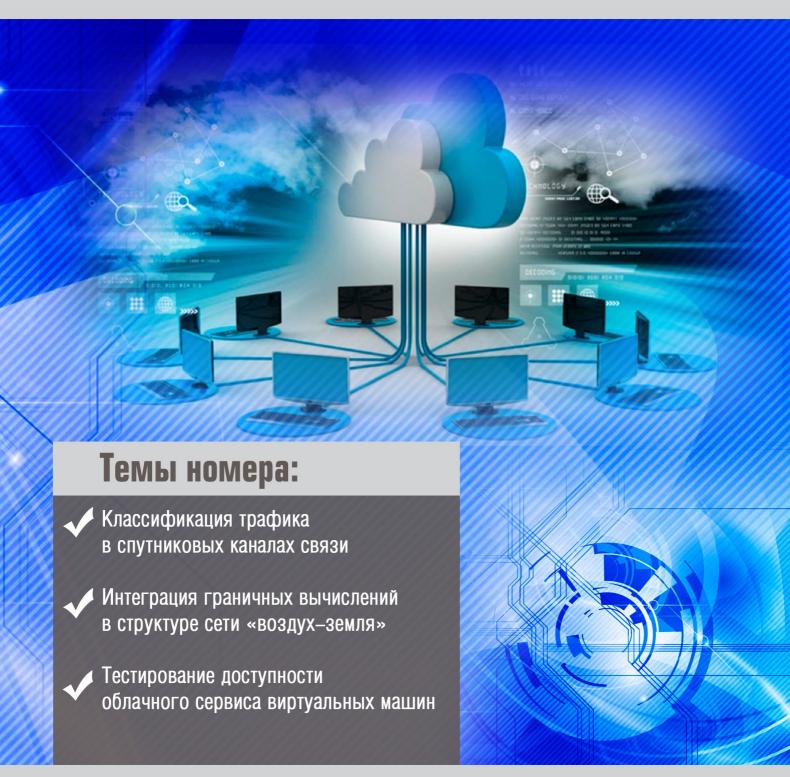


# ТРУДЫ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

ISSN: 1813-324X (print)



Vol. 9. lss. 3 2023 PROCEEDINGS OF TELECOMMUNICATION UNIVERSITIES

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

Научный журнал

## ТРУДЫ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СВЯЗИ

Том 9. № 3

## **Proceedings of Telecommunication Universities**

Vol. 9. Iss. 3

Санкт-Петербург

2023

## Описание журнала

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

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16. Радиолокация и радионавигация
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации
- 2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

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

## Редакционный совет

Киричек Р.В.	д.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникациі
--------------	--

Главный редактор им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

Владыко А.Г. к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

Зам. Главного редактора им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

**Буйневич М.В.** д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

Шеф-редактор им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

Зеневич А.О. д.т.н., проф., Белорусская государственная академия связи, г. Минск, Республика Беларусь

Розанов Н.Н. д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН, АО «Государственный оптический институт

им. С.И. Вавилова» (ГОИ), г. Санкт-Петербург, Россия

Дукельский К.В. д.т.н., доцент, АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ГОИ),

г. Санкт-Петербург, Россия

**Кучерявый Е.** PhD, Технологический университет Тампере, г. Тампере, Финляндия

Гошек И. PhD, Технологический университет Брно, г. Брно, Чешская республика

**Тиамийу О.А.** РhD, Университет Илорина, г. Илорин, Нигерия

Козин И.Д. д.ф.-м.н., проф., Алматинский университет энергетики и связи, г. Алма-Аты, Казахстан

Самуйлов К.Е. д.т.н., проф., Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва, Россия

Степанов С.Н. д.т.н., проф., Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ),

г. Москва, Россия

Росляков А.В. д.т.н., проф., Поволжский государственный университет телекоммуникаций

и информатики (ПГУТИ), г. Самара, Россия

Кучерявый А.Е. д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

Канаев А.К. д.т.н., проф., Петербургский университет путей сообщения имени Александра I (ПГУПС),

г. Санкт-Петербург, Россия

**Новиков С.Н.** д.т.н., проф., Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики

(СибГУТИ), г. Новосибирск, Россия

Дворников С.В. д.т.н., проф., Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного (ВАС),

г. Санкт-Петербург, Россия

**Коржик В.И.** д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

Ковалгин Ю.А. д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург, Россия

## Регистрационная информация

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

Подписной индекс в объединенном каталоге «ПРЕССА РОССИИ»: 59983

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

## Контактная информация

Учредитель Федеральное государственное бюджетное

и издатель: образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

(СПбГУТ)

Адрес 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки,

учредителя: д. 61, литера А

Адрес 193232, Санкт-Петербург, редакции: пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2 Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022,

+79643759970 **E-mail:** tuzs@sut.ru

Web: http://tuzs.sut.ru

BK: http://vk.com/spbtuzs

## Description

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

- **1.2.2.** Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs
- **2.2.6.** Optical and optoelectronic devices and complexes
- **2.2.13.** Radio engineering, including television systems and devices
- **2.2.14.** Antennas, microwave devices and its technologies
- 2.2.15. Systems, networks and telecommunication devices
- 2.2.16. Radiolocation and radio navigation
- **2.3.1.** System analysis, management and information processing
- 2.3.6. Methods and systems of information security, cybersecurity

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

_		-				
H1	ďΪ	to	ria	ıĸ	na	rd

R.V. Kirichek DSc, associate prof., The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University

Editor-in-chief of Telecommunications (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia

A.G. Vladyko PhD, associate prof., The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University

Deputy editor-in-chief of Telecommunications (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia

DSc, prof., The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications M.V. Buinevich

Chief editor (SPbSUT), Saint-Petersburg, Russia

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

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

Saint-Petersburg, Russia

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

Saint-Petersburg, Russia

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

I. Hošek PhD, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic

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

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

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

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

Moscow, Russia

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

Russia

University of Telecommunications»

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

Saint-Petersburg, Russia

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

Saint-Petersburg, Russia

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

Novosibirsk, Russia

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

Saint-Petersburg, Russia

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

Saint-Petersburg, Russia

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

Saint-Petersburg, Russia

## **Registration Information**

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

Subscription index for joint catalog «PRESSA ROSSII»: 59983

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

## **Contact Information**

Publisher: Federal State Budget-Financed Educational 193232, Saint Petersburg, Post address:

> Institution of Higher Education Prospekt Bolshevikov, 22/1

«The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State Phone: +7 (812) 326-31-63, local 2022,

+79643759970

(SPbSUT) E-mail: tuzs@sut.ru

Web: http://tuzs.sut.ru **Publisher** 191186, Saint Petersburg, Moika river embankment,

address:

## СОДЕРЖАНИЕ

## **CONTENTS**

## ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

## Григорьев Е.К., Сергеев А.М.

Оценка качества матричного маскирования цифровых звуковых данных 6

## Grigoriev E., Sergeev A.

Quality analysis of matrix masking of digital audio data

## До Ф.Х., Ле Ч.Д., Берёзкин А.А., Киричек Р.В.

Графовые нейронные сети для классификации трафика в спутниковых каналах связи: сравнительный анализ 14

## Do P.H.., Le T.D., Berezkin A., Kirichek R.

Graph neural networks for traffic classification in satellite communication channels: a comparative analysis

## Ламри М.А., Абилов А.В., Преснецов А.М.

Метод автоматического повторного запроса прикладного уровня для потоковой передачи данных по сети БПЛА 28

## Lamri M.A., Abilov A., Presnetsov A.

Application layer cooperative automatic repeat request method for data streaming over UAVs network

## Мутханна А.С.А.

Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности

42

## Muthanna A.S.A.

A model for integrating edge computing into an air-ground network structure and offloading traffic method for high and ultra-high densities internet of things networks

## Типикин А.А., Потапов Д.С.

Методика учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн ОНЧ-диапазона

60

## Tipikin A., Potapov D.

Methodology for accounting the influence of parameters of a spherical underlying surface with finite conductivity on VLF antennas characteristics

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

## Марченко А.Г., Щемелинин Д.А.

Разработка системы тестирования доступности сервиса развертывания виртуальных машин в облаке

68

## Marchenko A., Shchemelinin D.

Development of an accessibility testing system for the virtual machine deployment service in the cloud

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

## Горбачева Л.С.

Разработка модельной сети и анализ сетевого трафика управления роботом-манипулятором 75

## Gorbacheva L.

Development of a model network and an analysis of network traffic for controlling robot manipulators

## Редругина Н.М.

Метод вычисления временных характеристик обслуживания в сервисных платформах инфокоммуникационных транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов

**82** 

## Redrugina N.

A method for time characteristics calculating in the service platforms of infocommunication transactional services with parallel requests processing

## Степанец И.В.

Методика расчета пропускной способности радиорелейной линии миллиметрового диапазона с адаптивной модуляцией в условиях замираний 91

## Stepanets I.

Method of throughput calculation for microwave link with adaptive modulation under the fading conditions inherent for millimeter waves

Hybrid-NOMA для беспроводной системы связи

104

## Khan R.

Hybrid-NOMA for wireless communication system

## ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- 2.2.6 Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- 2.2.13 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14 Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16 Радиолокация и радионавигация

Научная статья УДК 004.056.53 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-6-13



## Оценка качества матричного маскирования цифровых звуковых данных

- **БЕВГЕНИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ ГРИГОРЬЕВ**, ev.grig95@gmail.com
- © Александр Михайлович Сергеев, aleks.asklab@gmail.com

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

Аннотация: Рассмотрена задача обеспечения конфиденциальности звуковой информации, передаваемой по каналу связи с пакетной передачей. Анализ предметной области показал, что для обеспечения конфиденциальности переговоров используются, в основном, криптографические методы. Однако, наряду с ними, начинают применяться матричные методы защитного кодирования, с реализацией на программируемых логических интегральных схемах или процессорах цифровой обработки сигналов. Данные методы, используя случайные матрицы, накладывают дополнительные инструментальные ошибки при декодировании. Целью исследования является оценка качества защитного кодирования – маскирования звуковых данных квазиортогональными структурированными матрицами. Предложенный в работе метод маскирования цифровой звуковой информации квазиортогональными матрицами отличается от известных предсказуемыми результатами и простотой реализацией. Предложен подход оценки результата маскирования, альтернативный классическому использованию метрик. Он основан на анализе спектральной составляющей сигнала. Показано, что маскирование квадратной матрицей Мерсенна – Уолша приводит цифровую звуковую информацию, представленную в виде матрицы, к виду, близкому по спектру к белому шуму. Это надежно защищает ее в коммуникационном канале от несанкционированного доступа. Полученные результаты показывают перспективность применения предлагаемого метода и предполагают исследование влияния выбора структур ортогональных матриц и их размеров на результаты маскирования.

**Ключевые слова**: матричное маскирование, цифровая звуковая информация, качество маскирования, белый шум, шумоподобный сигнал

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

**Ссылка для цитирования**: Григорьев Е.К., Сергеев А.М. Оценка качества матричного маскирования цифровых звуковых данных // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 6–13. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-6-13

## Quality Analysis of Matrix Masking of Digital Audio Data

- Evgeny Grigoriev, ev.grig95@gmail.com
- Aleksandr Sergeev, aleks.asklab@gmail.com

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 190000, Russian Federation

Abstract: This article considered the guarantee of confidentiality task of audio information transmitted over a packet communication channel. Domain analysis showed, that in most cases cryptographical method used for guarantee of confidentiality of audio information, however, along with them, matrix methods of protective coding used, with implementation on FPGA or DSP processors. These methods, using random matrices, impose additional instrumental errors during decoding. The purpose of the study: is to assess the quality of protective coding – masking of audio data by quasi-orthogonal structured matrices. The proposed method of masking digital audio information by quasi-orthogonal matrices differs from the known ones in predictable results and simplity of implementation. An alternative approach to the classical use of metrics is proposed for evaluating the result of masking. It is based on the analysis of the spectral component of the signal. It is shown that masking with a square Mersenne – Walsh matrix brings digital audio information, presented in the form of a matrix, to a form close in spectrum to white noise. This reliably protects it in the communication channel from unauthorized access. The obtained results showed that the proposed method is promising and suggests the study of the influence of the choice of orthogonal matrix structures and their sizes on the results of masking.

**Keywords:** matrix masking, digital sound information, masking quality, white noise, noise-like signal

**Funding:** The paper was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant agreement No. FSRF-2023-0003, "Fundamental principles of building of noise-immune systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring".

**For citation:** Grigoriev E., Sergeev A. Quality Analysis of Matrix Masking of Digital Audio Data. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3):6–13. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-6-13

## Введение

Сегодня человеческая речь и, в частности телефонные переговоры, остается одним из основных каналов информационного взаимодействия между людьми. Развитие и введение в эксплуатацию новых цифровых систем связи направлено на совершенствование именно этого способа коммуникации людей. При этом приходится решать широкий круг задач, связанных со сжатием сигналов, преобразованием форматов, выбором протоколов, хранением и обеспечением конфиденциальности переговоров.

В качестве стержневой в настоящей статье рассмотрим задачу обеспечения конфиденциальности информации, передаваемой по каналу связи. Известны решения, основанные на аналоговом и цифровом скремблировании, при которых изменяется звуковой сигнал с целью сокрытия информационной составляющей речевого сообщения [1]. Однако анализ большинства современных источников показывает, что для обеспечения конфиденциальности переговоров используются, в основном, криптографические методы [2-7]. И наряду с ними прослеживается тема использования матричных [8, 9] или гибридных [10–12] методов защитного кодирования, с реализацией на программируемых логических интегральных схемах [13] или процессорах цифровой обработки сигналов.

Целью данной работы является оценка качества защитного кодирования – маскирования звуковых данных квазиортогональной структурированной матрицей на основе проведенных компьютерных экспериментов.

## Матрицы в защитном кодировании цифровых звуковых данных

В работе [8] используются методы Compressed Sensing [14] и Тёплицевы матрицы, формируемые на основе сдвиговых регистров в качестве матрицы измерений. Это удобно, поскольку на приемную сторону необходимо передать лишь (m+n-1) элементов матрицы, где m – количество строк, n – количество столбцов. Однако итоговые результаты работы подобных методов зависят не только от используемой матрицы измерений, но и от выбора алгоритма оптимизации, а также разреживающей матрицы.

В работе [9] предлагается деление входного звукового файла на части и формирование из них квадратной матрицы размером  $n \times n$ . Полученная таким образом матрица умножается на секретный ключ – матрицу, формируемую из вещественных случайных чисел. Результат – преобразованное сообщение отправляется по каналу связи на приемную сторону, где обратное преобразование осуществляется умножением сообщения на матрицу, обратную матрице-ключу. Однако авторы не поясняют, каким образом матрица-ключ передается на приемную сторону, а также как при этом решаются потенциальные проблемы вычисления обратной матрицы, связанные, например, с плохой обусловленностью или погрешностями округления.

В работах [10–12] используются хаотические матрицы, при работе с которыми возникают проблемы интерпретации полученных результатов, а также сильная зависимость от начальных условий.

В работах [15–18] рассматривается применение матричных преобразований для маскирования –

преобразования для защиты изображений или кадров видеопоследовательностей от несанкционированного ознакомления. Результат матричного двустороннего умножения изображений на квазиортогональные матрицы интерпретируется как «шумоподобный» [15].

## Алгоритм матричного маскирования цифровых звуковых данных

Как известно, если длина ключа системы шифрования совпадает с длиной сообщения, методов восстановления шифрованного сообщения не существует. Наше предложение по защите звуковых цифровых данных основано на подходе, реализующем данное утверждение. Однако отличие реализации от известных способов с применением матриц [8–12] состоит в том, что:

- исходное сообщение формируется в виде матрицы размера  $n \times n$ , путем распределения блоков цифровых звуковых данных последовательно по строкам, но n не является произвольным, а кратно объему данных, передаваемых, например, в пакетах при передаче по IP-сетям;
- преобразование осуществляется только путем математического умножения матрицы сообщения на матрицу-ключ справа и результат представляет собой матрицу того же размера  $n \times n$ ;
- матрица-ключ является структурированной ортогональной и процесс маскирования/демаскирования «почти» симметричен восстановление выполняется умножением на транспонированную матрицу слева;
- возможно использование матрицы-ключа как размера  $n \times n$ , так любого меньшего размера, кратного n, что расширяет выбор и повышает гибкость реализации.

Извлечение полезной информации из элементов матрицы после преобразования невозможно. Их значения определяются не только матрицейключом, но и цифровыми отсчетами звукового сигнала в строке, поскольку каждый элемент представляет собой сумму парных произведений элементов строки сообщения и столбца матрицыключа [17].

Преобразование на передающей стороне осуществляется умножением матрицы исходного сообщения  $\mathbf{X}_n$  размера  $n \times n$  на матрицу-ключ  $\mathbf{M}_n$  того же размера в виде:

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{X}_n \; \mathbf{M}_n, \tag{1}$$

где  $\mathbf{Y}_n$  – передаваемый в канале защищенный аудиосигнал в цифровом виде.

Обратное преобразование на приемной стороне осуществляется по выражению:

$$\mathbf{X}_n = \mathbf{M}_{n}^{-1} \mathbf{Y}_n. \tag{2}$$

Использование для маскирования ортогональных матриц  $\mathbf{M}_n$ , для которых  $\mathbf{M}_{n}^{-1} = \mathbf{M}_{n}^{T}$ , упрощает обратное преобразование по (2). В качестве матрицы-ключа могут быть использованы матрицы Адамара, порядки которых кратны 4t, где t – натуральное число, а также матрицы Мерсенна, существующие на порядках (4t – 1). Как те, так и другие существуют в структурированных видах, в том числе по Уолшу [19].

Преобразования (1 и 2), составляющие полный их цикл вне коммуникационного канала, при использовании матриц Мерсенна могут вносить только инструментальную погрешность умножения целочисленных значений на вещественные коэффициенты матриц  $\mathbf{M}_n$  и  $\mathbf{M}_n^T$ , сводимую в современных вычислителях к нулю. Поэтому восстановленный на приемной стороне звуковой сигнал соответствует исходному. Использование матриц Адамара, элементы которых имеют значения 1 и –1, таких погрешностей в преобразования не вносит.

## Эксперименты по маскированию цифровых звуковых данных

Эксперименты по маскированию несжатых аудиофайлов формата .wav, взятыми из датасета «UrbanSound8K» [20], проводились с использованием матриц Мерсенна – Уолша. Частота дискретизации аудиофайлов составляет 48 КГц. Файлы, в которых количество отсчетов превышает количество элементов матрицы-ключа, были обрезаны для выравнивания их длин.

Файлы, с которыми проводились эксперименты, приведены в таблице 1.

**ТАБЛИЦА 1. Описание входных данных** *TABLE 1. Input Data Description* 

Файл из датасета [16]	Краткое описание содержимого
108362-2-0-23.wav	Разговор двух собеседников
7383-3-0-0.wav	Лай собаки
24074-1-0-2.wav	Звуковой сигнал автомобиля
26270-9-0-35.wav	Концерт на городской площади
40722-8-0-8.wav	Речь на фоне сирены
46669-4-0-37.wav	Высокочастотный писк
57320-0-0.wav	Пение птиц
59277-0-0-5.wav	Низкочастотный гул
196087-2-0-0.wav	Детский смех

Компьютерный эксперимент с оценкой параметров преобразований проводился по приведенному ниже алгоритму. В качестве матрицы-ключа использовалась квадратная двухуровневая матрица Мерсенна – Уолша размера  $511 \times 511$  со значениями элементов, равных 1 и -b, где b = 0.9188. Портрет указанной матрицы приведен на рисунке 1.

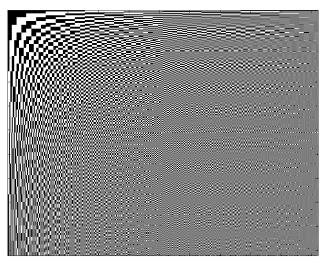


Рис. 1. Портрет матрицы-ключа

Fig. 1. Portrait of Key Matrix

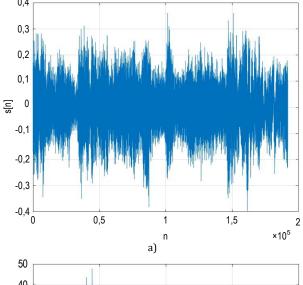
- 1) На вход программы преобразования подавался звуковой сигнал из файлов (см. таблицу 1).
  - 2) Вычислялся амплитудный спектр.
- 3) В случае необходимости количество отсчетов аудиофайла подгонялось под размер матрицыключа.
- 4) Входной звуковой файл преобразовывался в матрицу с распределением блоков данных последовательно по строкам матрица звукового сигнала формировалась размером 511 × 511.
- 5) Матрица с содержимым звукового файла умножалась на матрицу-ключ по формуле (1) с формированием маскированного звукового файла.
- 6) Для маскированного звукового файла вычислялись метрики: среднеквадратическая ошибка MSE (аббр. от англ. Mean Squared Error) и отношение сигнал-шум (SNR, аббр. от англ. Signal-to-Noise Ratio).
- 7) Вычислялась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) маскированного звукового сигнала.
- 8) С маскированным звуковым файлом производилось обратное преобразование по формуле (2) с формированием демаскированного звукового сигнала.
- 9) Для демаскированного звукового сигнала вычислялись метрики MSE, SNR, а также AЧХ.

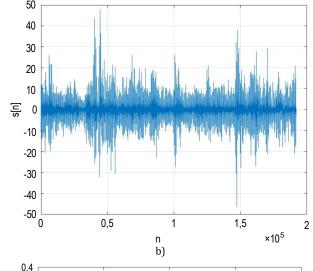
Эксперименты проводились с использованием специального программного обеспечения, реализованного на языке MATLAB [21, 22].

В качестве примера рассмотрим результаты маскирования и демаскирования звукового файла 108362-2-0-23.wav. На рисунке 2 приведены графики отсчетов исходного входного звукового сигнала, маскированного по формуле (1) и демаскированного по формуле (2).

Из рисунка 2 видно следующее:

- во-первых, график исходного и демаскированного сигналов совпадают, подтверждая симметричность преобразования;
- во-вторых, маскирующее преобразование усиливает амплитуду входного сигнала.





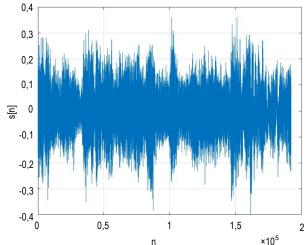


Рис. 2. Графики отсчетов входного (а), маскированного (b) и демаскированного (c) сигналов

Fig. 2. Samples of Input (a), Masked (b) and Demasked (c) Signals

В таблице 2 приведены классические метрики звуковых сигналов: MSE и SNR. Отрицательные значения SNR для маскированных сигналов говорят о том, что их амплитуда значительно выше амплитуды исходных сигналов. Для демаскированных сигналов метрики MSE и SNR близки к машинному нулю.

ТАБЛИЦА 2. Объективные метрики качества

TABLE 2. Objective Quality Merics

	Сигнал				
Файл из датасета [16]	Маскированный		Демаскированный		
	MSE	SNR, дБ	MSE	SNR, дБ	
108362-2-0-23.wav	2,0100		1,2415e-29	9,6433e-16	
7383-3-0-0.wav	2,2712		1,1413e-29	9,6433e-15	
24074-1-0-2.wav	6,3564		2,9602e-29	-1,4465e-15	
26270-9-0-35.wav	23,6375		2,2560e-28	9,6433e-16	
40722-8-0-8.wav	4,7825	-26,7326	3,0260e-29	3,8573e-15	
46669-4-0-37.wav	1,1140		2,7322e-30	-3,3751e-15	
57320-0-0-0.wav	0,8823		5,4861e-30	-2,8930e-15	
59277-0-0-5.wav	13,4536		1,2646e-28	9,6433e-16	
196087-2-0-0.wav	1,2740		6,4893e-30	-8,1968e-15	

Однако, классические метрики MSE и SNR не определяют качество маскирования входного сигнала, поскольку на слух из файлов с самым низким и самым высоким значениями MSE (57320-0-0-0.wav и 26270-9-0-35.wav, соответственно) невозможно определить звук исходного сигнала.

Анализ предметной области показывает, что метрик вычисления качества искажения (маскирования) звука не существует. Поэтому в рамках данной работы нами предложен альтернативный подход к определению качества маскирования звукового сигнала. Он основывается на оценке близости АЧХ звукового сигнала к АЧХ белого шума. Поскольку субъективно из белого шума невозможно что-либо услышать, а объективно – затруднительно извлечь какую-либо информацию.

В качестве примера приведены АЧХ входного звукового сигнала из файла 108362-2-0-23.wav, а также маскированного и демаскированного сигналов (рисунок 3).

Анализ приведенных на рисунке 3 графиков показывает, что:

- АЧХ маскированного сигнала достаточно равномерно распределена на всем диапазоне частот;
- процедура маскирования подавила все спектральные компоненты входного сигнала, которые были сосредоточены в диапазоне до 5 КГц.

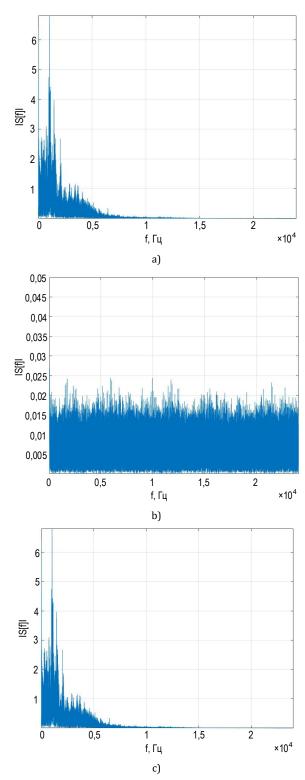


Рис. 3. Графики АЧХ входного (а), маскированного (b) и демаскированного (c) сигналов

Fig 3. Amplitude Spectrum of Input (a), Masked (b) and Demasked (c) Signals

На рисунке 4 для сравнения приведены АЧХ маскированного сигнала и белого гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением (СКО), равным СКО маскированного звукового сигнала.

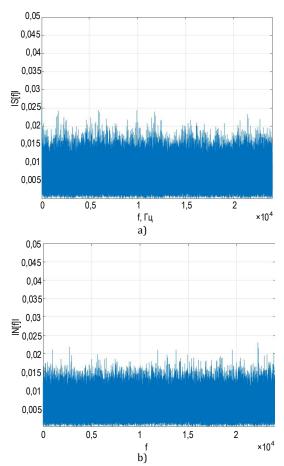


Рис. 4. Сравнение АЧХ маскированного сигнала (а) и белого гауссовского шума (b)

Fig. 4. Amplitude Spectrum of Masked Signal (a) and White Gaussian Noise (b) Compare

Спектр маскированного звукового сигнала близок к спектру белого гауссовского шума, СКО между ними составляет 2,1379\*10<sup>-05</sup>.

Эксперименты по матричному маскированию других звуковых файлов из таблицы 1 показали аналогичные результаты.

В случае маскирования звуковых файлов можно также воспользоваться вариантом двухстороннего матричного маскирования [15, 17], при котором на передающей стороне осуществляется умножение матрицы исходного сообщения  $\mathbf{X}_n$  размера  $n \times n$  на матрицу-ключ того же размера  $\mathbf{M}_n$  слева и транспонированную матрицу ключ  $\mathbf{M}_n$  справа:

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{X}_n \, \mathbf{M}_n \, \mathbf{M}_n^T, \tag{3}$$

Обратное преобразование на приемной стороне осуществляется по выражению:

$$X_n = M_n^{-1}Y_n (M_n^T)^{-1}. (4)$$

В данном варианте осуществляется наиболее полное перемешивание фрагментов матрицы исходного сообщения, что соответствующим образом отображается на объективных метриках, которые для двухстороннего маскирования звуковых файлов приведены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Объективные метрики качества для двухстороннего маскирования звуковых файлов

TABLE 3. Objective Quality Merics for Two Side Audiofiles Masking

-	Сигнал				
Файл из датасета	Маскированный		Демаскированный		
[16]	MSE	SNR, дБ	MSE	SNR, дБ	
108362-2-0-23.wav	949,1217		1,6724e-29	5,7860e-15	
7383-3-0-0.wav	1,0678e+03		1,6213e-29	1,0608e-14	
24074-1-0-2.wav	2,9936e+03		4,1723e-29	-3,3751e-15	
26270-9-0-35.wav	1,1092e+04		2,9338e-28	-3,8573e-15	
40722-8-0-8.wav	2,2713e+03	-53,4653	4,0415e-29	1,1572e-14	
46669-4-0-37.wav	523,4474		5,2276e-30	-4,8216e-15	
57320-0-0-0.wav	418,9160		7,4647e-30	-2,8930e-15	
59277-0-0-5.wav	6,3379e+03		1,6126e-28	1,1572e-14	
196087-2-0-0.wav	599,0425		9,0774e-30	-8,1968e-15	

Однако в данном случае пропорционально увеличиваются и вычислительные затраты алгоритма, в связи с этим для ускорения вычислительных процессов целесообразно использовать матрицы порядков, равных матрице, сформированной из исходного сообщения. Это становится возможным благодаря расширению класса ортогональных матриц четных порядков, используемых для маскирования цифровой информации, квазиортогональными матрицами Мерсенна, Эйлера, Ферма и т. д. [15, 16].

## Заключение

Для защитного преобразования цифровой звуковой информации – маскирования – применение матричного умножения с использованием квазиортогональных матриц отличается от известных подходов с использованием случайных матриц предсказуемыми результатами и простотой реализации.

Маскирование квадратной матрицей Мерсенна – Уолша размера n приводит цифровую звуковую информацию к виду, близкому по спектру к белому шуму, что надежно защищает ее в коммуникационном канале от несанкционированного доступа. Размер матриц n следует для IP- и других систем с пакетной передачей данных выбирать кратным длине пакета.

Полученные результаты показывают перспективность применения предлагаемого метода и предполагают исследование влияния выбора структур ортогональных матриц и их размеров на результаты маскирования.

## Список источников

- 1. Владимиров С.С., Когновицкий О.С. Обработка широкополосных последовательностей Гордона Миллса Велча с использованием двойственного базиса на основе двух регистров // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 2. С. 49–58. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-49-58
- 2. Advanced encryption standard (AES) // FIPS 197. URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.197.pdf (дата обращения 22.03.2023)
- 3. Rahman Md. M., Saha T.K., Bhuiyan Md. A. Implementation of RSA Algorithm for Speech Data Encryption and Decryption // International Journal of Computer Science and Network Security. 2012. Vol. 12. Iss. 3. PP 74–82.
- 4. Gnanajeyaraman R., Prasadh K. Audio encryption using higher dimensional chaotic map // International Journal of Recent Trends in Engineering, 2009. Vol. 1. Iss. 2. PP. 103–107.
- 5. Hassan N.A., Al-Mukhtar F.S., Ali E.H. Encrypt Audio File using Speech Audio File As a key // Proceedings of the 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University (ISCAU-2020, Thi-Qar, Iraq, 15–16 July 2020). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 928 032066. PP. 79–84. DOI:10.1088/1757-899X/928/3/032066
- 6. Farsana F.J., Devi V.R., Gopakumar K. An audio encryption scheme based on Fast Walsh Hadamard Transform and mixed chaotic keystreams // Applied Computing and Informatics. 2020. Vol. 16. Iss. 2. DOI:10.1016/j.aci.2019.10.001
- 7. Adhikari S., Karforma S. A novel audio encryption method using Henon–Tent chaotic pseudo random number sequence // International Journal of Information Technology. 2021. Vol. 13. PP. 1463–1471. DOI:10.1007/s41870-021-00714-x
- 8. Cai C., Bai E., Jiang X.Q., Wu Y. Simultaneous Audio Encryption and Compression Using Parallel Compressive Sensing and Modified Toeplitz Measurement Matrix // Electronics. 2021. Vol. 10. Iss. 23. P. 2902. DOI:10.3390/electronics10232902
- 9. Al-laham M.M. A Method for Encrypting and Decryptingwave Files // International Journal of Network Security & Its Applications. 2018. Vol. 10. Iss. 4. PP. 11–21.
- 10. Abdallah H.A., Meshoul S.A. Multilayered Audio Signal Encryption Approach for Secure Voice Communication // Electronics. 2023. Vol. 12. Iss. 1. P. 2. DOI:10.3390/electronics12010002
- 11. Hameed Y.M., Ali N.H.M. An efficient audio encryption based on chaotic logistic map with 3D matrix // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2018. Vol. 96. Iss. 16. PP. 5142–5152.
- 12. Luis M., Daniel L., Isabel A., Deicy A. A new multimedia cryptosystem using chaos, quaternion theory and modular arithmetic // Multimedia Tools and Applications. 2023. DOI:10.1007/s11042-023-14475-1
- 13. Ge X., Sun G., Zheng B., Nan R. FPGA-Based Voice Encryption Equipment under the Analog Voice Communication Channel // Information. 2021. Vol. 12. Iss. 11. PP. 456. DOI:10.3390/info12110456
- 14. Donoho D.L. Compressed sensing // IEEE Transactions on Information Theory. 2006. Vol. 52. Iss. 4. PP. 1289-1306. DOI:10.1109/TIT.2006.871582
- 15. Востриков А.А., Сергеев М.Б., Литвинов М.Ю. Маскирование цифровой визуальной информации: термин и основные определения // Информационно-управляющие системы. 2015. №5(78). С. 116–123. DOI:10.15217/issn1684-8853.2015.5.116
- 16. Vostrikov A., Sergeev M. Expansion of the Quasi-Orthogonal Basis to Mask Images // Proceedings of the 8th International KES Conference on Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services (KES-IIMSS-15, Sorrento, Italy, 17–19 June 2015). Smart Innovation, Systems and Technologies. Vol. 40. Cham: Springer, 2015. PP. 161–168. DOI:10.1007/978-3-319-19830-9 15
- 17. Sergeev A. M., Grigoriev E. K. Quasi-orthogonal Structured Mersenne Matrices for Masking Digital Video and Audio Data in Distributed Systems // Proceedings of the International Conference on Information Processes and Systems Development and Quality Assurance (IPSQDA-2023). 2023. PP. 57–59.
- 18. Сергеев А.М. Связь симметрии и антисимметрии квазиортогональных циклических матриц с простыми числами // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 4. С. 14–19. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-14-19
- 19. Балонин Н.А., Балонин Ю.Н., Востриков А.А., Сергеев М.Б. Вычисление матриц Мерсенна Уолша // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 11. С. 51–55.
  - 20. UrbanSound8K dataset. URL: https://urbansounddataset.weebly.com/urbansound8k.html (дата обращения 04.04.2023)
- 21. Григорьев Е.К., Сергеев М.Б., Сергеев А.М. Программа маскирования и демаскирования звуковой цифровой информации. Модуль маскирования. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023614623 от 03.03.2023. Опубл. 03.03.2023.
- 22. Григорьев Е.К., Сергеев М.Б., Сергеев А.М. Программа маскирования и демаскирования звуковой цифровой информации. Модуль демаскирования. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2023614622 от 03.03.2023. Опубл. 03.03.2023.

## References

- 1. Vladimirov S., Kognovitsky O. Dual Basis Based Processing of Wideband Gordon Mills Welch Sequences Based on Two Linear Registers. *Proceed. of Telecom. Universities*. 2019;5(2):49–58. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-2-49-58
- 2. FIPS 197. Advanced encryption standard (AES). URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/FIPS/NIST.FIPS.197.pdf [Accessed 22d March 2023]
- 3. Rahman M., Saha K., Bhuiyan A. Implementation of RSA Algorithm for Speech Data Encryption and Decryption. *International Journal of Computer Science and Network Security*. 2012;(12)3:74–82.
- 4. Gnanajeyaraman R., Prasadh K. Audio encryption using higher dimensional chaotic map. *International Journal of Recent Trends in Engineering*. 2009;1(2):103–107.
- 5. Hassan N.A., Al-Mukhtar F.S., Ali E.H. Encrypt Audio File using Speech Audio File As a key. *Proceedings of the 2nd International Scientific Conference of Al-Ayen University, ISCAU-2020, 15–16 July 2020, Thi-Qar, Iraq. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;928 032066:79–84. DOI:10.1088/1757-899X/928/3/032066

- 6. Farsana J., Devi R., Gopakumar K. An audio encryption scheme based on Fast Walsh Hadamard Transform and mixed chaotic keystreams. *Applied Computing and Informatics*. 2020;16(2). DOI:10.1016/j.aci.2019.10.001
- 7. Adhikari S., Karforma S. A novel audio encryption method using Henon–Tent chaotic pseudo random number sequence. *International Journal of Information Technology*. 2021;13:1463–1471. DOI:10.1007/s41870-021-00714-x
- 8. Cai C., Bai E., Jiang X.Q., Wu Y. Simultaneous Audio Encryption and Compression Using Parallel Compressive Sensing and Modified Toeplitz Measurement Matrix. *Electronics*. 2021;10(23):2902. DOI:10.3390/electronics10232902
- 9. Al-laham M.M. A Method for Encrypting and Decryptingwave Files. *International Journal of Network Security & Its Applications*. 2018;10(4):11–21.
- 10. Abdallah H.A., Meshoul S.A. A Multilayered Audio Signal Encryption Approach for Secure Voice Communication. *Electronics*. 2023;12(1):2. DOI:10.3390/electronics12010002
- 11. Hameed Y.M., Ali N.H.M. An efficient audio encryption based on chaotic logistic map with 3D matrix. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2018;96(16):5142–5152.
- 12. Luis M., Daniel L., Isabel A., Deicy A. A new multimedia cryptosystem using chaos, quaternion theory and modular arithmetic. *Multimedia Tools and Applications*. 2023. DOI:10.1007/s11042-023-14475-1
- 13. Ge X., Sun G., Zheng B., Nan R. FPGA-Based Voice Encryption Equipment under the Analog Voice Communication Channel. *Information*. 2021;12(11):456. DOI:10.3390/info12110456
- 14. Donoho D.L. Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006;52(4):1289–1306. DOI:10.1109/TIT.2006.871582
- 15. Vostrikov A.A., Sergeev M.B., Litvinov M.Yu. Masking of Digital Visual Data: the Term and Basic Definitions. *Information and Control Systems*. 2015;5(78):116–123. (in Russ.) DOI:10.15217/issn1684-8853.2015.5.116.
- 16. Vostrikov A., Sergeev M. Expansion of the Quasi-Orthogonal Basis to Mask Images. *Proceedings of the 8th International KES Conference on Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services, KES-IIMSS-15, 17–19 June 2015, Sorrento, Italy. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol.40.* Cham: Springer; 2015. p.161–168. DOI:10.1007/978-3-319-19830-9\_15
- 17. Sergeev A. M., Grigoriev E. K. Quasi-orthogonal Structured Mersenne Matrices for Masking Digital Video and Audio Data in Distributed Systems. *Proceedings of the International Conference on Information Processes and Systems Development and Quality Assurance, IPSQDA-2023.* 2023. p.57–59.
- 18. Sergeev A. Interrelation of Symmetry and Antisymmetry of Quasi-Orthogonal Cyclic Matrices with Prime Numbers. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(4):14–19. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-4-14-19
- 19. Balonin A., Balonin U., Vostrikov A., Sergeev M. Computation of Mersenne Walsh Matrices. *Herald of computer and information technologies*. 2014;11:51–55. (in Russ.)
  - 20. UrbanSound8K dataset. URL: https://urbansounddataset.weebly.com/urbansound8k.html [Accessed 04th April 2023]
- 21. Grigoriev E.K., Sergeev M.B., Sergeev A.M. *The program for masking and demasking sound digital information. Masking module.* Patent RF, no. 2023614623, 03.03.2023. (in Russ.)
- 22. Grigoriev E.K. Sergeev M.B. Sergeev A.M. *The program for masking and demasking sound digital information. Demasking module.* Patent RF, no. 2023614622, 03.03.2023. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 24.04.2023; принята к публикации 20.05.2023.

The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 24.04.2023; accepted for publication 20.05.2023.

## Информация об авторах:

ГРИГОРЬЕВ Евгений Константинович ассистент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

https://orcid.org/0000-0001-5981-4074

СЕРГЕЕВ Александр Михайлович кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

https://orcid.org/0000-0002-4788-9869

Научная статья УДК 004.896 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-14-27



# Graph Neural Networks for Traffic Classification in Satellite Communication Channels: A Comparative Analysis

- Phuc Hao Do¹ ⋈, haodp@dau.edu.vn
- Tran Duc Le2, letranduc@dut.udn.vn
- Aleksandr Berezkin¹, berezkin.aa@sut.ru
- Ruslan Kirichek¹, kirichek@sut.ru

<sup>1</sup>The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>2</sup>University of Science and Technology – The University of Danang, Da Nang, Viet Nam

**Abstract:** This paper presents a comprehensive comparison of graph neural networks, specifically Graph Convolutional Networks (GCN) and Graph Attention Networks (GAT), for traffic classification in satellite communication channels. The performance of these GNN-based methods is benchmarked against traditional Multi-Layer Perceptron (MLP) algorithms. The results indicate that GNNs demonstrate superior accuracy and efficiency compared to MLPs, emphasizing their potential for application in satellite communication systems. Moreover, the study investigates the impact of various factors on GNN algorithm performance, providing insights into the most effective strategies for implementing GNNs in traffic classification tasks. This research offers valuable knowledge on the benefits and prospective use cases of GNNs within satellite communication systems.

Keywords: Satellite Communication, Graph Neural Network, Traffic classification, GCN, GAT

**Funding:** The scientific article was prepared in the framework of applied scientific research of St. Petersburg State University of Telecommunications, registration number 1022040500653-0 dated February 16, 2023 in USIS R&D.

**For citation:** Do P.H., Le T.D., Berezkin A., Kirichek R. Graph Neural Networks for Traffic Classification in Satellite Communication Channels: A Comparative Analysis. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3):14–27. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-14-27

# Графовые нейронные сети для классификации трафика в каналах спутниковой связи: сравнительный анализ

- **© Фук Хао До¹**⊠, haodp@dau.edu.vn
- <sup>©</sup> Чан Дык Ле<sup>2</sup>, letranduc@dut.udn.vn
- 👨 Александр Александрович Берёзкин<sup>1</sup>, berezkin.aa@sut.ru
- <sup>©</sup> Руслан Валентинович Киричек¹, kirichek@sut.ru

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

<sup>2</sup>Университет науки и технологий – Университет Дананга, Дананг, Вьетнам

**Аннотация:** В данной статье представлено всестороннее сравнение графовых нейронных сетей (GNN), в частности – графовых сверточных сетей (GCN) и сетей внимания к графам (GAT), для классификации

трафика в спутниковых коммуникационных каналах. Производительность этих методов, основанных на GNN, сравнивается с традиционными алгоритмами многослойного персептрона (MLP). Результаты показывают, что GNN обладают превосходной точностью и эффективностью по сравнению с MLP, что подчеркивает их потенциал для применения в системах спутниковой связи. Кроме того, в рамках исследования изучается влияние различных факторов на производительность алгоритма GNN, предоставляя информацию о наиболее эффективных стратегиях реализации GNN в задачах классификации трафика. Это исследование предлагает ценные знания о преимуществах и потенциальных применениях GNN в системах спутниковой связи.

**Ключевые слова:** спутниковая связь, графовая нейронная сеть, классификация трафика, GCN, GAT

**Источник финансирования:** Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1022040500653-0 от 16.02.2023 в ЕГИСУ НИОКТР.

**Ссылка для цитирования**: До Ф.Х., Ле Ч.Д., Берёзкин А.А., Киричек Р.В. Графовые нейронные сети для классификации трафика в каналах спутниковой связи: сравнительный анализ // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 14–27. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-14-27

## 1. Introduction

In the realm of modern communication, there exists an intricate web of infrastructure known as a satellite communication system [1]. This system facilitates the transfer of information by means of communication satellites, intertwining various components on the ground, such as antennas, ground stations, and control centers, with the celestial entities themselves.

The demand for high-speed communication and data services has led to the rapid expansion of satellite communication [2] systems, which are particularly useful for providing global connectivity in remote areas where terrestrial infrastructure is limited. Despite their unique advantages, satellite communication channels present distinct challenges, such as global coverage, higher latency, higher cost, atmospheric interference, and limited bandwidth and spectrum allocation. Efficient management of network resources [3] is crucial for satellite communication channels, and expanding capacity may be more feasible in terrestrial networks through the addition of more infrastructure or advanced technologies.

The utilization of satellite communication channels presents notable benefits when compared to alternative channels, particularly in terms of global coverage encompassing even the most remote regions. These channels possess expansive bandwidth capacities that facilitate the seamless transmission of real-time video streams and large-scale data transfers. Moreover, through the implementation of point-to-multipoint communication [4], the dissemination of information to numerous recipients becomes possible. The deployment of satellites is characterized by its expeditiousness and scalability, thereby guaranteeing steadfast and redundant connectivity that operates autonomously from terrestrial networks [5]. Notably, satellites play a pivotal role in enabling long-range and mobile communication [6], while their varied orbital paths confer a remarkable degree of geographical adaptability [7]. It is worth highlighting that satellite communication finds application in various domains, including but not limited to telecommunications, broadcasting, remote sensing, military communications, and disaster response.

In the conventional realm, the process of traffic classification within satellite networks finds its execution primarily within the terrestrial segment, more specifically, at either the Network Operations Center (NOC) or the teleport. Employing techniques such as deep packet inspection, protocol analysis, port-based classification, and quality of service parameters, serves as the customary approach in this regard. The overarching objective of traffic classification is to facilitate the judicious allocation and exploitation of the satellite network's capacity and resources, thereby guaranteeing optimal performance across a diverse array of traffic categories.

One of the critical aspects of managing satellite communication channels is the efficient classification of network traffic, which directly impacts the overall performance and quality of service (QoS) [8]. Consequently, there is a growing interest in the development of advanced traffic classification methods for satellite communication channels.

In addition, an alternative proposition arises, entailing the exploitation of graph neural networks (GNNs) to undertake traffic classification within satellite networks. GNNs, being a distinctive form of deep learning model, demonstrate an inherent capacity to capture intricate relationships and intricate patterns intrinsic to graph-structured data. Through the conceptualization of network traffic as a graph, wherein nodes symbolize data flows and edges signify relationships, the deployment of GNNs holds the potential to enhance the precision and efficacy of traffic classification endeavors.

Graph Neural Networks (GNNs) are a powerful tool for complex problem solving in domains such as computer vision, natural language processing, and network analysis [9, 10]. They can effectively classify network

traffic, detect anomalies, and handle large-scale datasets in satellite communication channels [11]. GNNs' adaptability to dynamic changes in network traffic patterns and transfer learning capabilities make them valuable for optimizing bandwidth usage, improving QoS, and enhancing the overall user experience. Furthermore, pre-training on large datasets and fine-tuning on specialized ones can lead to improved classification accuracy and efficiency.

In this paper, we present a comprehensive analysis of the application of GNNs, specifically Graph Convolutional Networks (GCN) [12] and Graph Attention Networks (GAT) [13], for traffic classification in satellite communication channels. Our study aims to methodically and empirically examine the performance of these GNN models, comparing them with traditional Multi-Layer Perceptron (MLP) algorithms. By evaluating the accuracy and efficiency of these methods, we seek to explore the potential advantages of GNNs in satellite communication systems.

Overall, this paper contributes to the growing body of knowledge on the benefits and potential applications of GNNs in satellite communication systems, particularly in the context of traffic classification. Our findings will not only advance the understanding of GNN-based methods but also pave the way for the development of more efficient and robust traffic classification techniques in satellite communication channels.

## 2. Literature Review

Satellite resource optimization and management have been extensively researched due to the growth of internet communications. Wenjuan [14] proposed a novel traffic classification routing (TCR) algorithm for Low Earth Orbit Satellite (LEO) satellite networks, which uses traffic classification link-cost metrics (TCM) to optimize network resource utilization for multimedia applications. TCR algorithm introduces a blocking-probability filter mechanism and a server reservation priority queue (SRPQ) mechanism to improve performance and balance traffic load distribution. TCR algorithm outperformed single-service and multiservice routing algorithms in different traffic scenarios, making it a suitable choice for future multimedia satellite networks.

Pacheco et al. [15] developed an ML-based framework for internet traffic classification in satellite communications, with the goal of enhancing QoS management. The hierarchical classification system distinguishes between encryption and flow patterns, surpassing the performance of Deep Packet Inspection (DPI). The proposed system profiles internet communications and sends the data to a Policy-Based Network (PBN) for QoS management.

In 2020, Pacheco et al. [16] developed a framework for internet traffic classification in satellite communications using ML and DL techniques to improve QoS [17]. They proposed a hierarchical classification system that

performs well on encrypted, unencrypted, and tunneled traffic. The solution was tested on a cloud-emulated platform and integrates an ILM for each classifier. Results showed improved performance over ntop DPI (nDPI). Future work should consider different types of tunneled protocols and adapt to evolving communication technologies.

Pang et al. [18] introduced a chained graph neural network (CGNN) for traffic classification to overcome challenges posed by Network Address Translation (NAT), port dynamics, and encrypted traffic [19]. Their model uses a chained graph to capture structural and causal relationships in the traffic stream and builds a graph classifier over extracted features. Results show that CGNN improves application and malicious traffic prediction accuracy, outperforming existing neural network-based traffic classifiers on real-world datasets while maintaining robust recall and precision metrics. Huoh et al. [20] proposed a GNN model for encrypted network traffic classification that captures packet relations, raw bytes, and metadata, outperforming traditional CNN and RNN models.

Pang et al. [21] proposed a GNN model for network traffic classification that captures interaction features of packet flows. They designed a graph structure to embed packet contents and sequence relationships into a unified graph and introduced a graph neural network framework for graph classification. The model improves prediction accuracy by up to 37 % for malicious traffic classification and outperforms state-of-the-art deep learning methods. Additionally, it achieves high precision, recall, F1 score, and Matthews Correlation Coefficient, indicating strong correlation between predicted and true values for various types of malicious traffic. Evaluations on real-world traffic data support the efficacy of the proposed model.

This review emphasizes the significance of traffic classification in satellite communications and discusses various techniques proposed to enhance QoS management and optimize network resources. These techniques include TCR algorithm, ML-based frameworks, and GNN models, which outperform traditional methods in terms of accuracy, precision, recall, and F1 Score. These approaches also provide balanced traffic distribution in satellite networks, indicating their potential for improving traffic classification [22]. Future research should address the limitations of these methods and adapt to the changing communication technologies.

## 3. Method

This investigation utilizes Fig. 1 to demonstrate the methodology for evaluating GNN models in internet traffic classification. The methodology consists of data collection, preprocessing, graph creation, and classification. The acquired internet traffic dataset is preprocessed using standardization and min-max normalization techniques to ensure optimal normalization.

Standardization rescales data to a mean of 0 and a standard deviation of 1, while min-max normalization scales feature values within a range of 0–1 to allow for comparisons among features with varying value ranges. The quality of the data processing [23] is essential for evaluating the effectiveness of multiple GNN models in classifying internet traffic.

After preprocessing the internet traffic data, the next step is to create a graph where each data point is a node and the edges represent relationships between them. This provides insight into the patterns and structures within the data. GNN models are then used to classify the network traffic data based on the information gathered from the graph.

Satellite networks serve as conduits for a diverse range of data, catering to an array of applications and services. The following categories encompass the prevalent types of data transmitted over satellite networks:

- + Voice and Telephony [24]: An essential function of satellite networks lies in facilitating voice communication, particularly in remote regions where terrestrial infrastructure may be limited or absent.
- + Internet Data: Satellite networks assume a pivotal role in providing internet connectivity to areas where terrestrial networks are not readily accessible. By means of satellite links, a broad spectrum of internet data, encompassing web pages, emails, file downloads, and streaming media, can be effectively transmitted. Consequently, individuals, businesses, and organizations gain access to a vast realm of online resources and services, regardless of their geographical location. Notably, the network traffic data set published in reference [25] represents a notable example within this domain.
- + Video and Television Broadcasting [26]: The transmission of television signals constitutes a substantial aspect of satellite network functionality, affording broadcasters the means to disseminate television channels to a wide-ranging audience.
- + Data Networks and Virtual Private Networks (VPNs) [27]: Satellite networks offer robust data connectivity for a multitude of applications, including corporate networks, government networks, and remote site connectivity. Through their utilization, wide-area networks (WANs) and virtual private networks (VPNs) can be established, facilitating secure and private data communication between disparate locations.
- + Earth Observation Data: Satellites dedicated to Earth observation contribute significantly to the transmission of data pertaining to the Earth's surface, atmosphere, and environmental conditions. This encompasses a vast array of information, including high-resolution images, weather data, climate data, and other pertinent environmental parameters.

- + Global Navigation Satellite Systems (GNSS) Data: Noteworthy satellite networks, such as the Global Positioning System (GPS), Galileo, and GLONASS, are responsible for transmitting navigation data to user devices. This invaluable data serves as the foundation for precise positioning, navigation, and timing information, thereby enabling a plethora of applications, including navigation systems, geolocation services, and asset or vehicle tracking.
- + Sensor Data and Telemetry: Satellites, equipped with sensors or scientific instruments, fulfill a critical role in the collection and transmission of diverse data types for research purposes. This encompasses a wide range of scientific disciplines, including space exploration, astronomy, climate studies, oceanography, and related domains, thereby contributing to advancements in scientific knowledge.
- + Command and Control Data [28]: In order to effectively manage and operate satellites, satellite networks necessitate the transmission of command and control data.

In this study, we evaluated the classification performance of various GNN models on preprocessed network traffic data [25], which includes five categories: Bulk, Video, Web, Interactive, and Idle. The dataset was provided as pcap files, with features extracted from the raw data. Details of the data are shown in Table 1.

The network traffic dataset used in this study contains pcap files with features extracted from the raw information, categorized into Bulk, Video, Web, Interactive, and Idle. Interactive data refers to real-time applications such as Google Docs or SSH sessions, while Bulk data transfer pertains to applications transferring large data volumes and Web browsing includes traffic generated from browsing web pages. Video playback refers to traffic from streaming applications, and Idle behavior encompasses background traffic from a user's computer.

**TABLE 1. Data Set Composition** 

Category	Num of traces	Duration (s)	Size (MB)
Bulk	19	3599	8704
Video	23	4496	1405
Web	23	4203	148
Interactive	42	8934	30.5
Idle	52	6341	0.69

This research employs label encoding, min-max normalization, and standardization as preprocessing techniques to mitigate the adverse effects of columns with dissimilar value ranges on the performance of regression and classification models. Proper scaling is essential to enhance model efficiency, and established techniques such as min-max normalization and z-score standardization are utilized for this purpose [29].

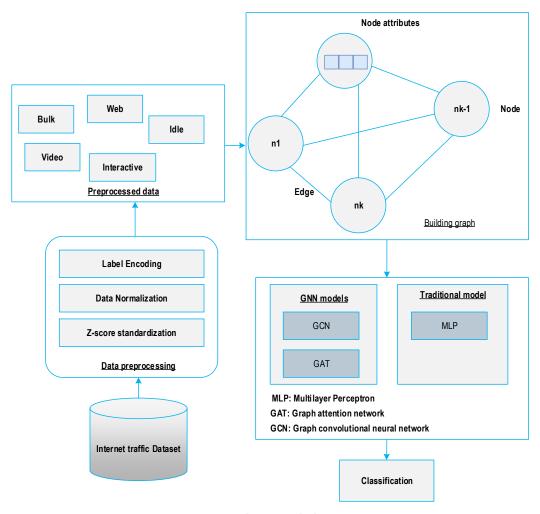


Fig. 1. The Research Flow

Min-max normalization transforms feature values of a dataset into the [0, 1] range using a specific formula:

$$X_{\text{normalized}} = \frac{(X - X_{\text{min\_value}})}{(X_{\text{max\_value}} - X_{\text{min\_value}})}.$$
 (1)

The min-max normalization formula transforms feature values to fit within the [0, 1] range, with  $X_{\text{min\_value}}$  and  $X_{\text{max\_value}}$  representing the bounds. On the other hand, z-score standardization resizes features to display a normal distribution with a mean of  $\mu=0$  and standard deviation of  $\sigma=1$ , represented by the following equation:

$$X_{\text{normalized}} = \frac{(X - \mu)}{\sigma}.$$
 (2)

After data processing [30], we converted the data into a graph format. We constructed a separate graph for each traffic category, where every packet was treated as a node with a vector of its data. The nodes were connected by sequentially linking adjacent packets as an experiment. (Refer to Fig. 2 for more details.)

This study explores the effectiveness of widely used GNN [31] models, GCN and GAT, for network traffic classification. MLP is included as a conventional model

for comparison, with computational time evaluated for all models. GCN and GAT have distinct graph neural network architectures, with unique strengths and weaknesses, and a comparative analysis will provide insights into the best architecture for traffic classification and malware detection. By benchmarking GCN and GAT, this study provides a reference point for developing new GNN models for traffic classification.

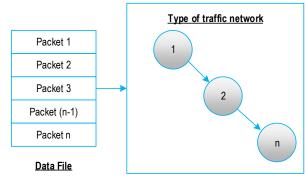


Fig. 2. Represent Data in Graph Form

Comparing GNN models' performance with conventional models like MLP is a fruitful approach for evaluating their effectiveness in traffic classification tasks.

This contrast can reveal the strengths and weaknesses of each approach, enabling the selection of the most appropriate model based on computational constraints, accuracy requirements, and execution time considerations. The following section presents GNN algorithms, including GCN and GAT.

The GCN is a powerful model for graph data learning, particularly in network traffic classification where the goal is to categorize edges. To monitor traffic flow effectively, capturing edge adjacency is crucial, similar to how an adjacency matrix represents node connectivity. The current adjacency matrix  $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$  is central to the GCN [32] model, which uses multilayer graph convolution to process input data at different levels of abstraction. At each time step t, the  $l^{th}$  layer of the GCN updates the embedding node matrix  $H_t^{(l+1)}$  by utilizing the weight matrix  $W_t^{(l)}$  with input from the current adjacency matrix At and embedding node matrix  $H_t^{(l)}$ .

This mechanism can be formally expressed as follows:

$$H_{t}^{(l+1)} = G_{-}CONV(A_{t}, H_{t}^{(l)}, W_{t}^{(l)} = \sigma(\hat{A}_{t}H_{t}W_{t}^{(l)})).$$
 (3)

where  $\sigma$  is the activation function (usually ReLU).

The G\_CONV layer, a key component of the GCN, is similar to the perceptron, but with a distinct difference: its weight matrix is derived through spectrum filtering of the graph Laplacian matrix. This feature allows the G\_CONV layer to effectively capture the graph structure, making it useful for graph-based classification tasks. See the parameterized model in [33].

$$g_{\theta} * x = U g_{\theta} U^T x, \tag{4}$$

where the G\_CONV layer is similar to a perceptron, but its weight matrix is derived through spectrum filtering of the graph Laplacian matrix.

This allows it to capture the structure of graph data and achieve practical graph-based classification tasks. The model in [34] includes a parameterized framework with a matrix U composed of eigenvectors of the normalized graph's Laplacian matrix, denoted as  $\theta \in \mathbb{R}^N$ .

$$L = I_N - D^{-\frac{1}{2}} A D^{-\frac{1}{2}} = U \Lambda U^T.$$
 (5)

The Laplacian matrix is constructed using the degree matrix, adjacency matrix, and eigenvalue matrix  $\Lambda$ .  $\Lambda$  is diagonal, and its diagonal values are the eigenvalues. The graph Fourier transform of a signal x is  $U^Tx$ .

In equation (4), the function  $g_{\theta}$  depends on the Laplacian matrix eigenvalues. However, computing the Laplacian eigenvalue decomposition is computationally expensive. To address this, a truncated expansion of the Chebyshev polynomial  $T_k(x)$  is used to approximate  $g_{\theta}(\Lambda)$  up to the  $k^{\text{th}}$  order:

$$g_{\theta'}(\Lambda) \approx \sum_{k=0}^{k} \theta'_k T_K(\widetilde{\Lambda}),$$
 (6)

where the Chebyshev polynomials are utilized to approximate  $g_{\theta}(\Lambda)$  up to the  $k^{\text{th}}$  order, denoted by  $\theta' \in R^k$ . The matrix  $\widetilde{\Lambda}$ , obtained by scaling and shifting the Laplacian matrix  $\Lambda$ , captures the highest eigenvalues, and L denotes the number of eigenvalues encapsulated by it.

The Chebyshev polynomials can be defined as follows:

$$T_k(x) = 2xT_{K-1}(x) - T_{K-2}(x), \tag{7}$$

where  $T_0(x) = 1$ ,  $T_1(x) = x$ .

Equation (8) show cases the GCN model, which is built using convolutional layers arranged in a stacked multilayer equation:

$$g_{\theta^*} * x \approx \sum_{k=0}^{k} \theta_k T_K(\tilde{L}),$$
 (8)

where 
$$\tilde{L} = \frac{2}{\lambda_{\text{max}}} L - I_N$$
.

In this context, we set a constraint on the convolution layer such that *k* equals 1, that is:

$$g_{\theta} * x \approx \theta_0' T_0(\tilde{L}) x + \theta_1' T_1(\tilde{L}) x = \theta_0' x + \theta_1' \tilde{L} x. \tag{9}$$

Taking the approximation  $\lambda_{max}=2$  , we can get:

$$g_{\theta'} * x \approx \theta'_0 x + \theta'_1 (L - L_N) x =$$

$$= \theta'_0 x - \theta'_1 D^{-\frac{1}{2}} A D^{-\frac{1}{2}} x.$$
(10)

Furthermore, to prevent overfitting, the number of trainable parameters could be restricted:

$$g_{\theta} * x \approx \theta \left( I_N + D^{-\frac{1}{2}} A D^{-\frac{1}{2}} \right) x.$$
 (11)

Note that  $\theta = \theta_0' = -\theta_1'$  in (6).

The range of feature values of  $I_N + D^{-\frac{1}{2}}AD^{-\frac{1}{2}}$  is [0, 2]. In the context of deep neural network models, it has been observed that repetitive application of a particular operation may lead to unstable values and gradient explosion.

To mitigate this issue, a novel normalization technique is proposed in [34]:

$$I_N + D^{-\frac{1}{2}} A D^{-\frac{1}{2}} \to \widetilde{D}^{-\frac{1}{2}} \widetilde{A} \widetilde{D}^{-\frac{1}{2}},$$
 (12)

where  $\tilde{A} = A + I_N$ ,  $D_{ii} = \sum_i \tilde{A}_{ii}$ .

The attention mechanism has demonstrated considerable potential in various sequence-based tasks. In this section, the theoretical derivation of the GAT will be explicated, along with a discussion of its advantageous applications. GAT comprises a solitary graph attention layer, while any graph attention network can be created by integrating numerous layers.

To calculate the attention coefficient for the node pair (i, j) in this layer, the following formula is employed:

$$\operatorname{sum}_{N} = \sum_{k \in N_{i}} e^{\{\operatorname{LeakyReLu}\left[a^{T}(Wh_{i} \| Wh_{j})\right]\}},$$

$$\alpha_{i,i} = e^{\{\text{LeakyReLu}\left[a^T(Wh_i || Wh_j)\right]\}} / \text{sum}_N.$$
 (13)

The GAT employs a single graph attention layer, which serves as the building block for constructing any graph attention network by stacking multiple layers. The attention coefficient, denoted as  $\alpha_{i,j}$ , for node j in relation to node i, where  $N_i$  denotes the neighbor node set of nodes *i* in the graph, is calculated by employing the concatenated vectors notation ||, and the formula provided in (13). The GAT's input node features are denoted by  $h = \{h_1, h_2, \cdots, h_N\}$ , where  $h_i \in R^F$ . The weight matrix  $W \in R^{F \times F}$  enables weight-sharing linear transforma-tion among nodes. The weight vector  $a \in$  $R^{2F}$ , representing a single-layer feedforward neural network [35], is normalized with the softmax activation function and the LeakyRelu function is used for nonlinearity. The normalized attention coefficient  $\alpha_{i,j}$  is used to compute each node's final output eigenvector h', using formula:

$$h_i' = \sigma \left( \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij} W h_j \right). \tag{14}$$

GAT uses the activation function  $\sigma$  (.) for nonlinearity and employs multi-head attention with K independent mechanisms to compute hidden state vectors for each node

The resulting vectors are concatenated to obtain the final output, as expressed in the mathematical formula for multi-head attention:

$$h_i' = \parallel_{k=1}^K \sigma \left( \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij}^k W^k h_j \right). \tag{15}$$

In GAT, multiple attention mechanisms are used to compute hidden state vectors for each node, which are concatenated to obtain the final output. Equation (15) involves concatenation using the || symbol and employs a normalized attention coefficient and weight matrix.

To address the issue of multiple eigenvectors in the final output, the average method is used, as shown in the formula:

$$h_i' = \sigma \left( \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{j \in N_i} \alpha_{ij}^k W^k h_j \right). \tag{16}$$

GAT applies the average method to compute the final output eigenvector for each node, which contains F' fused feature vectors. This simplifies the feature aggregation process and improves the model's performance by preserving the important graph features.

The MLP is a neural network with an input layer, one or more hidden layers, and an output layer. The input layer feeds the network with input variables, while the output layer generates the final output. Hidden layers are between the input and output layers. The MLP is

widely used in various fields and is composed of interconnected neurons in a one-way and one-directional manner.

The mathematical description of each layer can be represented by Eq:

$$O_i^{(\ell)} = \varphi(u_i^{(\ell)}) = \varphi\left(\sum_{j=1}^{n_\ell} O_j^{(\ell-1)} w_{j,i}^{(\ell)} + w_{0,j}^{(\ell)}\right), \quad (17)$$

$$1 \le \ell \le L,$$

where  $\phi(.)$  plays a crucial role in determining the output of a neural network.

For hidden layers, the activation function is typically a nonlinear tangent hyperbolic function, while a linear function is used for the output layer. In a neural network with L non-input layers, the real layer is identified by index l, and the output of neuron i in the real layer l is denoted as  $O_i^l$ . The weights associated with the connections between neurons in adjacent layers are represented by  $w_{j,1}^{(\ell)}$ . The final output of the network is represented by  $O^{(L)} = y$ , where L is the index of the final layer and  $n_L$  is its length. The basic architecture of an MLP neural network is shown in Fig. 3.

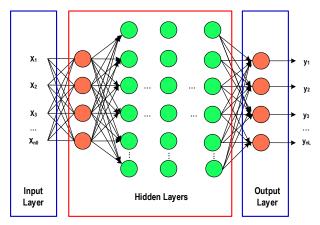


Fig. 3. Basic Architecture of an MLP Neural Network

## 4. Results

This study aimed to evaluate the effectiveness of GNN algorithms in network traffic classification, focusing on two popular algorithms: GCN, GAT, and a traditional MLP. The dataset was divided into three parts: training, validation, and test data, with an 8:1:1 ratio. The experiment involved classifying network traffic into five categories (*Idle, Interactive, Web, Video, Bulk*) and evaluating the results through a multi-classification problem. In the experiment we will use measures such as *F*1-score, Recall and Precsision to evaluate the results.

The Fig. 4 displays the loss value obtained while training the model using GCN, GAT, and MLP algorithms. The results indicate that MLP had the lowest loss value, followed by GCN, and then GAT. Furthermore, the loss values began converging from the 80th

epoch onwards. These findings suggest that all three algorithms effectively classify network traffic, with MLP being the most efficient in reducing loss, followed by GCN and GAT. Notably, GNN algorithms, such as GCN and GAT, demonstrated effectiveness in classifying network traffic, which has practical applications in network security and intrusion detection.

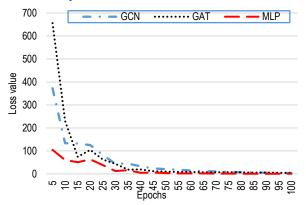


Fig. 4. Loss Value for Training Data of Algorithms

The Fig. 5 presents the accuracy of the validation dataset for each epoch. The study found that GCN achieved the highest accuracy of 92,2 %, followed by GAT with an accuracy of 91,12 %, and MLP with an accuracy of 79,5 %. These results indicate that GCN outperformed GAT and MLP in terms of accuracy, which could be attributed to GCN's ability to capture higher-order dependencies between nodes in the graph. GAT, a more recent GNN architecture, performed slightly worse than GCN but still better than MLP, suggesting its potential in this domain.

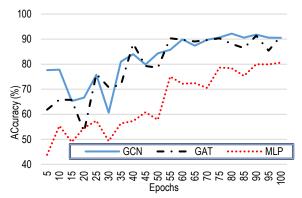


Fig. 5. Accuracy of Validation Data via Each Epoch of Algorithms

Training time is crucial when selecting a model for classification tasks, especially when handling large datasets or limited computational resources. Fig. 6 shows that the GCN algorithm had the shortest training time, followed by MLP, and then GAT. Consequently, GCN may be a more suitable choice for scenarios where speed is critical. However, it is essential to consider other factors, such as dataset size and complexity, computational resource availability, and the required level of interpretability, when selecting an appropriate algorithm for classification tasks.

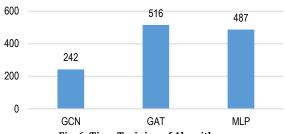


Fig. 6. Time Training of Algorithms

Next, we will evaluate the classification of each pair of categories together. There are some reasons for these experiments.

- + Detailed analysis: Assessing the classification performance for each pair of categories individually allows for a more in-depth analysis of the models' strengths and weaknesses. This approach can reveal specific areas where the models perform well or struggle, providing valuable insights for further improvements.
- + Identifying challenging category pairs: Some pairs of categories might be more challenging to distinguish than others due to overlapping or similar traffic patterns. Evaluating the classification of each pair separately can help identify these challenging cases, informing potential strategies to address these issues.
- + Model selection: By comparing the performance of different algorithms for each pair of categories, we can identify the most suitable model for each pair, allowing for a more targeted and efficient application of the algorithms in real-world scenarios.
- + Robustness evaluation: Investigating the performance of the classifiers for each pair of categories can provide insights into their robustness and adaptability when handling various types of traffic patterns. This can be especially important when the classifiers are deployed in dynamic environments where traffic patterns might change over time.
- + Fine-grained performance metrics: Evaluating the classification of each pair of categories together allows for calculating fine-grained performance metrics such as precision, recall, and F1-score for each category pair. These metrics can provide a more comprehensive understanding of the classifiers' performance and help identify areas for improvement.

Fig. 7a provides a detailed view of the performance metrics for the three algorithms (MLP, GCN, and GAT) when classifying between the *Idle* and *Interactive* categories. MLP and GCN achieved a precision of 0,98, while GAT had a slightly lower precision of 0,97. This indicates that MLP and GCN were slightly better at correctly identifying true positive cases as a proportion of all the predicted positive cases. MLP and GAT achieved a perfect recall score of 1, while GCN had a slightly lower recall of 0,99. This means that MLP and GAT could identify all true positive cases as a proportion of the total positive cases. GCN, on the other hand, missed a small proportion of true positive cases.



The *F*1-score, the harmonic mean of precision and recall, was 0,99 for MLP and 0,98 for GCN and GAT. This suggests that MLP provided a better balance between precision and recall in classifying *Idle* and *Interactive* categories, followed closely by GCN and GAT.

MLP achieved the highest accuracy of 0,98, while both GCN and GAT had a slightly lower accuracy of 0,97. This indicates that MLP was the best-performing algorithm in correctly classifying both *Idle* and *Interactive* categories as a proportion of all cases.

In conclusion, based on the performance metrics provided, MLP demonstrated a slightly better overall performance in classifying between the *Idle* and *Interactive* categories when compared to GCN and GAT. However, all three algorithms showed strong performance, with only minor differences in the metrics.

Fig. 7b provides a detailed view of the performance metrics for the three algorithms (MLP, GCN, and GAT) when classifying the *Idle* and *Web* categories. MLP exhibits the highest precision (0,98), but its recall (0,87) and accuracy (0,85) are considerably lower than those of GCN and GAT.

This suggests that while MLP effectively identifies *Idle* and *Web* traffic cases, it struggles to capture all true instances within the dataset. On the other hand, GAT achieves perfect recall (1) and the highest *F*1-score (0,98) and accuracy (0,97), indicating a balanced performance in terms of correctly identifying and classifying *Idle* and *Web* traffic cases. GCN closely follows GAT, with an *F*1-score of 0,97 and an accuracy of 0,94.

In summary, **GAT demonstrates the best overall performance for classifying** *Idle* **and** *Web* **categories**, closely followed by GCN. While MLP has the highest precision, its lower recall and accuracy suggest it may be less suitable for this specific classification task.

Fig. 7c compares MLP, GCN, and GAT for Idle and Video traffic classification, revealing similar performance among the algorithms, with only minor differences in precision and recall. F1-scores are identical at 0,98, and accuracy scores are equal at 0,97 for all three models. This suggests strong performance across the board, with the choice of the best algorithm depending on the specific application requirements and constraints.

In Fig. 7d, the comparison of Idle and Bulk categories is presented. GCN demonstrates a slight edge over MLP and GAT, with an accuracy of 0,99 and an *F*1-score of 0,99. MLP and GAT show almost identical performance with accuracy and *F*1-scores of 0,97 and 0,98, respectively. These results indicate that **GCN** is the most effective in this specific classification task, but all three algorithms exhibit strong performance. The optimal choice should be determined based on the application's requirements and constraints.

For the *Interactive* and *Web* categories (Fig. 7e), GCN outperforms the other algorithms with an accuracy of 0,87 and an *F*1-score of 0,84. MLP shows moderate performance with an accuracy of 0,81 and an *F*1-score of 0,76. In contrast, GAT's performance is notably lower, with an accuracy of 0,61 and an *F*1-score of 0,65. These results suggest that **GCN** is **the most suitable algorithm for this classification task**, while GAT may not be as effective in this specific context. As always, the choice of the algorithm should be guided by the unique requirements and constraints of the application.

When classifying between Interactive and Video categories (Fig. 7f), both GCN and GAT excel with an accuracy of 0,97 and F1-scores of 0,97. MLP lags with an accuracy of 0,78 and an F1-score of 0,71. The recall for MLP is considerably lower at 0,56, while GCN and GAT maintain high recall rates of 0,95 and 0,97, respectively. These results highlight **GCN and GAT as the preferred algorithms for this classification task**, while MLP may not be the optimal choice. It is crucial to consider the application's unique requirements and constraints when selecting an algorithm.

For the Interactive and Bulk categories (Fig. 7g), GCN stands out with an accuracy of 0,99 and an F1-score of 0,98. MLP and GAT have similar accuracies (0,91 and 0,90, respectively) but differ in recall and F1-score. While MLP has a higher recall (0,8) and F1-score (0,89) than GAT, both algorithms have perfect precision (1). Given the results, GCN is the best choice for classifying between *Interactive* and *Bulk* categories, while MLP and GAT may be suitable alternatives depending on the specific context and requirements.

When comparing the algorithms for the Web and Video categories (Fig. 7h), GCN outperforms MLP and GAT with an accuracy of 0,85 and an F1-score of 0,87. MLP has a significantly higher recall (0,98) but lower precision (0,62), resulting in an F1-score of 0,76 and accuracy of 0,66. GAT demonstrates the lowest performance, with an accuracy of 0,52, precision of 0,67, recall of 0,29, and an F1-score of 0,4. In this case, **GCN is** the most suitable choice for classifying Web and *Video* categories, while MLP could be considered if a high recall is prioritized. In comparing the algorithms for the Web and Bulk categories (Fig. 7i), GAT performs the best with an accuracy of 0,92 and an F1-score of 0,92. GCN follows closely with an accuracy of 0,90 and an F1-score of 0,91, exhibiting a particularly high recall of 0,97. MLP has the lowest accuracy of 0,86 and an F1score of 0,86. Based on these results, **GAT** is the preferred choice for classifying the Web and Bulk categories, while GCN can be a viable alternative, particularly when a high recall is desired.

For the Video and Bulk categories (Fig. 7j), GCN outperforms the other algorithms, achieving an accuracy of 0,99 and an *F*1-score of 0,99, with near-perfect precision and recall. GAT is the next best option, with an accuracy of 0,98 and an *F*1-score of 0,98. MLP, although performing well in precision, has lower recall and thus shows a lower accuracy of 0,91 and an *F*1-score of 0,88. Based on these results, **GCN** is the **optimal choice for classifying the** *Video* **and** *Bulk* **categories**, with GAT as a strong alternative.

In conclusion, the performance of the three algorithms (MLP, GCN, and GAT) varies depending on the specific pair of categories being classified. However, some general trends can be observed.

First of all, GCN consistently achieves high performance across most category pairs, making it a reliable

and effective choice for network traffic classification tasks. GCN is the best choice for classifying between Video and Bulk, Interactive and Bulk, and Interactive and Video categories.

Secondly, GAT performs strongly in several cases, such as classifying between Idle and Interactive, Idle and Video, and Video and Bulk categories. While it may not always outperform GCN, GAT is a promising alternative, especially considering its ability to capture higher-order dependencies.

Third, MLP demonstrates competitive performance in some cases, such as classifying between Idle and Interactive and Idle and Web categories. However, it tends to be outperformed by GCN and GAT in other scenarios. MLP may be a suitable choice when computational resources are limited or when dealing with specific category pairs where it shows strong performance.

Ultimately, the choice of the best algorithm for network traffic classification should consider the specific requirements and constraints of the application, including computational resources, desired level of interpretability, and the relative importance of precision, recall, and accuracy.

### 5. Conclusions

Evaluating network traffic classification methods utilizing graph neural networks in satellite communica-

tion channels has yielded promising outcomes for enhancing the user experience. The conducted experiments employing GNN models, such as GCN and GAT, have demonstrated their capability to classify network traffic data and pinpoint areas needing optimization accurately.

GNN models' capacity to consider spatial and temporal dependencies in data renders them highly suitable for analyzing traffic data within satellite communication channels. By detecting patterns and anomalies, network operators can optimize the network to reduce latency and packet loss, ultimately leading to significant improvements in user experience.

Future research in this field could explore applying GNN models for network traffic classification in other communication networks, including cellular networks and IoT networks. Moreover, there is potential for investigating alternative neural network architectures for traffic classification, such as recurrent neural networks and convolutional neural networks.

In conclusion, examining network traffic classification methods using graph neural networks in satellite communication channels demonstrates that GNN models hold considerable potential for significantly enhancing user experience. This study lays the groundwork for further exploration of GNN models' application in network traffic classification and optimization across various communication networks.

## References

- 1. Rahmat-Samii Y., Densmore A.C. Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2014;63(4):1191–1204.
- 2. Kodheli O., Lagunas E., Maturo N., Sharma S.K., Shankar B., Montoya J.F.M., et al. Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020;23(1):70–109. DOI:10.1109/COMST.2020.3028247
- 3. Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Borodin A., Koucheryavy A., et al. Future Networks 2030: Architecture & Requirements. *Proceedings of the 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT, 05–09 November 2018, Moscow, Russia.* IEEE; 2018. DOI:10.1109/ICUMT.2018.8631208
- 4. Umar S., Eshiguike E.C., Anye V.C., Mamman T.V. Reliable Delivery of Point-To-Multi Point Services via Satellite (Multicast & Broadcast): Requirements and Solutions. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*. 2019;4(2): 482–486.
- 5. Wang P., Zhang J., Zhang X., Yan Z., Evans B.G., Wang W. Convergence of Satellite and Terrestrial Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. 2019;8:5550–5588. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2963223
- 6. Chen S., Sun S., Kang S. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G. *China Communications*. 2020;17(12):156–171. DOI:10.23919/JCC.2020.12.011
- 7. Abdu T.S., Kisseleff S., Lagunas E., Chatzinotas S. Flexible Resource Optimization for GEO Multibeam Satellite Communication System. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021;20(12):7888–7902. DOI:10.1109/TWC.2021.3088609
- 8. Niephaus C., Kretschmer M., Ghinea G. QoS Provisioning in Converged Satellite and Terrestrial Networks: A Survey of the State-of-the-Art. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016;18(4):2415–2441. DOI:10.1109/COMST.2016.2561078
- 9. Zhou J., Cui G., Hu S., Zhang Z., Yang C., Liu Z., et al. Graph neural networks: A review of methods and applications. *Al Open*. 2020;1:57–81. DOI:10.1016/j.aiopen.2021.01.001
- 10. He S., Xiong S., Ou Y., Zhang J., Wang J., Huang Y., et al. An Overview on the Application of Graph Neural Networks in Wireless Networks. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2021;2:2547–2565. DOI:10.1109/0JCOMS.2021.3128637
- 11. Suárez-Varela J., Almasan P., Ferriol-Galmes M., Rusek K., Geyer F., Cheng X., et al. Graph Neural Networks for Communication Networks: Context, Use Cases and Opportunities. *IEEE Network*. 2022. DOI:10.1109/MNET.123.2100773
- 12. Ji X., Meng Q. Traffic Classification Based on Graph Convolutional Network. *Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, AEECA, 25–27 August 2020, Dalian, China.* IEEE; 2020. p.596–601. DOI:10.1109/AEECA49918.2020.9213630
- 13. Wang C., Tian R., Hu J., Ma Zhongyu, et al. A trend graph attention network for traffic prediction. *Information Sciences*. 2023;623:275–292. DOI:10.1016/j.ins.2022.12.048

- 14. Wenjuan J., Peng Z. QoS routing algorithm based on traffic classification in LEO satellite networks. *Proceedings of the Eighth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 24–26 May 2011, Paris, France.* IEEE; 2011. DOI:10.1109/WOCN.2011.5872957
- 15. Pacheco F., Exposito E., Gineste M. A Wearable Machine Learning Solution for Internet Traffic Classification in Satellite Communications. *Proceedings of the 17th International Conference on Service-Oriented Computing, ICSOC 2019, 28–31 October 2019, Toulouse, France.* Cham: Springer; 2019. p.202–215. DOI:10.1007/978-3-030-33702-5\_15
- 16. Pacheco F., Exposito E., Gineste M. A framework to classify heterogeneous Internet traffic with Machine Learning and Deep Learning techniques for satellite communications. *Computer Networks*. 2020;173:107213. DOI:10.1016/j.comnet.2020.107213
- 17. Pham V.D., Do P.H., Le D.T., Kirichek R. LoRa Link Quality Estimation Based on Support Vector Machine. *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications, DCCN 2021, 20–24 September 2021, Moscow, Russia. Lecture Notes in Computer Science, vol.13144*. Cham: Springer; 2021. p.92–102. DOI:10.1007/978-3-030-92507-9\_9
- 18. Pang B., Fu Y., Ren S., Wang Y., Liao Q., Jia Y. CGNN: Traffic Classification with Graph Neural Network // arXiv:2110.09726. 2021. DOI:10.48550/arXiv.2110.09726
- 19. Luksha I., Dinh T.D., Karelin E., Glushakov R., Kirichek R. Method for filtering encrypted traffic using a neural network between an Industrial Internet of things system and Digital Twin. *Proceedings of the 5th International Conference on Future Networks & Distributed Systems, ICFNDS 2021, 15–16 December 2021, Dubai, United Arab Emirates.* New York: Association for Computing Machinery; 2021. p.595–601. DOI:10.1145/3508072.3508193
- 20. Huoh T.L., Luo Y., Li P., Zhang T. Flow-based Encrypted Network Traffic Classification with Graph Neural Networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2022. DOI:10.1109/TNSM.2022.3227500
- 21. Pang B., Fu Y., Ren S., Jia Y. High-performance Network Traffic Classification Based on Graph Neural Network. *Proceedings of the 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference ITNEC, 24–26 February 2023, Chongqing, China.* IEEE; 2023. p.800–804. DOI:10.1109/ITNEC56291.2023.10082049
- 22. Do P.H., Le T.D., Vishnevsky V., Berezkin A., Kirichek R. A Horizontal Federated-Learning Model for Detecting Abnormal Traffic Generated by Malware in IoT Networks. *Proceedings of the 25th International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT*, 19–22 February 2023, Pyeongchang, Republic of Korea. IEEE, 2023. PP. 28–36. DOI:10.23919/ICACT56868. 2023.10079624
- 23. Vladimirov S., Kirichek R., Vishnevsky V. Network Coding for the Interaction of Unmanned Flying Platforms in Data Acquisition Networks. *Proceedings of the 4th International Conference on Future Networks and Distributed Systems, ICFNDS, 26–27 November 2020, St. Petersburg.* New York: Association for Computing Machinery, 2020. DOI:10.1145/3440749.3442622
- 24. Abdrakhmanova M., Kuzdeuov A., Jarju S., Khassanov Y., Lewis M., Varol H.A. Speakingfaces: A Large-Scale Multimodal Dataset of Voice Commands with Visual and Thermal Video Streams. *Sensors*. 2021;21(10):3465. DOI:10.3390/s21103465
- 25. Labayen V., Magaña E., Morató D., Izal M. Online classification of user activities using machine learning on network traffic. *Computer Networks*. 2020;181:107557. DOI:10.1016/j.comnet.2020.107557
- 26. Du B., Cai S., Wu C. Object Tracking in Satellite Videos Based on a Multiframe Optical Flow Tracker. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2019;12:8:3043–3055. DOI:10.1109/JSTARS.2019.2917703
- 27. Naas M., Fesl J. A novel dataset for encrypted virtual private network traffic analysis. *Data in Brief.* 2023;47:108945. DOI:10.1016/j.dib.2023.108945
- 28. Hosseini N., Jamal H., Haque J., Magesacher T., Matolak D.W. UAV Command and Control, Navigation and Surveillance: A Review of Potential 5G and Satellite Systems. *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, 02–09 March 2019, Big Sky, USA.* IEEE; 2019. DOI:10.1109/AERO.2019.8741719.
- 29. Mahfouz A., Abuhussein A., Venugopal D., Shiva S. Ensemble Classifiers for Network Intrusion Detection Using a Novel Network Attack Dataset. *Future Internet*. 2020;12(11):180. DOI:10.3390/fi12110180
- 30. Do P.H. Dinh T.D., Le D.T., Pham V.D., Myrova L., Kirichek R. An Efficient Feature Extraction Method for Attack Classification in IoT Networks. *Proceedings of the 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT, 25–27 October 2021, Brno, Czech Republic.* IEEE; 2021. p.194–199. DOI:10.1109/ICUMT54235. 2021.9631726
- 31. Ji X., Meng Q. Traffic Classification Based on Graph Convolutional Network. *Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, AEECA, 25–27 August 2020, Dalian, China.* IEEE; 2020. p.596–601. DOI:10.1109/AEECA49918.2020.9213630
- 32. Pham T.D., Ho T.L., Truong-Huu T., Cao T.D., Truong H.L. Mappgraph: Mobile-App Classification on Encrypted Network Traffic Using Deep Graph Convolution Neural Networks. *Proceedings of the Annual Computer Security Applications Conference, ACSAC, 6–10 December 2021*. New York: Association for Computing Machinery; 2021. p.1025–1038. DOI:10.1145/3485832. 3485925
- 33. Marín G., Caasas P., Capdehourat G. Deepmal-Deep Learning Models for Malware Traffic Detection and Classification. *Proceedings of the 3rd International Data Science Conference on Data Science–Analytics and Applications (iDSC2020)*. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2021. p.105–112. DOI:10.1007/978-3-658-32182-6\_16
- 34. Kipf T.N., Welling M. Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. *arXiv:1609.02907*. 2016. DOI:10.48550/arXiv.1609.02907
- 35. Berezkin A., Kukunin D., Kirichek R. Neural Network Coding in Data Compression Systems in Communication Channels. *Proceedings of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies, ICCT, 03–07 October 2022, Astrakhan, Russian Federation.* IEEE; 2022. DOI:10.1109/ICCT56057.2022.9976532

## Список источников

1. Rahmat-Samii Y., Densmore A. C. Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2014. Vol. 63. Iss. 4. PP. 1191–1204.

- 2. Kodheli O., Lagunas E., Maturo N., Sharma S.K., Shankar B., Montoya J.F.M., et al. Satellite Communications in the New Space Era: A Survey and Future Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 23. Iss. 1. PP. 70–109. DOI:10.1109/COMST.2020.3028247
- 3. Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Borodin A., Koucheryavy A., et al. Future Networks 2030: Architecture & Requirements // Proceedings of the 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT, Moscow, Russia, 05–09 November 2018). IEEE, 2018. DOI:10.1109/ICUMT.2018.8631208
- 4. Umar S., Eshiguike E.C., Anye V.C., Mamman T.V. Reliable Delivery of Point-To-Multi Point Services via Satellite (Multicast & Broadcast): Requirements and Solutions // International Research Journal of Advanced Engineering and Science. 2019. Vol. 4. Iss. 2. PP. 482–486.
- 5. Wang P., Zhang J., Zhang X., Yan Z., Evans B.G., Wang W. Convergence of Satellite and Terrestrial Networks: A Comprehensive Survey // IEEE Access. 2019. Vol. 8. P. 5550–5588. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2963223
- 6. Chen S., Sun S., Kang S. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G // China Communications. 2020. Vol. 17. Iss. 12. PP. 156–171. DOI:10.23919/JCC.2020.12.011
- 7. Abdu T.S., Kisseleff S., Lagunas E., Chatzinotas S. Flexible Resource Optimization for GEO Multibeam Satellite Communication System // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2021. Vol. 20. Iss. 12. PP. 7888–7902. DOI:10.1109/TWC. 2021.3088609
- 8. Niephaus C., Kretschmer M., Ghinea G. QoS Provisioning in Converged Satellite and Terrestrial Networks: A Survey of the State-of-the-Art // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. Iss. 4. PP. 2415–2441. DOI:10.1109/COMST.2016. 2561078
- 9. Zhou J., Cui G., Hu S., Zhang Z., Yang C., Liu Z., et al. Graph neural networks: A review of methods and applications // AI Open. 2020. Vol. 1. PP. 57–81. DOI:10.1016/j.aiopen.2021.01.001
- 10. He S., Xiong S., Ou Y., Zhang J., Wang J., Huang Y., et al. An Overview on the Application of Graph Neural Networks in Wireless Networks // IEEE Open Journal of the Communications Society. 2021. Vol. 2. PP. 2547–2565. DOI:10.1109/OJCOMS. 2021.3128637
- 11. Suárez-Varela J., Almasan P., Ferriol-Galmes M., Rusek K., Geyer F., Cheng X., et al. Graph Neural Networks for Communication Networks: Context, Use Cases and Opportunities // IEEE Network. 2022. DOI:10.1109/MNET.123.2100773
- 12. Ji X., Meng Q. Traffic Classification Based on Graph Convolutional Network // Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA, Dalian, China, 25–27 August 2020). IEEE, 2020. PP. 596–601. DOI:10.1109/AEECA49918.2020.9213630
- 13. Wang C., Tian R., Hu J., Ma Zhongyu, et al. A trend graph attention network for traffic prediction // Information Sciences. 2023. Vol. 623. PP. 275–292. DOI:10.1016/j.ins.2022.12.048
- 14. Wenjuan J., Peng Z. QoS routing algorithm based on traffic classification in LEO satellite networks // Proceedings of the Eighth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (Paris, France, 24–26 May 2011). IEEE, 2011. DOI:10.1109/WOCN.2011.5872957
- 15. Pacheco F., Exposito E., Gineste M. A Wearable Machine Learning Solution for Internet Traffic Classification in Satellite Communications // Proceedings of the 17th International Conference on Service-Oriented Computing (ICSOC 2019, Toulouse, France, 28–31 October 2019). Cham: Springer, 2019. PP. 202–215. DOI:10.1007/978-3-030-33702-5\_15
- 16. Pacheco F., Exposito E., Gineste M. A framework to classify heterogeneous Internet traffic with Machine Learning and Deep Learning techniques for satellite communications. *Computer Networks*. 2020. Vol. 173. P. 107213. DOI:10.1016/j.comnet. 2020.107213
- 17. Pham V.D., Do P.H., Le D.T., Kirichek R. LoRa Link Quality Estimation Based on Support Vector Machine // Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN 2021, Moscow, Russia, 20–24 September 2021). Lecture Notes in Computer Science. Vol. 13144. Cham: Springer, 2021. PP. 92–102. DOI:10.1007/978-3-030-92507-9\_9
- 18. Pang B., Fu Y., Ren S., Wang Y., Liao Q., Jia Y. CGNN: Traffic Classification with Graph Neural Network. *arXiv:2110.09726*. 2021. DOI:10.48550/arXiv.2110.09726
- 19. Luksha I., Dinh T.D., Karelin E., Glushakov R., Kirichek R. Method for filtering encrypted traffic using a neural network between an Industrial Internet of things system and Digital Twin // Proceedings of the 5th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS 2021, Dubai, United Arab Emirates, 15–16 December 2021). New York: Association for Computing Machinery, 2021. PP. 595–601. DOI:10.1145/3508072.3508193
- 20. Huoh T.L., Luo Y., Li P., Zhang T. Flow-based Encrypted Network Traffic Classification with Graph Neural Networks // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2022. DOI:10.1109/TNSM.2022.3227500
- 21. Pang B., Fu Y., Ren S., Jia Y. High-performance Network Traffic Classification Based on Graph Neural Network // Proceedings of the 6th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC, Chongqing, China, 24–26 February 2023). IEEE, 2023. PP. 800–804. DOI:10.1109/ITNEC56291.2023.10082049
- 22. Do P.H., Le T.D., Vishnevsky V., Berezkin A., Kirichek R. A Horizontal Federated-Learning Model for Detecting Abnormal Traffic Generated by Malware in IoT Networks // Proceedings of the 25th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT, Pyeongchang, Republic of Korea, 19–22 February 2023). IEEE, 2023. PP. 28–36. DOI:10.23919/ICACT56868.2023.10079624
- 23. Vladimirov S., Kirichek R., Vishnevsky V. Network Coding for the Interaction of Unmanned Flying Platforms in Data Acquisition Networks // Proceedings of the 4th International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS, *Saint-Petersburg*, Russian Federation, 26–27 November 2020). New York: Association for Computing Machinery, 2020. DOI:10.1145/3440749.3442622

- 24. Abdrakhmanova M., Kuzdeuov A., Jarju S., Khassanov Y., Lewis M., Varol H.A. Speakingfaces: A Large-Scale Multimodal Dataset of Voice Commands with Visual and Thermal Video Streams // Sensors. 2021. Vol. 21. Iss. 10. P. 3465. DOI:10.3390/s21103465
- 25. Labayen V., Magaña E., Morató D., Izal M. Online classification of user activities using machine learning on network traffic // Computer Networks. 2020. Vol. 181. P. 107557. DOI:10.1016/j.comnet.2020.107557
- 26. Du B., Cai S., Wu C. Object Tracking in Satellite Videos Based on a Multiframe Optical Flow Tracker // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2019. Vol. 12. Iss. 8. PP. 3043–3055. DOI:10.1109/JSTARS. 2019.2917703
- 27. Naas M., Fesl J. A novel dataset for encrypted virtual private network traffic analysis // Data in Brief. 2023. Vol. 47.  $P.\,108945.\,DOI:10.1016/j.dib.2023.108945$
- 28. Hosseini N., Jamal H., Haque J., Magesacher T., Matolak D.W. UAV Command and Control, Navigation and Surveillance: A Review of Potential 5G and Satellite Systems // Proceedings of the IEEE Aerospace Conference(Big Sky, USA, 02–09 March 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/AERO.2019.8741719
- 29. Mahfouz A., Abuhussein A., Venugopal D., Shiva S. Ensemble Classifiers for Network Intrusion Detection Using a Novel Network Attack Dataset // Future Internet. 2020. Vol. 12. Iss. 11. P. 180. DOI:10.3390/fi12110180
- 30. Do P.H. Dinh T.D., Le D.T., Pham V.D., Myrova L., Kirichek R. An Efficient Feature Extraction Method for Attack Classification in IoT Networks // Proceedings of the 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT, Brno, Czech Republic, 25–27 October 2021). IEEE, 2021. PP. 194–199. DOI:10.1109/ICUMT54235.2021.9631726
- 31. Ji X., Meng Q. Traffic Classification Based on Graph Convolutional Network // Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA, Dalian, China, 25–27 August 2020). IEEE, 2020. PP. 596–601. DOI:10.1109/AEECA49918.2020.9213630
- 32. Pham T.D., Ho T.L., Truong-Huu T., Cao T.D., Truong H.L. Mappgraph: Mobile-App Classification on Encrypted Network Traffic Using Deep Graph Convolution Neural Networks // Proceedings of the Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC, 6–10 December 2021). New York: Association for Computing Machinery, 2021. PP. 1025–1038. DOI:10.1145/3485832.3485925
- 33. Marín G., Caasas P., Capdehourat G. Deepmal-Deep Learning Models for Malware Traffic Detection and Classification // Proceedings of the 3rd International Data Science Conference on Data Science–Analytics and Applications (iDSC2020). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. PP. 105–112. DOI:10.1007/978-3-658-32182-6\_16
- $34. \ Kipf \ T.N., \ Welling \ M. \ Semi-Supervised \ Classification \ with \ Graph \ Convolutional \ Networks \ // \ arXiv:1609.02907. \ 2016. \ DOI:10.48550/arXiv.1609.02907$
- 35. Berezkin A., Kukunin D., Kirichek R. Neural Network Coding in Data Compression Systems in Communication Channels // Proceedings of the International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT, Astrakhan, Russian Federation, 03–07 October 2022). IEEE, 2022. DOI:10.1109/ICCT56057.2022.9976532

Статья поступила в редакцию 09.06.2023; одобрена после рецензирования 28.06.2023; принята к публикации 03.07.2023.

The article was submitted 13.06.2023; approved after reviewing 28.06.2023; accepted for publication 03.07.2023.

## Информация об авторах:

ДО Фук Хао аспирант кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

https://orcid.org/0000-0003-0645-0021

ЛЕ Чан Дык кандидат технических наук, преподаватель кафедры сетей и коммуникаций Университета науки и технологий – Университет Дананга

https://orcid.org/0000-0003-3735-0314

БЕРЁЗКИН Александр Александрович кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича

https://orcid.org/0000-0002-1748-8642

Киричек Руслан Валентинович доктор технических наук, доцент, ректор Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

https://orcid.org/0000-0002-8781-6840

Научная статья УДК 621.391 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-28-41



## Application Layer Cooperative Automatic Repeat Request Method for Data Streaming over UAVs Network

- **In Mohammed Amin Lamri**<sup>1</sup> ⊠, lamri.amin@istu.ru
- Albert Abilov<sup>2</sup>, abilov.av@sut.ru
- Alexandr Presnetsov³, alexandrpresnetsov@gmail.com

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, 426069, Russian Federation <sup>2</sup>The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation <sup>3</sup>Neftemash LLC

Izhevsk, 426062, Russian Federation

**Abstract:** In this article, an evaluation study was conducted on an Application Layer Cooperative Automatic Repeat ReQuest Algorithm ALC-ARQ designed for data streaming over a Wi-Fi Unmanned Aerial Vehicles standalone networks. A simulation model in NS-3 was implemented to investigate the performances of the method and conduct a comparative analysis with well-known routing protocols such like Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) and Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) in terms of declaring link state information, rapidity of relaying and transmission range. The QoS metrics measured was Packet Loss Rate (PLR) and One-way Transmission Delay. Results show that the proposed method consistently outperform the classical routing protocols it terms of rapidity of relying and transmission range. In addition, the results show that the method maintains its stability it terms of packet recovery along the relay-node transmission range and keeps the QoS metrics under the permissible rates.

**Keywords**: packet loss, error control, delay, data streaming, automatic repeat request

**Funding:** This research was funded by Russian Foundation for Basic Research according to the research project No. 19-29-06076.

**For citation:** Lamri M.A., Abilov A., Presnetsov A. Application Layer Cooperative Automatic Repeat Request Method for Data Streaming over UAVs Network. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3):28–41. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-28-41

## Метод автоматического повторного запроса прикладного уровня для потоковой передачи данных по сети БПЛА

- <sup>©</sup> Мохаммед Амин Ламри¹⊠, lamri.amin@istu.ru
- Альберт Винерович Абилов², abilov.av@sut.ru
- Александр Михайлович Преснецов³, alexandrpresnetsov@gmail.com

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, 426069, Российская Федерация

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

3000 «Нефтемаш»

Ижевск, 426062, Российская Федерация

Аннотация: В работе предложен и исследован метод кооперативного автоматического повторного запроса прикладного уровня ALC-ARQ, предназначенный для потоковой передачи данных по автономным сетям БПЛА. Имитационная модель в сетевом симуляторе NS-3 реализована для оценки производительности алгоритма и проведения сравнительного анализа с известными протоколами маршрутизации – AODV и OLSR. Измеренными показателями качества обслуживания являются коэффициент потери пакетов и односторонняя задержка передачи. Результаты показывают, что предложенный метод превосходит указанные протоколы таким параметрам, как: объявление информации о состоянии канала, скорость кооперативной ретрансляции и дальность передачи. Также он улучшает метрики качества обслуживания, сохраняет стабильность передачи с точки зрения восстановления потерянных пакетов в диапазоне передачи узла-ретранслятора и удерживает показатели односторонней задержки ниже допустимых значений.

**Ключевые слова:** потеря пакетов, контроль ошибок, задержка, потоковая передача данных, автоматический повторный запрос

**Источник финансирования:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 19-29-06076.

**Ссылка для цитирования**: Ламри М.А., Абилов А.В., Преснецов А.М. Метод автоматического повторного запроса прикладного уровня для потоковой передачи данных по сети БПЛА // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 28–41. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-28-41

## I. Introduction

The theory of cooperative data streaming over Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) networks has been studied in depth during the past few years [1–3]. Many researches, experimental and simulation studies were conducted for different transmission scenarios and network topologies. However, most of the existing research studies are intend to customize or improve the existed MAC protocols with or without additional support of physical layer techniques [4, 5]. In fact, the implementation of such methods and methods consider being complex and costly since it requires optimizations and changes of existed standardized protocols that may lead to incompatibility issues. Moreover, there is a high possibility of lake of effectiveness since OSI model can fail to meet the practical expectations.

In general, the goal behind cooperative transmission in UAVs networks is to improve the system performances in terms of reliability of link, network coverage and energy efficiency [6, 7]. In UAVs standalone network, because of their specific characteristics from high mobility of nodes to unreliability of transmission link, it is very crucial to address the two key issues: 1) Cooperative condition (since the quality of transmission links and the density of the network is constantly in change, a source node may not always need help from relay node; the condition by which the transmission switch to relay node is considered as sensible); 2) How to guarantee cooperative transmission (regardless the possibility of existence of error-control mechanisms on the down layers stack, the cooperative transmission must include a control mechanism to protect all ongoing transmission flows from potential packet loss and guaranty the data delivery at certain rate [8]).

Scholars have been working on cooperative data transmission for reliability and network coverage

purposes. In [9] the authors proposed a Multi-relay Cooperative Automatic Repeat ReQuest (MC-ARQ) MAC protocol based on the IEEE 802.11 DCF access scheme and CFC frames where they defined three schemes inspired by the use of different bakeoff time before transmission to choose optimal relay. However if two or more relays have the same Ti start timer, they will transmit simultaneously to the channel and a collision will occur as a consequence, which in turn leads the cooperative retransmission attempt to failure. In [10] the authors developed a selective retransmission scheme for multi-channel systems. The idea was to deliver the required data successfully using the available power and bandwidth within a limited number of transmissions using four schemes. In the Selective Automatic Repeat Request with Fixed Band scheme, the maximum number of transmission was limited. In the Selective Chase Combining with Fixed Bandwidth, data was detected using less number of transmission but implement a collection buffer to collect the unsuccessfully detected observations along with newly received. In Limited Selective Chase Combining with Fixed Band, a single buffer per channel can preserve only one previous observation per channel. And last, Selective Automatic repeat request with Variable Band was design similar to SARQ-Fixed Band but with the use of a single detector and the ability of channel increasing the bandwidth retransmission to achieve reliable transmission. Other works were also proposed for error control over cooperative transmission [11-13] where error correcting code, priority position inside Group of Pictures and, retransmission decision based on a given threshold are the key highlighted proposed features.

A long with the novel methods and models of cooperative reliable transmission that can be proposed for a specific scenario, a verification approach must be included to check their correctness and feasibility. The

most well-known approaches is the use of experiments in real-life, the use of simulation environments, the use of formal methods and the use of model checking. The use of simulation environment is one of the most optimal methods for verification, which consists of constructing a simulation model for the proposed method and schedule the main features and behaviors that produce the execution of the scenario proposed by entering their values as a set of parameters. The results of the simulation scenario represent a numerous abstraction level analysis of the method behavior; produce a reachability graph that includes all the simulation paths and compare it with the method expected results.

For a specific scenario of data streaming over UAVs standalone network, were a dynamic single relay-node is used to guarantee the cooperative transmission and the cooperative condition, which is dynamically, depend on the link state between the sender and receiver, an method Application Layer Automatic Repeat ReQuest (ALC-ARQ) is proposed. This method is inspired by the selective-repeat Automatic Repeat ReQuest error-control model, with a customized packet header on the application layer and a link-state routing scheme where all sending nodes are already aware about the map connectivity and they will route data transmission based on packet loss rate metrics.

The paper is organized as follows. Section II introduces the system model of cooperative transmission of ALC-ARQ and its error-control model as well as the QoS metrics measurement methods. In Section III we present the implemented simulation model in NS-3 simulation environment and describe in detail its components. The results of simulation model and the comparative analysis are conducted in section IV. The conclusions are drawn in section V.

## II. System model and ALC-ARQ method design

In this section, the proposed method ALC-ARQ is described in detail, starting from cooperative transmission with relay deployment, criteria of deployment and link quality measurement.

## A. System model for cooperative transmission

To ensure coverage and communication, lower-cost relay node may be inserted to forward data from each individual sending node in the network in a multi-hop transmission way to the server or data sink. Nodes locations are considered optimal if the resulting links can satisfy transmitting and communication coverage to a predefined packet delivery rate PDR value. In case of deterioration of the link, the measurements provided by the implementation of the measurement model (described in II.C) will be used to dynamically deploy additional transmission relay node or activate already deployed one.

For each sending node *Ni* we define two types of transmission link:

- Direct link *Dl*, between source and destination end nodes (*Ni–BS*) without relay;
- Relay link *Rl*, for the communication composition (*Ni–R–BS*) with relay.

Assuming that the relay node has the same transmission range as the sending nodes. The single-tiered network method proposed aims to ensure connectivity for each communication pair (Ni–BS) by dividing the unreliable long hop between Ni and BS to two short hops by deploying relay node. This relay will stand as a node helper to retransmit all the packets coming from each end node. In the first scenario, we consider one relay node in the network. When the transmission starts, each sending node will transmit data packets to the base station. For each transmission window, the reliability of the link will be measured by calculating packet loss rate (PLR).

Fig. 1 shows the scenario of deploying, activating and deactivating a relay node between source node and Base Station.

The deployment of relay will be fully automatic by the network without external interactions. Consequently, the topology of the network will be changed depending on the relay node state. To describe the system model, we define the following states.

Standby mode (Fig. 1a). BS starts to receive data without the interaction of the relay node after UAVs have been launched (P2P mode). During this period, the quality of Dl link will be measured. The window size used for metrics measurements is defined based on the parameters of the scenario proposed (Wi-Fi standard, channel bandwidth, node velocity and reordering buffer size on the application layer). Because packet loss rate is dependent on link quality and network interference. loss events will occur which in turn invoke the application layer ALC-ARQ error control method [14]. The constant mobility of source nodes away from BS during the transmission will decrease the PLR measured on the application layer on BS. If PLR value for a given link  $Dl_i$  exceeds a predefined threshold, the BS will broadcast a control message packet to all nodes in the network to notify the correspondent source node about the  $Dl_i$  link state. Threshold value is defined by the system's user when starting the application. The source node in its turn after receiving control message will switch to multicast transmission including relay node R as intended destination (node helper) on its transmission table. Consequently, another transmission link Rl will be created between Ni and BS as a combination of two sub-links (Ni-R, R-BS) and the relay node will switch to active mode.

**Active mode (Fig. 1b)**. After receiving the control message, the relay node starts by creating a playback buffer for the newly created link (*Ni–R*). This buffer will be used for error control purposes like packet recovering and reordering. Buffer parameters such as reordering buffer offset and reordering late time will be

chosen as input parameters when starting the relay application. Relay node will listen to packets coming from both source-node and *BS*, and determine the type of each packet depending on packet\_id field in ALC-ARQ header. If the packet contains video data and does not exist in the playback buffer, the relay will keep a copy of it in the corresponding buffer, and then forward it to the *BS*. Since the source node is multicasting data packets, the *BS* will continue to check the reliability of links *Dl* and *Rl* by measuring PLR for each flow for the same sending window size. This measurement allows the *BS* to define the most reliable link from which packets will be accepted.

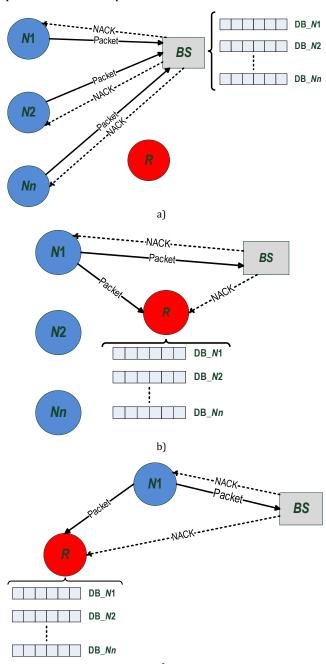


Fig. 1. System Model of Cooperative Transmission:
a) Transmission without Relay; b) Relay is Deployed;
c) Relay Out of Range (Background Mode)

As a result, packets coming from less reliable link will be ignored. During transmission and on both BS and R, loss events will be recognized by checking out-of-order received packets using the sequence numbers (SN) assigned in ALC-ARQ header. Consequently, the lost packets will be requested by broadcasting a Negative Acknowledgment (NACK) message. For (Ni-BS) link. source node will attempt to retransmit the requested packet(s) if the NACK packet was successfully received. For (Ni-R, R-BS) link, both source-node and R will attempt to retransmit the requested packet(s). However, for each requested packet, BS will accept only the first correct received packet by one link and ignore the others. If the attempt of packet recovery fails, the BS will broadcast the same NACK again for each Round Trip Time RTT value until Retransmission Timeout RTO is reached [15] or the requested packet no longer exists in the buffer. Since playback buffers on source-node and R node are set up with different parameters' values, if the requested packet does not exist in the relay buffer, the relay node will forward this request to the source node in an attempt to recover the maximum number of lost packets. The average delay for all packets and average delay for only retransmitted packets on both links will be measured.

While the reliability of links is measured, the choice of receiving link will be chosen as follow:

$$Dl ext{ if } PLR_{Dl} \ge ext{Threshold } \lor PLR_{Dl} > PLR_{Rl},$$
 (1)

$$Rl \text{ if } PLR_{Dl} \le PLR_{Rl} \land PLR_{Dl} < \text{Threshold.}$$
 (2)

If the first condition is satisfied, the relay node will switch to background (inactive) mode.

Background mode (Fig. 1c). The condition for which relay node switch to background mode is when PLR of link *Dl* is greater than or equal to the threshold value or the packet loss rate of link Rl (1). The BS then will send a control message to notify both source and relay that data will be received by Dl only. However, the source node will continue to multicast data packets to ensure that the relay node is still receiving data packets but without involving in the packet delivery process. The reason behind this is to keep *Rl* link active with the minimum consumption of network and memory resources (bandwidth and buffer). This can be achieved by saving only sequence numbers of the received packets on relay's buffer. Thereafter, based on these sequence numbers, BS will keep checking the quality of each link till the condition in equation (2) is satisfied to switch to state II (Active mode).

## B. Cooperative error-control ALC-ARQ method description

The ALC-ARQ transmission block scheme is represented in Fig. 2. This scheme is inspired by the selective-repeat Automatic Repeat ReQuest error-control model with a customized packet header on the application layer and a link-state routing scheme where all sending nodes are already aware about the connectivity map and they will route data based on packet loss rate metrics.

The proposed scheme defines two error-control phases.

1 phase: Relay cooperative error-control

The performance of ALC-ARQ error control is measured by its capacity to alleviate packet loss. The relay node experiences a loss event whenever  $SN_b - SN_a > 1$  where:  $SN_b$  and  $SN_a$  represent the sequence numbers of two consecutive received packets. For a window size denoted  $n\_bit$ , let P(L) denote the probability of a loss event. To guarantee the reliability of data transmission, the probability P(L) has to be very small. The performance of ALC-ARQ packet recovery is dependent on what type of loss events may occur during transmission.

For this purpose, we define the following probability:  $-P_n$  is the probability for  $n\_bit$  to be received without loss:

- $-P_s$  is the probability for  $n\_bit$  to be received with n series of losses with burst size equal to one;
- $-P_b$  is the probability for  $n\_bit$  to be received with n series of losses with burst size greater than one.

Accordingly  $P(L) = P_n + P_s + P_b$ .  $P_n$  represents the ideal link state between the source-node and the relay node where there is no interference or channel errors. Assuming that the transmission link is not ideal  $(P_n = 0)$  and  $P_s$  is a special case of  $P_b$ , then the probability P(L) for loss event for  $n\_bit$  is equal to  $P_b$  and define as:

$$P_b = 1 - \exp\left(\frac{1}{P_i \cdot SNR(\theta_i)} \cdot \left(2^{\frac{r}{w}} - 1\right)\right). \tag{3}$$

In this function, the probability of loss event is a function of transmission power  $P_i$  used to transmit the i-th packet and the normalized expected Signal-to-noise Ratio  $SNR(\theta_i)$  given the fading level  $\theta_i$  [16], where r and w represent the transmission rate (bits/sec) and bandwidth respectively. In section III, the values of  $P_i$ ,  $\theta_i$ , r and w are determined for the simulation model on the network device layer.

The customization that was made on the application layer was designed to handle more than one loss event using one NACK packet (loss event is defined by SN of the first lost packet and burst length -BL). According to Fig. 2, the relay node keeps asking for the lost packets for each RTO while receiving data packets. In other words, another loss event(s) may occur and the previous event has not been handled yet. In this situation, instead of sending another NACK message to request the lost packets of the last loss event, the same NACK will be edited to include SN and burst length of the second event. Fig. 3 represents the format of NACK packet.

In this way, one NACK packet can handle more than one loss event by adding  $SN_i$  and  $BL_i$  of the occurred loss. Furthermore, if not all the packets are successfully recovered, the burst can be break up into N sub-bursts with the corresponding SN and BL.

As mentioned before, the process of sending NACK messages is repeated if RTO value is exceeded until the

requested packets are no longer relevant to the application. RTO value is defined by default when starting the application to 70 ms.

However, it will be updated for each loss event based on the approximated time value of Round Trip Time RTT in 4 phases [17]:

1) the current smoothed time is calculated Smoothed Round Trip Time ( $SRTT_{curr}$ ) which uses the smoothed round trip time previous value:

$$SRTT_{curr} = \frac{7}{8}.SRTT_{prev} + \frac{1}{8}.RTT_{curr},$$
 (4)

where  $SRTT_{prev}$  – previous smoothed round trip time;  $RTT_{curr}$  – current round trip time;

2) the current deviation is determined *DEV<sub>curr</sub>*:

$$DEV_{curr} = |RTT_{curr} - SRTT_{prev}|; (5)$$

3) the current smoothed deviations value is calculated:

$$SDEV_{curr} = \frac{3}{4}.SDEV_{prev} + \frac{1}{4}.DEV_{curr},$$
 (6)

where  $SDEV_{prev}$  – previous smoothed deviations value;

4) the retransmission timeout is calculated using the following formula:

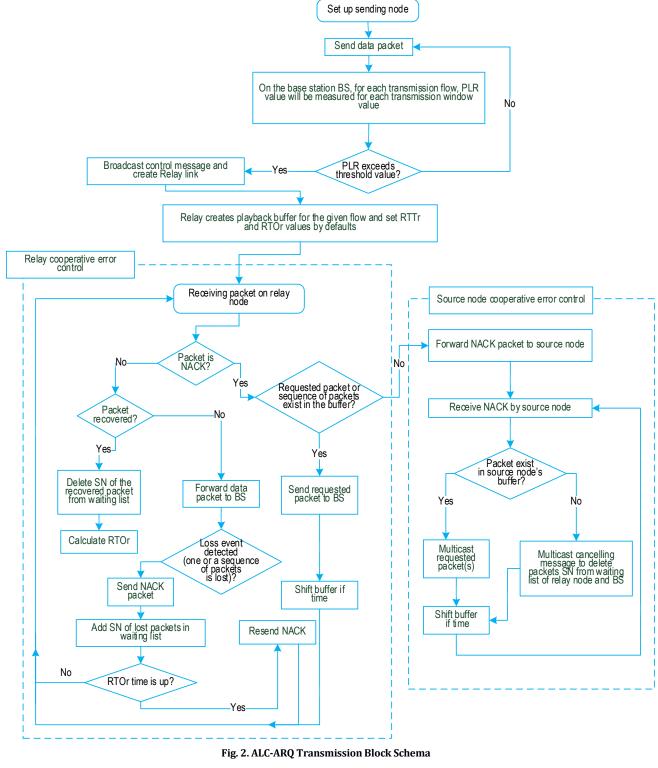
$$RTO = SRTT_{curr} + 2.SDEV_{curr}.$$
 (7)

2 phase: Source-node error control

Source node implements the same mechanism of error control. On relay node, if the requested packets do not exist in the playback buffer, the received NACK will be forwarded to the source node. The probability of recovering these packets depends on its relevance to the application on *BS* which in turn is related to byte offset and late time buffer parameters that are set by the application user. As a result, if the requested packets no longer exist in the buffer, the source node multicasts a cancellation message to inform *BS* that the requested packets no longer exist. *BS* after receiving the cancellation message will delete the sequence numbers of the requested packets from its waiting list.

To analyze the performances of ALC-ARQ on the application layer using a predefined packet loss rate and burst lengths, an integrated method for generating artificial packet loss events is implemented based on the classical 2-state Markov model introduced by Gilbert and Elliott [18] in Fig. 4. The proposed method is implemented on the source-node side, where after generating data packets, the Gilbert – Elliott average loss probability P will decide if the packet will be sent or dropped, and the average burst size L will define the sequence of dropped packets. P and L values define the transaction probabilities L and L values define the transaction probabilities L and L values define the packet) by the following formulas:

$$p = \frac{1}{L}, \qquad q = \frac{P}{L(1-P)}.$$
 (8)



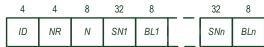


Fig. 3. NACK Packet; *ID*) Packet Identifier 4 Bits; *NR*) Node Identifier 4 Bits; *N*) Number of NACK Repeats 8 Bits; *SN*) Sequence Number of the First Lost Packet in Succession 32 Bits; *BL*) Burst Length 8 Bits

The method was implemented in C++ programming language. The implementation is provided on the appen-dix below.

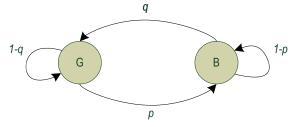


Fig. 4. 2-State Markovian Model for Artificial Packet Loss Generation

```
Appendix
HEADER FILE gilbert elliott.h
#ifndef GILBERT ELLIOTT H
#define GILBERT ELLIOTT H
#include "socket io.h"
#define MAX BURST LENGTH GEC 1000
class gilbert Elliott
        int p,q; // transition probabilities
        bool state;
    public:
        short stat[MAX BURST LENGTH GEC];
        unsigned char bl; //burst length
    public:
        gilbert Elliott();
        void initGilbert Elliott(double plr, dou-
ble lb avr);
        bool getState(void);
        bool getCurrentState(void);
        int randomNumber(int hi);
        //int write stat to file(FILE *file);
}:
#endif // GILBERT ELLIOTT H
CLASS FILE gilbert elliott.cc
#include "gilbert elliott.h"
gilbert Elliott::gilbert Elliott()
     p = q = 0;
     b1 = 0;
     for (int i=0; i<MAX_BURST_LENGTH_GEC; i++)</pre>
      stat[i]=0;
      state = true;
void gilbert Elliott::initGilbert Elliott(double
plr, double lb avr)
     srand( (unsigned) time( NULL ) );
     p = (1 / lb avr) * 10000;
      q = (plr / (lb avr * (1 - plr)))*10000;
      state = true;
bool gilbert Elliott::getState()
   if (state)
        { if (randomNumber(10000) < q)
              state = false;
              bl++;
      else
        { if
            (randomNumber(10000) < p)
              state = true;
              if ((bl)&&(bl <
MAX BURST LENGTH GEC))
                  stat[bl]++;
                  bl=0;
            }
          else
            bl++;
      return state;
bool gilbert Elliott::getCurrentState()
     if (!state)
       bl++;
      return state;
int gilbert Elliott::randomNumber(int hi)
      float scale = rand()/float(RAND MAX);
      return int((float)scale*hi);
```

## C. QoS Measurement Model

In this section, we will analyze the performances of ALC-ARQ method in terms of packet loss rate PLR and one-way transmission delay on the application layer.

## 1) Packet Loss Rate

Packet reordering and recovering on the *BS* side is handled by the receiving buffer. For each dataflow *fi* the packet loss rate will be measured for both transmission links *Dl* and *Rl* as the ratio of the number of lost packets to the total number of sent packets as:

$$PLR(f_i) = 1 - \frac{N_g}{N_r},\tag{9}$$

where  $N_g$  and  $N_r$  represent the number of transmitted packets and the number of received packets respectively.

It should be noted that erroneous data that has failed to be detected by Forward Error Correction (FEC) mechanism of data link layer [19] and has been delivered to upper layers are out of scope since ALC-ARQ error control considers error events as a defect in the succession of sequence numbers of the received packets. The performance of ALC-ARQ will be investigated in relation to node velocity and distance between end nodes (source-node and *BS*). The traffic generator model in source-application uses fixed intervals to schedule the next packet transmission, the value is set by default to 1.7 ms for all different velocity values. Based on this, the receiving window for which PLR will be measured is defined dynamically and depends on the given velocity.

## 2) One-way transmission delay

The proposed method for calculating a one-way transmission delay requires a registered timestamp (sending time) for each sent packet in the application layer header. As the simulation study is handled on one machine, there was no need to distribute a clock sync signal to handle synchronization between the network units [20]. Based on this, the one-way transmission delay will be measured as presented in (10):

$$D_i = T_{reception} - T_{transmission} , (10)$$

where  $T_{reception}$  and  $T_{transmission}$  are respectively the reception time by BS and the transmission time packet fixed on the application layer.

## III. NS-3 simulation model of ALC-ARQ

To conduct performance evaluation, NS-3 is used, as it is a packet-level network simulator where the main unit of modeling is packets and entities that exchange packets. The modelling process in NS-3 follows the workflow presented in Fig. 5.

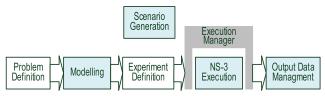


Fig. 5. NS-3 Workflow for the Modelling Process

## A. ALC-ARQ packet generation in NS-3

Data packets are generated as special data buffers with space for headers, trailers, tags and packet metadata. At the application layer, the packets are created with dummy data bytes. We choose a 1250 bytes size for packets that are considered to carry video data. The headers that contain information about packet type, application layer *SN*, transmission Node ID, transmission timestamp, node IP address are created using the implemented class PacketDataTag.cc that is derived from the class Tag.cc of NS-3 as shown in Fig. 6. As the packet moves down the stack, the stack layers will add the corresponding headers and append it to the packet, and the reverse will happen in the receive process.

```
Ptr<Packet> packet = Create<Packet>(MTU_SIZE);
PacketDataTag tag;
tag.SetNumberOfRepeat (0);
if(gal_pn == MAX_PN) gal_pn = 0; else gal_pn++;
tag.SetSeqNumber (gal_pn);
tag.SetNodeId (GetNode ()->GetId ());
tag.SetPacketId (IDM_UDP_ARQ_VIDEO);
tag.SetTimestamp (Simulator::Now ());
tag.SetTreeNumber (0);
m_my_addr.Serialize (tag.sourceAddr);
packet->AddPacketTag (tag);
```

Fig. 6. Code Snippet for Data Packet Creation in NS-3

## B. ALC-ARQ application model in NS-3

NS-3 simulator was not designed to provide so much fidelity on the application layer, because it typically uses a packet generator models such as Net devices (https://www.nsnam.org/docs/release/3.29/doxygen/ classns3 1 1 net device.html) that aims to characterize the traffic generated by the real applications. In other words, it does not run real applications but just models of how to generate packets. The lack of such functionality led us to create an NS-3 custom component for the ALC-ARO method to implement all the functionalities proposed in it. We started by creating 3 applications (source-application, destination-application and relayapplication) as subclasses of NS-3 application class (https://www.nsnam.org/docs/release/3.16/doxygen/ classns3\_1\_1\_application.html) then, we used the predefined UDP socket API on NS-3 which is based on BSD socket API (https://www.nsnam.org/docs/release/ 3.19/doxygen/classns3 1 1 socket.html#details) for communication between end nodes. The packets are generated with a custom header as shown in Fig. 6, and the traffic management is implemented as a C++ Client/Server structured application. All measurements (PLR calculation, RTO, RTT and delay) are measured on the application layer. The metrics include all the down stack OSI layers values.

## C. End nodes Net Devices

This class represents the API, which the IP and ARP layers need to access to manage the instance of a

network device layer (https://www.nsnam.org/docs/ release/3.29/doxygen/classns3 1 1 net device.html# details). Typically, it is installed on the nodes using a net device helper (https://www.nsnam.org/docs/release/ 3.19/doxygen/classns3 1 1 net device container.html# details). This class is used to extend the MAC layer functions and it hides as many MAC-level details to allow a single layer three to work with any kind of MAC layer. For ALC-ARQ to configure the net devices, we used WifiHelper.cc class to create the Wi-Fi Net Device object and configure its attributes. To create and manage the Wi-Fi physical layer we used the YansWifiPhyHelper.cc class and YansWifiChannel Helper.cc class to create and manage Wi-Fi channel objects for the created model. The configuration method for 802.11ax 5GHz is presented in Fig. 7.

```
NetDeviceContainer
NetDeviceSetup::ConfigureDevices (NodeContainer&
nodes)
int channelWidth = 80;
std::string Vht = "7";
WifiHelper wifiHelper;
wifiHelper.SetStandard(WIFI PHY STANDARD 80211ax
5GHZ):
YansWifiPhyHelper wifiPhyHelper =
YansWifiPhvHelper::Default ();
wifiPhyHelper.SetPcapDataLinkType(YansWifiPhyHelp
er::DLT IEEE802 11 RADIO);
wifiPhyHelper.Set ("TxPowerStart",
DoubleValue (13));
wifiPhyHelper.Set ("TxPowerEnd", DoubleValue(13));
wifiPhyHelper.Set ("RxNoiseFigure", DoubleValue
wifiPhyHelper.Set ("ChannelWidth", UintegerValue
(channelWidth));
wifiPhyHelper.Set ("Frequency",
UintegerValue(5180));
wifiPhyHelper.Set ("Antennas", UintegerValue(1));
wifiPhyHelper.Set ("ChannelNumber",
UintegerValue(42));
YansWifiChannelHelper wifiChannelHelper;
wifiChannelHelper.SetPropagationDelay
("ns3::ConstantSpeedPropagationDelayModel");
wifiChannelHelper.AddPropagationLoss("ns3::FriisP
ropagationLossModel", "SystemLoss",
DoubleValue(1), "Frequency", DoubleValue(5.18e9));
wifiPhyHelper.SetChannel
(wifiChannelHelper.Create ());
wifiHelper.SetRemoteStationManager("ns3::Constant
RateWifiManager", "DataMode", StringValue ( "VhtMcs" + Vht), "ControlMode", StringValue
("VhtMcs0"));
WifiMacHelper macHelper =
HtWifiMacHelper::Default ();
macHelper.SetType ("ns3::AdhocWifiMac");
NetDeviceContainer devices = wifiHelper.Install
(wifiPhyHelper, macHelper, nodes);
return devices;
```

Fig. 7. Code Snippet for Net Device Configuration for ALC-ARQ

#### D. Mobility model In NS-3

Mobility models are used to track and maintain the current Cartesian position and speed of a node/object (https://www.nsnam.org/docs/models/html/mobility. html). It is composed of a set of helper classes, which can be used to place nodes and set up their mobility. In our proposed scenario, the sending nodes are flying away from the BS with a specific velocity while relay node is located on a fixed position away from the BS. The transmission link between relay node and BS is guaranteed as ideal. The two mobility ConstantVelocityMobilityModel.cc ConstantPositionMobilityModel.cc were used to set the Cartesian position of the sending node and both BS and relay node respectively. The mobility model configuration is presented in Fig. 8.

```
MobilityHelper mobility;
mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantVelocityM
obilityModel");
mobility. Install (nodes);
for (uint32 t i=1; i<nodes.GetN() - 1; i++)
Ptr<ConstantVelocityMobilityModel> cvmm =
DynamicCast<ConstantVelocityMobilityModel>(nodes.
Get(i) -> GetObject<MobilityModel>());
cvmm->SetPosition( Vector (distance, 0, 0));
cvmm->SetVelocity( Vector (0.2,0,0));
MobilityHelper relay mobility;
Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc =
CreateObject<ListPositionAllocator>();
positionAlloc->
Add(Vector(relay position, 2.0, 0.0));
positionAlloc->Add (Vector (0.0, 0.0, 0.0));
relay mobility.SetPositionAllocator(positionAloc);
relay mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPos
itionMobilityModel");
mobility.Install (nodes.Get (nNodes - 1));
```

Fig. 8. Code Snippet for ALC-ARQ Mobility Configuration

#### IV. Simulation experiments and results

To understand the difference of packet delivery efficiency of ALC-ARQ between point-to-point and multi-hop (one relay node between source node and destination) topology, the testbed shown in Fig. 9 is used to set up the technical and execution requirements for the simulation stand where flying source nodes stream video data to the base station on the ground. The relay node and BS are placed symmetrically 25 m apart from each other where the path between them is ideal. The source nodes during transmission are flying away from the base station location toward the relay node, the distance between BS and source node when starting the simulation is 0 m, by the end of simulation, the distance is dependent on the Wi-Fi standard transmission capabilities and its configuration parameters. Other simulation parameters are listed in Tab. 1.

The performance of ALC-ARQ while using the Gilbert – Elliott model for artificial packet loss is investigated. The dependence of Packet Loss Ratio on the distance between the source and destination node is explored, in addition to the position of the source-node, the mobility of nodes and the time required to switching to a relayed transmission. The improvements which ALC-ARQ has given related to the Packet Loss Ratio and topology change compared to classical well known routing protocols such as Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) and Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) were shown. The effect of recovery process on the application level one-way transmission delay was derived.

**TABLE 1. Simulation Parameters** 

Parameter	Setting	
Channel delay model	Constant Speed Propagation Delay Model	
Propagation loss model	FriisPropagationLossModel	
Transmission protocol	UDP	
Application data rate	6 Mbps	
Packet size	1250 bytes	
Mobility speed	[1; 60] km/h	
Simulation topology	End to End; Multi-hop	
Number of transmission nodes	[1; 10] nodes	
PLR measurement window	[60; 740] packets	
Playback buffer size	248 packets for source nodes; 148 for both relay and <i>BS</i>	

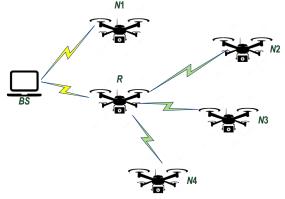


Fig. 9. Testbed for Simulation Scenario

Fig. 10 shows the results of packet delivery simulation using artificial packet loss and burst length for ALC-ARQ method. The simulation results present the theoretical analysis for the efficiency of the method and its ability to recover lost packets on the application layer while using a non-reliable transmission protocol on the transport layer. It is obvious that the packet delivery is enhanced by the use of ALC-ARQ where the path is in pure conditions (0.15–0.6 in Given PLR axis). The reason is the lightweight packet request scheme on the application level that uses dynamic NACK packets to request lost packets of different burst size; this scheme does not require a high competition for media access, processing time and buffer management for packet

recovering. We further investigate the cooperative transmission of ALC-ARQ by measuring the packet loss rate for mobility scenario. Fig. 11 represents PLR measurements for cooperative transmission. The threshold value after which the transmission is switched to cooperative is set to 0.1.

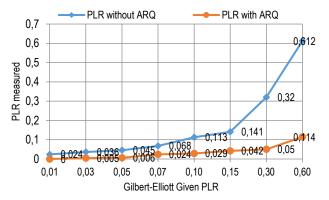


Fig. 10. Packet Loss Rate Measurement for Artificial Packet Loss Model. Burst Length Equals 18 Packets

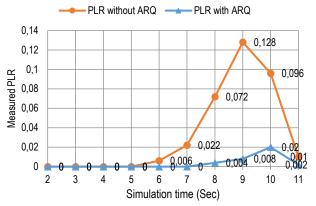


Fig. 11. Packet Loss Rate for Cooperative Transmission for Threshold Value Equals 0.1 (10%) and Nodes Velocity Equals  $14\ km/h$ 

As we see in Fig. 11, while the source node is flying away from the BS (node velocity = 14 km/h), for each time value, ALC-ARQ calculates the packet loss rate and compares it to the threshold value. On second 9, the transmission was switched to cooperative. This change in the transmission topology is noticed by the sharp decrease in the value of packet loss rate.

For this simulation, it should be noticed that the threshold value was set to the PLR values measured without ALC-ARQ packet recovery. However, the system user can also set the threshold value for PLR of ALC-ARQ.

To justify the effectiveness of the ALC-ARQ proposed method, a comparative analysis with some well known routing protocols such as OLSR and AODV should be conducted in terms of declaring the link state information, rapidity of relaying, and transmission range. In Fig. 12, we present the simulation results of the packet loss rate measurement for OLSR, AODV, and ALC-ARQ at different threshold values. As we can see from this figure, because ALC-ARQ does not have to periodically announce the information about the relay's state, it

means less number of transmission is required, the overhead of flooding messages is in its minimal value compared with routing protocols. From the point of view of declaring link state, rapidity of relaying, and knowing that routing protocols do not provide any error control processes, our method provides better rapidity of relaying and better transmission range. From the graph, it is shown that AODV takes 2 measurements (38 and 39 m) to maintain routing tables, get information about nodes before switching to relay transmission. For OLSR it is shown that switching to relay transmission takes longer by 4 measurements (37, 38, 39 and 40) to maintain routing tables, select the path and carry out the handshake procedure before switching to relay transmission.

Fig. 13 represents the results of PLR measured for different source-node velocity values. As we can see, the method maintains its stability in terms of relaying process and packet recovery along the range of transmission through the relay node, the threshold value defined for each simulation was 0.1 (10%). The difference between the results was the distance at which the relay node was activated: 37 (Fig. 13a), 36 (Fig. 13b) and 36 m (Fig. 13c). For packet recovery effectiveness for the second phase (where the relay node is active and starting from position 58 m), we recorded an increase in PLR values measured on the same node position for different velocities. For example, for position 61 m, 15  $km/h \approx 0.041$ ; 30 km/h  $\approx 0.08$ ; 60 km/h  $\approx 0.22$ . This is related to signal strength and the transmission range for physical and data link layers.

Fig. 14 represents the analyses of a sequence of 700 successfully received packets by BS by order. The PLR value measured for the given sample was 0.09 (9 %) for both graphs; transmission without relay (transmission delay for Dl link) and with relay (transmission delay for Rl link). It is shown that if the Transmission experiences some loss events, and then the one way-transmission delay for the recovered packets increases for both graphs. For Dl link, if the transmission is lossless, the average transmission delay is between 0.85 and 0.96 ms. and the average delay for recovered packets is between 1.67 and 1.77 ms. For Rl link, if the transmission is lossless, the average transmission delay is between 1.89 and 1.95 ms and average delay for recovered packets is between 5.51 and 5.54 ms. For comparative results, if the relay node is active, the lossless transmission delay increases by 1.96 times the value of transmission delay without relay node. The increasing rate totally conforms to the assumptions of the theoretical study since the sending packets are sent through two sub-links passing by the same process. Although, if the transmission experiences loss events then the average delay for recovered packets is increased by 3.3 times the value of recovered packets using the direct link. This is because relay node have to forward NACK packet to source nodes if the requested packets no longer exist in its buffer, which needs extra time for retransmission.

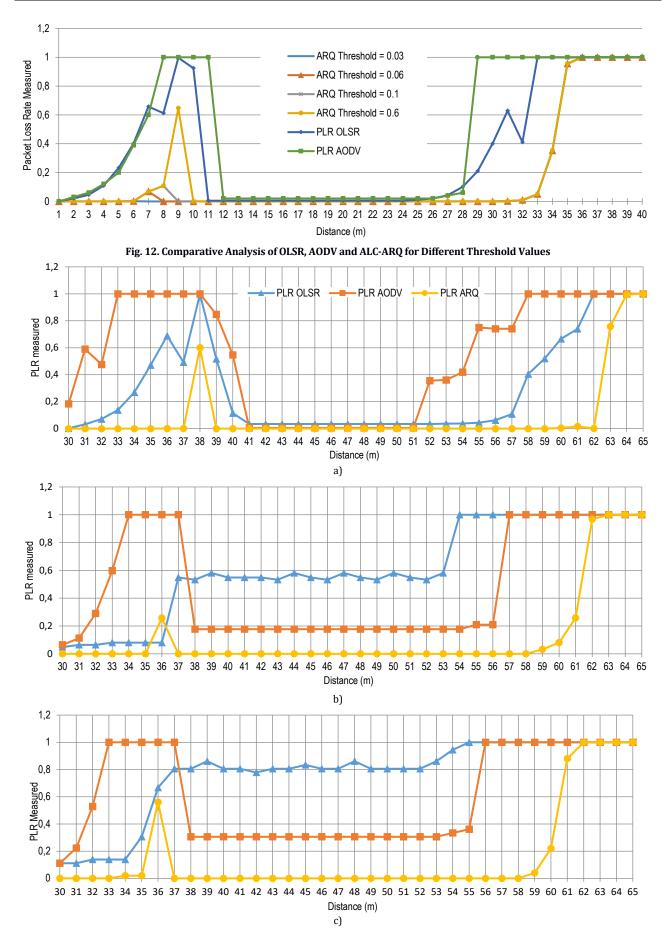


Fig. 13. Comparative Analysis for OLSR, AODV and ALC-ARQ for Different Velocity Values: 15 (a); 30 (b) and 60 km/h (c)

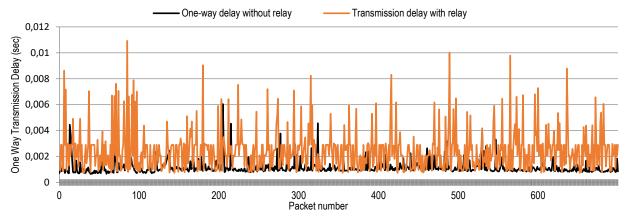


Fig. 14. One-Way Transmission Delay for ALC-ARQ Packet Loss Rate PLR = 0.09

#### V. Conclusion

In this work the effectiveness of the ALC-ARQ proposed method was justified in comparison with OLSR and AODV routing methods in terms of the link state information, rapidity of relaying, and transmission range. The method has the ability to recover lost packets on the application layer while using a nonreliable transmission protocol on the transport layer. The packet delivery is enhanced where the path is in pure conditions as a result of the lightweight packet request scheme on the application level that uses dynamic NACK packets to request lost packets of different burst size, this scheme does not require a high competition for media access, processing time and buffer management for packet recovering. cooperative transmission of ALC-ARQ was investigated by measuring the packet loss rate for mobility scenario.

While the source node is flying away from the *BS* at certain time, the transmission was switched to cooperative, where the change in the transmission topology is noticed by the sharp decrease in the value of packet loss rate. The threshold value was set to the PLR values measured without ALC-ARQ packet recovery; however, it can also be set to the threshold value for PLR of ALC-ARQ. Because ALC-ARQ does not have to periodically announce the information about the relay's

state, it means less number of transmission is required, the overhead of flooding messages is in its minimal value compared with routing protocols.

From the point of view of declaring link state, rapidity of relaying, and knowing that routing protocols do not provide any error control processes, our method provides better rapidity of relaying and better transmission range. The method maintains its stability in terms of relaying process and packet recovery along the range of transmission through the relay node. Transmission experiences some loss events, and then the one way-transmission delay for the recovered packets increases. For comparative results, if the relay node is active, the lossless transmission delay increases by 1.96 times the value of transmission delay without relay node. The increasing rate totally conforms to the assumptions of the theoretical study since the sending packets are sent through two sub-links passing by the same process. If the transmission experiences loss events then the average delay for recovered packets is increased by 3.3 times the value of recovered packets using the direct link. This is because relay node have to forward NACK packet to source nodes if the requested packets no longer exist in its buffer, which needs extra time for retransmission.

#### References

- 1. Ngo H.A., Hanzo L. Hybrid Automatic-Repeat-reQuest Systems for Cooperative Wireless Communications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 2013;16(1):25–45. DOI:10.1109/SURV.2013.071913.00073
- 2. He X., Kumar R., Mu L., Gjøsæter T., Li F.Y. Formal verification of a Cooperative Automatic Repeat reQuest MAC protocol. *Computer Standards and Interfaces.* 2012;34(4):343–354. DOI:10.1016/j.csi.2011.12.001
- 3. Jamshidi A. Efficient cooperative ARQ protocols based on relay selection in underwater acoustic communication sensor networks. *Wireless Networks*. 2019;25:4815–4827. DOI:10.1007/s11276-018-1773-5
- 4. Goel J., Jagadeesh H. Listen to Others' Failures: Cooperative ARQ Schemes for Low-Latency Communication Over Multi-Hop Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021;20(9):6049–6063. DOI:10.1109/TWC.2021.3071504
- 5. Tutgun R., Aktas E. A Markovian Analysis of Cooperative ARQ with Random Access. *Wireless Personal Communications*. 2022;123:3201–3211. DOI:10.1007/s11277-021-09282-6
- 6. Goel J., Harshan J. Minimal Overhead ARQ Sharing Strategies for URLLC in Multi-Hop Networks. *Proceedings of the 93rd Vehicular Technology Conference, 25–28 April 2021, Helsinki, Finland.* IEEE; 2021. DOI:10.1109/VTC2021-Spring51267.2021. 9448948
- 7. Mheich Z., Savin V. Cooperative communication protocols with energy harvesting relays. *Proceedings of the Wireless Days*, 29–31 March 2017, Porto, Portugal. IEEE; 2017. p.60–65. DOI:10.1109/WD.2017.7918116

- 8. Kim S., Kim B.S., Kim K.H., Kim K.I. Opportunistic Multipath Routing in Long-Hop Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2019;19(19):4072. DOI:10.3390/s19194072
- 9. He X., Li F.Y. A Multi-Relay Cooperative Automatic Repeat Request Protocol in Wireless Networks. *Proceedings of the International Conference on Communications, 23–27 May 2010, Cape Town, South Africa.* IEEE; 2010. DOI:10.1109/ICC.2010.5502169
- 10. Shafique T., Abdelhady A.M., Amin O., Alouini M. S. Energy Efficiency, Spectral Efficiency and Delay Analysis for Selective ARQ Multichannel Systems. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking.* 2018;2(3):612–622. DOI:10.1109/TGCN.2018.2809729
- 11. Yufeng S. Cross-Layer Techniques for Adaptive Video Streaming over Wireless Networks. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2005. DOI:10.1155/ASP.2005.220
- 12. Kang S.H., Zakhor A. Packet Scheduling Algorithm for wireless video streaming. *International Packet Video Workshop*. 2002.
- 13. Aramvith S., Lin C.W., Roy S. Sunet M.T. Wireless video transport using conditional retransmission and low-delay interleaving. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2002;12(6):558–565. DOI:10.1109/TCSVT.2002.800326
- 14. Lamri M.A., Abilov A., Vasiliev D., Kaisina I., Nistyuk A. Application Layer ARQ Algorithm for Real-Time Multi-Source Data Streaming in UAV Networks. *Sensors*. 2021;21(17):5763. DOI:10.3390/s21175763
- 15. Zhai F., Eisenberg Y., Pappas T.N., Berry R., Katsaggelos A.K. Joint source-channel coding and power allocation for energy efficient wireless communications. *Proceedings of the 41st Allerton Conference on Communication, Control and Computing, 1–3 October 2003, Monticello, USA.* 2003.
- 16. Kondi L.P., Ishtiaq F., Katsaggelos A.K. Joint source channel coding for motion-compensated DCT-based SNR scalable video. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002;11(9):1043–1052. DOI:10.1109/TIP.2002.802507
- 17. Paxson V., Allman M., Chu J., Sargent M. Computing TCP's Retransmission Timer. *RFC 6298*. 2011. DOI:10.17487/RFC6298
- 18. Hasslinger G., Hohlfeld O. The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet. *Proceedings of the 14th GI/ITG Conference: Measurement, Modeling and Evaluation of Computer and Communication Systems, 31 March 2008–02 April 2008, Dortmund, Germany.* VDE; 2008.
- 19. Rondeau E., Lepage F., Georges J. P., Morel G. Chapter 3 Measurements and Sustainability. *In: Dastbaz M., Pattinson C., Akhgar B. (ed.) Green Information Technology. A Sustainable Approach: Measurements and Sustainability.* Elsevier; 2015. p.29–59. DOI:10.1016/B978-0-12-801379-3.00003-6
- 20. Hofmann U., Pfeiffenberger T., Hechenleitner B. One-way-delay measurements with CM toolset. *Proceedings of the International Performance, Computing, and Communications Conference, 05–08 February 2000, Phoenix, USA.* IEEE; 2000. p.41–47. DOI:10.1109/PCCC.2000.830300

#### Список источников

- 1. Ngo H.A., Hanzo L. Hybrid Automatic-Repeat-reQuest Systems for Cooperative Wireless Communications // IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2013. Vol. 16. Iss. 1. PP. 25–45. DOI:10.1109/SURV.2013.071913.00073
- 2. He X., Kumar R., Mu L., Gjøsæter T., Li F.Y. Formal verification of a Cooperative Automatic Repeat reQuest MAC protocol // Computer Standards and Interfaces. 2012. Vol. 34. Iss. 4. PP. 343–354. DOI:10.1016/j.csi.2011.12.001
- 3. Jamshidi A. Efficient cooperative ARQ protocols based on relay selection in underwater acoustic communication sensor networks // Wireless Networks. 2019. Vol. 25. PP. 4815–4827. DOI:10.1007/s11276-018-1773-5
- 4. Goel J., Jagadeesh H. Listen to Others' Failures: Cooperative ARQ Schemes for Low-Latency Communication Over Multi-Hop Networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2021. Vol. 20. Iss. 9. PP. 6049–6063. DOI:10.1109/TWC. 2021.3071504
- 5. Tutgun R., Aktas E. A Markovian Analysis of Cooperative ARQ with Random Access // Wireless Personal Communications. 2022. Vol. 123. PP. 3201–3211. DOI:10.1007/s11277-021-09282-6
- 6. Goel J., Harshan J. Minimal Overhead ARQ Sharing Strategies for URLLC in Multi-Hop Networks // Proceedings of the 93rd Vehicular Technology Conference (Helsinki, Finland, 25–28 April 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/VTC2021-Spring51267. 2021.9448948
- 7. Mheich Z., Savin V. Cooperative communication protocols with energy harvesting relays // Proceedings of the Wireless Days (Porto, Portugal, 29–31 March 2017). IEEE, 2017. PP. 60–65. DOI:10.1109/WD.2017.7918116
- 8. Kim S., Kim B.S., Kim K.H., Kim K.I. Opportunistic Multipath Routing in Long-Hop Wireless Sensor Networks // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 19. P. 4072. DOI:10.3390/s19194072
- 9. He X., Li F.Y. A Multi-Relay Cooperative Automatic Repeat Request Protocol in Wireless Networks // Proceedings of the International Conference on Communications (Cape Town, South Africa, 23–27 May 2010). IEEE, 2010. DOI:10.1109/ICC.2010. 5502169
- 10. Shafique T., Abdelhady A.M., Amin O., Alouini M. S. Energy Efficiency, Spectral Efficiency and Delay Analysis for Selective ARQ Multichannel Systems // IEEE Transactions on Green Communications and Networking. 2018. Vol. 2. Iss. 3. PP. 612–622. DOI:10.1109/TGCN.2018.2809729
- 11. Yufeng S. Cross-Layer Techniques for Adaptive Video Streaming over Wireless Networks // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2005. DOI:10.1155/ASP.2005.220
- 12. Kang S.H., Zakhor A. Packet scheduling algorithm for wireless video streaming // International Packet Video Workshop. 2002.
- 13. Aramvith S., Lin C.W., Roy S. Sunet M.T. Wireless video transport using conditional retransmission and low-delay interleaving // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2002. Vol. 12. Iss. 6. PP. 558–565. DOI:10.1109/TCSVT. 2002.800326

- 14. Lamri M.A., Abilov A., Vasiliev D., Kaisina I., Nistyuk A. Application Layer ARQ Algorithm for Real-Time Multi-Source Data Streaming in UAV Networks // Sensors. 2021. Vol. 21. Iss. 17. P. 5763. DOI:10.3390/s21175763
- 15. Zhai F., Eisenberg Y., Pappas T.N., Berry R., Katsaggelos A.K. Joint source-channel coding and power allocation for energy efficient wireless communications // Proceedings of the 41st Allerton Conference on Communication, Control and Computing, (Monticello, USA, 1-3 October 2003). 2003.
- 16. Kondi L.P., Ishtiaq F., Katsaggelos A.K. Joint source channel coding for motion-compensated DCT-based SNR scalable video // IEEE Transactions on Image Processing, 2002. Vol. 11. Iss. 9. PP. 1043-1052. DOI:10.1109/TIP.2002.802507
- 17. Paxson V., Allman M., Chu J., Sargent M. Computing TCP's Retransmission Timer // RFC 6298. 2011. DOI:10.17487/ RFC6298
- 18. Hasslinger G., Hohlfeld O. The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet // Proceedings of the 14th GI/ITG Conference: Measurement, Modeling and Evaluation of Computer and Communication Systems (Dortmund, Germany, 31 March-02 April 2008). VDE, 2008.
- 19. Rondeau E., Lepage F., Georges J. P., Morel G. Chapter 3 Measurements and Sustainability // In: Dastbaz M., Pattinson C., Akhgar B. (ed.) Green Information Technology. A Sustainable Approach: Measurements and Sustainability. Elsevier, 2015. PP. 29-59. DOI:10.1016/B978-0-12-801379-3.00003-6
- 20. Hofmann U., Pfeiffenberger T., Hechenleitner B. One-way-delay measurements with CM toolset // Proceedings of the International Performance, Computing, and Communications Conference (Phoenix, USA, 05-08 February 2000). IEEE, 2000. PP. 41-47. DOI:10.1109/PCCC.2000.830300

Статья поступила в редакцию 12.06.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 04.07.2023.

The article was submitted 13.06.2023; approved after reviewing 03.07.2023; accepted for publication 04.07.2023.

### Информация об авторе:

ЛАМРИ Мохаммед Амин аспирант кафедры «Радиотехника» Приборостроительного факультета Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова

https://orcid.org/0000-0001-7226-7087

АБИЛОВ Альберт Винерович

кандидат технических наук, первый проректор-проректор по учебной работе Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

https://orcid.org/0000-0003-2358-4478

**ПРЕСНЕЦОВ** программист 000 «Нефтемаш»

Александр Михайлович | https://orcid.org/0009-0009-1453-4082

Научная статья УДК 004.27 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-42-59



# Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности

Аммар Салех Али Мутханна, muthanna.asa@sut.ru

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

Аннотация: Статья посвящена научной проблеме интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности. Подобные проблемы являются наиболее актуальными сегодня в связи с появлением концепции интегрированных сетей «космосвоздух-земля-море». Разработана модель сети, в которой предложено для уменьшения задержки и энергопотребления использовать мобильные серверы граничных вычислений, расположенные на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), а также метод выгрузки трафика с наземной сети на мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА. При этом процедура выгрузки трафика является трехуровневой, а на оконечных устройствах используется программный профилировщик, который определяет сложность вычисляемой задачи и по результатам его работы механизм принятия решения делает вывод о необходимости выгрузки трафика. Для оптимизации структуры сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности с целью минимизации задержки и энергопотребления при выгрузке трафика с наземной сети на серверы граничных вычислений БПЛА разработан метаэвристический алгоритм на основе хаотического «роя сальп». Результаты моделирования показали, что предложенные модель и метод обеспечивают существенное уменьшение задержки и энергопотребления, а также доли заблокированных задач при выгрузке трафика по сравнению с известными решениями.

**Ключевые слова**: интегрированные сети, сеть «воздух–земля», сети высокой и сверхвысокой плотности, задержка, энергопотребление, алгоритм «роя сальп»

**Ссылка для цитирования**: Мутханна А.С.А. Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух–земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 42–59. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-42-59

# A Model for Integrating Edge Computing into an Air-Ground Network Structure and Offloading Traffic Method for High and Ultra-High Densities Internet of Things Networks

Ammar Muthanna, muthanna.asa@sut.ru

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

**Abstract:** The scientific challenge of incorporating edge computing into the air-ground network architecture for high and ultra-high density Internet of Things networks is the focus of this article. These issues are particularly important right now because of the concept of "space-air-ground-sea" inegrated networks. A mechanism for offloading traffic from the ground network to mobile edge computing servers on UAVs has also been devised. This network model suggests using mobile edge computing servers deployed on unmanned aerial vehicles (UAVs) to reduce latency and

power consumption. At the same time, a software profiler is utilized on the terminal devices to identify the difficulty of the computed task and, based on that determination, a three-level technique for offloading traffic is used.

**Keywords:** integrated networks, air-ground network, high and ultra-high density networks, latency, power consumption, salp swarm algorithm

**For citation:** Muthanna A. A Model for Integrating Edge Computing into an Air-Ground Network Structure and Offloading Traffic Method for High and Ultra-High Densities Internet of Things Networks. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3):42–59. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-42-59

#### Введение

Развитие сетей связи в настоящее время осуществляется в направлении создания интегрированных сетей связи «космос-воздух-земля-море» (SAGSIN, аббр. от англ. Space-Air-Ground-Sea Integrated Networks) [1]. Это ни в коей мере не отрицает достижений в области сетей связи пятого и шестого поколений, сетей связи высокой и сверхвысокой плотности, сетей связи с ультрамалыми задержками [2, 3]. Напротив, интеграция ресурсов в сети SAGSIN должна позволить эффективно использовать возможности таких сетей.

Сценарии высокоплотного и сверхплотного построения сетей связи [4, 5] призваны в полной мере использовать возможности концепции Интернета Вещей, а сети с ультрамалой задержкой – концепции Тактильного Интернета. Для решения задач по построению таких сетей требуется использовать новые технологии в области сетей и систем связи [6]. К таким технологиям относятся, например, распределенные граничные вычисления (МЕС, аббр. от анал. Mobile Edge Computing) [7–10] и беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [11–15].

Беспилотные летательные аппараты могут быть использованы для сетевой поддержки в современных сетях для решения разнообразных задач, таких как увеличение покрытия сети, при чрезвычайных ситуациях, граничные вычисления на базе БПЛА и т. д. [16–21].

В статье исследуется возможность использования БПЛА в качестве мобильных серверов граничных вычислений для поддержки наземных высокоплотных и сверхплотных сетей Интернета Вещей с целью уменьшения задержки и энергопотребления, а также уменьшения доли заблокированных задач при выгрузке трафика в воздушный сегмент сети (БПЛА). Эта цель достигается путем разработки модели сети, метода выгрузки трафика и оптимизации полученных решений с использованием метаэвристического алгоритма на базе хаотического SSA (аббр. от англ. Salp Swarm Algorithm – алгоритм «роя сальп»).

Модель сети. Разработанная модель сети представлена на рисунке 1. Она включает в себя наземный и воздушный сегменты.

#### А) Наземный сегмент

Наземный сегмент представляет собой сеть Интернета Вещей с высокой плотностью или сверхвысокой плотностью с распределенными оконечными устройствами. Это четырехуровневая сеть, для обеспечения функционирования которой используется технология МЕС.

Первый уровень включает в себя распределенные устройства IoT, например, датчики и исполнительные механизмы. Эти устройства используют измерения параметров окружающей среды.

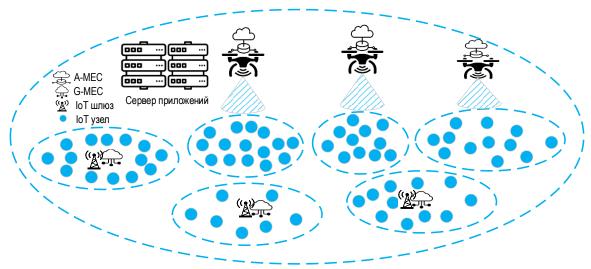


Рис. 1. Разработанная модель сети

Fig. 1. Developed Network Model

Сценарий высокоплотного и сверхплотного развертывания предполагает, что количество таких устройств будет очень велико; они могут быть распределены по широкому диапазону областей, поддерживают различные интерфейсы, в том числе интерфейс «воздух-земля» (A2G, аббр. от англ. Airto-Ground) с БПЛА.

Наземные распределенные серверы граничных вычислений (G-MEC, аббр. от англ. Ground MEC) представляют собой второй уровень такой сети.

Третий уровень образуется шлюзами сети Интернета Вещей. Этот уровень представляет собой интерфейс между оконечными устройствами и облачным сервером сети Интернета Вещей [22]. При этом предполагается, что все шлюзы IoT в рассматриваемой сети подключены и к воздушной плоскости.

Четвертый уровень – это прикладной уровень, а именно: облачный сервер приложений. Все собранные данные передаются через ІоТ-шлюзы или воздушный сегмент на сервер приложений, где данные анализируются и хранятся. Принятые данные предварительно обрабатываются на оконечных устройствах и граничных, что обеспечивается на основе разработанного метода выгрузки трафика.

#### Б) Воздушный сегмент

Воздушный сегмент включает в себя множество БПЛА, например, микродронов и квадрокоптеров,

развернутых для поддержки сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности. Каждый БПЛА имеет два интерфейса связи: A2G и A2A (аббр. от англ. Air-to-Air – «воздух-воздух»). A2G – это интерфейс, используемый для связи с наземным сегментом, а интерфейс A2A – для связи между БПЛА.

Каждый БПЛА имеет граничный сервер A-MEC (аббр. от англ. Air MEC) для предоставления вычислительных ресурсов наземной сети. A-MEC представляет собой микрооблачный сервер, обеспечивающий процедуру выгрузки трафика.

Каждый БПЛА обслуживает кластер оконечных устройств Интернета Вещей. При этом устройства ІоТ решают, присоединиться ли к кластеру узла БПЛА или связаться с ІоТ-шлюзом на основе индикатора уровня принимаемого сигнала (RSSI, аббр. англ. Received Signal Strength Indicator). Оконечное устройство ІоТ решает также, к какому БПЛА присоединиться или присоединиться к ІоТ-шлюзу, сравнивая их RSSI.

# Математическая модель исследуемой сети и ее составляющих

Прежде всего, определим необходимые для исследования параметры и переменные. В таблице 1 приведены обозначения всех рассматриваемых параметров и переменных.

#### ТАБЛИЦА 1. Параметры и переменные

TABLE 1. Parameters and Variables

Обозначение	Описание
D	Набор БПЛА, развернутый в воздушной плоскости
R MEC-A	Вычислительные ресурсы сервера МЭК-А
N	Общее число развернутых БПЛА в воздухе
h	Высота БПЛА
<i>x, y</i>	Характеристики местоположения БПЛА (двумерные наземные координаты)
XDi, YDi	Характеристики местоположения <i>i</i> -го БПЛА, <i>D<sub>i</sub></i> (двумерные наземные координаты)
$h_{Di}$	Высота $i$ -го БПЛА ( $D_i$ )
P <sup>Di</sup>	Текущее местоположение і-го БПЛА, Ди
$T^{Di}$	Траектория БПЛА $D_i$
$G_{x^{Di}}$	Множество х местоположений БПЛА $D_i$ , формирующих траекторию $T^{\mathcal{D}i}$
$G_{\mathcal{Y}}^{Di}$	Множество у местоположений БПЛА $D_i$ , формирующих траекторию $T^{\mathcal{D}i}$
I	Набор оконечных устройств IoT, развернутых в наземном сегменте
М	Общее количество устройств IoT, развернутых в наземном сегменте
$P^{lj}$	Текущее местоположение IoT-устройства $I_j$
XIj, YIj	Характеристики местоположения $I_{j}$ (местоположение $xy$ )
С	Набор сформированных кластеров
$CM_j^{Ci}$	$j$ -й член кластера $i$ -го кластера ( $C_i$ )
Ki	Общее количество членов кластера $i$ -го кластер ( $C_i$ )
G	Набор IoT-шлюзов, развернутых в наземном сегменте
W	Общее количество IoT-шлюзов, развернутых в наземном сегменте

Обозначение	Описание
$L_{Ii,Dj}$	Расстояние между оконечным устройством IoT $I_i$ и БПЛА $D_j$
$L_{Ii,Gj}$	Расстояние между оконечным устройством IoT $I_i$ и IoT-шлюзом $G_j$
₫Di	Продолжительность полета БПЛА $D_i$
$h_{Gj}$	Высота ІоТ-шлюза $G_i$
X <sub>Gi</sub> , y <sub>Gi</sub>	$x$ - $y$ местоположения $IoT$ -шлюза $G_i$
ts	Продолжительность временного интервала
$\gamma_{nts}^{Di}$	Коэффициент усиления канала БПЛА $D_i$ для $n$ -го кадра
γο	Принимаемая мощность на эталонном расстоянии 1 м
$\Omega_{ extit{C-Ij},Di}$	Энергия, потребляемая в восходящем соединении между $I_0$ Т-устройством $I_j$ и БПЛА $D_i$
$\Omega_{ extit{C-Di,Ij}}$	Энергия, потребляемая в нисходящем соединении между БПЛА $D_i$ и $IoT$ -устройством $I_j$
$\sigma^2$	Мощность шума
В	Ширина полосы шума
S	Количество данных в задаче, т. е. размер в байтах
Z	Объем данных, полученных в результате обработки выгруженной задачи
$\Omega_{M ext{-}Di}$	Энергозатраты БПЛА $D_i$ на механические операции
$V_{Di}^{nts}$	Вектор скорости БПЛА $D_i$ на $n$ -ом кадре
$m_{Di}$	Масса БПЛА $D_i$
UAV <sub>ID</sub>	Идентификация БПЛА
D <sub>clus,Ii</sub>	Решение IoT-устройства $I_i$ присоединиться к кластеру БПЛА
NC <sub>bit</sub>	Требуемые (CPU) циклы для обработки одного бита данных
$D_{h ext{-}IoT}$	Время, необходимое для обработки вычислительной задачи локально на ІоТ-устройстве
$\Omega_{exec ext{-}loT}$	Энергия, необходимая для обработки вычислительной задачи локально на IoT-устройстве
$\Omega_{available ext{-}aft ext{-}loT}$	Оставшаяся энергия IoT-устройства после обработки задачи с использованием IoT-ресурсов
$\Omega_{available ext{-}bef ext{-}loT}$	Доступный уровень энергии ІоТ-устройства перед обработкой выгруженной задачи
$\Omega_{Th ext{-}IoT}$	Пороговый уровень энергии оконечного IoT-устройства
$\delta_{alloc ext{-}IoT}$	Ресурсы обработки оконечного IoT-устройства, выделенные для вычислительной задачи
$\omega_{loT}$	Общие ресурсы обработки оконечного IoT-устройства
$\beta_{F-IoT}$	Бинарное решение о выгрузке определяется ІоТ-устройством
$\beta_{\Omega\text{-}IoT}$	Бинарное энергетическое решение о выгрузке, принятое IoT-устройством
$B_{D ext{-}IoT}$	Бинарное решение о выгрузке по времени определяется ІоТ-устройством
τ	Пороговое время вычислительной задачи поддерживает требования параметров качества обслуживания (QoS)
D <sub>h-G-мес</sub>	Общее время, необходимое для обработки вычислительной задачи на сервере G-MEC, запрошенное оконечным IoT-устройством
D <sub>exec-G-MEC</sub>	Общее время, необходимое для выполнения вычислительной задачи на сервере G-MEC
δ <sub>alloc-G-MEC</sub>	Ресурсы обработки блока G-MEC, выделенные для вычислительной задачи
$\omega_{G ext{-}MEC}$	Общие ресурсы обработки блока G-MEC
$T_{up ext{-}Ij ext{-}Gi}$	Общее время восходящей линии связи между оконечным IoT-устройством $\mathit{I}_{j}$ и IoT-шлюзом $\mathit{G}_{i}$
$T_{up ext{-}Gi ext{-}Ij}$	Общее время нисходящего канала между IoT-шлюзом $G_i$ и оконечным IoT-устройством $I_j$
T <sub>u-tx-Ij-Gi</sub>	Общая задержка передачи по восходящей линии связи между оконечным $I$ IoT-устройством $I_j$ и $I$ IoT-шлюзом $G_i$
T <sub>d-tx-GiIj</sub>	Общая задержка передачи по нисходящей линии связи между IoT-шлюзом $G_i$ и оконечным IoT-устройством $I_j$
$T_{pro}$	Задержка распространения
β <i>АF-G-МЕС</i>	Бинарное решение о принятии запроса на выгрузку, принятое G-MEC
Dh-A-MEC	Общее время, необходимое для обработки вычислительной задачи на сервере А-МЕС, выгруженной оконечным ІоТ-устройством
t <sub>up-Ij-Di</sub>	Общее время восходящей линии связи, необходимое для выгрузки данных задачи с оконечного IoT-устройства $I_j$ и БПЛА $D_i$
$t_{dw ext{-}Di ext{-}Ij}$	Общее время нисходящей линии связи, необходимое для отправки результата с БПЛА $D_i$ на $I$ оТ-устройство $I_j$

Обозначение	Описание
D <sub>exec-A-MEC</sub>	Общее время, необходимое для выполнения вычислительной задачи на сервере А-МЕС
δ <sub>alloc-A-MEC</sub>	Ресурсы обработки блока А-МЕС, выделенные для вычислительной задачи
ω <sub>A-MEC</sub>	Общие ресурсы обработки блока А-МЕС
T <sub>u-tx-Ij-Di</sub>	Суммарная задержка передачи по восходящей линии связи между оконечным IoT-устройством $I_j$ и БПЛА $D_i$
T <sub>d-tx-Dilj</sub>	Суммарная задержка передачи по нисходящей линии связи между БПЛА $D_i$ и оконечным $I$ оТ-устройством $I_j$
$\beta_{D-A-MEC}$	Бинарное решение о времени принятия запроса на выгрузку, принятое А-МЕС
$\beta_{\Omega\text{-}A\text{-}MEC}$	Бинарное энергетическое решение о принятии запроса на выгрузку, принятое А-МЕС
I()	Индикатор режима
$\Omega_{Th ext{-}IoT}$	Пороговый уровень энергии оконечного IoT-устройства
$\Omega_{available ext{-}aft ext{-}A ext{-}MEC}$	Остаток энергии БПЛА после выполнения задачи с использованием ресурсов А-МЕС
Ω <sub>Th-A-MEC</sub>	Пороговый уровень энергии БПЛА
Ω <sub>exec-A-MEC</sub>	Потребление энергии из-за вычислений при выполнении выгруженной задачи в А-МЕС
β <i>АF</i> - <i>A</i> - <i>MEC</i>	Бинарное решение о принятии запроса на выгрузку, принятое А-МЕС
Ф	Набор позиций БПЛА, $D_{i_j}$ в каждом временном интервале
$\alpha_D$	Весовой коэффициент времени
$\alpha_{\Omega}$	Весовой коэффициент энергии
$V_{ m max}$	Максимальная скорость БПЛА
X <sub>min-Di</sub> , X <sub>max-Di</sub> , y <sub>min-Di</sub> , and y <sub>max-Di</sub>	Минимальное и максимальное положенияв координатах $xy$ БПЛА $D_i$
δalloc-A-MEC-max	Максимальные вычислительные ресурсы А-МЕС, которые могут быть выделены для вычислений
δ <sub>alloc-A-MEC-Tj</sub>	Ресурсы обработки А-МЕС, выделенные для вычислений, связанных с задачей $\mathit{T}_{j}$
$P^i$	Вектор положения сальп
$n_s$	Общее количество сальп
F	Положение источника энергии
$U_b$	Верхняя граница, связанная с каждым измерением в пространстве поиска
$L_b$	Нижняя граница, связанная с каждым измерением в пространстве поиска
$C_1$ , $C_2$ , and $C_3$	Коэффициенты SSA
Δ	Текущая версия SSA
$\Delta_{max}$	Максимальное количество итераций SSA
m	Количество измерений в пространстве поиска
R <sub>b-Di-nts</sub>	Достижимая скорость выгрузки в $n$ -ом временном интервале

В воздушном сегменте создается набор БПЛА D (каждый БПЛА имеет граничный сервер МЕС-А с возможностью ресурсов обработки  $R_{\mathit{MEC-A}}$ ), определенный в следующем виде:

$$D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_N\} \quad \text{при} \quad \forall N \in \mathbb{R}, \tag{1}$$

где N – общее количество развернутых БПЛА в воздушной плоскости.

Трехмерная декартова система координат с координатами (x, y, h) используется для определения местоположения БПЛА и IoT-устройств, как показано на рисунке 2.

Местоположение БПЛА характеризуется двумерной наземной координатой x и y и высотой h. Таким образом, текущее местоположение БПЛА  $D_i$  равно  $P^{Di}$  и характеризуется  $x_{Di}$ ,  $y_{Di}$  и  $h_{Di}$ . Оконечные ІоТустройства расположены в плоскости xy в разных

местах. Каждый БПЛА движется по траектории  $T^{Di}$  с фиксированной высотой  $h_{Di}$ , имея два набора местоположений xy,  $G_x^{Di}$  и  $G_y^{Di}$ .

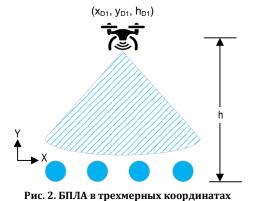


Fig. 2. UAV in Three-Dimensional Coordinates

Сети ІоТ используют набор оконечных устройств I, определенный в (2). Расположение ІоТ-устройств  $I_j$  равно  $P^{lj}$  и характеризуется  $x_{lj}$  и  $y_{lj}$ . Некоторые устройства сгруппированы в кластеры БПЛА, а остальные узлы взаимодействуют непосредственно со шлюзами. Набор развернутых кластеров равен C, определенному в (3, 4).

$$I = \{I_1, I_2, I_3, \cdots, I_M\}$$
 при  $\forall M \in \mathbb{R}$ , (2)

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_N\}$$
 при  $\forall N \in \mathbb{R}$ , (3)

$$C_{i} = \{D_{i}, CM_{1}^{Ci}, CM_{2}^{Ci}, \cdots, CM_{ki}^{Ci}\}$$
 при  $\forall K_{i} \in \mathbb{R}, C_{i} \subset C, D_{i} \in D$ ,  $CM_{i}^{Ci} \in I$ , (4)

где M — общее количество развернутых ІоТустройств;  $CM_j^{Ci}$  — j-й член i-го кластера;  $K_i$  — общее количество членов i-го кластера.

Набор IoT-шлюзов равен G и определяется следующим образом:

$$G = \{G_1, G_2, G_3, \dots, G_W\}$$
 при  $\forall W \in \mathbb{R}$ , (5)

где W — общее количество IoT-шлюзов.

Расстояние между оконечным устройством Интернета Вещей  $I_i$  и БПЛА  $D_j$  равно  $L_{li,Dj}$ , в соответствии с (6), а расстояние до шлюза  $G_j$ , равно  $L_{li,Gj}$  как это определено в (7).

$$L_{l_{i,D_j}} = \sqrt{(x_{li} - x_{Dj})^2 + (y_{li} - y_{Dj})^2 + h_{D_j}^2}, \quad (6)$$

$$L_{I_{i,G_{j}}} = \sqrt{\left(x_{Ii} - x_{Gj}\right)^{2} + \left(y_{Ii} - y_{Gj}\right)^{2} + h_{G_{j}}^{2}}.$$
 (7)

Каждый БПЛА имеет продолжительность полета  $d^{\mathrm{Di}}$ , которая зависит от энергии, потребляемой в процессах связи, вычислений и полета. Процессы, происходящие на одном БПЛА, отличаются от процессов, происходящих на другом; таким образом, продолжительность полета разных БПЛА неодинакова. Общее время полета разбивается на временные интервалы с длительностью интервала  $t_s$ , при этом процессы связи и вычислений выполняются в этих интервалах. В течение каждого временного интервала  $t_s$  местоположение БПЛА аппроксимируется как фиксированное. Набор местоположений xy соответствует траектории БПЛА  $D_i$  и может быть определен следующим образом:

$$G_x^{Di} = \{x_{Di}^{ts}, x_{Di}^{2ts}, x_{Di}^{3ts}, \dots, x_{Di}^{qts}\} \quad \forall D_i \in D, \quad (8)$$

$$G_y^{Di} = \{y_{Di}^{ts}, y_{Di}^{2ts}, y_{Di}^{3ts}, \dots, y_{Di}^{qts}\} \quad \forall D_i \in D. \quad (9)$$

При использовании неортогонального множественного доступа (NOMA, аббр. от англ. Non-Orthogonal Multiple Access) все оконечные устройства одновременно используют общую длительность кадра  $t_s$  для передачи данных по восходящему и нисходящему каналам. Будем предполагать, что связь между БПЛА и IoT-устройствами осуществляется в пределах прямой видимости.

Таким образом, усиление канала для n-го кадра можно рассчитать по выражению (10), где  $\gamma_0$  – коэффициент усиления канала на эталонном расстоянии в один метр, когда передаваемая мощность составляет 1 Вт.

#### Модель энергопотребления

БПЛА потребляют энергию тремя способами: потребление энергии из-за вычислений, потребление энергии из-за связи и потребление энергии из-за механических операций. Энергия, потребляемая изза вычислений, рассчитывается на основе количества выгружаемых данных. Энергия, потребляемая из-за связи, основана на объеме данных, передаваемых по восходящей и нисходящей линиям связи [23]. Энергия, потребляемая в восходящем соединении между IoT-устройством  $I_i$  и БПЛА  $D_i$ , равна  $\Omega_{C-I_i,D_i}$ и рассчитывается на основе объема выгружаемых данных S, как отмечено в (11). Отметим, что энергия, потребляемая в нисходящем соединении между БПЛА  $D_i$  и IoT-устройством  $I_i$ , составляет  $\Omega_{C-D_i,I_i}$  и рассчитывается на основе объема данных, не связанных с обработкой запроса на выгрузку Z, как в (12). Канал моделируется аддитивным белым гауссовым шумом мощности  $\sigma^2$  и шириной полосы B.

Энергия, потребляемая при связи по восходящей и нисходящей линиям связи, рассчитывается в виде выражений (11, 12). Потребление энергии изза механических операций  $\Omega_{M-Di}$  смоделировано в [24] и может быть рассчитано для длительности временного интервала на основе вектора скорости БПЛА V, и массы БПЛА  $m_{Di}$  по выражениям (13, 14).

$$\gamma_{nts}^{Di}(x_{Di}^{nts}, y_{Di}^{nts}) = \frac{\gamma_0}{(x_{Di}^{nts} - x_{Ij}^{nts})^2 + (y_{Di}^{nts} - y_{Ij}^{nts})^2}$$
 при  $\forall n \in \mathbb{R}, I_j \in I, D_i \in D$ , (10)

$$\Omega_{C-Ij,Di}(s, x_{Di}^{nts}, y_{Di}^{nts}) = \frac{\sigma^2 t_s \left(2^{S/Bt_s} - 1\right)}{\gamma_{nts}^{Di}(x_{Di}^{nts}, y_{Di}^{nts})} \cdot \frac{1}{\left(1 - \left(2^{S/Bt_s} - 1\right)\right)} \quad \forall n \in \mathbb{R}, I_j \in I, D_i \in D,$$
(11)

$$\Omega_{C-Di,Ij}(Z,x_{Di}^{nts},y_{Di}^{nts}) = \frac{\sigma^{2}t_{s}\left(2^{Z/B_{t_{s}}}-1\right)}{\gamma_{nts}^{Di}(x_{Di}^{nts},y_{Di}^{nts})} \cdot \frac{1}{\left(1-\left(2^{Z/B_{t_{s}}}-1\right)\right)} \quad \forall \ n \in \mathbb{R}, I_{j} \in I, \ D_{i} \in D, \tag{12}$$

$$\Omega_{M-Di}(x_{Di}^{nts}, y_{Di}^{nts}) = 0.5 m_{Di} t_s \|v_{Di}^{nts}\|^2 \,\forall \, n \in \mathbb{R}, D_i \in D, \tag{13}$$

$$\|v_{Di}^{nts}\| = \sqrt{(x_{Di}^{nts} - x_{Di}^{nts+1})^2 + (y_{Di}^{nts} - y_{Di}^{nts+1})^2} / t_s \ \forall \ n \in \mathbb{R}, \ D_i \in D.$$
 (14)

#### Формирование кластера

Кластеры формируются по раундам, по две фазы на каждый раунд; фаза формирования кластера и фаза обеспечения связи. В начале каждого раунда каждый БПЛА транслирует сообщение о соединении в формате, представленном в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Формат сообщения о присоединении

TABLE 2. Format of Join Message

Сообщение о присоединении				
Идентификация			Технические характеристики канала	
Идентификатор, ID	Расположение			
БПЛА <sub>ID</sub>	$x_{Di}$ $y_{Di}$ $H_{Di}$			

Сообщение о присоединении содержит идентификацию БПЛА: идентификатор БПЛА (UAV $_{1D}$ ),

координаты местоположения БПЛА  $(x, y \ h)$  и технические характеристики канала связи. Оконечные IoT-устройства получают сообщения о присоединении от БПЛА и решают, следует ли присоединиться к БПЛА или взаимодействовать с IoT-шлюзом.

Оконечное IoT-устройство вычисляет расстояние до БПЛА  $L_{li,Dj}$  на основе (6) и расстояние до IoT-шлюза  $L_{li,Dj}$  на основе (7) и выбирает кратчайший путь. IoT-устройства, которые получают несколько сообщений о присоединении, выбирают тот, у которого кратчайший путь связи, и сравнивают этот путь с путем к ближайшему IoT-шлюзу. Более того, IoT-устройства вне зоны действия IoT-шлюзов, выбирают ближайший БПЛА для присоединения.

Таким образом, решение о присоединении к кластеру БПЛА  $D_{clus}$  принимается согласно выражению:

$$D_{clus-I_{i,}} = I\left(L_{I_{i,G_{j}}}, \min\left(L_{I_{i,D_{j}}}\right)\right) = \begin{cases} 0 & IF\left(L_{I_{i,G_{j}}} \leq \min(L_{I_{i,D_{j}}})\right) \\ 1 & IF\left(L_{I_{i,G_{j}}} > \min(L_{I_{i,D_{j}}})\right) \lor (L_{I_{i,G_{j}}} \to \infty) \end{cases} \forall D_{j} \in D, \qquad I_{i} \in I$$
 (15)

Оконечные IoT-устройства при наличии кратчайшего пути к выбранному БПЛА отправляют ответное сообщение с положительным решением о кластеризации. Таким образом, формируются кластеры, в которых БПЛА выступает в роли головного узла кластера, и этап формирования кластера заканчивается. Оконечные IoT-устройства взаимодействуют и обмениваются данными с головным узлом кластера (БПЛА), который управляет кластером на фазе обеспечения связи.

#### Метод выгрузки трафика

Рассмотрим разработанный метод выгрузки трафика с наземной сети на мобильные серверы граничных вычислений на БПЛА. Оконечные ІоТустройства обрабатывают данные, используя имеющиеся у них ресурсы, т. е. осуществляется локальное выполнение требуемых задач. Такое решение допустимо для только для задач, требующих ограниченных ресурсов, в том числе и энергоресурсов. Задачи, требующие больших ресурсов, следует переносить на G-MEC или на A-MEC. Разработанный метод выгрузки является бинарным, поскольку предполагается, что БПЛА используются только для поддержки высокоплотных и сверхплотных сетей Интернета Вещей и не имеют иных локальных задач. На рисунке 3 представлен алгоритм реализации разработанного метода выгрузки с указанием основных шагов. Оконечные устройства и блоки МЕС используют ранее разработанную структуру, представленную в [25].

БПЛА можно рассматривать как мобильные серверы граничных вычислений, которые получают выгруженные задачи от оконечных ІоТ-устройств и либо обрабатывают их сами, либо переносят на другие граничные вычислительные узлы. Выгрузка трафика между наземным и воздушным сегментами осуществляется по восходящим и нисходящим интерфейсам с использованием дуплекса с частотным разделением. NOMA используется для улучшения связности и спектральной эффективности обслуживаемых кластеров.

Разработанный метод выгрузки состоит из трех уровней, каждый из которых представляет собой сервер граничных вычислений. На оконечных устройствах есть программный профилировщик, который вычисляет спецификации задачи, включая объем данных, т. е. размер в байтах S и требуемые циклы центрального процессора (CPU, аббр. от англ. Central Processing Unit) для обработки одного бита данных  $NC_{bit}$ .

Планировщик ресурсов оконечного устройства предоставляет механизму принятия решений доступные в настоящее время ресурсы для решаемой задачи. Механизм принятия решений оконечного устройства рассчитывает необходимое время для обработки задачи  $D_{h-loT}$ , необходимую энергию для

обработки задачи  $\Omega_{exec-oT}$  и остаточную энергию после обработки задачи с использованием ресурсов IoT,  $\Omega_{available-aft-IoT}$  следующим образом:

$$D_{h-IoT} = \frac{S.NC_{bit}}{\delta_{alloc-IoT}}, \ \delta_{alloc-IoT} \in \omega_{IoT}, \eqno(16)$$

$$\Omega_{exec-IoT} = S. NC_{bit} E_{Cyc-IoT}$$
 (17)

$$\Omega_{available-aft-IoT} = 
= \Omega_{available-bef-IoT} - \Omega_{exec-IoT}.$$
(18)

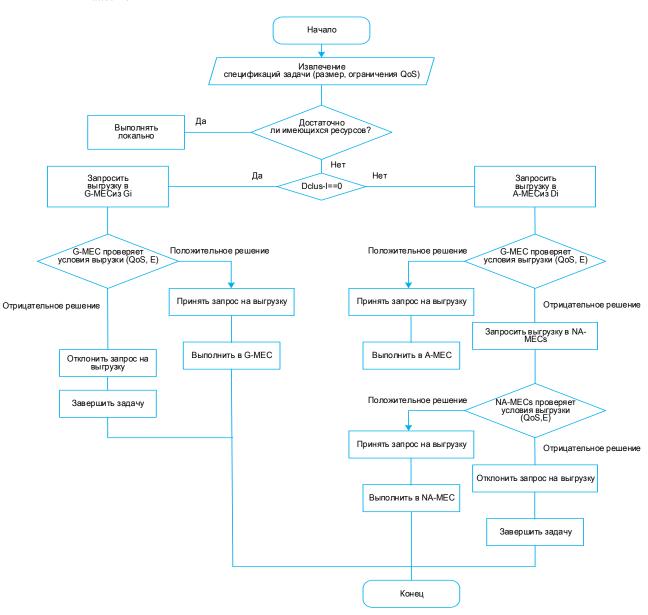


Рис. 3. Алгоритм выгрузки трафика для разработанного метода

Fig. 3. Offloading Traffic Algorithm for the Developed Method

На основе рассчитанных параметров QoS, задержки и энергопотребления принимается решение об обработке на месте или передачи задачи на граничный сервер МЕС.

Бинарное решение выгрузки  $B_{F-loT}$  рассчитывается следующим образом:

$$\beta_{\Omega-IoT} = I(\Omega_{available-aft-IoT}, \Omega_{Th-IoT}) = \begin{cases} 0 & IF \ (\Omega_{available-aft-IoT} \le \Omega_{Th-IoT}) \\ 1 & IF \ (\Omega_{available-aft-IoT} > \Omega_{Th-IoT}) \end{cases}$$
(19)

$$\beta_{D-IoT} = I(D_{h-IoT}, \tau) = \begin{cases} 0 & IF \ (D_{h-IoT} \le \tau) \\ 1 & IF \ (D_{h-IoT} > \tau) \end{cases}$$
(20)

$$\beta_{F-IoT} = \beta_{\Omega-IoT} \vee \beta_{D-IoT}. \tag{21}$$

Пусть доступных ресурсов, включая энергопотребление, оконечного устройства достаточно для выполнения задачи. В этом случае бинарное решение о выгрузке минимально, т. е.  $\beta_{F-loT} = 0$ , и устройство не выполняет выгрузку. Однако, если ресурсов недостаточно, включая ограничения по энергопотреблению устройства, конечное устройство решает передать задачу, т. е.  $\beta_{F-loT} = 1$ , на соответствующий граничный сервер MEC.

Устройство, подключенное к IoT-шлюзу, т. е. не являющееся членом кластера БПЛА, запрашивает выгрузку в G-MEC. Сообщение с запросом содержит необходимую информацию для обработки задачи и идентификации устройства. G-MEC обрабатывает полученные запросы на выгрузку и отправляет информацию о задаче в механизм принятия решений: принять или отклонить запрос. Это зависит от доступных вычислительных ресурсов G-MEC и ограничений QoS запрашиваемой задачи. Планировщик ресурсов G-MEC предоставляет механизму принятия решений доступные ресурсы для принятия решения о приеме или отклонении запрошенной задачи.

Механизм принятия решений G-MEC вычисляет время, необходимое для обработки задачи по запросу  $D_{hG-MEC}$ , следующим образом:

$$D_{exec-G-MEC} = \frac{S.NC_{bit}}{\delta_{alloc-G-MEC}},$$
 (22)

 $\delta_{alloc-G-MEC}\in\omega_{G-MEC},$ 

$$D_{h-G-MEC} = D_{exec-G-MEC} + T_{up-Ij-Gi} + T_{dw-Gi-Ii},$$
(23)

$$T_{up-Ij-Gi} = T_{u-tx-Ij-Gi} + T_{pro}, (24)$$

$$T_{dw-Gi-Ij} = T_{d-tx-Gi-Ij} + T_{pro}. (25)$$

Затем механизм принятия решений определяет бинарное решение о принятии или отклонении запроса на выгрузку  $\beta_{AF-G-MEC}$  путем сравнения общего времени, необходимого для обработки запрошенной задачи  $D_{hG-MEC}$ , со временем QoS. При отрицательном решении задача завершается.

$$\beta_{AF-G-MEC} = I(D_{h-G-MEC}, \tau) = = \begin{cases} 1 & IF \ (D_{h-G-MEC} \le \tau) \\ 0 & IF \ (D_{h-G-MEC} > \tau) \end{cases}$$
 (26)

#### Выгрузка в воздушный сегмент

В случае, если механизм принятия решений устройств – членов кластера, подключенных к БПЛА, отклоняет локальное выполнение задачи, то устройства запрашивают выгрузку у соответствующего БПЛА через интерфейс восходящей линии связи. Сервер граничных вычислений А-МЕС беспилотного летательного аппарата обрабатывает полученные запросы на выгрузку от обслуживаемых оконечных устройств, путем извлечения информации об устройстве и выполняемой задаче и предоставляет их механизму принятия решений А-МЕС.

Механизм принятия решений также получает информацию о доступных в данный момент времени ресурсах от планировщика ресурсов и вычисляет время, необходимое для обработки запрошенной задачи,  $D_{hA-MEC}$ . Это время включает время восходящей линии связи, необходимое для выгрузки данных задачи в БПЛА  $t_{up-lj-Di}$ , время нисходящей линии связи для отправки результата  $t_{dw-Di-lj}$ , и время вычислений  $t_{exec-A-MEC}$ . Анализ расчетов времени передачи по восходящей и нисходящей линиям связи представлен в Приложении I к статье [26].

$$D_{h-A-MEC} = T_{up-Ij-Di} + T_{dw-Di-Ij} + D_{exec-A-MEC},$$
(27)

$$D_{exec-A-MEC} = \frac{S.NC_{bit}}{\delta_{alloc-A-MEC}},$$

$$\delta_{alloc-A-MEC} \in \omega_{A-MEC},$$
(28)

$$T_{up-Ij-Di} = T_{u-tx-Ij-Di} + T_{pro}, \tag{29}$$

$$T_{dw-Di-Ii} = T_{d-tx-Di-Ii} + T_{pro}.$$
 (30)

Далее механизмом принятия решений вычисляется время в двоичном формате и принимается решение о принятии или отклонении запроса на выгрузку  $\beta_{DA-MEC}$  путем сравнения общего времени, необходимого для обработки запрошенной задачи,  $D_{hA-MEC}$ , со временем QoS.

$$\beta_{D-A-MEC} = I(D_{h-A-MEC}, \tau) = \\ = \begin{cases} 1 & IF \ (D_{h-A-MEC} \le \tau) \\ 0 & IF \ (D_{h-A-MEC} > \tau) \end{cases}$$
(31)

При отрицательном решении, т. е.  $\beta_{DA-MEC}=0$ , БПЛА  $D_i$  запрашивает ресурсы у соседнего БПЛА. БПЛА Di передает запрос на выгрузку БПЛА в рое. Связь между БПЛА осуществляется по ранее разработанной схеме маршрутизации, представленной в [27]. Кроме того, бинарное решение о принятии запроса по выгрузке  $\beta_{\Omega-A-MEC}$  рассчитывается путем сравнения оставшейся энергии БПЛА  $D_i$  после выполнения запрошенной задачи  $\Omega_{available-aft-A-MEC}$  с пороговым уровнем энергии БПЛА  $\phi$   $\Omega_{Th-A-MEC}$ . БПЛА сначала рассчитывает расход энергии на вычисление запрашиваемой задачи  $\Omega_{exec-A-MEC}$ , как в (32), и расход энергии на передачу результатов расчета  $\Omega_{c-Di,ij}$ , как в (12):

$$\Omega_{exec-A-MEC} = S.NC_{bit} E_{Cyc-A-MEC}, \tag{32}$$

$$\Omega_{available-aft-A-MEC} = \Omega_{available-bef-A-MEC} - 
\Omega_{exec-A-MEC} - \Omega_{C-Di,Ij}(R, x_{Di}^{nts}, y_{Di}^{nts}),$$
(33)

$$\beta_{\Omega-A-MEC} = I\left(\Omega_{available-aft-A-MEC}, \Omega_{Th-A-MEC}\right) = \\ = \begin{cases} 1 & IF \ (\Omega_{available-aft-A-MEC} \le \Omega_{Th-A-MEC}) \\ 0 & IF \ (\Omega_{available-aft-A-MEC} > \Omega_{Th-A-MEC}) \end{cases}$$
(34)

$$\beta_{AF-A-MEC} = \beta_{\Omega-A-MEC} \wedge \beta_{D-A-MEC}. \tag{35}$$

При отказе о приеме запроса на выгрузку БПЛА запрашивает выгрузку у соседнего БПЛА в рое с до-

ступными ресурсами. Беспилотный летательный аппарат  $D_i$  передает запрос на выгрузку соседним БПЛА. Этот запрос принимается и обрабатывается с помощью описанного ранее алгоритма. Соседние узлы отправляют ответы для принятия или отклонения запросов на выгрузку, а БПЛА завершает задачу или выгружает ее на основе полученных ответов.

# Оптимизация среднего энергопотребления и задержки для обработки задач, выгруженных на БПЛА, с помощью хаотического «роя сальп»

Описанная ранее схема выгрузки потребляемой энергии и задержка, необходимые для выполнения вычислительных задач, в основном зависит от ме-

стоположения БПЛА. Основная цель этого раздела – оптимизировать энергопотребление и минимизировать среднюю задержку для выполнения задач выгрузки.

Задача оптимизации определяется следующим по выражению (36) при ограничениях (37–42), где  $\varphi$  – множество позиций БПЛА  $D_i$  в каждом временном интервале;  $\alpha_D$  и  $\alpha_\Omega$  – весовые коэффициенты времени и энергии, соответственно;  $\delta_{alloc\text{-}A\text{-}MEC\text{-}max}$  – максимальные вычислительные ресурсы A-MEC, которые могут быть выделены для вычислений;  $V_{\text{max}}$  – максимальная скорость БПЛА;  $z_{\text{min-}Di}$ ,  $z_{\text{max-}Di}$ ,  $z_{\text{max-}Di}$  – минимальные и максимальные координаты  $z_{\text{max}}$  БПЛА  $z_{\text{max}}$ 

$$\min_{\varphi} \left( \sum_{i=1}^{k} \alpha_{D} D_{h-A-MEC}^{Di,Ij} + \sum_{i=1}^{k} \alpha_{\Omega} \left( \Omega_{C-Di,Ij} \left( Z, x_{Di}^{nts}, y_{Di}^{nts} \right) + \Omega_{C-Ij,Di} (s, x_{Di}^{nts}, y_{Di}^{nts}) + \Omega_{exec-A-MEC} \right) \right), \quad (36)$$

C1:

$$\sqrt{(x_{Di}^{nts} - x_{Di}^{nts+1})^2 + (y_{Di}^{nts} - y_{Di}^{nts+1})^2} / t_s \le V_{\text{max}} \ \forall n \in \mathbb{R}, D_i \in D,$$
(37)

C2: 
$$X_{\min-Di} < X_{Di} < X_{\max-Di} \quad \forall \ D_i \in D,$$
 (38)

C3: 
$$Y_{\min-Di} < Y_{Di} \le Y_{\max-Di} \quad \forall \ D_i \in D,$$
 (39)

C4:

$$\sum_{i=1}^{N_{f-Di}} \delta_{alloc-A-MEC-Tj} \leq \delta_{alloc-A-MEC-\max} \ \forall \ \delta_{alloc-A-MEC-Tj}, \ \delta_{alloc-A-MEC-\max} \in \omega_{A-MEC}, \tag{40}$$

C5: 
$$\beta_{AF-A-MEC} \in \{0,1\}, \tag{41}$$

**C6**:

$$\sum_{j=1}^{N_{f-Di}} \beta_{AF-A-MEC-Tj} \le k_i. \tag{42}$$

Первое ограничение С1 вводится для того, чтобы скорость БПЛА в любой момент времени не превышала максимальной. Ограничения С2 и С3 вводятся для обеспечения того, чтобы каждый БПЛА покрывал только запланированную область полета и избегал столкновений между БПЛА роя. С4 гарантирует, что вычислительные ресурсы, направленные на обработку различных параллельно выполняемых задач, меньше, чем максимальные ресурсы БПЛА, выделенные для вычислений.

# Хаотический «рой сальп» для получения оптимальных позиций БПЛА

SSA – это основанный на популяции сальп метаэвристический метод, который имитирует поведение сальп в океанах [28]. Это относительно новый класс оптимизации роя частиц, который имитирует семейство сальп [29]. Популяция сальп состоит из двух типов: сальпы-лидера и сальпы-последователя. Сальпа-лидер является первой сальпой в цепочке и отвечает за руководство роем. Сальпы, которые следуют за сальпой-лидером к источнику пищи, являются сальпами-последователями. Каждая сальпа занимает m-мерное пространство поиска, где m обозначает количество переменных в данной задаче, аналогично другим алгоритмам на основе роя [28]. Сальпы имеют вектор положения  $P^i$  из  $n_s$  элементов, который представляет общее количество развернутых роев и определяется следующим образом:

$$P^{i} = \{P_{1}^{i}, P_{2}^{i}, P_{3}^{i}, \cdots, P_{m}^{i}\}, i = 1, 2, 3, 4, \cdots, n_{s}. (43)$$

Сальпы ищут «место пищи» в пространстве и в результате поиска обновляют свои позиции до тех

пор, пока не достигнут источника пропитания, т. е. оптимального решения. Согласно уравнениям (44, 45), где F указывает положение пищи;  $U_b$  и  $L_b$  – верх-

няя и нижняя границы, связанные с каждым измерением в пространстве поиска, сальпа-лидер сначала обновляет свое положение; затем все следующие сальпы выслеживают его.

$$P_{j}^{1} = \begin{cases} F_{j} + C_{1} \left( \left( U_{b_{j}} - U_{l_{j}} \right) C_{2} + L_{b_{j}} \right), & C_{3} \geq 0 \\ F_{j} - C_{1} \left( \left( U_{b_{j}} - U_{l_{j}} \right) C_{2} + L_{b_{j}} \right), & C_{3} < 0 \end{cases}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m,$$

$$P_{j}^{z} = \frac{1}{2} \left( P_{j}^{z} + P_{j}^{z-1} \right) \quad 2 \leq z < n_{s}, \quad z \in \mathbb{Z}^{+},$$

$$(44)$$

$$P_j^z = \frac{1}{2} \left( P_j^z + P_j^{z-1} \right) \quad 2 \le z < n_s \,, \quad z \in \mathbb{Z}^+, \tag{45}$$

Работа алгоритма основана на коэффициентах С1, С2 и С3, которые используются для обновления положения сальпы при каждой итерации.

Коэффициент С1 вводится для поддержания уровня стабильности между разведкой и эксплуатацией и определяется следующим образом:

$$C_1 = 2e^{-\left(\frac{4\Delta}{\Delta_{\text{max}}}\right)^2},\tag{46}$$

где  $\Delta$  – текущая итерация;  $\Delta_{max}$  – максимальное количество итераций.

Другие коэффициенты могут быть обновлены с использованием случайных функций со значениями от 0 до 1. Для предлагаемой модели мы вводим хаотические карты для обновления коэффициентов рассматриваемого SSA [30].

Рассматриваемая карта является логистической и определяется следующим образом:

$$y(\Delta + 1) = ay(\Delta)[1 - y(\Delta)], a = 4,0, y(0) = 0,7.$$
 (47)

Таким образом, С2 может быть обновлен следующим образом:

$$C_2^{\Delta} = y(\Delta). \tag{48}$$

В SSA параллельно выполняет поиск в рабочем пространстве, чтобы получить решение, представляющее собой набор оптимальных положений роя БПЛА в течение каждого временного интервала. Алгоритм 1 выполняет поставленную задачу и получает оптимальное решение. Алгоритм используется во вложенном цикле с ранее представленным алгоритмом выгрузки.

Алгоритм «роя сальп» начинается с инициализации начальных параметров SSA на основе хаотических карт, включая нижнюю и верхнюю границу, а также максимальное количество итераций. Затем он случайным образом инициализирует  $n_s$  сальпы, представляющие количество местоположений БПЛА. Приспособленность различных сальп, в том числе ведущих и ведомых, определяется с помощью (36). «Место пропитания» считается местом с наибольшей приспособленностью сальпы (роя БПЛА). Параметры SSA обновляются, и в результате - местоположения сальпы. Процесс обновления местоположения сальпы повторяется до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение или не будет достигнуто максимальное количество итераций.

#### АЛГОРИТМ 1. Хаотическая SSA для оптимального положения БПЛА

```
1:
        Initialize U_b, L_b, \Delta_{\max}, m, n_s
        Initialize positions of salps Pj (j = 1, 2, 3, ..., n_s)
2:
3:
        While (\Delta \leq \Delta_{max})
           Calculate the fitness function of each salp position
 4:
           F = The best salp position
           Update the value of C_1 (using (46))
           Calculate the logistic map's current value y(\Delta)
           For (m = 1: m \le n_s) do
 9:
            if (m == 1)
 10:
                Update the position of the leader (P_j^1) (using
                (44))
 11:
            else
                Update the position of follower salp (P_{j^m}) (using
 12:
                (45))
 13:
            end if
14:
           end for
           Adjust salps based on U_b and L_b
 15:
           Call offloading algorithm
 16:
           Update the best salp based on the results of offload-
17:
           ing algorithm
 18:
           \Delta \leftarrow \Delta + 1
       Return F
19:
```

#### Результаты моделирования

Разработанные решения были промоделированы в среде NS-3 на основе LIMosim framework [31]. Кроме того, в процессе оценки характеристик разработанных решений была использована среда Cloudsim [32]. В качестве наземной сети рассматривалась сеть ІоТ с 1000 оконечными устройствами и двумя шлюзами, распределенными на площади 25 км<sup>2</sup>. Воздушная сеть состояла из четырех БПЛА, находящихся на равной высоте 30 м. В таблице 3 представлены рассматриваемые параметры сети и моделирования, а в таблице 4 – минимальное и максимальное положения ху каждого БПЛА. Расположение ІоТ-шлюзов представлено в таблице 5.

Чтобы оценить характеристики разработанных решений для архитектуры распределенных граничных вычислений «воздух-земля» и оптимизированной модели, были рассмотрены четыре системы, которые определяются следующим образом:

- Система (1): представляет традиционные сети ІоТ без поддержки G-MEC или A-MEC;
- Система (2): представляет сеть IoT, поддерживаемую только наземной шиной распределенных граничных вычислений; развернуты серверы G-MEC;
- Система (3): представляет собой сеть IoT с поддержкой распределенных G-MEC и A-MEC: развернуты как соответствующие серверы;
- **Система (4):** представляет собой оптимизированную систему «воздух–земля»; и серверы G-MEC, и серверы A-MEC поддерживают сеть IoT.

ТАБЛИЦА 3. Параметры моделирования

TABLE 3. Simulation Parameters

Параметр	Ценить
Сетевая зона	5 × 5 км²
N	4
W	2
М	5 × 5 км <sup>2</sup>
В	4
$\sigma^2$	2
γ0	1000
$h_{Di}$	20 МГц
$t_s$	-60 дБм
$V_{ m max}$	-30 дБ
$V_{Di}$	30 м
$E_{Cyc ext{-}IoT}$	45 мс
$\Omega_{Th ext{-}IoT}$	50 м/с
E <sub>Cyc-A-MEC</sub>	∈ (1, 50) м/с
$\Omega_{\mathit{Th-A-MEC}}$	1Ј/ГГц
ω <sub>A-MEC</sub>	€ [1.0,3.0] ГГц
ω <sub>G-MEC</sub>	€ [1.5,5.0] ГГц
$\omega_{IoT}$	€ [0.5,1.0] ГГц
Tapp-I	7 мс
Tapp-II	10 мс
τ <sub>app-III</sub>	16 мс
$ au_{app ext{-IV}}$	24 мс

ТАБЛИЦА 4. Минимальное и максимальное положение с координатами *ху* для каждого БПЛА

TABLE 4. Minimum and Maximum Position with xy Coordinates for Each UAV

$D_i$	$X_{\min-Di}$	$X_{\max ext{-}Di}$	$Y_{\min-Di}$	$Y_{\text{max-Di}}$
1	4	5	4	5
2	4	5	0	1
3	0	1	4	5
4	0	1	0	1

ТАБЛИЦА 5. Расположение ІоТ-шлюзов

TABLE 5. IoT Gateways Location

$G_i$	$X_{Gi}$	$Y_{Gi}$
1	1	2,5
2	4	2,5

Энергопотребление, задержка и доступность для решения вычислительных задач рассматриваются как показатели функционирования систем. Потребление электроэнергии оценивалось для трех систем: традиционной сети ІоТ, т. е. системы (1), развитой сети ІоТ «воздух-земля», т. е. системы (3), и оптимизированной сети ІоТ «воздух-земля», т. е. системы (4).

На рисунке 5 представлено сравнение среднего энергопотребления в процентах для трех систем при разных значениях числа решаемых задач для каждого оконечного устройства.

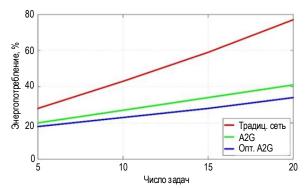


Рис. 5. Среднее энергопотребление при разном числе решаемых задач (в процентах от начального значения доступного энергопотребления)

Fig. 5. Average Power Consumption at Different Number of Solved Tasks (as a Percentage of the Initial Value Available Energy Consumption)

Эти значения были зафиксированы при заданном числе оконечных устройств – 1000, а задачи относились к категории II (обработка неподвижных изображений). Потребление энергии увеличивается по мере увеличения числа вычислительных задач на оконечных устройствах, однако разработанная модель «воздух-земля» сохраняет энергию для большего числа вычислительных задач по сравнению с традиционными сетями ІоТ. Предлагаемая модель снижает энергопотребление в среднем на 27 % по сравнению с традиционной моделью ІоТ. Более того, оптимизированная сеть ІоТ «воздух-земля» позволяет экономить еще больше энергии. При этом достигается более высокая энергоэффективность (в среднем на 6 %) по сравнению с моделью «воздух-земля».

На рисунке 6 показан процент энергопотребления для трех систем в четырех категориях приложений: первая – это облегченные приложения, которые включают простые задачи, например такие, которые необходимы для обработки простых вебстраниц; вторая – приложения на основе неподвижных изображений; третья – простые видеоприложения, которые требуют достаточно простую обработку видео; четвертая категория включает работу с 360-градусными панорамами и обработкой видео, например, дополненной реальности.

При переходе из первой категории в четвертую задачи требуют все более высоких ресурсных возможностей, что снижает вероятность локального выполнения. Очевидно, что энергопотребление для решения задач более высоких категорий выше, чем у более низких категорий.

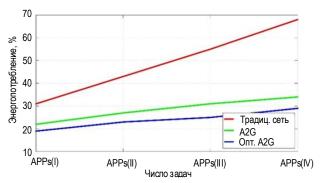


Рис. 6. Среднее энергопотребление для различных типов приложений

Fig. 6. Average Power Consumption for Various Types of Applications

При этом число развернутых устройств составляло 1000 устройств, а число задач на каждом устройстве – 10. Как видим, разработанная система «воздух-земля» снижает энергопотребление в среднем на 29 % по сравнению с традиционными сетями, в то время как оптимизированная модель позволяет снизить потребление энергии на 9 %. На рисунке 6 можно заметить, что разработанная система и оптимизированная система позволяют снизить энергопотребление на более высокий процент для приложений с более высокой рабочей нагрузкой, например, третьей и четвертой категорий.

Влияние плотности расположения оконечных устройств на энергетические характеристики было также проанализировано для трех упомянутых систем. На рисунке 7 показан процент энергопотребления трех систем с разным числом оконечных устройств.

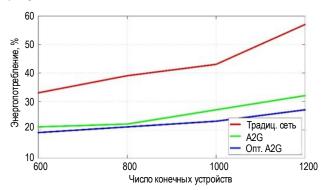


Рис. 7. Среднее энергопотребление при различном количестве развернутых узлов

Fig. 7. Average Power Consumption at Various Number of Nodes Deployed

Количество оконченных устройств в сети начиналось с 600 и было увеличено до 1200. Рассматриваемые задачи относились ко второй категории, а

число задач на каждом оконечном устройстве равнялось десяти. Разработанная модель «воздух-земля» снизила потребление энергии в среднем на 19 % по сравнению с традиционной сетью, а оптимизированная модель обеспечила снижение еще на 4 %. Для сети с большим числом развернутых оконечных устройств разработанная модель позволяет снизить потребление энергии на 27 % по сравнению с традиционной моделью. Это связано с высокой нагрузкой на наземное исполнение при плотном развертывании традиционной модели. Отметим, что разработанная схема выгрузки, естественно, снижает общее потребление энергии.

Задержка – важнейший показатель сети, анализируемый в процессе оценки ее функционирования. Средняя задержка обработки рассмотренных вычислительных задач была измерена для ранее упомянутых четырех систем. При этом изменялось число развернутых устройств, требуемых к решению вычислительных задач и категорий приложений.

На рисунке 8 представлена средняя задержка, необходимая для обработки вычислительных задач в каждой из четырех рассматриваемых систем с изменением числа задач, требуемых для выполнения каждым оконечным устройством. Эти показатели были определены для 1000 таких устройств и задач приложений второй категории. Разработанная система «воздух-земля», т. е. система 3, обеспечивает более высокую эффективность системы по задержкам, чем традиционные системы без граничных вычислений и системы только с G-MEC. Это повышение эффективности возрастает с увеличением числа вычислительных задач на оконечных устройствах. Внедрение серверов А-МЕС обеспечивает выгрузку вычислительных задач и, таким образом, сокращает общее время, необходимое для обработки этих задач. Более того, разработанная оптимизированная модель обеспечивает дополнительное снижение задержки в среднем на 2,5 %.

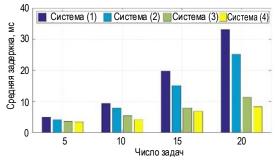


Рис. 8. Средняя задержка для четырех систем с разным числом оконечных устройств

Fig. 8. Average Delay for Four Systems with Different Number of End Devices

На рисунке 9 показана средняя задержка обработки задач в каждой системе из четырех рассматриваемых систем для четырех категорий приложений. Эти значения были получены для сети с 1000 оконечных устройств и десятью задачами на каждом из них. Разработанные система «воздух-земля» и оптимизированная система снижают среднюю задержку, необходимую для обработки вычислительных задач, особенно четвертой категории.

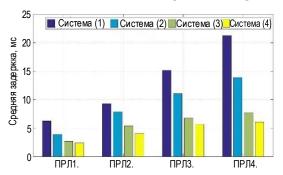


Рис. 9. Средняя задержка при различном числе вычислительных задач

Fig. 9. Average Delay at Different Number Computing Tasks

Кроме того, была измерена средняя задержка для четырех систем с разным числом оконечных устройств, результаты представлены на рисунке 10. Эти показатели были оценены для случая, когда на каждом устройстве было десять задач второй категории. Как показывают результаты, с увеличением числа оконечных устройств традиционные модели не могут поддерживать требуемую задержку, в то время как разработанная система и оптимизированная система достигают существенно более высокой эффективности для обеспечения значений задержки, главным образом в сценариях плотного развертывания.

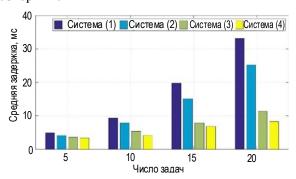


Рис. 10. Средняя задержка для четырех систем с разным числом вычислительных задач для оконечных устройств

Fig. 10. Average Latency for Four Systems with Different Number of Computing Tasks for End Devices

Третьим исследуемым показателем является процент заблокированных задач, который можно использовать в качестве меры доступности системы. Число заблокированных задач фиксировалось для каждой системы в разных случаях. На рисунке 11 представлен процент заблокированных задач для четырех упомянутых систем при различных значениях вычислительных задач для оконечных устройств. С увеличением числа задач процент заблокированных, естественно, увеличился во всех

четырех системах, что связано с нехваткой вычислительных ресурсов. Однако процент заблокированных задач для разработанной системы «воздух—земля» меньше, чем у традиционных и наземных систем. Это связано с дополнительными ресурсами, предоставляемыми со стороны воздушного сегмента сети.

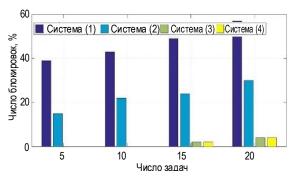


Рис. 11. Процентное соотношение заблокированных задач при различных значениях вычислительных задач для оконечных устройств

Fig. 11. Percentage of Blocked Tasks for Different Values of Computational Tasks for End Devices Tasks

На рисунке 12 представлены результаты оценки процента заблокированных задач для четырех систем по четырем категориям приложений. Как показывают результаты, процент заблокированных задач увеличивается для третьей и четвертой категорий приложений; однако это увеличение минимально для разработанной системы «воздухземля» и оптимизированной системы. Это связано с тем, что для этих категорий приложений требуются более высокие вычислительные ресурсы, что уменьшает вероятность локального выполнения. Предложенные решения обеспечивает дополнительную возможность с использованием ресурсов воздушного сегмента сети для выгрузки данных, снижая вероятность блокировки задачи.

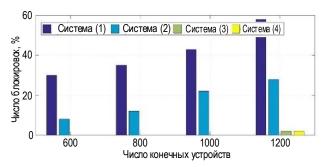


Рис. 12. Процентное соотношение заблокированных задач в зависимости от категории приложений

Fig. 12. Percentage of Blocked Tasks Depending on the Application Category

На рисунке 13 представлены результаты по заблокированным задачам в процентном соотношении для четырех систем при разном количестве оконечных устройств. По мере роста числа таких устройств увеличивается вероятность блокировки из-за высокой нагрузки на доступные ресурсы. Однако предлагаемые решения, как уже отмечалось выше, обеспечивают дополнительные ресурсы через воздушный сегмент сети.

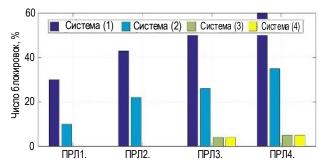


Рис. 13. Процентное соотношение заблокированных задач при разном количестве оконечных устройств

Fig. 13. Percentage of Blocked Tasks for Different Number of End Devices

На рисунке 14 показаны результаты моделирования для четырех систем при различной плотности устройств. Предложенные модель и метод показали более высокую эффективность для значений задержки во всем диапазоне плотности, особенно при высокой плотности наземной сети. Для сетей со сверхвысокой плотностью традиционные модели IoT не могут достичь сверхнизкой или даже низкой задержки. Однако предложенные модель и метод могут поддерживать приложения с ультрамалой задержкой даже при сверхвысокой плотности наземной сети.

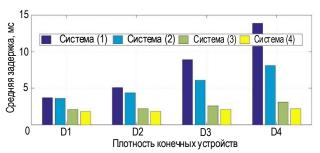


Рис. 14. Средняя задержка для различной плотности наземной сети

Fig. 14. Average Delay for Different Density Ground Network

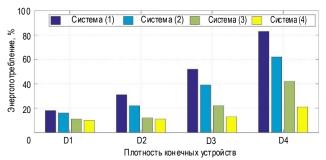


Рис. 15. Процент потребление энергии для различной плотности наземной сети

Fig. 15. Percentage of Energy Consumption for Different Terrestrial Network Density

#### Заключение

Решена научная проблема, отличающаяся от известных тем, что предложены модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности, основанные на интегральном решении задач по размещению граничных серверов на БПЛА и оптимизации структуры сети с использованием метаэвристического алгоритма «роя сальп».

Для решения научной задачи интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности разработана модель сети, отличающаяся от известных тем, что для уменьшения задержки и энергопотребления в такой сети предложено использовать МЕС на БПЛА, а связь между наземным и летающим сегментом обеспечивать с использованием NOMA.

Для решения задачи минимизации задержки и энергопотребления в разработанной модели предложен метод выгрузки трафика с наземной сети на МЕС на БПЛА, отличающийся от известных тем, что процедура выгрузки трафика является трехуровневой, причем на оконечных устройствах используется программный профилировщик, который определяет сложность вычисляемой задачи и по результатам его работы механизм принятия решения определяет необходимость выгрузки трафика. Кроме того, на втором уровне процедуры сервер БПЛА, на который выгружается трафик, может в условиях недостаточного объема ресурсов принять решение выгрузить трафик на сервер другого БПЛА.

Для решения научной задачи оптимизации структуры сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности, в отличие от известных решений, для минимизации задержки и энергопотребления при выгрузке трафика с наземной сети на серверы граничных вычислений БПЛА был разработан метаэвристический алгоритм на основе хаотического «роя сальп».

Результаты моделирования доказали, что разработанные модель и метод интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух-земля» для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности обеспечивают уменьшение задержки до более, чем в 2 раза по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений и на 30–40 % по сравнению с сетью с использованием только наземных граничных вычислений. Кроме того, использование оптимизации на основе метаэвристического хаотического «роя сальп» дает дополнительный выигрыш около 10 % по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

Таким образом достигается уменьшение энергопотребления до более, чем в 2 раза по сравнению с сетью без использования технологий граничных

вычислений. Кроме того, использование оптимизации на основе метаэвристического хаотического «роя сальп» дает дополнительный выигрыш в 5–10 % по сравнению с использованием неоптимизированного алгоритма.

Результат работы показали уменьшение доли заблокированных задач по выгрузке трафика в десятки раз по сравнению с сетью без использования технологий граничных вычислений, в разы по сравнению с сетью с использованием только наземных граничных вычислений. Использование оптимизации на основе метаэвристического хаотического «роя сальп» не дает практически значимого эффекта по сравнению с неоптимизированным алгоритмом.

Определены зависимости значений задержки, энергопотребления и доли заблокированных задач по выгрузке трафика.

#### Список источников

- 1. Дунайцев Р.А., Бородин А.С., Кучерявый А.Е. Интегрированная сеть космос-воздух-земля-море как основа сетей связи шестого поколения // Электросвязь. 2022. № 10. С. 5–8. DOI: 10.34832/ELSV2022.35.10.001
- 2. Ateya A.A., Muthanna A., Makolkina M., Koucheryavy A. Study of 5G Services Standardization: Specifications and Requirements // Proceedings of the 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT, Moscow, Russia, 05–09 November 2018). IEEE, 2018. DOI:10.1109/ICUMT.2018.8631201
- 3. Guo F., Yu F.R., Zhang H., Li X., Ji H., Leung V.C.M. Enabling Massive IoT Toward 6G: A Comprehensive Survey // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8. Iss. 15. PP. 11891–11915. DOI:10.1109/JIOT.2021.3063686
- 4. Laghari A.A., Wu K., Laghari R.A., Ali M., Khan A.A. A Review and State of Art of Internet of Things (IoT) // Archives of Computational Methods in Engineering. 2022. Vol. 29. Iss. 3. PP. 1395–1413. DOI:10.1007/s11831-021-09622-6
- 5. Ateya A.A., Algarni A.D., Hamdi M., Koucheryavy A., Soliman N.F. Enabling Heterogeneous IoT Networks over 5G Networks with Ultra-Dense Deployment—Using MEC/SDN // Electronics. 2021. Vol. 10. Iss. 8. P. 910. DOI:10.3390/electronics10080910
- 6. Bhuiyan M.N., Rahman M.M., Billah M.M., Saha D. Internet of Things (IoT): A Review of Its Enabling Technologies in Healthcare Applications, Standards Protocols, Security, and Market Opportunities // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8. Iss. 13. PP. 10474–10498. DOI:10.1109/JIOT.2021.3062630
- 7. Carvalho G., Cabral B., Pereira V., Bernardino J. Edge computing: current trends, research challenges and future directions // Computing. 2021. Vol. 103. PP. 993–1023. DOI:10.1007/s00607-020-00896-5
- 8. Haibeh L.A., Yagoub M.C.E., Jarray A. A Survey on Mobile Edge Computing Infrastructure: Design, Resource Management, and Optimization Approaches // IEEE Access. 2022. Vol. 10. PP. 27591–27610. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3152787
- 9. Cruz P., Achir N., Viana A.C. On the Edge of the Deployment: A Survey on Multi-access Edge Computing // ACM Computing Surveys. 2022. Vol. 55. Iss. 5. PP. 1–34. DOI:10.1145/3529758
- 10. Kong L., Tan J., Huang J., Chen G., Wang S., Jin X., et al. Edge-computing-driven Internet of Things: A survey // ACM Computing Surveys. 2022. Vol. 55. Iss. 8. PP. 1–41. DOI:10.1145/3555308
- 11. Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah I., Alsharif M.H. Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review // Drones. 2022. Vol. 6. Iss. 6. P. 147. DOI:10.3390/drones6060147
- 12. Amarasingam N., Salgadoe A.S.A., Powell K., Gonzalez L.F., Natarajan S. A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops // Remote Sensing Applications: Society and Environmentvol. 2022. Vol. 26. P. 100712. DOI:10.1016/j.rsase.2022.100712
- 13. Liu Y., Dai H.-N., Wang Q., Shukla M.K., Imran M. Unmanned aerial vehicle for internet of everything: Opportunities and challenges // Computer Communications. 2020. Vol. 155. PP. 66–83. DOI:10.1016/j.comcom.2020.03.017
- 14. Pakrooh R., Bohlooli A. A Survey on Unmanned Aerial Vehicles-Assisted Internet of Things: A Service-Oriented Classification // Wireless Personal Communications. 2021. Vol. 119. Iss. 2. PP. 1541–1575. DOI:10.1007/s11277-021-08294-6
- 15. Idrissi M., Salami M., Annaz F. A Review of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles: Applications, Architectural Design and Control Algorithms // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2022. Vol. 104. DOI:10.1007/s10846-021-01527-7
- 16. Labib N.S., Brust M.R., Danoy G., Bouvry P. The Rise of Drones in Internet of Things: A Survey on the Evolution, Prospects and Challenges of Unmanned Aerial Vehicles // IEEE Access/ 2021. Vol. 9. PP. 115466–115487. DOI:10.1109/ACCESS. 2021.3104963
- 17. Siddharthraju K., Dhivyadevi R., Supriya M., Jaishankar B., Shanmugaraja T. A Survey on IoE-Enabled Unmanned Aerial Vehicles // Mohindru V., Singh Y., Bhatt R., Gupta A.K. (Ed.) Unmanned Aerial Vehicles for Internet of Things (IoT). Wiley, 2021. PP. 173–192. DOI:10.1002/9781119769170.ch10
- 18. Shehzad M.K., Ahmad A., Hassan S.A., Jung H. Backhaul-Aware Intelligent Positioning of UAVs and Association of Terrestrial Base Stations for Fronthaul Connectivity // IEEE Transactions on Network Science and Engineering. 2021. Vol. 8. Iss. 4. PP. 2742–2755. DOI:10.1109/TNSE.2021.3077314
- 19. Alsamhi S.H., Shvetsov A.V., Kumar S., Hassan J., Alhartomi M.A., Shvetsova S.V., et al. Computing in the Sky: A Survey on Intelligent Ubiquitous Computing for UAV-Assisted 6G Networks and Industry 4.0/5.0 // Drones. 2022. Vol. 6. Iss. 7. P. 177. DOI:10.3390/drones6070177
- 20. Yazid Y., Ez-Zazi I., Guerrero-González A., El Oualkadi A., Arioua M. UAV-Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on AI: A Comprehensive Review // Drones. 2021. Vol. 5. Iss. 4. P. 148. DOI:10.3390/drones5040148
- 21. Zhang S., Liu W., Ansari N. Joint Wireless Charging and Data Collection for UAV-Enabled Internet of Things Network // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9. Iss. 23. PP. 23852–23859. DOI:10.1109/JIOT.2022.3190813
- 22. Beniwal G., Singhrova A. A systematic literature review on IoT gateways // Journal of King Saud University Computer and Information Sciences. 2021. Vol. 34. Iss. 10. PP. 9541–9563. DOI:10.1016/j.jksuci.2021.11.007

- 23. Jeong S., Simeone O., Kang J. Mobile cloud computing with a UAV-mounted cloudlet: optimal bit allocation for communication and computation // IET Communications. 2017. Vol. 11. Iss. 7. PP. 969–974. DOI:10.1049/iet-com.2016.1114
- 24. Jeong S., Simeone O., Kang J. Mobile Edge Computing via a UAV-Mounted Cloudlet: Optimization of Bit Allocation and Path Planning // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2018. Vol. 67. Iss. 3. PP. 2049–2063. DOI:10.1109/TVT.2017. 2706308
- 25. Ateya A.A.A., Muthanna A., Kirichek R., Hammoudeh M., Koucheryavy A. Energy- and Latency-Aware Hybrid Offloading Algorithm for UAVs // IEEE Access. 2019. Vol. 7. PP. 37587–37600. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2905249
  - 26. Solomon M.G., Kim, D. Fundamentals of communications and networking. Jones & Bartlett Learning, 2021.
- 27. Ateya A.A.A., Muthanna A., Gudkova I., Gaidamaka Y., Algarni A.D. Latency and energy-efficient multi-hop routing protocol for unmanned aerial vehicle networks // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2019. Vol. 15. Iss. 8. DOI:10.1177/1550147719866392
- 28. Castelli M., Manzoni L., Mariot L., Nobile M.S., Tangherloni A. Salp Swarm Optimization: A critical review // Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 189. P. 116029. DOI:10.1016/j.eswa.2021.116029
- 29. Pradhan A., Bisoy S.K., Das A. A survey on PSO based meta-heuristic scheduling mechanism in cloud computing environment // Journal of King Saud University Computer and Information Sciences. 2022. Vol. 34. Iss. 8. PP. 4888–4901. DOI:10.1016/j.jksuci.2021.01.003
- 30. Parthiban S., Harshavardhan A., Neelakandan S., Prashanthi V., Alolo A.-R.A.A., Velmurugan S. Chaotic Salp Swarm Optimization-Based Energy-Aware VMP Technique for Cloud Data Centers // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 2022. P. 4343476. DOI:10.1155/2022/4343476
- 31. Sliwa B., Patchou M., Wietfeld C. Lightweight Simulation of Hybrid Aerial- and Ground-Based Vehicular Communication Networks // Proceedings of the 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall, Honolulu, USA, 22–25 September 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/VTCFall.2019.8891340
- 32. Goyal T., Singh A., Agrawal A. Cloudsim: simulator for cloud computing infrastructure and modeling // Procedia Engineering. 2012. Vol. 38. PP. 3566–3572. DOI:10.1016/j.proeng.2012.06.412

#### References

- 1. Dunaytsev R.A., Borodin A.S., Koucheryavy A.E. Space-air-ground-sea integrated networking as a basis for 6G networks. *Electrosyyaz*. 2022;10:5–8. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV2022.35.10.001
- 2. Ateya A.A., Muthanna A., Makolkina M., Koucheryavy A. Study of 5G Services Standardization: Specifications and Requirements. *Proceedings of the10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT, 05–09 November 2018, Moscow, Russia.* IEEE; 2018. DOI:10.1109/ICUMT.2018.8631201
- 3. Guo F., Yu F.R., Zhang H., Li X., Ji H., Leung V.C.M. Enabling Massive IoT Toward 6G: A Comprehensive Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021;8(15):11891–11915. DOI:10.1109/JIOT.2021.3063686
- 4. Laghari A.A., Wu K., Laghari R.A., Ali M., Khan A.A. A Review and State of Art of Internet of Things (IoT). *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022;29(3):1395–1413. DOI:10.1007/s11831-021-09622-6
- 5. Ateya A.A., Algarni A.D., Hamdi M., Koucheryavy A., Soliman N.F. Enabling Heterogeneous IoT Networks over 5G Networks with Ultra-Dense Deployment—Using MEC/SDN. *Electronics*. 2021;10(8):910. DOI:10.3390/electronics10080910
- 6. Bhuiyan M.N., Rahman M.M., Billah M.M., Saha D. Internet of Things (IoT): A Review of Its Enabling Technologies in Healthcare Applications, Standards Protocols, Security, and Market Opportunities. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021;8(13): 10474–10498. DOI:10.1109/JIOT.2021.3062630
- 7. Carvalho G., Cabral B., Pereira V., Bernardino J. Edge computing: current trends, research challenges and future directions. Computing. 2021;103:993–1023. DOI:10.1007/s00607-020-00896-5
- 8. Haibeh L.A., Yagoub M.C.E., Jarray A. A Survey on Mobile Edge Computing Infrastructure: Design, Resource Management, and Optimization Approaches. *IEEE Access.* 2022;10:27591–27610. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3152787
- 9. Cruz P., Achir N., Viana A.C. On the Edge of the Deployment: A Survey on Multi-access Edge Computing. *ACM Computing Surveys*. 2022;55(5):1–34. DOI:10.1145/3529758
- 10. Kong L., Tan J., Huang J., Chen G., Wang S., Jin X., et al. Edge-computing-driven Internet of Things: A survey. *ACM Computing Surveys*. 2022;55(8):1–41. DOI:10.1145/3555308
- 11. Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah I., Alsharif M.H. Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *Drones*. 2022;6(6):147. DOI:10.3390/drones6060147
- 12. Amarasingam N., Salgadoe A.S.A., Powell K., Gonzalez L.F., Natarajan S. A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops. *Remote Sensing Applications: Society and Environmentvol.* 2022;26:100712. DOI:10.1016/j.rsase.2022.100712
- 13. Liu Y., Dai H.-N., Wang Q., Shukla M.K., Imran M. Unmanned aerial vehicle for internet of everything: Opportunities and challenges. *Computer Communications*. 2020;155:66–83. DOI:10.1016/j.comcom.2020.03.017
- 14. Pakrooh R., Bohlooli A. A Survey on Unmanned Aerial Vehicles-Assisted Internet of Things: A Service-Oriented Classification. *Wireless Personal Communications*. 2021;119(2):1541–1575. DOI:10.1007/s11277-021-08294-6
- 15. Idrissi M., Salami M., Annaz F. A Review of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles: Applications, Architectural Design and Control Algorithms. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2022;104. DOI:10.1007/s10846-021-01527-7
- 16. Labib N.S., Brust M.R., Danoy G., Bouvry P. The Rise of Drones in Internet of Things: A Survey on the Evolution, Prospects and Challenges of Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Access.* 2021;9:115466–115487. DOI:10.1109/ACCESS. 2021.3104963
- 17. Siddharthraju K., Dhivyadevi R., Supriya M., Jaishankar B., Shanmugaraja T. A Survey on IoE-Enabled Unmanned Aerial Vehicles. *In: Mohindru V., Singh Y., Bhatt R., Gupta A.K. (Ed.) Unmanned Aerial Vehicles for Internet of Things (IoT)*. Wiley; 2021. p.173–192. DOI:10.1002/9781119769170.ch10

- 18. Shehzad M.K., Ahmad A., Hassan S.A., Jung H. Backhaul-Aware Intelligent Positioning of UAVs and Association of Terrestrial Base Stations for Fronthaul Connectivity. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. 2021;8(4):2742–2755. DOI:10.1109/TNSE.2021.3077314
- 19. Alsamhi S.H., Shvetsov A.V., Kumar S., Hassan J., Alhartomi M.A., Shvetsova S.V., et al. Computing in the Sky: A Survey on Intelligent Ubiquitous Computing for UAV-Assisted 6G Networks and Industry 4.0/5.0. *Drones.* 2022;6(7):177. DOI:10.3390/drones6070177
- 20. Yazid Y., Ez-Zazi I., Guerrero-González A., El Oualkadi A., Arioua M. UAV-Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on Al: A Comprehensive Review. *Drones*. 2021;5(4):148. DOI:10.3390/drones5040148
- 21. Zhang S., Liu W., Ansari N. Joint Wireless Charging and Data Collection for UAV-Enabled Internet of Things Network. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022;9(23):23852–23859. DOI:10.1109/JIOT.2022.3190813
- 22. Beniwal G., Singhrova A. A systematic literature review on IoT gateways. *Journal of King Saud University Computer and Information Sciences*. 2021;34(10):9541–9563. DOI:10.1016/j.jksuci.2021.11.007
- 23. Jeong S., Simeone O., Kang J. Mobile cloud computing with a UAV-mounted cloudlet: optimal bit allocation for communication and computation. *IET Communications*. 2017;11(7):969–974. DOI:10.1049/iet-com.2016.1114
- 24. Jeong S., Simeone O., Kang J. Mobile Edge Computing via a UAV-Mounted Cloudlet: Optimization of Bit Allocation and Path Planning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018;67(3):2049–2063. DOI:10.1109/TVT.2017.2706308
- 25. Ateya A.A.A., Muthanna A., Kirichek R., Hammoudeh M., Koucheryavy A. Energy- and Latency-Aware Hybrid Offloading Algorithm for UAVs. *IEEE Access*. 2019;7:37587–37600. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2905249
  - 26. Solomon M.G., Kim D. Fundamentals of communications and networking. Jones & Bartlett Learning; 2021.
- 27. Ateya A.A.A., Muthanna A., Gudkova I., Gaidamaka Y., Algarni A.D. Latency and energy-efficient multi-hop routing protocol for unmanned aerial vehicle networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks.* 2019;15(8). DOI:10.1177/1550147719866392
- 28. Castelli M., Manzoni L., Mariot L., Nobile M.S., Tangherloni A. Salp Swarm Optimization: A critical review. *Expert Systems with Applications*. 2022;189:116029. DOI:10.1016/j.eswa.2021.116029
- 29. Pradhan A., Bisoy S.K., Das A. A survey on PSO based meta-heuristic scheduling mechanism in cloud computing environment. *Journal of King Saud University Computer and Information Sciences*. 2022;34(8):4888–4901. DOI:10.1016/j.jksuci. 2021.01.003
- 30. Parthiban S., Harshavardhan A., Neelakandan S., Prashanthi V., Alolo A.-R.A.A., Velmurugan S. Chaotic Salp Swarm Optimization-Based Energy-Aware VMP Technique for Cloud Data Centers. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022; 2022:4343476. DOI:10.1155/2022/4343476
- 31. Sliwa B., Patchou M., Wietfeld C. Lightweight Simulation of Hybrid Aerial- and Ground-Based Vehicular Communication Networks. *Proceedings of the 90th Vehicular Technology Conference, VTC2019-Fall, 22–25 September 2019, Honolulu, USA.* IEEE; 2019. DOI:10.1109/VTCFall.2019.8891340
- 32. Goyal T., Singh A., Agrawal A. Cloudsim: simulator for cloud computing infrastructure and modeling. *Procedia Engineering*. 2012;38:3566–3572. DOI:10.1016/j.proeng.2012.06.412

Статья поступила в редакцию 09.06.2023; одобрена после рецензирования 25.06.2023; принята к публикации 05.07.2023.

The article was submitted 09.06.2023; approved after reviewing 25.06.2023; accepted for publication 05.07.2023.

### Информация об авторе:

МУТХАННА Аммар Салех Али кандидат технических наук, доцент кафедры сети связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

https://orcid.org/0000-0003-0213-8145

Научная статья УДК 621.371.334 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-60-66



# Методика учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн ОНЧ-диапазона

- **© Алексей Алексеевич Типикин**<sup>⊠</sup>, alextip@mail.ru
- Денис Сергеевич Потапов, denpotapow@yandex.ru

Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова, Санкт-Петербург, 198514, Российская Федерация

**Аннотация:** Подстилающая поверхность Земли оказывает существенное влияние на характеристики антенны и энергетические параметры радиотрассы. Несмотря на то, что теоретические аспекты влияния конечной проводимости подстилающей поверхности на антенны достаточно исследованы, требуется разработка частной методики, позволяющей автоматизировать расчеты энергетических параметров радиотрасс скачковым методом. В статье представлена методика учета электрических характеристик подстилающей поверхности, отличающаяся возможностью использования цифровых карт и автоматизации вычислений, представлены отдельные результаты расчетов поправочных антенных коэффициентов, подтверждающие теоретические выкладки. Разработанная методика может применяться при расчетах энергетических параметров радиотрасс скачковыми методами.

**Ключевые слова**: подстилающая поверхность, очень низкие частоты, прогнозирование энергетических параметров, антенны, корректирующие коэффициенты

**Ссылка для цитирования**: Типикин А.А., Потапов Д.С. Методика учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн ОНЧ-диапазона // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 60–66. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-60-66

# Methodology for Accounting the Influence of Parameters of a Spherical Underlying Surface with Finite Conductivity on VLF Antennas Characteristics

- ♠ Aleksey Tipikin<sup>™</sup>, alextip@mail.ru
- Denis Potapov, denpotapow@yandex.ru

Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov, St. Petersburg, 198514, Russian Federation

**Abstract:** The Earth's underlying surface has a significant impact on the characteristics of antennas and the energy parameters of the radio path. Although the theoretical aspects of the influence of the finite conductivity of the underlying surface on antennas have been sufficiently studied, there is a need for the development of a specific methodology that would allow to automize energy parameters calculations of radio paths using the wavehop method. This article presents a methodology for accounting for the electrical characteristics of the subsoil surface,

which differs in its ability to use digital maps and automate calculations. It also includes separate calculation results for correcting antenna coefficients that confirm the theoretical calculations. The developed methodology can be used for calculations of energy parameters of radio paths using the wavehop method.

**Keywords:** underlying surface, very low frequency, predicting of energy parameters, antennas, correction coefficients

**For citation:** Tipikin A., Potapov D. Methodology for Accounting the Influence of Parameters of a Spherical Underlying Surface with Finite Conductivity on VLF Antennas Characteristics. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3): 60–66. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-60-66

#### Введение

Прогнозирование энергетических параметров радиотрасс является актуальной задачей, возникающей в процессе планирования радиосетей различных частотных диапазонов, в том числе и диапазона очень низких частот (ОНЧ) [1, 2]. С этой целью используются как волновые методики, дающие строгое решение распространения радиоволн в волноводе, образованном сферическими поверхностями Земли и ионосферы [3], так и скачковые методики, представляющие напряженность поля в точке приема в виде суммы нескольких лучей (мод) с разным количеством скачков и земной волны [4]. Если для учета характеристик ионосферы и подстилающей поверхности волновые методики обычно пользуются значительными приближениями реальных характеристик, что связано с особенностями решения волновых уравнений, то скачковые методики обладают более простыми алгоритмами учета указанных параметров. Это дает возможность в полной мере использовать стандартную модель ионосферы [5-7] и цифровые карты подстилающей поверхности Земли [8, 9].

Стандартная модель ионосферы (IRI, аббр. от англ. International Reference of Ionosphere) - это международный проект, спонсируемый Комитетом по космическим исследованиям (COSPAR) и Международным союзом радиовещания (URSI). Указанные организации создали рабочую группу, в которую вошли представители различных стран, в том числе и из России. В конце 60-х годов была создана эмпирическая стандартная модель ионосферы на основе всех доступных источников данных. Выпущено несколько вариантов модели. Для данного местоположения, времени и даты IRI предоставляет среднемесячные значения электронной плотности, электронной температуры, температуры ионов и состава ионов в диапазоне ионосферных высот, критические частоты и другие данные.

Цифровые карты электрических характеристик подстилающей поверхности земли в ОНЧ-диапазоне представляют собой набор числовых массивов с геопривязкой. Общая методика формирования цифровых карт изложена в статье [9].

В скачковых методиках характеристики ионосферы и подстилающей поверхности Земли учитываются с помощью соответствующих коэффициентов отражения [10]. Коэффициенты отражения от ионосферы получаются на основе эмпирических данных, аппроксимированных функциями, зависящими от индекса солнечной активности F10.7, косинуса зенитного угла Солнца в точке отражения  $\cos \chi$  и произведения частоты электромагнитной волны на косинус угла падения на ионосферу  $f\cos i$ .

Кроме коэффициентов отражения от поверхности Земли, характеристики подстилающей поверхности влияют также на диаграмму направленности передающей и приемной антенн, что учитывается с помощью поправочного коэффициента антенны. Рекомендованный способ расчета, приведенный в [10], дает только модуль коэффициента, в то время как другие способы [11, 12] представлены либо табличными, либо графическими результатами, что не позволяет использовать их в автоматизированных методиках. Указанные недостатки определяют цель статьи, которая заключается в разработке автоматизированной методики учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн на радиотрассе диапазона ОНЧ, позволяющей рассчитывать модуль и аргумент поправочного антенного коэффициента.

#### Методика

В соответствии с [11, 13] поправочный коэффициент антенны, расположенной на сферической поверхности с конечной проводимостью, рассчитывается через параметр потерь:

$$A = \delta(ka)^{1/3},\tag{1}$$

где  $\delta = \sqrt{2\pi\epsilon_0 f/2\sigma}$ ;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная  $(\Phi/\mathrm{M})$ ; f – частота  $(\Gamma\mathrm{L})$ ;  $\sigma$  – проводимость  $(\mathrm{CM/M})$ ;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  – длина волны в вакууме  $(\mathrm{M})$ ; a = 1,25;  $R_3 = 8495000$  – эффективный радиус Земли при нормальной рефракции  $(\mathrm{M})$ ; диэлектрический параметр определяется по выражению:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{(60\pi\sigma a)^{2/5}},\tag{2}$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость.

Графики параметров A и  $\alpha$  показаны на рисунке 1.

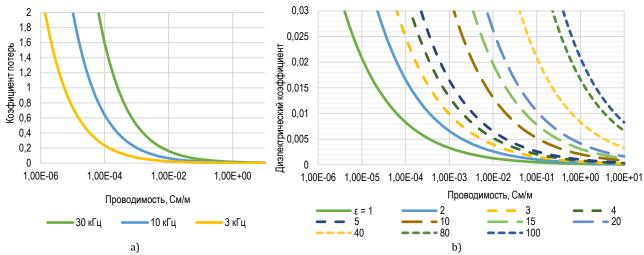


Рис. 1. Коэффициент потерь (а) и диэлектрический коэффициент (b)

Fig. 1. Loss Factor (a) and Dielectric Factor (b)

Для расчета величин є и о на основе цифровых карт [9] требуется не только определение координат точки расположения передатчика или приемника, но и определенной области земной поверхности, окружающей эту точку и участвующей в формировании электромагнитной волны. Если угол места  $\theta$ , т. е. угол между направлением на точку отражения от ионосферы и касательной к поверхности земли, является неотрицательным, то с указанной целью выделяется область пространства, участвующая в передаче электромагнитной волны, которая в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля представляет собой эллипсоид. В фокусах эллипсоида находятся точки передачи и приёма [14-16]. Область, влияющая на распространение электромагнитной волны, является сечением эллипсоида земной поверхностью. Пренебрегая кривизной земли, можно считать эту область эллипсом. Большая полуось, малая полуось эллипса и смещение точки пересечения оси эллипса с Земной поверхностью определяются из выражений (3-5).

$$2a = R \frac{\sqrt{\lambda R(\lambda R + 12h_1h_2)}}{\lambda R + 3(h_1 + h_2)^2};$$
 (3)

$$2b = R \frac{\sqrt{\lambda R(\lambda R + 12h_1h_2)}}{3[\lambda R + 3(h_1 + h_2)^2]};$$
(4)

$$c = R \frac{h_2 - h_1}{2(h_1 + h_2) \left[1 + \frac{3(h_1 + h_2)^2}{\lambda R}\right]'}$$
 (5)

где R – расстояние между точками отражения (км);  $\lambda$  – длина волны на заданной частоте (км);  $h_1$ ,  $h_2$  – высоты точек отражения (км);  $h_1$  = 0 – для передающей антенны;  $h_2$  = 0 – для приемной антенны.

Если угол места θ отрицательный, то при распространении радиоволны наблюдается механизм так называемого «проскальзывания» [17], т. е. часть пути луч преодолевает вдоль земли дифракционной волной и часть пути – по прямолинейной тра-

ектории ионосферной волной. В этом случае большая ось эллипса принимается равной дифракционному сегменту траектории, а малая полуось – рассчитывается по формуле (4) при  $h_1=h_2=0$ .

После того, как получены электрические характеристики подстилающей поверхности и вычислены параметры A и  $\alpha$ , рассчитывается поправочный антенный коэффициент, который для расстояния, не превышающего границу оптического горизонта, определяется по формуле:

$$F = \frac{e^{-ika\theta}}{\sqrt{\pi}} \int_{\Gamma} \frac{e^{-iXt}}{W_1'(t) - qW_1(t)} dt,$$
 (6)

где  $X=\left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}}; q=-i\left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}}\frac{\eta_0}{Z}; W_L(t)$  – интеграл Эйри;  $Z/\eta_0$  – комплексный паметр, определяемый через поверхностный импеданс Z, приблизительно равный волновому сопротивлению среды, и  $\eta_0=120\pi$ . Контур интегрирования  $\Gamma$  проходит из бесконечности вдоль кривой  $e^{-i2\pi/3}$  до нуля и уходит вдоль действительной оси в бесконечность [11].

Интегралы Эйри могут быть вычислены по формулам:

$$W_1(t) = -ie^{-\frac{i2\pi}{3}} \sqrt{\frac{\pi}{3}} t H_{\frac{1}{2}}^{(2)} \left[ \frac{2}{3} e^{-i\frac{3\pi}{2}} t^{\frac{3}{2}} \right], \tag{7}$$

$$W_1'(t) = -ie^{-\frac{i4\pi}{3}} \sqrt{\frac{\pi}{3}} t H_{\frac{2}{3}}^{(2)} \left[ \frac{2}{3} e^{-i\frac{3\pi}{2}} t^{\frac{3}{2}} \right], \tag{8}$$

где  $H_{\frac{1}{3}}^{(2)}[z]$  и  $H_{\frac{2}{3}}^{(2)}[z]$  – функции Ханкеля второго рода порядка 1/3 и 2/3, соответственно.

За пределами области геометрической оптики антенный коэффициент сводится к бесконечному ряду вида:

$$F' = -2i\sqrt{\pi}e^{-ika\theta} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{e^{-i(ka)^{\frac{1}{3}}\theta\tau_s}}{\left(2^{\frac{1}{3}}\tau_s - q^2\right)W_1\left(2^{\frac{1}{3}}\tau_s\right)},$$
 (9)

где  $\tau_s$  – корни специального уравнения Риккати:

$$\frac{dv}{d\tau} + 2v^2\tau + 1 = 0. \tag{10}$$

Методика реализована в виде скрипта Matlab и показана в качестве блок-схемы на рисунке 2. После запуска скрипта загружаются структуры PtsStruct и DiffErr с исходными данными, которые формируются в соответствии с частными методиками [16, 18]. Далее последовательно открываются циклы по максимальному учитываемому количеству скачков (мод), количеству рассчитываемых частот и числу скачков в моде. В блоке 5 проверяется условие наличия дифракционного пути, в зависимости от чего выбирается способ расчета области, существенно влияющей на характеристики антенны при распространении ЭМВ заданной частоты при заданном угле места – блоки 6 и 7.

В блоке 8 полученные параметры эллипса преобразуются в объекты геопривязки geoshape. После чего по картам электрических параметров подстилающей поверхности вычисляются эффективные значения є и  $\sigma$  [9]. Для этого найденные эллиптические области преобразуются в растровые маски посредством функции vec2mtx (блок 9). С помощью масок на растровых картах электрических характеристик подстилающей поверхности выделяются массивы величин є и о. В качестве эффективных значений используются медианные значения проводимости и диэлектрической проницаемости, на их основе с помощью функции FresZonesCalc рассчитываются поправочные антенные коэффициенты (блок 10). После завершения расчетов все данные записываются в структуру FresZones.

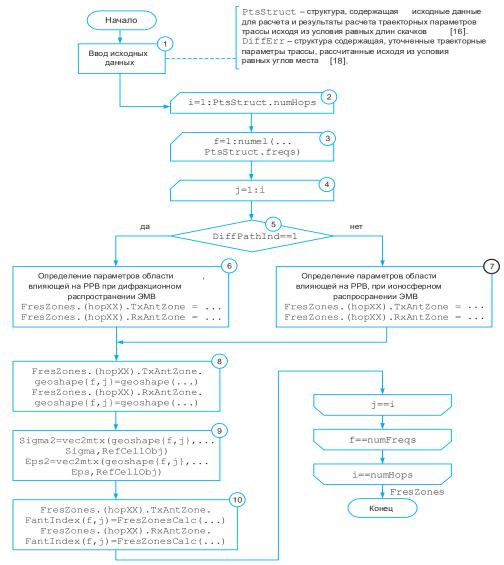


Рис. 2. Блок-схема методики учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн

Fig. 2. Flowchart of the Methodology for Accounting the Influence of Parameters of a Spherical Underlying Surface with Finite Conductivity on Antennas Characteristics

#### Результаты и выводы

Примеры расчета модуля и аргумента поправочного антенного коэффициента для условий  $\sigma = 5$  См/м,  $\epsilon = 80$  1/м показаны на рисунке 3.

С помощью разработанной методики проведены расчеты поправочных антенных коэффициентов для радиотрассы с началом в точке 54,4504° с.ш., 26,7811° в.д. и концом в точке 23,3869° с.ш., 63,5690° з.д. На рисунке 4 показаны области подстилающей поверхности, влияющие на характеристики передающей и приемной антенн соответственно для 5 скачкового луча и рабочей частоты 3 кГц. Цветовым градиентом на рисунках обозначена проводимость.

В таблицах 1 и 2 представлены расчеты поправочных антенных коэффициентов  $F_t$  и  $F_r$  для 5, 10 и 15-скачковых лучей на заданной радиотрассе. Как видно из таблиц, при более пологих траекториях, т. е. при меньшем количестве скачков, влияние подстилающей поверхности с конечной проводимостью, приводит к большему затуханию электромагнитной волны. Существенное, но меньшее влияние, оказывает диэлектрическая проницаемость подстилающей поверхности. Для передающей антенны, расположенной на суше, модуль поправочного коэффициента на  $3-9\,\%$  ниже, чем для приемной антенны, расположенной на поверхности морской воды.

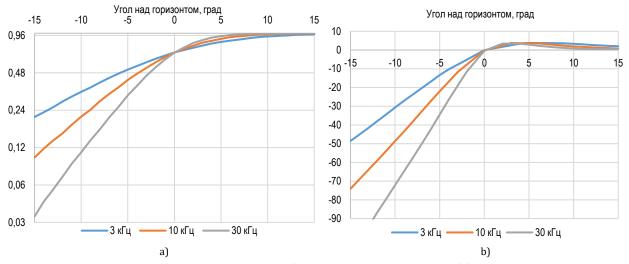


Рис. 3. Модуль (a) и аргумент (b) поправочного антенного коэффициента

Fig. 3. Magnitude (a) and Argument (b) of the Correction Antenna Coefficient

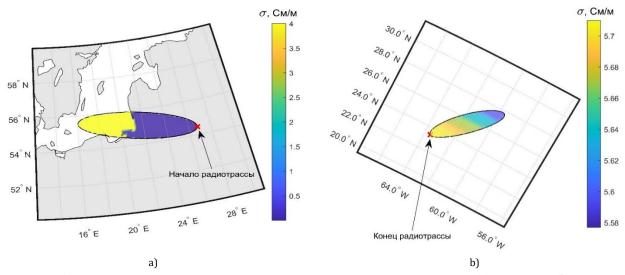


Рис. 4. Область подстилающей поверхности, влияющая на характеристики передающей (а) и приемной (b) антенн при 5-скачковом распространении ЭМВ частотой 3 кГц

Fig. 4. The Area of the Underlying Surface That Affects the Characteristics of the Transmitting (a) and Receiving (b) Antennas at the 5-Hop Electromagnetic Wave Propagation with the Frequency of 3 kHz

## ТАБЛИЦА 1. Поправочные антенные коэффициенты для передающей антенны

TABLE 1. Correction Antenna Coefficients for the Transmitting Antenna

-					
Параметр	Частота,	Количество скачков луча			
	кГц	5	10	15	
σ, См/м	3-30	0,01	0,01-0,003	0,003	
ε, 1/м	3-30	8,3	8,3-5,4	5,4	
$ F_t $	3	0,74	0,91	0,95	
	10	0,75	0,92	0,96	
	30	0,75	0,90	0,93	
$arg(F_t)$ , град	3	-0,06	2,69	1,0	
	10	-1,50	-1,13	-1,16	
	30	-5,54	-4,17	-3,6	

Разработанная методика может быть использована для расчета поправочных антенных коэффициентов при расчете энергетических параметров радиотрасс скачковыми методами.

Кроме того, с помощью поправочного антенного коэффициента решается ряд частных задач, таких как определение уровня напряженности электромагнитного поля у нижнего края ионосферы при известных характеристиках излучателя, уровень поля, измеренный приемной антенной, падающей волны, а также диаграмма направленности антенны с учетом конечной проводимости сферической подстилающей поверхности.

#### ТАБЛИЦА 2. Поправочные антенные коэффициенты для приемной антенны

TABLE 1. Correction Antenna Coefficients for the Receiving Antenna

Параметр	Частота, кГц	Количество скачков луча			
		5	10	15	
σ, См/м	3-30	5,67-5,70	5,70-5,71	5,7	
ε, 1/м	3-30	69,35-69,23	69,22-69,20	69,21-69,19	
$ F_r $	3	0,76	0,91	0,98	
	10	0,77	0,97	0,99	
	30	0,81	0,99	0,99	
$arg(F_r)$ , град	3	1,22	3,68	2,28	
	10	1,89	2,53	0,97	
	30	2,74	1,23	0,52	

Перспективным направлением для продолжения исследования с точки зрения реализации машинных алгоритмов является способ определения области, участвующей в формировании диаграммы направленности антенны. Хранение полной цифровой карты подстилающей поверхности в зависимости от ее разрешения может занимать до нескольких гигабайт в оперативной памяти, поэтому ее обработка занимает длительное время (при проведении серии расчетов – до нескольких часов). Целесообразно проработать вопрос предварительного выделения участка карты, подлежащего обработке (тайла), который будет загружаться и обрабатываться отдельно от общей карты.

#### Список источников

- 1. Bradley P.A. IRI and VLF/LF radio service planning // Advances in Space Research. 2001. Vol. 27. Iss. 1. PP. 145–152. DOI:10.1016/S0273-1177(00)00150-2
- 2. Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W. Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception with AWESOME instrument // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. Vol. 48. Iss. 1. PP. 3–17. DOI:10.1109/TGRS.2009.2028334
- 3. Lynn K. VLF Waveguide Propagation: The Basics // Proceedings of the 1st International Conference on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations. 2010. Vol. 1286. Iss. 1. PP. 3–41. DOI:10.1063/1.3512893
- 4. Pal S., Basak T., Chakrabarti S.K. Results of Computing Amplitude and Phase of the VLF Wave Using Wave Hop Theory // Advances in Geosciences. 2011. Vol. 27. Pp. 1–11. DOI:10.1142/9789814355414 0001
- 5. Bilitza D. IRI the international Standard for the ionosphere // Advances in Radio Science. 2018. Vol. 16. PP. 1–11. DOI:10.5194/ars-16-1-2018
- 6. Fron A., Galkin I., Krankowski A., Bilitza D., Hernández-Pajares M., Reinisch B., et al. Towards Cooperative Global Mapping of the Ionosphere: Fusion Feasibility for IGS and IRI with Global Climate VTEC Maps // Remote Sens. 2020. Vol. 12. Iss. 21. P. 3531. DOI:10.3390/rs12213531
- 7. Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernández-Pajares M., Krankowski A., Nava B., et al. Global Monitoring of Ionospheric Weather by GIRO and GNSS Data Fusion // Atmosphere. 2022. Vol. 13. Iss. 3. P. 371. DOI:10.3390/atmos13030371
- 8. Типикин А.А., Потапов Д.С. Методика оценки электрических характеристик почвы на трассе распространения земных радиоволн // Техника радиосвязи. 2022. № 1(52). С. 19–29. DOI:10.33286/2075-8693-2022-52-19-29
- 9. Типикин А.А. Методика формирования глобальных цифровых карт электрических характеристик подстилающей поверхности в диапазоне очень низких частот // Информатика, телекоммуникации и управление. 2022. Т. 15. № 1. С. 7–18. DOI:10.18721/ICSTCS.15101
- 10. Рекомендация МСЭ R Р.684-7 (9/2016). Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц.
- 11. Wait J., Conda A. Pattern of an antenna on a curved lossy surface // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1958. Vol. 6. Iss. 4. PP. 348–359. DOI:10.1109/TAP.1958.1144610
- 12. Hyovalti D.C. Computations of the antenna cut-back factor for LF radio waves. Technical note №330. Boulder Laboratories, 1965.
- 13. Knight P. MF propagation: a wavehop method for ionospheric field strength prediction // BBC eng. 1973. Vol. 100. P. 22-34.
  - 14. Coleman C.J. Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 296 p.

- 15. Gonzalez G. Advanced Electromagnetic Wave Propagation Methods. Boca Raton: CRC Press, 2022. 708 p.
- 16. Типикин А.А., Пыков Е.В. Уточненная модель высоты точки отражения для методики прогнозирования энергетических параметров радиотрасс в диапазоне очень низких частот // Труды всеармейской научно-практической конференции «Инновационная деятельность в вооруженных силах Российской Федерации». СПб.: ВАС, 2022.
- 17. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля–ионосфера и в ионосфере. М.: Наука, 1994. 152 с.
- 18. Типикин А.А., Пыков Е.В., Розанов А.А. Модифицированная методика расчета дифференциальных временных задержек лучей в лучевой модели распространения радиоволн ОНЧ диапазона // Сборник трудов научнотехнической конференции «Интеллектуальные разработки в интересах строительства и развития Военно-морского флота». 2022. С. 47–56.

#### References

- 1. Bradley P.A. IRI and VLF/LF radio service planning. *Advances in Space Research*. 2001;27(1):145–152. DOI:10.1016/S0273-1177(00)00150-2
- 2. Cohen M.B., Inan U.S., Paschal E.W. Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception with AWESOME instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010;48(1):3–17. DOI:10.1109/TGRS.2009.2028334
- 3. Lynn K. VLF Waveguide Propagation: The Basics. *Proceedings of the 1st International Conference on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations, 13–18 March 2010, Kolkata, India.* 2010. vol.126(1). p.3–41. DOI:10.1063/1.3512893
- 4. Pal S., Basak T., Chakrabarti S.K. Results of Computing Amplitude and Phase of the VLF Wave Using Wave Hop Theory. *Advances in Geosciences*. 2011;27:1–11. DOI:10.1142/9789814355414\_0001
- $5.\,$  Bilitza D. IRI the international Standard for the ionosphere. *Advances in Radio Science*. 2018;16:1-11. DOI:10.5194/ars-16-1-2018
- 6. Fron A., Galkin I., Krankowski A., Bilitza D., H.-P. Manuel, Reinisch B., et al. Towards Cooperative Global Mapping of the Ionosphere: Fusion Feasibility for IGS and IRI with Global Climate VTEC Maps. *Remote Sens.* 2020;12(21):3531. DOI:10.3390/rs12213531
- 7. Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernández-Pajares M., Krankowski A., Nava B., et al. Global Monitoring of Ionospheric Weather by GIRO and GNSS Data Fusion. *Atmosphere*. 2022;13(3):371. DOI:10.3390/atmos13030371
- 8. Tipikin A.A., Potapov D.S. Evaluation of the electrical characteristics of the soil on the path of propagation of surface radio waves. *Tekhnika radiosvyazi*. 2022;1(52):19–29. (in Russ.) DOI:10.33286/2075-8693-2022-52-19-29
- 9. Tipikin A.A. Method of obtaining global digital maps of underlying surface electric characteristics in the very low frequency band. *Computing, Telecommunication and Control*. 2022;15(1):7–18. (in Russ.) DOI:10.18721/JCSTCS.15101
  - 10. Rec. ITU-R P.684-7. Prediction of field strength at frequencies below about 150 kHz. September 2016.
- 11. Wait J., Conda A. Pattern of an antenna on a curved lossy surface. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. 1958;6(4):348–359. DOI:10.1109/TAP.1958.1144610
- 12. Hyovalti D.C. Computations of the antenna cut-back factor for LF radio waves. Tecnical note №330. Boulder Laboratories; 1965.
  - 13. Knight P. MF propagation: a wavehop method for ionospheric field strength prediction. BBC eng. 1973;100:22-34.
  - 14. Coleman C.I. Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 296 p.
  - 15. Gonzalez G. Advanced Electromagnetic Wave Propagation Methods. Boca Raton: CRC Press; 2022. 708 p.
- 16. Tipikin A.A., Pykov E.V. A refined model of the height of the reflection point for the prediction method of radio tracks energy parameters in the very low frequency band. *Proceedings of the All-Army Scientific and Practical Conference «Innovations in Armed Forces of the Russian Federation»*. St. Petersburg: Military Academy of Communications Publ.; 2022. (in Russ.)
- 17. Makarov G.I., Novikov V.V., Rybachek S.T. *Propagation of radio waves in the Earth–ionosphere waveguide channel and in the ionosphere*. Moscow: Nauka Publ.; 1994. 152 p. (in Russ.)
- 18. Tipikin A.A., Pykov E.V., Rozanov A.A. A modified method for calculating the differential time delays of rays in the wavehop model of radio waves propagation in the VLF band. *Proceedings of the Scientific and Technical conference on Intellectual investigations in the interests of the development and improvement of the Navy.* 2022. p.47–56. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 30.04.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2023; принята к публикации 06.06.2023.

 $The \ article \ was \ submitted \ 30.04.2023; \ approved \ after \ reviewing \ 24.05.2023; \ accepted \ for \ publication \ 06.06.2023.$ 

### Информация об авторах:

ТИПИКИН Алексей Алексеевич

кандидат технических наук, начальник отдела научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий и разведки Военно-морской академии им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова

в https://orcid.org/0000-0002-0940-4285

ПОТАПОВ Денис Сергеевич младший научный сотрудник отдела научно-исследовательского центра телекоммуникационных технологий и разведки Военно-морской академии им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова

[10] https://orcid.org/0009-0008-2289-1576



Научная статья УДК 681.3.06 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-68-73



# Development of an Accessibility Testing System for the Virtual Machine Deployment Service in the Cloud

- **□ Andrey Marchenko** Mar4enko.ag@gmail.com
- Dmitry Shchemelinin, dshchmel@gmail.com

Intel Corporation, Santa Clara, United States of America

**Abstract:** This paper presents a developed system for testing the accessibility of the virtual machine deployment service in the cloud. The methods used for monitoring cloud systems based on open-source solutions such as Kubernetes, Prometheus, and Selenium are discussed. The key stages of the system design are described, including requirements gathering and analysis, architecture, and implementation features. This system allows for the prevention of potential issues before they arise, as well as increasing IT service reliability. Integration with open-source systems helps to reduce the cost of system development and operation and speeds up implementation time. Additionally, this system can be quickly adapted and customized to meet specific needs. To analyze the feasibility of building the system, production statistics of virtual machine reservations were collected using the Prometheus monitoring system.

**Keywords:** information technology, monitoring, information processing, monitoring metrics, cloud technologies, application testing, Prometheus, Selenium, Kubernetes, Cronjobs, Python

**For citation:** Marchenko A., Shchemelinin D. Development of an Accessibility Testing System for the Virtual Machine Deployment Service in the Cloud. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3):68–73. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-68-73

# Разработка системы тестирования доступности сервиса развертывания виртуальных машин в облаке

- **© Андрей Геннадьевич Марченко**⊠, mar4enko.ag@gmail.com
- Дмитрий Александрович Щемелинин, dshchmel@gmail.com

Корпорация Intel, Санта-Клара, Соединенные Штаты Америки

**Аннотация:** В данной статье представлена разработанная система тестирования доступности сервиса развертывания виртуальных машин в облаке. Рассмотрены методы, используемые для мониторинга облачных систем на основе решений с открытым исходным кодом (от англ. Opensource), такие как Kubernetes, Prometheus и Selenium. Описаны ключевые этапы проектирования системы, а именно сбор и анализ требований, архитектура, а также особенности реализации. Данная система позволяет предупредить возможные проблемы до их возникновения, а также повысить надежность сервиса. Интеграция с системами на основе открытых исходных кодов позволяет уменьшить стоимость разработки и экс-

плуатации системы, а также ускорить сроки внедрения. Данная система также может быть быстро адаптирована и настроена с учетом конкретных потребностей. Для анализа целесообразности построения системы была собрана производственная статистика резервирований виртуальных машин с помощью системы мониторинга Prometheus.

**Ключевые слова**: информационные технологии, мониторинг, обработка информации, метрики мониторинга, облачные технологии, тестирование приложений, Prometheus, Selenium, Kubernetes, Cronjobs, Python

**Ссылка для цитирования**: Марченко А.Г., Щемелинин Д.А. Разработка системы тестирования доступности сервиса развертывания виртуальных машин в облаке // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 68–73. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-68-73

#### Introduction

Cloud providers offer various types of services, such as hosting virtual machines, data storage, databases, analytics, and more. Typically, access to these services is provided both through a web interface and an API (Application Programming Interface) - a set of interfaces for software integration with services via various protocols. Monitoring the availability and performance of cloud systems and services is one of the most important aspects of ensuring their stable operation, as well as identifying and fixing issues that arise during operation. Specialized software is used to monitor the availability of cloud services. One popular open-source solution is the Prometheus monitoring service [1]. This monitoring system allows you to collect and store performance and availability data in the form of time series - sequences of values that change over time. The collected data can be analyzed using various methods, such as visualization, statistical analysis, and machine learning.

In this study, a new method for testing and monitoring a cloud service was proposed. This service allows users to rent virtual machines in the cloud and choose one of the offered types of virtual machines with a specified amount of RAM, processors, and storage. This type of service is very popular for both enterprises and individual users and allows significant resources to be saved by providing compute resources on demand.

#### The object of scientific research

The object of the research is the internal cloud platform of the Intel company [2], which allows developers and researchers to use computing resources to test and optimize their applications and algorithms. The platform also provides extensive capabilities for managing infrastructure for computing and efficient resource management and is used for various tasks, such as processing big data and machine learning. Intel is one of the world's leading manufacturers of electronic devices and computer components, including microprocessors and chipsets for client computing systems and data centers, chips for artificial intelligence systems and the Internet of Things, and non-volatile memory.

One of the key services of the cloud platform is VMaaS (Virtual Machine as a Service), which provides virtual infrastructure. By analyzing the reservation statistics of virtual machines within the internal cloud (Figure 1), one can infer that there is a continuous increase in the demand for virtual infrastructure, thereby necessitating a greater emphasis on ensuring the service's stability and reliability.

The aim of the research is to develop a method and system for testing the availability of virtual machine deployment service in the cloud based on Prometheus and Selenium [3], characterized by the following scientific novelty:

- Implementation of a service for testing virtual machine deployment in the cloud;
- Integration of Prometheus and Selenium tools with the deployment service and defining scenarios for monitoring and testing cloud resources;
- A new method for collecting and analyzing data on availability using Prometheus and Selenium, including identifying performance issues and optimizing the operation of the virtual machine deployment service in the cloud.

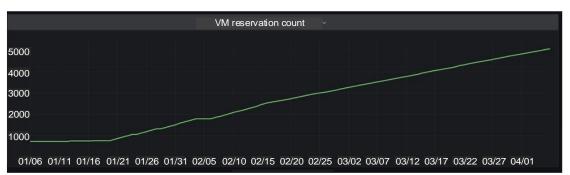


Fig. 1. The Number of Reservations for Virtual Machines in the VMaaS System from 06th January 2023 to 01st April 2023

#### **Research Methods**

The main functional requirement for testing a cloud subsystem is the ability to create and delete a virtual machine with specified characteristics such as memory, processor, and disk size. As a part of this research a user interface was chosen for interaction with the testing system. This allowed not only to ensure the maximum correspondence of the test scenario with the end user behavior in the system, but also to organize the collection of metrics for analyzing the quality of services that provide functionality, with the aim of identifying potential problems before users report them.

The following functional requirements were formulated for the developed subsystem:

- 1) Implementation of login to the cloud system;
- 2) Navigation through the interface, localization, and selection of the virtual machine deployment service:
  - 3) Creation and deletion of virtual machines;
- 4) Checking the readiness status of the virtual machine;
  - 5) Calculation of key service metrics:
    - Tracking login time;
    - Tracking virtual machine creation time;
    - Tracking the overall scenario execution time.

When choosing key metrics, the need for further predicting the service availability using mathematical models and event forecasting algorithms to achieve business goals was considered [4–6]. Creating a virtual machine through the user interface is a process with many steps, each of which must be considered from the perspective of potential errors and their corresponding handling, including ensuring reliable and stable system behavior in case the task unexpectedly fails.

Therefore, the following non-functional requirements were formulated:

- Running the scenario at a specified frequency and schedule;
- Automatically retrying unsuccessful operations during scenario execution. Configure the waiting interval between retries and the number of retries;
- Global time limit for the entire scenario. If the scenario exceeds the specified limit, it should be forcibly terminated.

To implement the test scenario with the formulated functional and non-functional requirements, the Python programming language, and the selenium-python library [7] based on the Selenium WebDriver were chosen. Python is a widely used language [8] that allows applications of varying complexity to be implemented in a short time. It has simple and understandable syntax, lack of additional performance requirements, and ease of debugging and testing make it an ideal candidate for this research.

Selenium WebDriver [9], together with the selenium-python library, is widely used for testing web applications and allows for emulating user interaction with the browser.

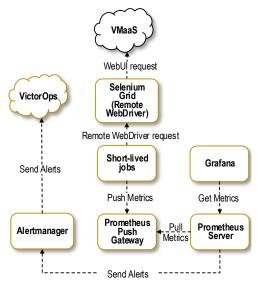


Fig. 2. System Architecture

Based on the formulated functional and nonfunctional requirements, a corresponding architecture was developed (Figure 2). Kubernetes, an open-source software for automating deployment, scaling, and management of containerized applications, was chosen as the platform for implementation, along with a special type of Kubernetes resource - Cronjob. This type of resource enables the scheduling and execution of tasks at specific times, controlling the schedule and frequency, managing retries in case of errors, and setting a global limit on task execution. The Selenium Grid subsystem [10] was used to interact with the user interface of the virtual machine deployment cloud service. This component provides a platform for remote script execution using WebDriver, enabling parallel execution of test scenarios by running them on different instances of remote browsers. VMaaS is a cloud service that provides a platform for deploying virtual machines. Prometheus was chosen as the main system for collecting and storing metrics, which also handles metric processing and notification generation. Alertmanager processes notifications generated by Prometheus and forwards them to VictorOps. This component manages and processes incidents in real-time and allows for notifying relevant teams in case of problems. Prometheus Pushgateway serves as an intermediate layer between short-lived tasks and the main Prometheus server. This component is necessary because Prometheus operates on a pull model where it periodically scrapes target objects for metric collection via a short interval, while tasks run on their own schedule, and for efficient metric collection, a push model needs to be implemented. During task execution, the task sends an HTTP (Hypertext transfer protocol) request to Prometheus Pushgateway, which temporarily stores metrics and serves as the target object for Prometheus. To create and configure graphs, diagrams, and other metric visualization panels, Grafana [11] was along with Prometheus.

To evaluate the availability of the virtual machine deployment service, key metrics were selected. The primary metric was chosen as the user login time, which is the time during which the user is authenticated and authorized using registered credentials. The measurement was taken from the moment the login form appeared until the user was shown the main screen with the ability to launch a virtual machine. The following time\_monitor function was proposed for calculating time metrics.

The usage of this function for the login process is as follows:

```
wrapped login = retry(
   on exception=WebDriverException,
   to exception=LoginError,
   attempts=self.login_retry_count,
   sleep interval=self.login retry interval
)(self.login)
with self.time_monitor('login'):
   wrapped login()
```

The next key metric selected was the instance launch time, which determines the acceptable limit for the time we expect the virtual machine to be ready.

```
with self.time_monitor('launch_instance',
start_time):
    self.driver.find_element(
         By.XPATH,
         "//button[@class='btn btn-primary' and
text() = 'Launch Instance']"
    ).click()
    logger.info(f'Instance launched:
{start_time}')
    self.wait_running_instance()
```

If this limit is exceeded, the script will terminate with an error.

The last key metric identified was the total time it took to create a virtual machine, including processing expected exceptional situations, repeating operations, waiting for the machine to be ready, and deleting it. Machine deletion is an important part of completing

the testing scenario, as all resources allocated during the process must be freed up.

The virtual machine launch time metric was analyzed, and a threshold value was determined, which was used in Prometheus to create notifications. To select the optimal method for determining the threshold value, it was necessary to check if the distribution was normal. To do this, the Shapiro-Wilk test was used [12]. The basis of the test is to check the null hypothesis - the data is normally distributed. The alternative hypothesis is that the data does not have a normal distribution. The result of the Shapiro-Wilk criterion is a statistical value and a p-value. In most cases, the threshold value is taken as 0.05. If the p-value is less than 0.05, the null hypothesis is rejected. The SciPy library of the Python language was used for implementation. The input data was an array of virtual machine launch time metrics from Prometheus over the past 7 days.

```
from scipy.stats import shapiro
from datetime import timedelta, datetime
from prometheus import PrometheusClient
p = PrometheusClient (PROMETHEUS ADDRESS,
PROMETHEUS USER, PROMETHEUS PASSWORD)
query = 'vm test provisioning seconds'
end = datetime.now()
start = end - timedelta(days=7)
step = 600 # 10 min
input list =
p.make range query(start.timestamp(),
end.timestamp(), step, query)
statistic, p value = shapiro(input list)
print('Statistic:', statistic)
print('p-value:', p value)
alpha = 0.05
if p value > alpha:
   print('fail to reject H0)')
   print('reject H0')
```

As a result, a low p-value of 2.098965063816978e-31 was obtained, based on which the null hypothesis was rejected, and it was concluded that the data did not have a normal distribution.

To calculate the threshold value, the following method was used – the sum of the median and three absolute deviations [13]:

```
Threshold = Median + 3 * MAD
```

The median of the data was calculated using the Numpy library in Python, and the mean absolute deviation was computed.

```
import numpy as np
median = np.median(input list)
mad = np.median(np.abs(input list - median))
threshold = median + 3 * mad

print("Median: ", median)
print("MAD: ", mad)
print("Threshold: ", threshold)
```

As a result, the median was calculated to be 131.5, the mean absolute deviation was 12.5, and the threshold value was determined to be 169.

### Results and discussion

A system that collects various key parameters of a cloud virtual machine deployment service was developed, based on a real-world scenario that simulates user behavior.

After analyzing the collected data (Figure 3) using the method of summing the median and three absolute deviations, a threshold value of 169 was calculated, which can be used in Prometheus in an expression describing a potential issue in the virtual machine deployment service. Exceeding this threshold indicates a deviation from the expected values and requires immediate escalation and technical investigation of the causes by the relevant support team [14].



Fig. 3. Virtual Machine Launch Time

### Conclusion

The main result of the work is the developed system for testing the availability of virtual machines and the integration method into the monitoring system of the internal cloud service of Intel company. The main test case was proposed and implemented – creating and deleting a virtual machine using the user interface, and trigger activation criteria were defined. During the operation of cloud environments using this system, problematic areas in the architecture of the virtual machine creation service were identified, which allowed for timely optimization of the cloud system's operation. By analyzing the collected data, problems with the performance of the web interface were iden-

tified and eliminated, which significantly improved the user experience of using this interface. The developed system allows for deviations in the behavior of the service to be recorded in a number of key parameters, such as login time and virtual machine launch time. This significantly reduced the response time to incidents. The use of free open-source technologies such as Prometheus and Selenium contributes to increased efficiency and reduced costs for servicing cloud services. The described method is an effective way of testing cloud services and can also be used to analyze and improve reliability and availability – the most important criteria for 24/7 business applications.

### References

- 1. Prometheus. Monitoring system & time series database URL: https://prometheus.io/docs/introduction/overview [Accessed 04th April 2023]
  - 2. Official intel web site. URL: https://www.intel.com [Accessed 04th April 2023]
- 3. *Selenium*. The selenium browser automation project. URL: https://www.selenium.dev/documentation [Accessed 04th April 2023]
- 4. Shchemelinin D. Mathematical Models and Methods for Monitoring and Predicting the State of Globally Distributed Computing Systems. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(3):73–78. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-73-78
- 5. Shchemelinin D. A method for predicting events in globally distributed computing complexes. *Modern Science: Current Issues in Theory and Practice. Series: Natural Technical Sciences.* 2021;12-2:47–54. (in Russ.) DOI:10.37882/2223-2966.2021. 12-2.16
- 6. Shchemelinin D. Method and algorithm for automatic recovery of information services based on objective predictive monitoring data. *Modern Science: Current Issues in Theory and Practice. Series: Natural Technical Sciences*. 2021;8:140–144. (in Russ.) DOI:10.37882/2223-2966.2021.08.41

- 7. Selenium with Python. URL: https://selenium-python.readthedocs.io [Accessed 04th April 2023]
- 8. The TIOBE Programming Community index an indicator of the popularity of programming languages. URL: https://www.tiobe.com/tiobe-index [Accessed 04th April 2023]
- 9. Raghavendra S. Python Testing with Selenium: Learn to Implement Different Testing Techniques Using the Selenium WebDriver. Berkeley: Apress; 2020. 196 p.
- 10. Selenium. When to Use Selenium Grid. URL: https://www.selenium.dev/documentation/grid/applicability [Accessed 04th April 2023]
  - 11. Grafana Labs. Grafana documentation. URL: https://grafana.com/docs/grafana/latest [Accessed 04th April 2023]
- 12. Razali N.M., Wah Y.B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*. 2011:2(1):21–33. URL: https://www.nrc.gov/docs/ML1714/ML17143A100.pdf [Accessed 04th April 2023]
- 13. Leys C, Ley C., Klein O., Bernard P., Licata L. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*. 2013;49(4):764–766. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022103113000668 [Accessed 04th April 2023]
- 14. Shchemelinin D. System of criteria and algorithm of information processing and decision-making for the software module for displaying the most significant monitoring events in the information system. *XXI century: Results of the Past and Challenges of the Present plus.* 2021;10(3):67–71. (in Russ.) DOI:10.46548/21vek-2021-1055-0012

### Список источников

- $1. \ \ Monitoring \ system \ \& \ time \ series \ database \ // \ Prometheus. \ URL: \ https://prometheus.io/docs/introduction/overview \ [Accessed 04th April 2023]$ 
  - 2. Official intel web site. URL: https://www.intel.com [Accessed 04th April 2023]
- 3. The selenium browser automation project // Selenium. URL: https://www.selenium.dev/documentation [Accessed 04th April 2023]
- 4. Щемелинин Д.А. Математические модели и методы мониторинга и прогнозирования состояния глобально распределенных вычислительных комплексов // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 3. С. 73–78. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-73-78
- 5. Щемелинин Д.А. Метод прогнозирования событий в глобально распределенных вычислительных комплексах. Современная наука: актуальные вопросы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 12-2. С. 47–54. DOI:10.37882/2223-2966.2021.12-2.16
- 6. Щемелинин Д.А. Метод и алгоритм автоматического восстановления информационных сервисов на основе объективных предиктивных данных мониторинга. Современная наука: актуальные вопросы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 8. С. 140–144. DOI:10.37882/2223-2966.2021.08.41
  - 7. Selenium with Python. URL: https://selenium-python.readthedocs.io [Accessed 04th April 2023]
- 8. The TIOBE Programming Community index an indicator of the popularity of programming languages. URL: https://www.tiobe.com/tiobe-index [Accessed 04th April 2023]
- 9. Raghavendra S. Python Testing with Selenium: Learn to Implement Different Testing Techniques Using the Selenium WebDriver. Berkeley: Apress, 2020. 196 p.
- 10. When to Use Selenium Grid // Selenium. URL: https://www.selenium.dev/documentation/grid/applicability [Accessed 04th April 2023]
  - 11. Grafana documentation // Grafana Labs. URL: https://grafana.com/docs/grafana/latest [Accessed 04th April 2023]
- 12. Razali N.M., Wah Y.B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests // Journal of Statistical Modeling and Analytics. 2011. Vol. 2. No. 1. PP. 21–33. URL: https://www.nrc.gov/docs/ML1714/ML17143A100.pdf [Accessed 04th April 2023]
- 13. Leys C, Ley C., Klein O., Bernard P., Licata L. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median // Journal of Experimental Social Psychology. 2013. Vol. 49. Iss. 4. PP. 764–766. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022103113000668 [Accessed 04th April 2023]
- 14. Щемелинин Д.А. Система Критериев и алгоритм обработки информации и принятия решений для программного модуля отображения наиболее значимых событий мониторинга в информационной системе // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 3(55). С. 67–71. DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0012

Статья поступила в редакцию 20.02.2023; одобрена после рецензирования 27.02.2023; принята к публикации 25.03.2023.

The article was submitted 20.02.2023; approved after reviewing 27.02.2023; accepted for publication 25.03.2023.

### Информация об авторах:

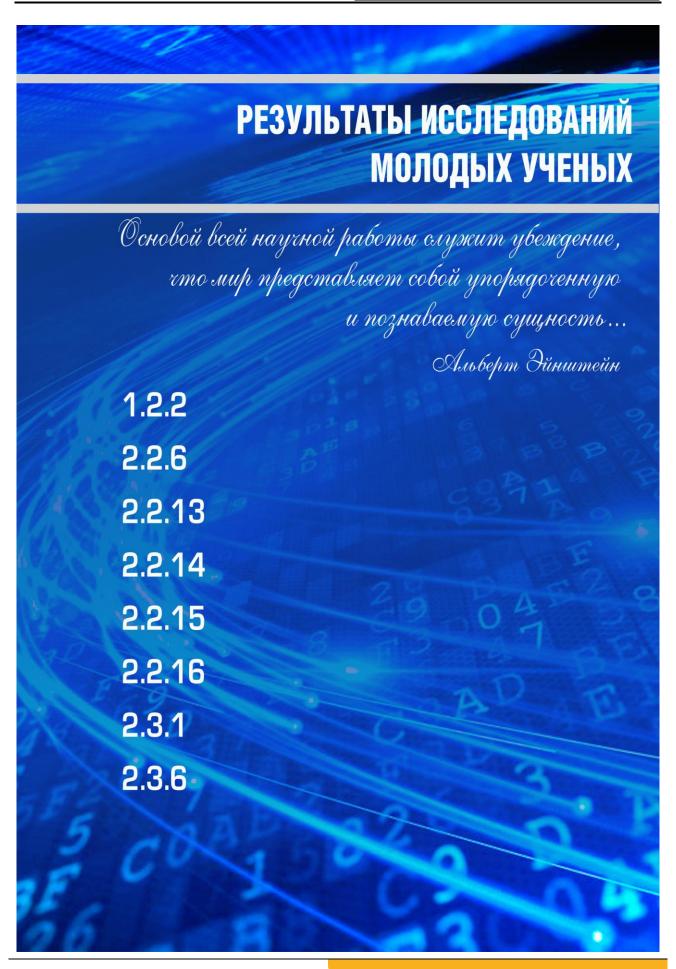
МАРЧЕНКО Андрей Геннадьевич

архитектор «облачных» приложений Software and Advanced Technology Group, корпорация Intel

https://orcid.org/0009-0001-9276-3907

ЩЕМЕЛИНИН Дмитрий Александрович доктор технических наук, вице-президент Software and Advanced Technology Group, корпорация Intel

https://orcid.org/0000-0003-3032-130X



Научная статья УДК 004.725.7 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-75-81



# Разработка модельной сети и анализ сетевого трафика управления роботом-манипулятором

💿 Любовь Сергеевна Горбачева, gorbacheva.ls@sut.ru

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

**Аннотация:** В статье рассматривается проблематика дистанционного управления роботами-манипуляторами по сети связи. Представлена структура разработанной модельной сети для перехвата и анализа сетевого трафика, генерируемого при дистанционном управлении роботами-манипуляторами, а также описаны ее основные компоненты. Представлены основные характеристики перехваченного сетевого трафика для четырех различных Приложений использования робота-манипулятора в базовом сценарии взаимодействия, а также с учетом использования предложенного автором улучшенного сетевого алгоритма управления роботами-манипуляторами или их кластерами. Проведена оценка коэффициента самоподобия полученного сетевого трафика.

**Ключевые слова:** промышленный Интернет Вещей, модельная сеть, робот-манипулятор, перехват и анализ сетевого трафика, характеристики сетевого трафика, коэффициент самоподобия

**Источник финансирования:** Научное исследование в ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича выполнено в рамках мегагранта Минобрнауки по соглашению № 075-15-2022-1137.

**Ссылка для цитирования**: Горбачева Л.С. Разработка модельной сети и анализ сетевого трафика управления роботом-манипулятором // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 75–81. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-75-81

# Development of a Model Network and an Analysis of Network Traffic for Controlling Robot Manipulators

Lyubov Gorbacheva, gorbacheva.ls@sut.ru

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

Abstract: The issue of controlling robotic manipulators remotely via a communication network is covered in the article. The built model network's structure is shown, and its key elements are detailed. It was designed to intercept and analyze network traffic generated during remote control of robotic manipulators. The main traits of the network traffic that was intercepted for four different applications of using a robot manipulator in the fundamental interaction scenario are presented. These traits also take into account the use of the author proposed improved network algorithm for controlling robot manipulators or their clusters. The self-similarity coefficient of the received network traffic was estimated.

**Keywords:** industrial Internet of Things, model network, robot manipulator, network traffic interception and analysis, network traffic characteristics, self-similarity coefficient

**Funding:** The studies at St. Petersburg State University of Telecommunications prof. M.A. Bonch-Bruevich were supported by the Ministry of Science and High Education of the Russian Federation by the grant 075-15-2022-1137

**For citation:** Gorbacheva L. Development of a Model Network and an Analysis of Network Traffic for Controlling Robot Manipulators. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3):75–81. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-75-81

### Введение

В настоящее время в мире все более активно набирает обороты четвертая промышленная революция, в рамках которой в различные сферы деятельности человека интегрируются такие перспективные и наукоемкие технологии как искусственный интеллект, Интернет Вещей, робототехника, технологии распределенного реестра (блокчейн) и т. д. [1].

Безусловно из всего перечисленного роботы и робототехника являются одним из основных столпов дальнейшего технического прогресса, поскольку именно они могут заменить людей на опасных и вредных производствах, значительно увеличить производительность труда, существенно повысить качество изготовляемой продукции и снизить ее стоимость.

По данным из открытых источников [2, 3] объемы рынка промышленной робототехники, а также ежегодные поставки различных типов промышленных роботов непрерывно увеличивались последние несколько лет, и эта тенденция будет сохраняться в ближайшие годы (рисунки 1 и 2).



**Рис. 1. Объем мирового рынка промышленных роботов** *Fig. 1. The Volume of the Global Market for Industrial Robots* 



**Рис. 2. Объем мировых поставок промышленных роботов** *Fig. 2. The Volume of World Supplies of Industrial Robots* 

### Постановка задачи исследования

Большинство роботов и роботизированных систем в настоящее время управляются непосредственно операторами или программно-аппаратными комплексами в дистанционном режиме работы. При высокой концентрации роботов на некоторой ограниченной площади, например, в рамках цехов автоматизированных промышленных производств, неизбежно потребуется их кластеризация (например, по типу решаемых задач, по фактору взаимного расположения и т. д.). Также станет просто невозможным управление каждым отдельным роботом по собственной выделенной линии связи, а значит, управление отдельными роботами или их кластерами будет происходить с использованием локальных вычислительных сетей предприятий и т. д.

Сетевой трафик управления роботами неизбежно будет смешиваться с другими видами сетевого трафика: такими как трафик данных, речь, видео и т. д., что может создать проблемы при его доставке получателю. Поэтому необходимо тщательно изучить особенности сетевого управления роботами и роботизированными системами, определить характеристики генерируемого при этом сетевого трафика, а также – определить наиболее оптимальную архитектуру сети для управления роботами и разработать требования к качеству обслуживания [4, 5].

### Разработка модельной сети

Для изучения особенностей сетевого управления роботами, а также перехвата и анализа генерируемого трафика на практике необходимо разработать и реализовать модельную сеть [6, 7]. Модельная сеть обычно представляет собой фрагмент сети связи, которому присущи все возможности и особенности существующих сетей (архитектура, сетевые протоколы, используемое для построения сети оборудование и кабели связи), а также некоторые дополнительные специфические функции - возможности генерации различных видов сетевого трафика по заданным параметрам, возможности ответвления/перехвата сетевого трафика, возможности внесения в каналы передачи данных помех (затухание сигнала, внесение дополнительной задержки, джиттера, потерь или дупликации сетевых пакетов), расширенные возможности мониторинга и протоколирования происходящих в сети событий и т. д.

Основным элементом модельной сети выбран робот-манипулятор «DOBOT Magician», который

представляет собой многофункциональный малогабаритный настольный робот-манипулятор для проведения исследований, обучения и тестирования в области робототехники [8]. К преимуществам данной модели робота можно отнести большое количество сменных модулей (вакуумная присоска, механический захват, лазерный гравер, держатель пишущего пера, блок FDM 3D-печати и др.), а также возможность использовать данную роботизированную платформу для собственных разработок и исследований, поскольку данная модель имеет 13 дополнительных интерфейсов ввода/вывода данных для управления навесным оборудованием. Робот поддерживает 20 различных языков программирования (включая наиболее распространенные сегодня Python, Java, C++ и др.).

Внешний вид робота-манипулятора со сменным модулем держателя пишущего пера представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Внешний вид робота-манипулятора «DOBOT Magician»

Fig. 3. The Robot-Manipulator "DOBOT Magician"

Основные технические характеристики роботаманипулятора представлены в таблице 1.

## ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики робота-манипулятора «DOBOT Magician»

TABLE 1. Technical Characteristics of the Robot-Manipulator "DOBOT Magician"

Характеристика	Значение
Количество осей	4
Полезная нагрузка	500 г
Макс. Объект	320 мм
Повторяемость положения (управление)	0,2 мм
Интерфейсы	USB / Wi-Fi / Bluetooth
Источник питания	100 В-240 В, 50/60 Гц
Питание	12 В / 6,5 А постоянного тока
Потребление	60 Вт Макс.
Рабочая температура	-10-60°C

На рисунке 4 приведена структура разработанной модельной сети, которая состоит из сервера, клиента, шлюзов доступа и самого робота-манипулятора.

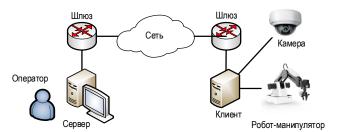


Рис. 4. Структура модельной сети

Fig. 4. The Model Network System Structure

Сервер передает команды управления через сеть связи к клиенту, который в свою очередь принимает поступающие команды и поочередно передает их на робота-манипулятора. Оператор осуществляет непрерывный контроль параметров работы сервера, клиента и сети связи, а также контроль состояния и качество выполнения поступающих команд роботом-манипулятором визуально или с помощью камеры видеонаблюдения, если визуальный контроль невозможен или по каким-то причинам затруднен.

В структуру модельной сети для внесения помех в канал передачи данных может быть добавлен специальный узел постановки помех, что позволит проводить многоплановое тестирование как самих робототехнических комплексов, так и возможностей дистанционного управления такими комплексами по сети связи [9]. Для управления роботом-манипулятором было разработано сетевое программное обеспечение (далее – ПО), которое позволяет передавать команды с сервера через клиентов как отдельным роботам-манипуляторам, так и целым кластерам таких роботов. В этом случае клиент может выполнять функции контроллера или головного узла кластера.

Базовый сценарий обмена сообщениями и последовательность действий при управлении роботомманипулятором для случая, когда в одном сетевом пакете передается одна команда, представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Базовый сценарий обмена сообщениями

Fig. 5. Basic Scenario

Перехват генерируемого в процессе дистанционного управления роботом-манипулятором сетевого трафика осуществлялся на сетевом интерфейсе клиента. Для перехвата и последующего анализа сетевого трафика использовалось открытое и свободно-распространяемое ПО [10]. Последующая статистическая обработка результатов измерений проходила с помощью табличного процессора.

### Перехват и анализ сетевого трафика

Перехват сетевого трафика осуществлялся для четырех Приложений:

- 1 (без модулей) на роботе-манипуляторе не установлено никаких сменных модулей, осуществляется перемещение манипулятора робота в пространстве по заданным координатам;
- 2 (вакуумный захват) на роботе-манипуляторе установлен модуль вакуумного захвата (присоска), осуществляется перемещение небольшого груза в рамках зоны действия робота;
- 3 (механический захват) то же, но механического захвата;
- 4 (черчение) на роботе-манипуляторе установлен модуль пишущего пера, осуществляется черчение геометрических фигур на поверхности листа бумаги.

Характеристики перехваченного в ходе экспериментов на базе модельной сети сетевого трафика представлены в таблице 2 (здесь и далее, время перехвата равняется 300 с).

ТАБЛИЦА 2. Трафик, поступающий от клиента на сервер / от сервера к клиенту

TABLE 2. Traffic Coming from Client to Server / from Server to Client

Характери-	Приложение				
стика	1	2	3	4	
Количество пакетов в секунду, п/с	2/2	2,8/2,8	3,1/3,1	12,7/12,7	
Средний размер пакета, байт	55/96	55/96	55/94	55/85	
Скорость передачи данных, бит/с	895/1565	1228/2118	1363/2354	5620/8625	

Как видно из представленных характеристик, для сетевого трафика, передаваемого от клиента на сервер с целью подтверждения приема и выполнения команд, характерна фиксированная длина пакетов, а для трафика, поступающего от сервера к клиенту, длина пакета меняется в зависимости от Приложения.

Интенсивность отправки пакетов данных зависит от сложности, решаемых роботом-манипулятором, задач. С одной стороны, чем больше установленное количество точек в пространстве, между которыми должен перемещаться манипулятор, тем

более плавно он движется, что важно при перемещении ценных грузов, при проведении высокоточных манипуляций, а также при черчении геометрических фигур. С другой стороны, это увеличивает количество передаваемых команд.

### Реализация улучшенного алгоритма управления

В результате проведенного тестирования и опытной эксплуатации роботов-манипуляторов было установлено, что разработанное ранее сетевое ПО управления роботами, сценарий работы которого представлен на рисунке 5, показало низкую эффективность. Фактически, процесс передачи команд управления с сервера к клиенту и подтверждения их приема в этом случае никак не связан с процессом выполнения поступающих команд роботом-манипулятором. В результате на клиенте за короткий период времени накапливается большой массив ожидающих выполнения команд, которые в случае возникновения ошибки выполнения конкретной команды роботом-манипулятором и необходимости дальнейшей перезагрузки клиента оказываются потерянными.

Было принято решение внести изменения в разработанное ПО и реализовать алгоритм, предложенный автором ранее [11]. Реализация алгоритма сетевого взаимодействия между сервером и клиентом с подключенными роботами-манипуляторами фактически является разработкой сетевого протокола прикладного уровня по модели OSI, который базируется на основе транспортного протокола ТСР и в рамках исследований получил рабочее название SRMP (аббр. от англ. Simple Robot Management Protocol). Основная идея алгоритма заключается в передаче от сервера к клиенту не отдельных команд управления, а серий команд, при этом подтверждается как получение, так и выполнение серии команд. Сами же серии команд имеют переменную длину, которая зависит от вероятности возникновения ошибки выполнения конкретной команды роботом. Поскольку в рамках разработанного ПО проводится учет успешно выполненных команд и команд, выполненных с ошибкой, происходит постоянный перерасчет вероятности возникновения ошибки.

Тогда, если обозначить оптимальное количество команд в серии как  $b^*$ , размер одной команды (который зависит от Приложения) как  $S_{DC}$ , суммарный размер служебных сообщений, передаваемых в рамках одной серии команд как L, а вероятность ошибки выполнения отдельной команды как  $p_{\rm er}$ , то решение может быть получено методом нахождения экстремума функции, что дает в результате выражение для  $b^*$ :

$$b^* = -\frac{L}{2S_{DC}} - \frac{\sqrt{L^2 \ln(1 - p_{er})^2 - 4LS_{DC} \ln(1 - p_{er})}}{2S_{DC} \ln(1 - p_{er})}.$$
 (1)

При этом значения  $p_{\rm er}$ ,  $S_{DC}$ , L,  $b^*_{\rm hav}$  вводятся оператором ПО и/или рассчитываются автоматически в начале работы, например, исходя из решаемой роботом задачи (используемого Приложения). Далее по мере накопления информации о выполненных командах и возникающих ошибках происходит перерасчет  $b^*$ . Сценарий обмена сообщениями и последовательность действий для описанного алгоритма представлены на рисунке 6.

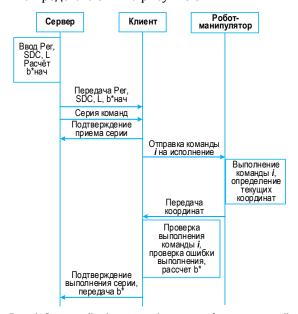


Рис. 6. Сценарий обмена сообщениями (с реализацией предложенного алгоритма)

Fig. 6. Scenario (with the Implementation of the Proposed Algorithm)

С учетом внесенных в ПО изменений согласно представленному алгоритму, был повторно произведен перехват и последующий анализ сетевого трафика. Результаты данных экспериментов представлены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Трафик, поступающий от клиента на сервер / от сервера к клиенту (с реализацией предложенного алгоритма)

TABLE 3. Traffic Coming from Client to Server / from Server to Client (with Implementation of the Proposed Algorithm)

Характери-		Прило	ожение		
стика	1	4			
Количество пакетов в секунду, п/с	0,1/0,1	0,1/0,2	0,1/0,2	0,4/0,5	
Средний размер пакета, байт	56/423	56/468	56/450	56/449	
Скорость передачи данных, бит/с	44/541	53/609	56/622	162/1874	

Чтобы более наглядно оценить изменение характеристик сетевого трафика после реализации в ПО управления роботом-манипулятором упомянутого выше алгоритма сетевого взаимодействия, было проведено сравнение данных из таблиц 2 и 3. Результаты сравнения представлены в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение характеристик сетевого трафика

TABLE 4. Comparison of Network Traffic Characteristics

			Траф	рик		
Приложение /	от сервера к клиенту			от клиента на сервер		
характери- стика	К	оличест	во пакет	ов в сек	унду, п/	'c
	Было	Стало	Измене- ние	Было	Стало	Изме- нение
Приложение 1	2	0,1	-95 %	2	0,1	-95 %
Приложение 2	2,8	0,2	-93 %	2,8	0,2	-93 %
Приложение 3	3,1	0,2	-94%	3,1	0,2	-94 %
Приложение 4	12,7	0,5	-96 %	12,7	0,5	-96 %
СРЕДНЕЕ		-94 %				-94 %
	Средний размер пакета, байт					
Приложение 1	96	423	+341 %	55	56	+2 %
Приложение 2	96	468	+388 %	55	56	+2 %
Приложение 3	94	450	+379 %	55	56	+2 %
Приложение 4	85	449	+428 %	55	56	+2 %
СРЕДНЕЕ			+384 %			+2 %
	(	Скорость	передач	и даннь	ых, бит/	С
Приложение 1	1565	451	-71 %	895	44	-95 %
Приложение 2	2118	609	-71 %	1228	53	-96 %
Приложение 3	2354	622	-74 %	1363	56	-96 %
Приложение 4	8625	1874	-78 %	5620	162	-97 %
СРЕДНЕЕ			-74 %			-96 %

Из представленных в таблице 4 результатов сравнения видно, что после реализации предложенного алгоритма значительно сократилась нагрузка на сеть при дистанционном управлении роботом-манипулятором. Так, например, скорость передачи данных от сервера к клиенту сократилась на 74 %, а средний размер пакета вырос на 384 %.

На рисунке 7 представлены распределения длин пакетов для сетевого трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором (интервал гистограммы равен 50 байт), а на рисунке 8 – распределения величин интервалов времени между отправкой пакетов в сеть для трафика, генерируемого сервером и клиентом во время дистанционного управления роботом-манипулятором (интервал гистограммы – 0,1 с).

Данные экспериментальные распределения величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов могут быть аппроксимированы смешанным распределением, плотность вероятности которого определяется как:

$$f(x) = \eta_1 f_1(x) + \eta_2 f_2(x) \tag{2}$$

где  $f_i(x)$  – плотность вероятности подходящего распределения,  $\eta_i$  – весовой коэффициент.

Сводные данные по вероятностным распределениям для сервера и клиента представлены в таблице 5.

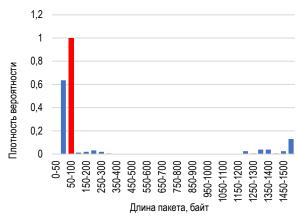
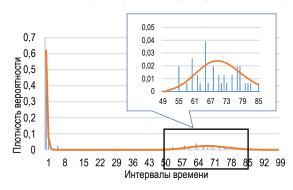


Рис. 7. Распределение длин генерируемых сервером (синим) и клиентом (красным) IP-пакетов

Fig. 7. Distribution of IP Packets Lengths Generated by the Server (in Blue) and Client (in Red)



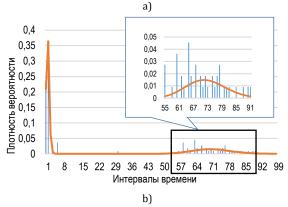


Рис 8. Распределение величин интервалов времени между отправкой IP-пакетов от сервера (a) и от клиента

Fig. 8. Distribution of Time Intervals between sending IP Packets from the Server (a) and client (b)

## ТАБЛИЦА 5. Вероятностные распределения, описывающие интервалы времени между отправкой пакетов в сеть

TABLE 5. Probability Distributions Describing the Time Intervals between Sending Packets to the Network

От сервера		От клиента	
Распределе- ние	Коэффици- енты	Распределе- ние	Коэффици- енты
Экспоненци- альное	$\lambda = 20,69;$ $\eta_1 = 0,71$	Двухпарамет- рическое Гамма	$\alpha = 5,73;$ $\beta = 0,02;$ $\eta_1 = 0,64$
Двухпарамет- рическое Гамма	$\alpha = 70,01;$ $\beta = 0,11;$ $\eta_2 = 0,51$	Двухпарамет- рическое Гамма	$\alpha = 73,72;$ $\beta = 0,09;$ $\eta_2 = 0,31$

В качестве распределений для аппроксимации выбраны: экспоненциальное распределение (где  $\lambda$  – параметр интенсивности ( $\lambda > 0$ ); двухпараметрическое Гамма-распределение (где  $\alpha$  – параметр формы ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  – параметр скорости ( $\beta > 0$ ).

### Оценка степени самоподобия сетевого трафика

Также для перехваченного сетевого трафика был рассчитан коэффициент самоподобия (коэффициент Херста (*H*)) методом изменения дисперсии [12]. Расчет производился на основе интервалов времени между отправкой пакетов от сервера к клиенту. Результаты оценки представлены в таблице 6.

ТАБЛИЦА 6. Оценка самоподобия сетевого трафика

TABLE 6. Self-Similarity Estimation of Network Traffic

		Прило	жение		Среднее		
	1	2	3	4	значение	СКО	
Базовый сценарий	0,41	0,49	0,53	0,58	0,5	0,07	
С предложенным алгоритмом	0,59	0,56	0,56	0,48	0,55	0,05	

Из результатов оценки коэффициента самоподобия (*H*) следует, что трафик, генерируемый при дистанционном управлении роботом-манипулятором при работе всех Приложений по предложенному алгоритму (протоколу) сетевого взаимодействия, имеет более самоподобный характер, чем в базовом сценарии.

### Выводы

В работе описан реализованный и апробированный в ходе исследований усовершенствованный алгоритм сетевого управления роботами манипуляторами. В результате проведенного перехвата и анализа сетевого трафика установлено снижение интенсивности поступления пакетов в сеть связи, снижение используемой пропускной способности и увеличение среднего размера пакетов при условии использования предложенного алгоритма.

Проведена оценка коэффициента самоподобия сетевого трафика (*H*). Показано, что после реализации предложенного алгоритма степень самоподобия сетевого трафика возросла.

Представленные результаты могут быть использованы для проведения имитационного моделирования, совершенствования алгоритмов управления отдельными роботами или их кластерами, а также для планирования и развертывания автоматизированных производств.

Данные исследования необходимы для эффективного выполнения задач на различных производствах, освобождая людей от опасной и монотонной работы. Также возможно применение в организации телеконференций, например, при удаленном подписании документов.

### Список источников

- 1. Шваб К. Технологии четвертой промышленной революции. Пер. с англ. М: Бомбора, 2018. 320 с.
- 2. Jocelyn V. Industrial robots worldwide // Statista Inc. 2022. URL: https://www.statista.com/study/14872/industrial-robots-statista-dossier (дата обращения 03.05.2023)
- 3. Аналитика // Национальная Ассоциация Участников Рынка Робототехники. 2023. URL: https://robotunion.ru/services/documents (дата обращения 10.05.2023)
- 4. Горбачева Л.С., Парамонов А.И. Модели показателей качества обслуживания для трафика (роботов-манипуляторов) // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 13–19. DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-13-19
- 5. Алзагир А.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений // Электросвязь. 2022. № 6. С. 2–7. DOI:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
- 6. МСЭ-Т Q.3900 (2006) Методы тестирования и архитектура модельных сетей для тестирования технических средств СПП, используемых в сетях электросвязи общего пользования.
- 7. Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Мутханна А.С., Матюхин А.Ю. и др. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия // Электросвязь. 2022. № 1. С. 14–20. DOI:10.34832/ELSV.2022.26.1.001
- 8. Промышленные и образовательные решения // DOBOT. 2023. URL : https://dobots.ru/magician (дата обращения 10.05.2023)
- 9. Горбачева Л.С., Фам В.Д., Матюхин А.Ю., Кучерявый А.Е. Исследование влияния характеристик сети на функционирование многофункционального робота-манипулятора // Электросвязь. 2022. № 2. С. 37–41. DOI:10.34832/ELSV. 2022.27.2.005
  - 10. Wireshark Foundation // Wireshark. 2023. URL: https://www.Wireshark.org (дата обращения 10.05.2023)
- 11. Горбачева Л. С. Метод оптимального использования сетевых ресурсов для робота-манипулятора // Электросвязь. 2023. № 5. С. 10–15.
- 12. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. М.: Физматлит, 2008. 368 с.

#### References

- 1. Schwab K. Shaping the Fourth Industrial Revolution. World Economic Forum; 2018. 287 p.
- 2. Jocelyn V. Industrial robots worldwide. *Statista Inc.* 2022. URL: https://www.statista.com/study/14872/industrial-robots-statista-dossier [Accessed 03.05.2023]
  - 3. Russian Association of Robotics. Analytics. 2023. URL: https://robotunion.ru/services/documents [Accessed 10.05.2023]
- 4. Gorbacheva L., Paramonov A. Models of quality of service indicators for traffic (robots-manipulators). *Telecom IT*. 2022; 10(3):13–19. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2022-10-3-13-19
- 5. Alzagir A.A., Paramonov A.I., Koucheryavy A.E. Study of Quality of Service in 5G and Next-Generation Networks. *Elektrosvyaz*. 2022;6:2–7. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
- 6. ITU-T Q.3900. Test methods and architecture of model networks for testing NGN hardware used in public telecommunication networks. 2006.
- 7. Koucheryavy A.E., Makolkina M.A., Paramonov A.I., Vybornova A.I., Muthanna A.S., Matyuhin A.Yu. Model network for research, training, and testing in the area of telepresence services. *Elektrosvyaz*. 2022;1:14–20. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV. 2022.26.1.001
  - 8. DOBOT. Industrial and educational solutions. 2023. URL: https://dobots.ru/magician [Accessed 10.05.2023]
- 9. Gorbacheva L.S., Fam V.D., Matyuhin A.Yu., Koucheryavy A.E. Investigation of the influence of network characteristics on the functioning of a multifunctional robotic arm. *Elektrosvyaz*. 2022;2:37–41. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.005
  - 10. Wireshark. Wireshark Foundation. 2023. URL: https://www.Wireshark.org [Accessed 10.05.2023]
- 11. Gorbacheva L.S. Model network for research, training, and testing in the area of telepresence services. *Electrosvyaz*. 2023;5:10–15. (in Russ.)
- 12. Shelukhin O.I., Osin A.V., Smolsky S.M. *Self-Similarity and Fractals. Telecommunication Applications*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2008. 368 p. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 22.06.2023; принята к публикации 28.06.2023.

The article was submitted 21.06.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 28.06.2023.

### Информация об авторе:

ГОРБАЧЕВА Любовь Сергеевна аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

https://orcid.org/0009-0001-2517-1370

Научная статья УДК 519.213.2 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-82-90



# Метод вычисления временных характеристик обслуживания в сервисных платформах инфокоммуникационных транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов

D Наталия Михайловна Редругина, redrugina.nm@sut.ru

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

Аннотация: В данной работе рассматривается проблема объединения слабосвязанных сервисов в единый рабочий процесс и исследуются методы расчета его временных характеристик с целью обеспечения контроля качества обслуживания и выявления «узких мест» в информационной системе. В дополнение к анализу процессов обслуживания запросов в цепочках локальных транзакций, рассматривается возможность внедрения инструментов массового обслуживания, таких как параллельное обслуживание системой Fork-Join, которые могут повысить эффективность обслуживания и улучшить производительность системы. В работе рассмотрен математический аппарат сетей Джексона, который используется для определения временных характеристик рабочего процесса транзакционной системы как сети систем массового обслуживания. Основным результатом исследования является разработка и представление математического инструмента для определения временных характеристик рабочего процесса транзакционной системы. Разработанный математический аппарат может быть использован для расчета временных характеристик рабочих процессов в разрабатываемых и эксплуатируемых информационных системах, для обеспечения высокого уровня качества обслуживания.

**Ключевые слова:** рабочий процесс, сети систем массового обслуживания, слабосвязанные услуги, транзакционные системы, Fork-Join, сети Джексона, QoS

**Ссылка для цитирования**: Редругина Н.М. Метод вычисления временных характеристик обслуживания в сервисных платформах инфокоммуникационных транзакционных услуг с параллельной обработкой запросов // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 82–90. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-82-90

# A Method for Time Characteristics Calculating in the Service Platforms of Infocommunication Transactional Services with Parallel Requests Processing

👨 Natalia Redrugina, redrugina.nm@sut.ru

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

**Abstract:** This paper addresses the problem of combining loosely coupled services into a single workflow and investigates methods for calculating its time characteristics. The goal of the study is to provide quality control over service quality and to identify bottlenecks in the information system. In addition to the analysis of request service processes in chains of local transactions, the possibility of introducing mass service tools, such as paralleling service

by Fork-Join system, which can increase the efficiency of service and improve the performance of the system is considered. The paper considers the mathematical apparatus of Jackson networks, which is used to determine the time characteristics of the workflow of the transaction system as a network of mass service systems. The main result of the research is the development and presentation of a mathematical tool for determining the time characteristics of the workflow of a transactional system. The developed mathematical apparatus can be used to calculate the time characteristics of work processes in the developed and operated information systems, to ensure a high level of service quality.

**Keywords:** workflow, queuing networks, loosely coupled services, transactional systems, Fork-Join, Jackson networks, OoS

**For citation:** Redrugina N. A Method for Time Characteristics Calculating in the Service Platforms of Infocommunication Transactional Services with Parallel Requests Processing. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3): 82–90. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-82-90

### 1. Введение

С учетом развития сетей нового поколения наблюдается значительный рост исследований [1–4], направленных на повышение качества предоставляемых конечным пользователям услуг. Однако становится все более очевидной необходимость обеспечения высокого качества не только самих сетей связи, но и приложений, использующих эти сети, чтобы пользователи могли полностью раскрыть возможности новых технологий.

Инфокоммуникационные системы, поддерживающие рабочие процессы и приложения электронной коммерции, требуют работы с транзакциями. Транзакции обеспечивают взаимодействие между веб-сервисами, серверами, участвующими в бизнес-транзакциях, локальными базами данных и т. д. Эти слабосвязанные услуги рассматриваются как последовательно выполняемые единицы работы с высоким уровнем надежности. В работе [5] дано определение рабочих процессов как программного обеспечения на основе правил, позволяющего координировать и контролировать выполнение действий (транзакций), представляющих бизнес-процесс. Рабочий процесс состоит из набора вызовов веб-служб, встроенных в ориентированный граф [6].

Шаблоны рабочих процессов были предложены в работах, таких как [7], а также для систем электронного здравоохранения [8]. Они могут быть использованы для определения функциональных возможностей приложения и последовательности выполнения действий его компонентов. В работе [9] представлен алгоритм планирования рабочего процесса на основе срочности, где расчет характеристик основан на симуляции. Это позволяет сформулировать направление, связанное с данной работой, основанное на разработке математических моделей и методов расчета вероятностно-временных характеристик для реализации алгоритма построения рабочих процессов в слабосвязанных транзакционных услугах.

В работе [10] предложена методология и архитектура фреймворка для оценки качества предоставления слабосвязанных услуг (QoS, аббр. от англ. Quality of Service). Авторы работы указали, что для общей применимости подхода было бы точнее разработать модель работы сети очередей для вычисления QoS, что будет реализовано в данном исследовании для сценариев рабочих процессов обслуживания запросов в транзакционных системах.

При разработке инфокоммуникационных систем необходимо производить моделирование в целях прогнозирования для получения качественных характеристик системы, определения узких мест, зависимости изменения параметров QoS от внешних воздействий. Для получения качественных характеристик сервисов необходима оценка параметров атомарных подсистем обслуживания транзакций и их комбинация. Поэтому целью данной работы будет создание математического аппарата оценки временных характеристик системы, основанной на выполнении транзакций внутри рабочего процесса.

# 2. Моделирование отдельных компонент рабочих процессов слабосвязанных услуг

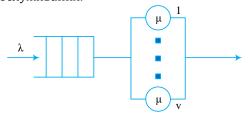
Цель данного исследования заключается в разработке функциональной модели рабочего процесса выполнения последовательной цепочки локальных транзакций, которая также может включать в себя ветвление сценариев прохождения системы [11]. Данная модель будет подвергаться математическому анализу, а также проверке результатов моделирования с использованием семейства имитационных моделей в программной среде AnyLogic. В [12] авторы проводят моделирование web-сервисов и выдвигают предположение, что процесс перехода между состояниями системы описывается цепью Маркова, а время пребывания в состоянии обслуживания имеет экспоненциальное распределение с функцией распределения вероятности (ФРВ) времени, равной:

$$F_{s}(t) = 1 - e^{-\mu t},\tag{1}$$

где µ – интенсивность обслуживания запросов.

К такому выводу пришли и авторы работ [13–15], используя в своем исследовании экспоненциально распределенное время t, дополнительно в [16] применяя к модели M/M/1 параметр  $\mu(1-\rho)$ . Поступление на обслуживающие приборы распределяется по закону Пуассона, служебная дисциплина обслуживания FIFO (аббр. от англ. First In, First Out). В иных случаях возможно применение к времени обслуживания транзакций функций распределения, заданных по равномерному закону Вейбулла или Парето [17].

Все рассмотренные исследования включают получение вероятностно временных характеристик систем массового обслуживания (СМО) типа М/М/1 при моделировании реальных систем. Задача, поставленная в данном исследовании, предусматривает построение математического аппарата расчета как одноканальных, так и многоканальных систем М/М/v (рисунок 1), включенных в цепочку, реализующую рабочий процесс обслуживания транзакций. Для реализации подобного моделирования будет использован математический аппарат сетей Джексона и его дополнение системой параллельного обслуживания.



Puc. 1. Многоканальная система массового обслуживания
Fig. 1. Multi-channel Queuing System

# 2.1. Моделирование рабочего процесса обслуживания локальных транзакций математическим аппаратом сетей Джексона

На рисунке 2 представлена функциональная модель рабочего процесса обслуживания последовательных локальных транзакций. Данная сеть СМО (CeMO) представляет совокупность эквивалентных обслуживающих узлов, для которых можно провести последовательный анализ перехода требований от узла к узлу для получения качественных временных характеристик.

Рис. 2. Модель рабочего процесса обслуживания в цепочке последовательных локальных транзакций

Fig. 2. Model of the workflow for serving sequential local transactions

Общая средняя задержка  $T_s$  от начала до конца обслуживания в выделенной цепочке СМО получается суммированием отдельных задержек на каждом из них:

$$\overline{T}_{S} = \sum_{i=1}^{N} \overline{T}_{i}.$$
 (2)

Для упрощения последовательного анализа цепочки узлов можно использовать свойство сцепления, как показано на рисунке 3. То есть преобразовать последовательное обслуживание запросов цепочкой СМО в один эквивалентный узел.

Для нахождения математического ожидания и дисперсии временных характеристик для всей сети необходимо провести расчет плотности распределения вероятности (ПРВ) времени нахождения требования в рассматриваемой СеМО. Согласно [18] ФРВ времени прохождения всей цепочки микросервисов определяется сверткой ФРВ времени прохождения в каждой СМО:

$$F_x(t) = F_{e1}(t) * F_{e2}(t) * F_{e3}(t) * \cdots * F_{eN}(t),$$
 (3)

где  $F_{ei}(t)$  – ФРВ времени окончания обслуживания в i-й СМО, i = 1, ..., N.

Данная функция находится с использованием аппарата свертки определенных в первой главе ФРВ времени обслуживания  $F_s(t)$  и времени ожидания в очереди  $F_w(t)$ .

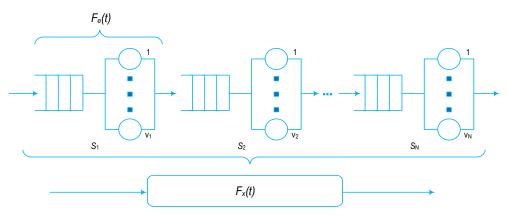


Рис. 3. Модель цепочки локальных транзакций в рабочем процессе системы

Fig. 3. Model of the local transaction chain in the system's workflow

Для системы типа M/M/v в [19] функция определена выражением (4), где P(0) – вероятность про-

стоя системы; A – загрузка системы, соответствующая неравенству  $\lambda/\mu < v$ ; v – количество обслуживающих приборов.

$$F_e(t) = \begin{cases} 1 - \frac{P(0)}{v - A - 1} \left[ e^{-\mu(v - \lambda)t} - e^{-\mu t} \right] - e^{-\mu t}, & 0 < A \neq v - 1 \\ 1 - \mu t P(0) e^{-\mu t} - e^{-\mu t}, & 0 < A = v - 1 \end{cases}$$
(4)

Стоит отметить, что функцию распределения вероятностей (5) можно определить как:

$$F_e(t) = \begin{cases} 1 - e^{-xt}, & t > 0; \\ 0, & t = 0; \end{cases}$$
 (5)

где x – величина, обратная среднему времени ожидания заявки.

Для расчета сети СМО с ветвлением сценариев прохождения системы (см. модель на рисунке 4) необходимо использовать принцип свертки ФРВ времени прохождения всех СМО в сценарии. Однако в данном случае ФРВ прохождения системы  $F_x(t)$  зависит от разбиения потока заявок в сети при поступлении на параллельные узлы, что изменяет интенсивность входного потока в каждый узел. Согласно источнику [20], интенсивность входного потока  $\lambda_j$  в узел j из предшествующего узла i определяется матрицей переходов  $R = \|p_{ij}\|$  и равняется  $\lambda_i \times R$ .

В результате проведенного анализа и полученных выражений расчета ФРВ прохождения всей цепочки СМО, возможен расчет математического ожидания и дисперсии времени прохождения требованиями системы или выделенного маршрута следующими выражениями:

– первый начальный момент или математическое ожидание времени пребывания в выделенной сети:

$$M[T_{CeMO}] = \int_{0}^{+\infty} t \, dF_x(t); \tag{6}$$

– дисперсия времени пребывания в выделенной сети:

$$D[T_{\text{CeMO}}] = M[(T_{\text{CeMO}})^2] - (M[T_{\text{CeMO}}])^2.$$
 (7)

### 2.2. Параллельная обработка запросов

Сложные информационные структуры часто завязаны на сценариях параллельной обработки запросов. Авторы работы [21] проводят анализ системы параллельной обработки и проводят имитационное моделирование системы вида M/G/n. В работе [22] исследуется применение параллелизма для построения рабочих процессов с использованием эквивалентных микросервисов. Для реализации данного блока параллельной обработки в рамках рабочего процесса необходимо определить математический аппарат, который позволит получить временные характеристики системы. На рисунке 5 представлена обобщенная схема реализации параллелизма, которая является шаблоном для разработки многих моделей репликации. К примеру, она может быть использована при реализации расчета качественных характеристик распределенной системы хранения данных с синхронной записью блоков данных на дисковое пространство [23].

Параллельность включает в себя репликацию запроса на *т* узлов, что может быть использовано для двух целей. Во-первых, для моделирования процесса одновременного опроса двух слабосвязанных услуг с целью получения ответа от всех узлов. Если обслуживание хотя бы одной из реплик завершается неудачей, то обслуживание оставшихся также прекращается и запрос, поступивший на начальный узел, считается необслуженным. Во-вторых, при необходимости разбиения поступающего запроса на более мелкие компоненты с их одновременным обслуживанием на параллельных узлах [24]. Обе влекут изменение времени выполнения транзакции:

$$t_{\text{обсл.}}^* = \frac{t_{\text{обсл.}}}{m}.$$
 (8)

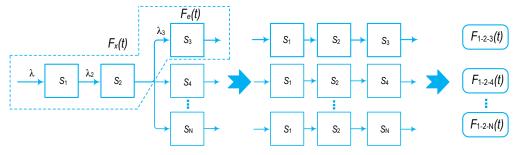


Рис. 4. Модель ветвления сценариев рабочих процессов системы

Fig. 4. Model of branching workflow scenarios in the system

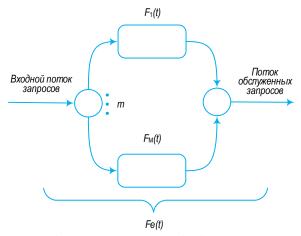


Рис. 5. Схема параллельной обработки запросов

Fig. 5. Diagram of Parallel Query Processing

Результатом реализации данного подхода будет зависимость (9), где временем удачного обслуживания является максимальное время обработки, а время, заложенное на ответ о неудачном обслуживании, является временем первого компонента, обслуживание которого завершилось неудачей:

$$T = \begin{cases} \max\{T_{\text{oбc.}}\}: |T_{\text{oбc.}}| > 0\\ \min\{T_{\text{Heyd.}}\}: |T_{\text{oбc.}}| = 0 \end{cases}; T = \{t_1, \dots, t_m\}, \quad (9)$$

где  $T_{\rm oбc.}$  – время успешного обслуживания в каждой запущенной ветви;  $T_{\rm неуд.}$  – время неудачного обслуживания

Математический аппарат Fork-Join сохраняет выделенное свойство атомарности при выполнении транзакций, что позволяет использовать его для расчета качественных характеристик элемента рабочего процесса в выделенной задаче расчета. Для получения точных результатов математического моделирования используется выражение (10) приближенной ФРВ времени для всей сети с коэффициентом репликации равным т, предложенное в работе [25], где  $c_i$  – коэффициент репликации (11), равный  $c_{m+1}$  = 0,  $c_1$  = 1,  $c_2$  = 1 -  $p_1/4$ , и  $p_i$ - вероятность того, что запрос будет ожидать обслуживания. Для учета блока параллельной обработки в расчете функции прохождения всей цепочки локальных транзакций, рассчитанной в уравнении (3), были определены выражения для изображения ФРВ и плотности распределения вероятности (ПРВ) времени параллельной обработки двумя слабосвязанными услугами (12, 13).

Расчет моделей с коэффициентом репликации m > 2 или с введением сложных распределений, рационально производить с использованием аппарата имитационного моделирования.

$$F_{F_j}(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^m c_i \left[ 1 - F_{S_i}(t) \right] \prod_{i=1}^{i-1} F_{S_i}(t) \approx \sum_{i=1}^m (c_i - c_{i+1}) \prod_{i=1}^i F_{S_i}(t), \tag{10}$$

$$c_i \approx \left(1 - \frac{p_{i-1}}{4}\right) \left(1 - \frac{p_{i-2}}{8}\right), \quad 3 \le i \le m,$$
 (11)

$$F_{FJ2}(s) = \frac{(\lambda - s - \mu)\left(-\lambda + 4\mu + \frac{4\mu(-2\lambda + s + 2\mu)}{s}\right)}{4\mu * (\lambda - s - \mu)(2\mu + s - 2\lambda)} + \frac{(-2\lambda + s + 2\mu)(8\mu - \lambda)}{4\mu * (\lambda - s - \mu)(2\mu + s - 2\lambda)},$$
(12)

$$f_{FJ2}(s) = \frac{8\mu^3 - 16\lambda\mu^2 + (\lambda s + 8\lambda^2)\mu - \lambda^2 s}{4\mu * (\mu + s - \lambda)(2\mu + s - 2\lambda)}.$$
(13)

# 3. Аналитическое и имитационное моделирование частного случая рабочего процесса для слабосвязанных услуг

В качестве примера проведем расчет цепочки локальных транзакций с внедрением параллельной обработки запроса (рисунок 6). Для расчета ФРВ времени прохождения такой сети, включая систему параллельной обработки запросов, также, как и в (3) используется уравнение свертки:

$$F_x(t) = F_{e1}(t) * F_{e2}(t) * F_{FJ}(t),$$
 (14)

Среднее время пребывания запроса в системе М/М/1 определяется выражением:

$$\bar{T}_e = \bar{t}_{\text{обсл.}} + \bar{W} = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{x}.$$
 (15)

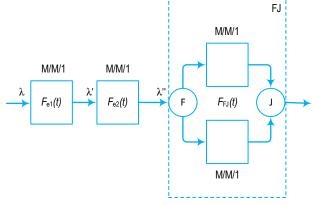


Рис. 6. Модель рабочего процесса с параллельной обработкой запроса

Fig. 6. Model of the workflow with parallel query processing

Используя выражение (5), определяем ФРВ времени нахождения заявки в системе  $F_{ei}(t)$ :

$$F_{ei}(t) = \begin{cases} 1 - e^{-(\mu - \lambda)t}, & t > 0; \\ 0, & t = 0. \end{cases}$$
 (16)

На рисунке 7 изображен график ПРВ и ФРВ времени прохождения трех сценариев выполнения транзакции: S (система FJ), S1 (СМО\_2 и система FJ) и S2 (СМО\_1, СМО\_2 и система FJ) со следующими входными данными  $\lambda = \lambda' = \lambda'' = 0,5$  по теореме Бёрке [19] и  $\mu = 1$ .

Также на рисунке показан результат расчета математического ожидания выделенных СеМО: M(t), M1(t) и M2(t), соответственно. Получение результатов моделирования необходимо для анализа влияния последовательных систем на выходные временные характеристики цепочки локальных транзакций. Плотность и функция распределения для S2 задаются выражениями (17, 18). Также были получены результаты имитационного моделирования с аналогичными входными данными, с помощью программного обеспечения Anylogic (рисунок 8).

$$f_{x}(t) = \frac{1}{8\mu} (\mu - \lambda) e^{t(\lambda - \mu)} (4\lambda^{2}t + \lambda^{3}t^{3} - 6\lambda^{2}t^{2}\mu - 15\lambda t^{2}\mu^{2} - 4\lambda e^{t(\lambda - \mu)} + 12\lambda t\mu - 16\mu e^{t(\lambda - \mu)} + 4\lambda^{2} + (17)$$

$$+8t^{2}\mu^{3} - 16t\mu^{2} + 16\mu,$$

$$F_{x}(t) = 1 + \frac{1}{32\mu^{2}} * (8\lambda\mu + 32\mu^{2})e^{2t(\lambda - \mu)} + (-4\lambda^{3}t^{2}\mu - 23\lambda^{2}t^{2}\mu^{2} - 8\lambda^{2}t\mu + 60\lambda t^{2}\mu - 8\lambda\mu - 32t^{2}\mu^{4} - 64\mu^{2}) * e^{t(\lambda - \mu)}.$$

$$(18)$$

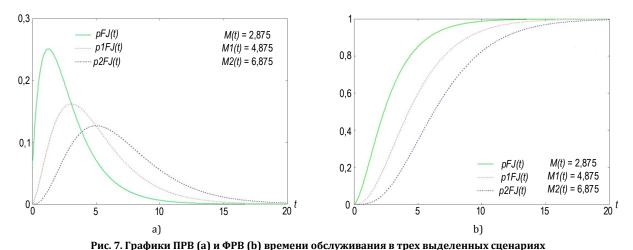


Fig. 7. Density (a) and probability (b) distribution function graphs of service time in three selected scenarios

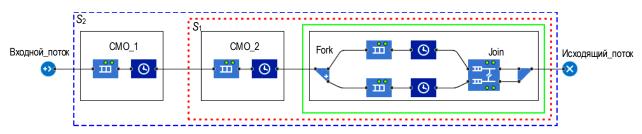


Рис. 8. Имитационная модель цепочки локальных транзакций с параллельностью

 $Fig.\ 8.\ Simulation\ model\ of\ the\ local\ transaction\ chain\ with\ parallel is m$ 

При сравнении результатов имитацинного моделирования (рисунок 9) с результатами математического анализа, можно сделать вывод о незначительном значении ошибки апроксимации при моделировании систем M/M/1. Учитывая свойства систем M/M/1, их применение для расчета временных характеристик цепочки транзакций обеспечивает достаточно точные результаты без суще-

ственной погрешности. В отличие от сложных систем типа G/G/1, которые требуют более сложных математических расчетов, что указывает на актуальность проведения дальнейших исследований. Однако данное исследование позволяет рассматривать алгоритм расчета CeMO с внедрением таких инструментов массового обслуживания как параллельная обработка.

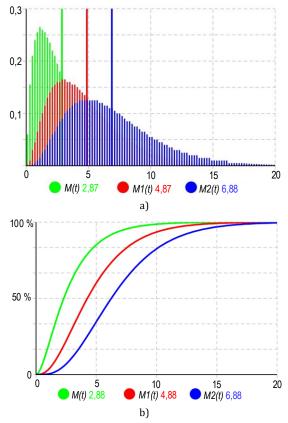


Рис. 9. Результаты иммитационного моделирования: ПРВ (a) и ФРВ (b) времени обслуживания

Fig. 9. Results of simulation modeling: density (a) and probability (b) distribution function of service time

### 4. Выводы

Математический инструмент, полученный как результат данного исследования, основанный не только на средних значениях, может применяться для получения точных результатов расчета вероятностно-временных характеристик, включающих моменты и дисперсию, для рабочих процессов обслуживания задач в транзакционных слабосвязанных услугах. Полученные результаты аналитического

моделирования частного сценария рабочего процесса были проверены путем создания имитационной модели, что позволило подтвердить корректность разработанного математического инструмента. Стоит отметить, что данный математический инструмент позволяет производить расчет характеристик систем с распределениями, к которым применимо преобразование Лапласа, в иных случаях необходимо применять либо имитационное моделирование, либо методы аппроксимации функций.

В дальнейших исследованиях будут рассмотрены более сложные системы для построения семейства моделей расчета качественных и количественных характеристик рабочих процессов обслуживания транзакций в слабосвязанных услугах. Что приведет к необходимости решения следующих задач:

- разработка семейства имитационных моделей сценариев рабочих процессов для транзакционных услуг:
- разработка подхода к моделированию систем сложных распределений (например, длиннохвостые Вейбулла или Парето), которые не поддаются преобразованию Лапласа для дальнейшей свертки; данный подход может включать в себя внедрение таких методов аппроксимации, как ступенчатые функции или аппроксимация гиперэкпоненциальным распределением;
- разработка алгоритма выборки эквивалентных слабосвязанных услуг для формирования рабочего процесса с заданным качеством обслуживания.

Последующее развитие инструментария позволит проводить математическое моделирование с целью оценки и прогнозирования качества во многих сферах инфокоммуникационных услуг, включая электронную коммерцию, работу с большими данными, внедрение в концепцию «Cloud-Fog-Edge», распределенные системы и т. д.

### Список источников

- 1. Алзагир А.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Исследование качества обслуживания в сетях 5G и последующих поколений // Электросвязь. 2022. № 6. С. 2–7. DOI:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
- 2. Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 2. С. 32–43. DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43
- 3. Казьмин О.Ю., Симонина О.А. Использование нейронных сетей для решения задачи оптимизации электромагнитной обстановки в сетях радиодоступа // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 3. С. 25–37. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-25-37
- 4. Новиков Е.А., Севостьянов А.С., Шадрин А.Г. Исследование качества обслуживания трафика реального времени в условиях сложной помеховой обстановки // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 50–56. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-50-56
- 5. O'Riordan D. Business Process Standards for Web Services // In: Web Services Business Strategies and Architectures. Berkeley: Apress, 2002. PP. 156–173. DOI:10.1007/978-1-4302-5356-3\_11
- 6. Назаревич С.А., Меркулова А.Ю. Марковские цепи для решения проблем управления технологическим процессом в производственной системе // Системный анализ и логистика. 2023. № 1(35). С. 67–73. DOI:10.31799/2077-5687-2023-1-67-73
- 7. Nagano H., Shimosawa T., Shimamura A., Komoda N. Blockchain based cross organizational workflow management system // Proceedings of the 17th International Conference on Applied Computing (AC, Lisbon, Portugal, 18–20 November 2020). 2020. PP. 97–104.

- 8. Weber J.H., Kuziemsky C. Pragmatic interoperability for eHealth Systems: The Fallback Workflow Patterns // Proceedings of the 1st International Workshop on Software Engineering for Healthcare (SEH, Montreal, Canada, 27 May 2019). IEEE, 2019. PP. 29–36. DOI:10.1109/SEH.2019.00013
- 9. Wang S., Ding Z., Jiang C. Elastic Scheduling for Microservice Applications in Clouds // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2020. Vol. 32. Iss. 1. DOI:10.1109/TPDS.2020.3011979
- 10. Avritzer A., Ferme V., Janes A., Russo B., van Hoorn A., Schulz H., et al. Scalability Assessment of Microservice Architecture Deployment Configurations: A Domain-Based Approach Leveraging Operational Profiles and Load Tests // Journal of Systems and Software. 2020. Vol. 165. P. 110564. DOI:10.1016/j.jss.2020.110564
- 11. Zheng Z., Lyu M.R. A Distributed Replication Strategy Evaluation and Selection Framework for Fault Tolerant Web Services // Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services (ICWS, Beijing, China, 23–26 September 2008). IEEE, 2008. PP. 145–152. DOI:10.1109/ICWS.2008.42
- 12. Zheng Z., Trivedi K.S., Qiu K., Xia R. Semi-Markov Models of Composite Web Services for their Performance, Reliability and Bottlenecks // IEEE Transactions on Services Computing. 2016. Vol. 6(1). PP. 1939–1374. DOI:10.1109/TSC.2015.2475957
- 13. Yu T., Lin K.J. The Design of QoS Broker Algorithms for QoS-Capable Web Services // International Journal of Web Services Research. 2004. Vol. 1. Iss. 4. PP. 17–24. DOI:10.1109/EEE.2004.1287283
- 14. Johnsson M., Jennings B. Meeting latency targets for complex SOA-based transactions in data centers // Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS 2016, Istanbul, Turkey, 25–29 April 2016). IEEE, 2016. PP. 695–698. DOI:10.1109/NOMS.2016.7502879
- 15. Cheung L., Golubchik L., Sha F. A Study of Web Services Performance Prediction: A Client's Perspective // Proceedings of the 19th Annual International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (Singapore, Singapore, 25–27 July 2011). IEEE, 2011. PP. 75–84. DOI:10.1109/MASCOTS.2011.66
- 16. Xiong K. Web services performance modeling and analysis // Proceedings of the International Symposium on High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (Charlotte, USA, 06–08 September 2006). IEEE, 2006. DOI:10.1109/HONET.2006.5338403
- 17. Lozhkovskyi A., Klymash M., Pyrih Y., Shpur O. Method for Evaluating the Quality of Service Characteristic of a Packet Access Network for IoT Devices // Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT, Lviv, Ukraine, 21–25 September 2021). IEEE, 2021. PP. 79–83. DOI:10.1109/AICT52120.2021.9628912
  - 18. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука. 1968, 496 с.
  - 19. Кожанов Ю.Ф. Теория телетрафика: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2020. 203 с.
  - 20. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
- 21. Горбунова А.В., Вишневский В.М. Оценка времени отклика среды для вычислений с интенсивным использованием данных // Информационно-управляющие системы. 2022. №4(119). С. 12–19. DOI:10.31799/1684-8853-2022-4-12-19
- 22. Song Z., Tilevich E. Equivalence-Enhanced Microservice Workflow Orchestration to Efficiently Increase Reliability // Proceedings of the International Conference on Web Services (ICWS, Milan, Italy, 08–13 July 2019). IEEE, 2019. PP. 426–433. DOI:10.1109/ICWS.2019.00076
- 23. Редругина Н.М., Алексеева Н.Н., Савельева А.А., Тарабанов И.Ф. Математическая модель записи информации на узлы распределенной системы хранения данных // XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2022, Санкт-Петербург, Россия, 15–16 февраля 2022 года). СПб: СПбГУТ, 2022. С. 65–70.
- 24. Gorbunova A.V., Lebedev A.V. Response Time Estimate for a Fork-Join System with Pareto Distributed Service Time as a Model of a Cloud Computing System Using Neural Networks // Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks (DCCN, Moscow, Russia, 20–24 September 2021). Communications in Computer and Information Science. Vol. 1552. Cham: Springer, 2022. PP. 318–332. DOI:10.1007/978-3-030-97110-6\_25
- 25. Горбунова А.В., Зарядов И.С., Самуйлов К.Е., Сопин Э.С. Обзор систем параллельной обработки заявок. Часть 1 // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Математика, информатика, физика. 2017. Т. 25. № 4 С. 350–362. DOI:10.22363/2312-9735-2017-25-4-350-362

### References

- 1. Alzagir A.A., Paramonov A.I., Koucheryavy A.E. Study of quality of service in 5g and next-generation networks. *Elektrosvyaz*. 2022;6:2–7. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2022.31.6.001
- 2. Volkov A., Muthanna A., Koucheryavy A. Fifth Generation Communication Networks: on the Way to Networks 2030. *Telecom IT*. 2020;8(2)32–43. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43
- 3. Kazmin O., Simonina O. Solving the Problem of Optimizing the Electromagnetic Environment in Radio Access Networks Using Neural Networ. *Proc. of Telecom. Universities.* 2021;7(3):25–37. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-25-37
- 4. Novikov E., Sevostyanov A., Shadrin A. Study of the Service Quality of Real Time Traffic in a Complex Interference Environment. *Proc. of Telecom. Universities.* 2022;8(3):50–56. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-50-56
- 5. O'Riordan D. Business Process Standards for Web Services. *In: Web Services Business Strategies and Architectures*. Berkeley: Apress; 2002. p.156–173. DOI:10.1007/978-1-4302-5356-3\_11
- 6. Nazarevich S.A., Merkulova A.Y. Markov chains for solving problems of art-technological process control in a production system. *Sistemnyi analiz i logistika*. 2023:1(35);67–73. (in Russ.) DOI:10.31799/2077-5687-2023-1-67-73
- 7. Nagano H., Shimosawa T., Shimamura A., Komoda N. Blockchain based cross organizational workflow management system. *Proceedings of the 17th International Conference on Applied Computing 2020 (AC, 18–20 November 2020, Lisbon, Portugal).* 2020. p.97–104.

- 8. Weber J.H., Kuziemsky C. Pragmatic interoperability for eHealth Systems: The Fallback Workflow Patterns. *Proceedings of the 1st International Workshop on Software Engineering for Healthcare, SEH, 27 May 2019, Montreal, Canada*. IEEE; 2019. p.29–36. DOI:10.1109/SEH.2019.00013
- 9. Wang S., Ding Z., Jiang C. Elastic Scheduling for Microservice Applications in Clouds. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2020;32(1). DOI:10.1109/TPDS.2020.3011979
- 10. Avritzer A., Ferme V., Janes A., Russo B., van Hoorn A., Schulz H., et al. Scalability Assessment of Microservice Architecture Deployment Configurations: A Domain-Based Approach Leveraging Operational Profiles and Load Tests. *Journal of Systems and Software*. 2020;165:110564. DOI:10.1016/j.jss.2020.110564
- 11. Zheng Z., Lyu M.R. A Distributed Replication Strategy Evaluation and Selection Framework for Fault Tolerant Web Services. *Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services, ICWS, 23–26 September 2008, Beijing, China.* IEEE; 2008. p.145–152. DOI:10.1109/ICWS.2008.42
- 12. Zheng Z., Trivedi K.S., Qiu K., Xia R. Semi-Markov Models of Composite Web Services for their Performance, Reliability and Bottlenecks. *IEEE Transactions on Services Computing*. 2016;6(1):1939–1374. DOI:10.1109/TSC.2015.2475957
- 13. Yu T., Lin K.J. The Design of QoS Broker Algorithms for QoS-Capable Web Services. *International Journal of Web Services Research*. 2004;1(4):17–24. DOI:10.1109/EEE.2004.1287283
- 14. Johnsson M., Jennings B. Meeting latency targets for complex SOA-based transactions in data centers. *Proceedings of the IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, NOMS 2016, 25–29 April 2016, Istanbul, Turkey.* IEEE; 2016. p.695–698. DOI:10.1109/NOMS.2016.7502879
- 15. Cheung L., Golubchik L., Sha F. (2011). A Study of Web Services Performance Prediction: A Client's Perspective. *Proceedings of the 19th Annual International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 25–27 July 2011, Singapore, Singapore.* IEEE; 2011. p.75–84. DOI:10.1109/MASCOTS.2011.66
- 16. Xiong K. Web services performance modeling and analysis. *Proceedings of the International Symposium on High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies, 06–08 September 2006, Charlotte, USA*. IEEE; 2006. DOI:10.1109/HONET.2006. 5338403
- 17. Lozhkovskyi A., Klymash M., Pyrih Y., Shpur O. Method for Evaluating the Quality of Service Characteristic of a Packet Access Network for IoT Devices. *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, AICT, 21–25 September 2021, Lviv, Ukraine.* IEEE; 2021. p.79–83. DOI:10.1109/AICT52120.2021.9628912
- 18. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis*. Moscow: Nauka Publ.; 1968. 496 p. (in Russ.)
- 19. Kozhanov Y.F. *Teletraffic Theory*. St. Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2020. 203 p. (in Russ.)
  - 20. Kleinrock L. Queueing systems. Vol. 1. Theory. New York: Wiley-Interscience; 1975. 417 p.
- 21. Gorbunova A.V., Vishnevsky V.M. Estimating the Response Time of a Data-Intensive Computing Environment. *Information and Control Systems*. 2022;4(119):12–19. (in Russ.) DOI:10.31799/1684-8853-2022-4-12-19
- 22. Song Z., Tilevich E. Equivalence-Enhanced Microservice Workflow Orchestration to Efficiently Increase Reliability. *Proceedings of the International Conference on Web Services, ICWS, 08–13 July 2019, Milan, Italy.* IEEE; 2019. p.426–433. DOI:10.1109/ICWS.2019.00076
- 23. Alekseeva N., Redrugina N., Saveleva A., Tarabanov I. Mathematical Modeling of Data Transfer between Nodes in Software Defined Storage. Proceedings of the International Scientific and Technical and Scientific-Methodical Conference on Actual Problems of Infotelecommunications in Science and Education, 15–16 February 2022, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2022. p.65–70. (in Russ.)
- 24. Gorbunova A.V., Lebedev A.V. Response Time Estimate for a Fork-Join System with Pareto Distributed Service Time as a Model of a Cloud Computing System Using Neural Networks. *Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks, DCCN, 20–24 September 2021, Moscow, Russia. Communications in Computer and Information Science, vol.1552.* Cham: Springer; 2022. p.318–332. DOI:10.1007/978-3-030-97110-6\_25
- 25. Gorbunova A.V., Zaryadov I.S., Samouylov K.E., Sopin E.S. A Survey on Queuing Systems with Parallel Serving of Customers Part 1. *RUDN Journal of Mathematics, Information Sciences and Physics*. 2017;25(4):350–362. (in Russ.) DOI:10.22363/2312-9735-2017-25-4-350-362

Статья поступила в редакцию 21.02.2023; одобрена после рецензирования 22.06.2023; принята к публикации 28.06.2023.

The article was submitted 21.02.2023; approved after reviewing 22.06.2023; accepted for publication 28.06.2023.

### Информация об авторе:

РЕДРУГИНА Наталия Михайловна аспирант кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

https://orcid.org/0000-0002-9385-3293

Научная статья УДК 621.396.4 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-91-103



# Методика расчета пропускной способности радиорелейной линии миллиметрового диапазона с адаптивной модуляцией в условиях замираний

### 👵 Ирина Валерьевна Степанец, stepanets.iv@sut.ru

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

Аннотация: Статья посвящена разработке методики расчета пропускной способности радиорелейной линии (РРЛ) с адаптивной модуляцией в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн. Показана взаимосвязь пропускной способности с коэффициентами неготовности интервалов РРЛ с разными градациями скорости передачи при известной функции распределения замираний. Представлены результаты обработки статистики замираний на интервалах РРЛ в диапазоне E-band (71–76/81–86 ГГц) и метеоданных, на основе которых была выявлена их взаимосвязь, учтенная в предлагаемом аналитическом выражении функции распределения замираний. Проведен сравнительный анализ результатов расчета коэффициентов неготовности и пропускной способности интервалов РРЛ в диапазоне E-band на основе предлагаемой и используемых в существующих методиках функций распределения. Показана высокая адекватность разработанной методики результатам измерений.

**Ключевые слова:** радиорелейная связь, пропускная способность, радиорелейный интервал, радиорелейная линия, диапазон E-band, замирания, статистика замираний, статистика погодных условий, коэффициент неготовности

**Ссылка для цитирования**: Степанец И.В. Методика расчета пропускной способности радиорелейной линии миллиметрового диапазона с адаптивной модуляцией в условиях замираний // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 91–103. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-91-103

## Method of Throughput Calculation for Microwave Link with Adaptive Modulation Under the Fading Conditions Inherent for Millimeter Waves

Irina Stepanets, stepanets.iv@sut.ru

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

**Abstract:** The article is devoted to the development of a method for calculating the capacity of microwave links with adaptive modulation under fading conditions in millimeter wave range. The relationship between throughput and unavailability coefficient of microwave links with different transmission rate levels are is shown for a known distribution function of fading. The results of data analysis of fading statistics at microwave links in the E-band range (71–76/81–86 GHz) and meteorological statistics are presented. The relationship of both statistics was revealed and taken into account in the proposed

analytical equation for the distribution function of fading. A comparative analysis of the calculation results of the unavailability coefficient and throughput at microwave links in the E-band range was carried out based on the proposed distribution function as well as based on the distribution functions of existing methods. High relevance of the developed method to the measurement results is shown.

**Keywords:** microwave communication, throughput, microwave link, microwave line, E-band range, fading, fading statistics, weather statistics, unavailability coefficient

**For citation:** Stepanets I. Method of Throughput Calculation for Microwave Link with Adaptive Modulation Under the Fading Conditions Inherent for Millimeter Waves. *Proc. of Telecom. Universities.* 2023;9(3):91–103. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-91-103

### Введение

Радиорелейная связь широко применяется на транспортных сетях связи и сетях доступа различного назначения, благодаря возможности быстрого развертывания с существенно меньшими затратами по сравнению с волоконно-оптическими линиями связи. В сетях подвижной связи радиорелейная связь составляет основу беспроводного распределительного транспортного сегмента, так как обеспечивает информационное включение узлов радиодоступа с ядром сети напрямую, или через ближайшую площадку, оборудованную точкой доступа к волоконно-оптическим линиям связи. Развитие технологий подвижной связи 5G и в перспективе 6G, выдвигает высокие требования к пропускной способности беспроводного транспортного сегмента в целом и радиорелейной связи в частности [1, 2]. Одним из направлений повышения пропускной способности систем радиорелейной связи для удовлетворения требований сетей 5G является освоение новых диапазонов радиочастотного спектра [3, 4]. В отчете Европейского института телекоммуникационных стандартов ETSI GR mWT 012 отмечается, что повышение пропускной способности радиорелейных систем беспроводного сегментов Backhaul/X-Haul распределительной транспортной сети 5G возможно на основе совместного применения стандартного диапазона (4-42 ГГц) и освоения диапазона миллиметровых волн (30 - 300 ГГц), включая Q-band (40,5-43,5 ГГц), V-band (59-64 ГГц), E-band (71-76/81-86 ГГц), W-band (92–96 ГГц) и D-band (150 ГГц).

Применение диапазона миллиметровых радиоволн позволяет в целом решить задачу повышения пропускной способности радиорелейных систем передачи. Однако существенная зависимость распространения радиоволн указанного диапазона от метеоусловий и недостаточная изученность этой зависимости выступают сдерживающим фактором прогнозирования качества связи в радиорелейных линиях (РРЛ) на этапе их планирования и проектирования. Сложилась ситуация, когда методы и модели расчета показателей качества радиорелейной связи, описанные в нормативных документах отрасли и рекомендациях, отстают от технологиче-

ских достижений и не охватывают широко применяемый на практике участок миллиметрового диапазона волн Е-band. Так, ГОСТ Р 53363-2009 по расчету показателей качества РРЛ ограничивается диапазоном частот от 3,4–40,5 ГГц, а разработанная НИИР методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости охватывает диапазон частот от 2 до 20 ГГц [5]. В Рекомендации Международного Союза Электросвязи для проектирования наземных систем прямой видимости [6] указан более высокий диапазон частот ее применимости, но с осторожной оговоркой: «... по крайней мере, для частот до 100 ГГц», что также свидетельствует о недостаточной изученности влияния метеоусловий на распространение радиоволн миллиметрового диапазона.

Особенностью радиорелейной связи в миллиметровом диапазоне частот является ее сильная подверженность влиянию осадков, вызывающих глубокие замирания сигналов, для борьбы с которыми на интервалах РРЛ (радиорелейных интервалах - РРИ) либо поддерживается повышенный запас мощности, либо используется адаптивная модуляция (АМ). Радиорелейное оборудование в этом диапазоне широко применяется на практике довольно продолжительный период, за который уже собран большой объем статистических данных [4], позволяющий оценить и обобщить влияние метеоусловий на замирания сигналов. На основе имеющихся статистических данных были проведены исследования указанного влияния в диапазоне E-Band, что позволило разработать рассмотренную в данной статье методику расчета пропускной способности РРЛ с АМ в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн.

### Основные положения разработанной методики

В основу разработанной методики расчета пропускной способности РРЛ с адаптивной модуляцией легла математическая модель функционирования сети радиорелейной связи с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов, предложенная в работе [7].

Под пропускной способностью РРИ без АМ, работающего с постоянной скоростью передачи, понимается максимальная скорость  $C_{\max} \in \{C_i\}_n$ , поддерживаемая радиорелейным оборудованием, при

условии обеспечения требуемого коэффициента неготовности  $K_{\rm H\Gamma}$  ( $C_{\rm max}$ )  $\leq K_{\rm H\Gamma,TP}$ :

$$C_{\max} = \max_{i=1.n} C_i | K_{\text{H}\Gamma.i} \le K_{\text{H}\Gamma.\text{Tp}}.$$
 (1)

В случае заданной постоянной скорости передачи  $C_{\rm Tp}$  интервал РРЛ считается пригодным, если  $K_{\rm Hr}$  ( $C_{\rm Tp}$ )  $\leq K_{\rm Hr.Tp}$ , что эквивалентно условию  $C_{\rm max} \geq C_{\rm Tp}$ . Отсюда следует, что расчет пропускной способности РРИ непосредственно связан с расчетом коэффициента неготовности и с оценкой пригодности интервала.

Однозначного определения пропускной способности РРИ, работающего с переменной скоростью передачи в режиме с АМ, в настоящее время не существует, поскольку такие интервалы применяются в мультисервисных транспортных сетях связи и сетях доступа, предназначенных для одновременной передачи разных типов трафика с разными требованиями к скорости передачи и коэффициенту неготовности. В работе [7] предлагается оценивать пропускную способность таких РРИ раздельно для двух типов трафика: 1) требующего постоянную скорость передачи и 2) допускающего переменную скорость передачи.

В случае передачи первого типа трафика, требующего постоянной скорости, в качестве пропускной способности РРИ с АМ в [7] предлагается, как и в случае РРИ без АМ, рассматривать максимальную скорость  $C_{\rm max}$ , рассчитываемую по формуле (1).

В случае передачи второго типа трафика, допускающую переменную скорость, в качестве пропускной способности РРИ с АМ в [7] предлагается рассматривать среднюю скорость передачи  $\mathcal{C}_{\rm cp}$ , рассчитываемую по формуле:

$$C_{\rm cp} = \sum_{i=1}^{n} C_i(F(V_{i+1}) - F(V_i)) =$$

$$= \sum_{i=1}^{n} C_i(P_{{\rm H}.i+1} - P_{{\rm H}.i}),$$
(2)

где  $V_i$  – допустимое ослабление сигнала (соответствующее глубине замирания, в результате чего уровень сигнала снижается до чувствительности приемника  $P_{\mathrm{c.rp}.i}$ ), при котором на скорости передачи  $C_i$ , соответствующей i-му уровню модуляции, выполняются требования к вероятности ошибки (BER), F(V) = Pr(v < V) – функция распределения вероятности (ФРВ) ослабления сигнала v;  $F(V_i) =$  $P_{\mathrm{H}.i} == \mathrm{K}_{\mathrm{H}\Gamma.i}$  – вероятность ослабления сигнала vменьше допустимой величины  $V_i$ , соответствующая коэффициенту неготовности К<sub>нг.і</sub> при работе РРИ с АМ на скорости  $C_i$ ; n – число доступных в РРИ градаций скорости передачи (уровней модуляции), упорядоченных по возрастанию, т. е.  $C_1 < C_2 < ... C_n$ . При i = n в формуле (2) следует подставлять значения  $F(V_{i+1}) = P_{H.i+1} = 1$ .

В случае передачи трафика с переменной скоростью со средней величиной  $C_{\rm cp}$ , рассчитываемой по формуле (2), пригодность РРИ с АМ оценивается по критерию допустимости коэффициента неготовности на минимальной градации скорости  $K_{\rm H\Gamma}$  ( $C_1$ )  $\leq$   $\leq$   $K_{\rm H\Gamma,Tp}$ .

Обычно первый тип трафика (с постоянной скоростью передачи) является приоритетным, а второй (с переменной скоростью передачи) – неприоритетным. В случае передачи обоих типов трафика одновременно именно по величине коэффициента неготовности РРИ с АМ при передаче первого типа трафика с заданной скоростью  $C'_{\text{тр}}$  делается вывод о пригодности интервала, т. е. РРИ с АМ считается пригодным, если  $P_{\text{H}}(C'_{\text{тр}}) < P_{\text{H-Tp}}$ . Если при этом оказывается, что  $C_{j-1} \le C'_{\text{тр}} < C_j$ , где  $1 < j \le n$ , то избыточные градации скорости  $\{C_j, ..., C_n\}$  можно использовать для передачи неприоритетного трафика с максимальной средней скоростью:

$$C''_{cp} = \sum_{i=j}^{n} (C_i - C'_{Tp})(F(V_{i+1}) - F(V_i)) =$$

$$= \sum_{i=j}^{n} (C_i - C'_{Tp})(P_{H.i+1} - P_{H.i}),$$
(3)

где  $C'_{\text{тр}} = 0$  и j = 1 (при отсутствии первого типа трафика) формула (3) совпадает с формулой (2).

Коэффициент неготовности РРИ с АМ при обслуживании неприоритетного трафика со средней скоростью C" (3) определяется вероятностью ослаблений, меньше допустимой величины  $V_j$  для градации скорости  $C_j$ , т. е.  $P_{\rm H}(C$ " ср) =  $P_{\rm H,j.}$ 

Расчеты по приведенным выше формулам (1–3) являются основной отличительной особенностью разработанной методики расчета пропускной способности РРЛ с АМ, в части, касающейся отдельных РРИ с АМ, по сравнению с известными методиками – без АМ [5, 6]. Пересчет пропускных способностей и коэффициентов неготовности РРИ с АМ к аналогичным показателям РРЛ с АМ приведен в [7].

Для расчета пропускной способности РРИ с АМ по формулам (1-3) необходимо знать ФРВ ослабления сигнала (функцию распределения замираний) F(V), точное аналитическое выражение которой для РРИ в диапазоне миллиметровых волн в настоящее время неизвестно. В то же время в Рекомендации ITU-R P.530 приводится формула расчета ослабления с заданной вероятностью при известной интенсивности дождя, превышаемой в течение 0,01 % времени. Из данной формулы можно получить функцию распределения замираний F(V), однако, как будет показано далее, эта функция существенно отличается от имеющихся статистических распределений, что вызвало необходимость проведения специальных исследований зависимости замираний сигнала от метеоусловий. Результаты проведенных исследований позволили получить аналитическое выражение F(V), которое более точно соответствует имеющимся статистическим данным о распределении замираний.

Далее в настоящей статье приводятся основные результаты анализа статистических данных, а также выполненное на их основе обоснование предлагаемой функции распределения замираний более подробно.

# Анализ статистических данных о замираниях сигналов на интервалах РРЛ с АМ, функционирующих в диапазоне E-band

Статистические данные о замираниях сигналов на РРИ с АМ, функционирующих в диапазоне E-band, были предоставлены компанией ИнфоТел [8]. Сбор статистики измерений уровней сигналов происходил в умеренном климатическом поясе Европейского континента на 23-х РРИ и 41-й близлежащей метеостанции в течение 15 следующих друг за другом месяцев. Пространственные параметры наблюдаемых РРИ характеризовались длиной интервалов от 3 до 10 км и высотой подвеса антенн от 23 до 79 м. Расстояния между площадками с радиорелейными станциями (РРС) и метеостанциями составляли от 0,6 до 10 км. Технические параметры РРС: диаметр антенны 0,6 м, ширина полосы сигнала 2000 МГц, доступные уровни модуляции 4QАМ, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, которым соответствовали значения чувствительности приемников и скорости передачи, приведенные в таблице 1.

**ТАБЛИЦА 1. Технические параметры РРС**TABLE 1. Technical Parameters of Microwave Link Station

Уровень модуляции	Чувствительность приемника $P_{\text{с.тр.}i}$ при BER = $10^{-6}$ , дБм	Скорость передачи С <sub>і</sub> , Мбит/с
4QAM	-60	2731
16QAM	-54	5462
32QAM	-51	6828
64QAM	-48	8193
128QAM	-44	9559

В результате обработки статистических данных было выяснено, что средние значения мощности сигнала на входе приемников РРС составляли от –41,4 до –31,2 дБм, среднеквадратическое отклонение (СКО) варьировалось от 1,7 до 4,5 дБм, максимальная глубина замираний достигала от 13,6 до 40,8 дБ. На всех РРИ использовался режим АМ. Усредненные статистические функции плотности вероятности (ФПВ) и ФРВ уровней сигналов при разных адаптивно переключаемых уровнях модуляции представлены на рисунке 1. Как видно из рисунка 1а, пики ФПВ для различных уровней модуляции приходятся на области значений мощности сигнала, превышающих значения соответствующих данным уровням чувствительностей (таблица 1),

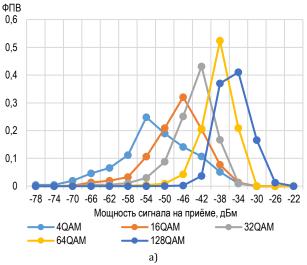
что в целом соответствует математической модели функционирования РРИ с АМ [8], использованной в формулах (2 и 3).

Среднее значение мощности сигнала (RSL, *аббр. от англ.* Received Signal Level) и СКО для различных видов модуляции приведены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Статистические значения RSL и СКО

TABLE 2. Statistical Values of RSL and Standard Deviation

Модуляции	RSL	СКО
4QAM	-53,3	7,8
16QAM	-48,6	5,9
32QAM	-45,3	4,7
64QAM	-40	3,4
128QAM	-36,5	3,4



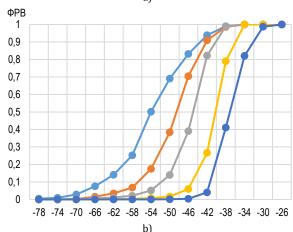
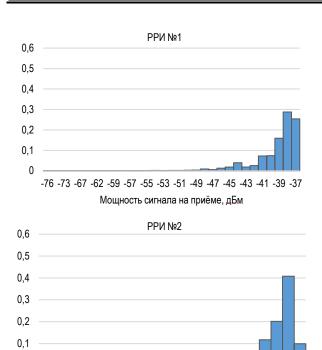
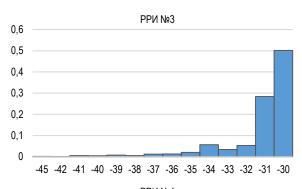


Рис. 1. Статистические ФПВ (a) и ФРВ (b) мощности сигнала на входе приемников РРС с АМ

Fig. 1. Statistical Functions of Probability Density (a) and Cumulative Distribution Functions (b) for the Signal Power at the Input of Microwave Link Receivers with Adaptive Modulation

На рисунке 2 для примера приведены гистограммы ФПВ мощности сигнала на входе приемников РРС для 4-х из 23-х анализируемых РРИ независимо от текущего уровня модуляции.





-44

-40

٥



**интервалов**Fig. 2. Histograms of Signal Levels for Selected Intervals

Из приведенных гистограмм были получены статистические ФРВ уровней сигнала, с которыми были сопоставлены аналитические функции распределения замираний, полученные на основании формул в Рекомендации ITU-R P.530 [6], где описана процедура оценки долгосрочной статистики затухания (ослабления с обратным знаком в дБ) сигналов из-за влияния осадков (дождя), которая после некоторых преобразований позволяет полу-

чить аналитическую функцию распределения замираний для дождя заданной интенсивности.

В указанной рекомендации приводится выражение для оценки затухания (дБ) от дождя на трассе, превышаемое в течение 0,01 % времени:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_r, \tag{4}$$

где  $\gamma_R$  – удельное затухание (дБ/км), которое рассчитывается согласно Рекомендации ITU-R P.838 [9] для заданной частоты, поляризации и интенсивности дождя  $R_{0.01}$ , превышаемой в течение 0,01 % времени;  $d_r$  – длина РРИ с учетом коэффициента дальности r, которая была задана в расчетах в соответствии с местоположением РРС, участвующих в сборе статистических данных.

Затухание  $A_p$  , превышаемое в течение других процентов времени p, отличных от 0,01 % , рассчитывается с помощью выражения:

$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = c_1 p^{-(c_2 + c_3 \log_{10} p)},\tag{5}$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ , и  $C_3$  – определяемые по рекомендации [6] параметры.

Решив уравнение (5) относительно p, было получено аналитическое выражение для ФРВ замираний F(V) глубиной более  $A_p = -V$  при заданной интенсивности дождя  $R_{0.01}$ :

$$F(V) = \begin{cases} p(V), & p(V) \le 1\\ 1, & p(V) > 1 \end{cases}$$
 (6)

где

$$p(V) = 10^{\frac{-c_2 + \sqrt{c_2^2 - 4c_3(\lg(-V) - \lg(A_{0,01}) - \lg(C_1))}}{2C_3}}.$$
 (7)

На рисунке 3 приведены результаты расчета ФРВ мощности сигнала с учетом распределения вероятности замираний, рассчитанной по формуле (6) для РРИ №4, имеющего длину 5,5 км, при различных значениях интенсивности дождя, которым соответствуют разные цветные линии. На этом же рисунке черным цветом изображена измеренная статистическая ФРВ мощности сигнала для РРИ №4. Из представленных графиков следует, что аналитическая функция распределения, посчитанная по ITU-R Р.530, значительно отличается от статистической ФРВ при  $R_{0.01} = 30$  мм/ч, соответствующей среднестатистическим данным о метеоусловиях в районе РРИ №4. В пределах значений уровня приемного сигнала, наиболее характерных для радиорелейной связи, от -60 дБм до примерно -35дБм, средняя ошибка между статистическими данными и рассчитанными значениями вероятности замираний составляет 4,7 % при СКО = 15,2 %. В целом рассчитанные значения вероятностей оказались меньше статистических данных в указанном диапазоне уровней приемного сигнала от 3-х до 12-ти раз.

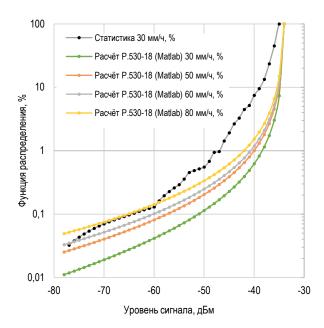


Рис. 3. Статистическая ФРВ уровня сигнала на РРИ №4 и функции распределения, рассчитанные по ITU-R P.530-18 при различных интенсивностях дождя  $R_{0,01}$ 

Fig. 3. Statistical PDF (Probability Density Function) of the Signal Level at the Interval No. 4 and Distribution Functions Calculated According to ITU-R P.530-18 for Various Rain Rates R<sub>0.01</sub>

Попытки уменьшения погрешности с помощью поправочного коэффициента к интенсивности дождя и ее увеличения с градациями 50, 60 и 80 мм/ч не привели к желаемому результату. Как видно из рисунка 3, при увеличении интенсивности дождя возникает неоднородная погрешность, то есть графики аналитической функции распределения и статистики показывают хорошее совпадение для низких значений уровня сигнала (менее –60 дБм), а для более высоких значений погрешность остается большой. С учетом поправки до 80 мм/ч средняя ошибка уменьшилась, но лишь до 4,2 %, а СКО составило 13,9 %.

Как видно из рисунка 3, результаты расчета функции распределения замираний в соответствии с Рекомендацией ITU-R P.530 для диапазона частот E-band получаются слишком оптимистичными, а введение поправочного коэффициента к интенсивности дождя не позволяет уменьшить погрешность. На практике такой оптимистичный результат прогноза влияния замираний на качество связи на РРИ с АМ может привести к завышенным ожиданиям устойчивости и пропускной способности, недостижимым в реальных условиях.

Для обоснования более подходящего аналитического выражения для расчета функции распределения замираний были проведены исследования влияния различных параметров метеоусловий на распространение радиоволн в диапазоне частот E-band, результаты которых представлены далее.

### Анализ влияния метеоусловий на замирания сигналов на интервалах РРЛ в диапазоне E-band

Для выявления влияния различных погодных условий на замирания радиорелейного сигнала статистика РРИ была совмещена с метеорологической статистикой. Для этого использовались метеосводки близлежащих к РРИ метеостанций. Совмещение данных обеих статистик произведено с периодом в пятнадцать минут.

Совмещение данных позволило выявить степень зависимости уровня сигнала на приеме РРИ от следующих погодных параметров: температуры; температуры точки росы; давления; ветра; дождей; влажности.

Более подробный перечень погодных параметров [10] и единиц измерения, зафиксированных с периодом 15 мин: средняя температура (°С), максимальная температура (°С), минимальная температура (°С), температура на высоте 15 см от поверхности земли (°С), температура точки росы (°С) (температура воздуха, при которой содержащийся в нем пар достигает состояния насыщения и начинает конденсироваться в росу), давление (гПа), направление ветра (°), порывы ветра (м/с), скорость ветра (м/с), интенсивность дождя (мм), относительная влажность (%).

В качестве примера на рисунке 4 представлены совмещенные графики двух групп статистик, снятых с периодом в 15 мин на 4-х из 23-х РРИ: уровни мощности сигнала на входе приемника РРС и погодных явлений вблизи этих станций. По горизонтальной оси отложены дата и время. По вертикальным осям отложены две шкалы: левая – совокупная для нескольких показателей; правая – для интенсивности дождей (мм/15 мин). Для примера были выбраны данные за январь и февраль, что соответствует для рассматриваемого региона наихудшим с точки зрения осадков месяцам. Представленные графики позволяют наглядно оценить причины возникновения замираний из-за погодных условий.

Визуальный анализ графиков подтверждает понижение уровня сигнала во время возникновения дождей. Однако это не единственная зависимость замираний от погодных условий. Также заметны явные провалы уровня сигнала при одновременном резком снижении относительной влажности и пиках средней температуры и температуры точки росы. При этом необходимо отметить, что в эти промежутки времени кривая интенсивности дождя указывает на отсутствие осадков, то есть влияние дождей на выявленные замирания в эти временные интервалы исключено.

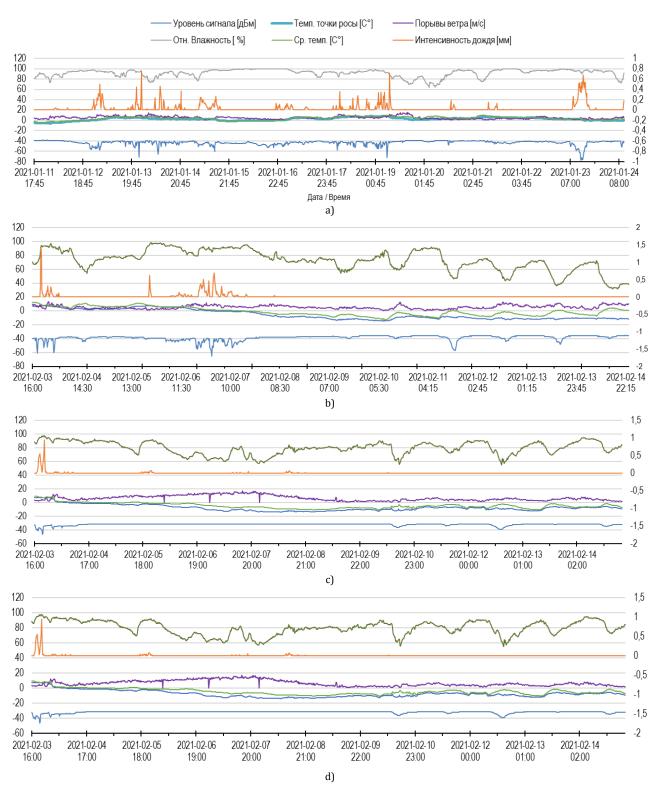


Рис. 4. Пример совмещенной статистики для РРИ №1 (a), РРИ №2 (b), РРИ №3 (c), РРИ №4 (d) Fig.4. Example of Combined Statistics for Interval No. 1 (a), No. 2 (b), No. 3 (c), No. 4 (d)

Согласно критерию Стьюдента для 99-процентного доверительного интервала и заданной статистической погрешности 0,2 дБм уровня принимаемого сигнала были рассчитаны требуемые количества испытаний для каждого из приведенных РРЛ

интервалов [11]. Для РРИ №1 требуется 1554 испытаний (было проведено 2677 испытаний); для РРИ №2 – 1169 (было проведено 1286); для РРИ №3 требуется 516 испытаний (было проведено 3087); для РРИ №4 – 91 (было проведено 1086).

В целях численного исследования влияние всех перечисленных метеорологических явлений на мощность сигнала на приеме, была проведена оценка влияния отдельных погодных явлений путем вычисления корреляции Пирсона [12]. Расчеты коэффициентов корреляции показали, какие погодные параметры оказывают наибольшее влияние на мощность сигнала (указаны в порядке возрастания степени влияния): относительная влажность, температура точки росы, давление, интенсивность дождя. Значения коэффициентов корреляции представлены в таблице 3.

Чтобы проверить представленную взаимосвязь между перечисленными погодными параметрами и мощностью сигнала на предмет искажений вследствие взаимных влияний каких-либо погодных явлений друг на друга, был применен способ расчета коэффициента частной корреляции, который исключает влияние третьего параметра:

$$r_{xy(z)} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)'}}$$
(8)

где  $r_{xy(z)}$  – коэффициент частной корреляции между мощностью сигнала (x) и исследуемым погодным параметром (y) без влияния другого погодного параметра (z);  $r_{yz}$  – коэффициент взаимной корреляция между двумя погодными параметрами.

Так как самое большое значение коэффициента корреляции на мощность сигнала приходится на интенсивность дождя, важно исключить искажения этого показателя за счет влияния других корреляционно значимых эффектов погоды. Сделав сравнительный анализ первой и второй строк таб-

лиц 3-6 и принимая во внимание разницу значений между простой  $r_{xy}$  и частной  $r_{xy(z)}$  корреляциями, можно подчеркнуть следующее. Во-первых, в корреляции между сигналом и интенсивностью дождя взаимосвязь между давлением и интенсивностью дождя не играет существенной роли. Во-вторых, наибольшая разница между корреляциями  $r_{xy}$  и  $r_{xy(z)}$  присутствует в случае воздействия давления и температуры точки росы на сигнал. Это говорит о том, что корреляция между сигналом и давлением подвергается влиянию от температуры, и наоборот. Что, впрочем, не противоречит закону Шарля о взаимосвязи давления и температуры [13]. В-третьих, относительная влажность не вносит в корреляцию сигнала с интенсивностью дождя значительного влияния. В-четвертых, температура точки росы вносит в корреляцию сигнала с относительной влажностью определенное влияние, так как наблюдается заметная разница между коэффициентами корреляций  $r_{xy}$  и  $r_{xy(z)}$  в случае воздействия относительной влажности на сигнал при учете температуры точки росы.

Из представленных таблиц 4–7 следует, что среди погодных явлений можно выделить основной фактор – интенсивность дождя как непосредственно влияющий на уровень сигнала в диапазоне E-band и независящий от других погодных явлений. Следует также выделить следующие погодные факторы, которые вносят в своей совокупности весомое воздействие на замирание сигнала: относительная влажность в совокупности с температурой точки росы, температура точки росы в совокупности с давлением.

ТАБЛИЦА 3. Результаты расчета коэффициента корреляции между наиболее значимыми погодными параметрами и замираниями сигнала

TABLE 3. Results of Calculating the Correlation Coefficient between the Most Significant Weather Parameters and Signal Fading

	Погодные параметры			
Статистический параметр	относительная влажность	температура точки росы	давление	интенсивность дождя
Коэффициент корреляции между мощностью сигнала на приеме и погодными явлениями	-0,36442	-0,39255	0,39712	-0,40621

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета частной и общей корреляции между сигналом и интенсивностью дождя

TABLE 4. Calculation Results of Partial and General Correlation between Signal and Rain Intensity

	Корреляция сигнала и погодных параметров				
Статистический параметр	Сигнал $(x)$ – интенсивность дождя $(y)$ без влияния давления $(z)$ относительной влажности $(z)$ температуры точки росы $(z)$				
$r_{xy(z)}$ без влияния $z$	-0,37	-0,36541	-0,37956		
$r_{xy}$	-0,41	-0,41	-0,41		
$r_{yz}$	-0,19	0,1997	0,156443		

### ТАБЛИЦА 5. Результаты расчета частной и общей корреляции между сигналом и давлением

TABLE 5. Calculation Results of Partial and General Correlation between Signal and Pressure

	Корреляция сигнала и погодных параметров				
Статистический параметр	Сигнал (х) – давление (у) без влияния				
	интенсивности дождя $(z)$ относительной влажности $(z)$ температуры точки росы $(z)$				
$r_{xy(z)}$ без влияния $z$	0,358	0,365	0,264		
$r_{xy}$	0,397	0,397	0,397		
$r_{yz}$	-0,19	-0,17	-0,4632		

ТАБЛИЦА 6. Результаты расчета частной и общей корреляции между сигналом и температурой точки росы

TABLE 6. Calculation Results of Partial and Total Correlation between Signal and Dew Point Temperature

	Корреляция сигнала и погодных параметров				
Статистический параметр	Сигнал (х) – температура точки росы (у) без влияния				
	давления $(z)$ относительной влажности $(z)$ интенсивности дождя $(z)$				
$r_{xy(z)}$ без влияния $z$	-0,2565	-0,31758	-0,36454		
$r_{xy}$	-0,39255	-0,39255	-0,39255		
$r_{yz}$	-0,4632	0,304	0,16		

ТАБЛИЦА 7. Результаты расчета частной и общей корреляции между сигналом и относительной влажностью

TABLE 7. Calculation Results of Partial and General Correlation between Signal and Relative Humidity

Статистический параметр	Корреляция сигнала и погодных параметров					
	Сигнал $(x)$ – относительная влажность $(y)$ без влияния					
	давления (z)	температуры точки росы (z)	интенсивности дождя (z)			
$r_{xy(z)}$ без влияния $z$	-0,328	-0,2797	-0,316			
$r_{xy}$	-0,365	-0,365	-0,365			
$r_{yz}$	-0,17	0,304	0,20			

# Обоснование предлагаемой аналитической функции распределения замираний на РРИ в диапазоне E-band

Предлагаемый в данной работе способ нахождения теоретической ФРВ замираний основан на методе моментов, или методе выравнивания имеющегося статистического ряда с помощью некоторых параметров, характерных для заданного статистического материала [15]. Подобные методы уже использовались ранее, но их применение ограничивалось максимальным значением частот 35 ГГц [16]. Суть метода состоит в том, что для нахождения аналитического выражения расчета вероятности замираний сигнала на РРИ в условиях дождей необходимо для имеющихся статистических данных определить моменты, а на их основе найти параметры, характеризующие искомую функцию распределения.

Предлагается использовать следующее экспоненциальное выражение для интегральной ФРВ [16]:

$$F(A, \alpha, \beta, \delta) = \begin{cases} \alpha \left( \delta^2 e^{\beta \delta^2 A} + \delta e^{\beta \delta A} + e^{\beta A} \right), \ A < 0. \\ 1, \ A \ge 0 \end{cases}$$
 (9)

Определить параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  можно, основываясь на характерных для заданной статистики значениях:  $P_d$  – вероятность наличия дождя, в долях;  $A_{sr}$  – статистическое среднее ослабление во время дождя (дБ);  $D_A$  – статистическая дисперсия ослабления во время дождя (дБ²). Параметры  $P_d$ ,  $A_{sr}$ ,  $D_A$  могут быть получены на основе  $d_r$  – длины РРИ с учетом коэффициента дальности r,  $\gamma_R$  – удельного затухания (дБ/км), которое рассчитывается согласно Рекомендации ITU-R P.838 [9] для заданной частоты, поляризации и средней интенсивности дождя, полученной из статистических данных о метеоусловиях в районе РРИ.

Для определения параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  при заданных значениях  $P_d$ ,  $A_{sr}$ ,  $D_A$  необходимо решить следующую систему уравнений [15] относительно данных параметров:

$$\begin{cases} P_d = \alpha(\delta^2 + \delta + 1) \\ A_{sr} = \frac{-3}{\beta(\delta^2 + \delta + 1)}. \\ D_A = \frac{2}{\beta^2 \delta^2} - A_{sr}^2 \end{cases}$$
 (10)

Деление третьего уравнения на квадрат второго дает соотношение  $\phi(\delta)$ :

$$\varphi(\delta) = \frac{D_A}{A_{sr}^2} = \frac{2(\delta^2 + \delta + 1)^2}{9\delta^2} - 1,$$
 (11)

из которого была выведена формула:

$$\delta = \frac{\sqrt{18 \frac{D_A}{A_{Sr}^2} - 12 \sqrt{\frac{D_A}{A_{Sr}^2} + 2} + 6 + 3\sqrt{2} \sqrt{\frac{D_A}{A_{Sr}^2} + 1} - 2}}{4}.$$
 (12)

Остальные параметры определяются по формулам:

$$\alpha = \frac{P_d}{\delta^2 + \delta + 1},\tag{13}$$

$$\beta = \frac{-3P_d}{A_{sr}(\delta^2 + \delta + 1)}. (14)$$

Для 4-х из 23-х РРИ, выбранных ранее для примера, был выполнен расчет замираний в условиях дождя с интенсивностью 15 и 30 мм/ч, превышаемой в течение 0,01 % времени, что характерно для климатических регионов, в которых находятся ин-

тервалы. Графики ФРВ ослабления сигнала в дождях для РРИ, функционирующих в диапазоне Е-band, полученные на основе статистики и рассчитанные с помощью предложенного метода, представлены на рисунке 5, соответственно, синим и красным цветами.

Результаты расчета по предложенной аналитической ФРВ замираний, основанной на методе моментов, показали хорошее совпадение со статистическим данными для 4-х интервалов. Для РРИ №1 средняя ошибка между статистическими данными и рассчитанными значениями вероятности замираний сигнала глубиной до -37 дБ составляет 0,4 %, СКО = 2 %. Для РРИ №2 при глубине замираний до -23 дБ средняя ошибка - 1 %, СКО = 1,1 %. Для РРИ №3 при глубине замираний до -14 дБ средняя ошибка – 1,6 %, СКО = 2,3 %. А для РРИ №4 при глубине замираний до -40 дБ средняя ошибка -0,5 %, СКО = 1,2 %. Обобщенный результат точности расчета вероятности замираний для предложенного метода по всем четырем РРИ составляет среднюю ошибку 0,9 % и СКО - 1,6 %.

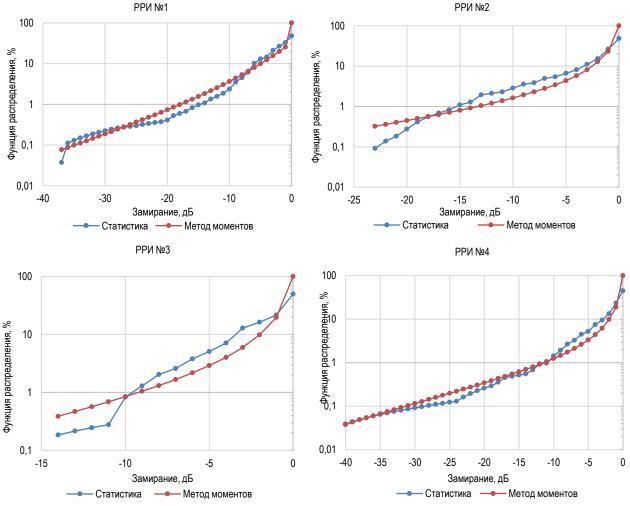


Рис. 5. Сравнение статистических ФРВ замираний и предлагаемой аналитической ФРВ

Fig. 5. Comparison of Statistical PDF and Proposed Analytical PDF of Fading

Результаты расчета средних значений уровня мощности сигнала  $P_{SR}$  по предложенной методике и статистические данные  $P_{SR\_{CTAT}}$  представлены в таблице 8. Символами  $P_{SR\_{CTAT}}$  и  $P_{SR\_{CTAT}2}$  обозначены значения среднего уровня мощности сигнала, соответственно, на станции 1 и станции 2 РРИ. Разница между статистическими данными  $P_{SR\_{CTAT}}$  и рассчитанными значениями  $P_{SR}$  для 4-х рассматри-

ваемых интервалов находится в диапазоне значений от –3,9 до 3,8 дБм, средняя ошибка составляет –0,26 дБм и СКО – 2,94 дБм.

Таким образом, предложенная функция распределения (9) замираний сигнала в условиях дождей позволяет рассчитать коэффициент неготовности для всех уровней модуляции, а затем, используя выражение (2) или (3), среднюю скорость передачи данных на РРИ с АМ.

ТАБЛИЦА 8. Средние значения уровни мощности сигнала (дБм) в дождях, рассчитанные предложенным методом и полученные на основе статистики

TABLE 8. Average Values of Signal Strength Levels (dBm) at Rain Calculated by the Proposed Method and Obtained on the Basis of Statistics

Интенсивность дождя <i>ld</i> = 15 мм/ч			Интенсивность дождя <i>Id</i> = 30 мм/ч				
РРИ №1, <i>R</i> = 9 км		РРИ №2, <i>R</i> = 8 км		РРИ №3, <i>R</i> = 7 км		РРИ №4, <i>R</i> = 6 км	
Расч. $P_{SR}$	Стат. $P_{SR\_{CTAT2}}$ ; $P_{SR\_{CTAT2}}$	Расч. $P_{SR}$	Стат. $P_{SR\_{CTAT1}}$ ; $P_{SR\_{CTAT2}}$	Расч. $P_{SR}$	Стат. $P_{SR\_{CTAT2}}$ ; $P_{SR\_{CTAT2}}$	Расч. $P_{SR}$	Стат. $P_{SR\_{CTAT1}}$ ; $P_{SR\_{CTAT2}}$
-43,7	-43,4 -41,9	-39,1	-42,8 -43,2	-49,7	-45,5 -46,3	-37,3	-39,6 -38,99

# Сравнение результатов расчета пропускной способности и устойчивости РРИ с АМ по разработанной методике со статистическими данными

Для возможности сравнения аналитических результатов со статистическими данными, расчет пропускной способности и устойчивости работы РРИ в диапазоне E-band выполнен для РРИ №4. На данном интервале применяется оборудование, которое поддерживает режим АМ с техническими параметрами, представленными в таблице 1.

Результаты расчета распределения вероятности уровня мощности сигнала на входе приемника РРИ №4 в диапазоне Е-band, полученные на основе аналитических функций и статистических данных, представлены на рисунке 6. Расчеты и статистические данные соответствуют условиям дождя со средней интенсивностью 30 мм/ч, превышаемой в течение 0,01 % времени. Для Рекомендации ITU-R Р.530 и предлагаемого метода расчет распределения вероятности уровня сигнала на входе приемника выполнен с использованием аналитических функций распределения замираний сигнала, соответственно, (6 и 9).

Представленные на рисунке 6 графики позволяют выполнить сравнительную оценку аналитических методов расчета устойчивости РРИ со статистическими данными. Например, требуется рассчитать устойчивость работы РРИ №4 в сети доступа на уровне модуляции 4QAM для обеспечения скорости передачи данных 2731 Мбит/с. Устойчивость работы оценивается коэффициентом неготовности  $K_{\text{Hг}.i}$  на i-й скорости передачи (i-м уровне модуляции). Для сети доступа требуемое значение коэффициента неготовности  $K_{\text{Hг}.Tpe6}$  = 0,05 % [5], что соответствует красной горизонтальной линии на ри-

сунке 6. Вертикальная линия красного цвета показывает чувствительность приемника для модуляции 4QAM при BER =  $10^{-6}$ . Точка пересечения указанных линий является критерием устойчивой работы РРИ. Интервал соответствует требованиям по устойчивости, если выполняется условие  $K_{\text{Hr.}i} \leq K_{\text{Hr.}Tpe6}$ .

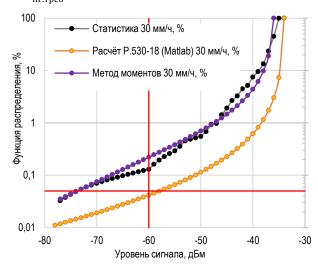


Рис. 6. Функции распределения вероятности уровня мощности сигнала на входе приемника, рассчитанная для РРИ №4 по различным методикам и их сравнение со статистическими данными

Fig. 6. Probability Distribution Functions for the Signal Power Level at the Receiver Input Calculated for the Station No. 4 Using Various Methods and Their Comparison with Statistical Data

Из графика следует, что согласно расчетам по Рекомендации ITU-R P.530 интервал соответствует требованиям по устойчивости работы, а согласно расчетам по предложенному методу и статистическим данным – интервал не соответствует требованиям по устойчивости для работы в сети доступа.

Следовательно, опасность применения чрезмерно оптимистичного прогноза, который дает Рекомендация ITU-R P.530, на практике может повлечь к нарушению устойчивой работы РРИ в реальных условиях. Более надежный прогноз дает разработанный метод (сиреневая линия), который хорошо согласуется со статистическими данными и позволяет избежать завышенных ожиданий от устойчивости работы РРИ и связанных с этим риском. Сравнение результатов моделирования, полученных по предложенной методике с эмпирическими значениями, было проведено по критерию согласия Колмогорова для уровня значимости 5 % [14, 16]. Пороговая величина параметра  $\lambda_{\text{порог}}$  критерия согласия Колмогорова для заданного уровня значимости составляет 1,35, а вычисленное значение  $\lambda_{\text{расч}}$  для статистического и предложенного теоретического рядов - 1,31, что меньше порогового значения  $\lambda_{\text{порог}}$ . Это позволяет считать допустимой гипотезу о соответствии предложенного аналитического распределения статистическому.

Результаты расчета пропускной способности РРИ №4 с использованием формулы (2) рассмотренными аналитическими методами и статистические данные представлены на рисунке 7.

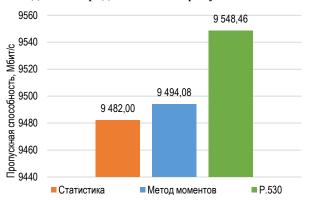


Рис. 7. Результаты расчета пропускной способности РРИ №4 при использовании различных методик

Fig. 7. Calculation Results of the Throughput for Station No. 4 Using Various Methods

Расчет по методу моментов наиболее приближен к реальным значениям. Расчет пропускной способности по методике ITU-R P.530, как и следовало ожидать, дает слишком оптимистические значения по сравнению с реальными данными статистики.

Численное сравнение результатов показывает, что погрешность расчетов по рекомендации ITU-R P.530 превышает погрешность по методу моментов в 5 раз. Использование результатов слишком оптимистичного прогноза на практике может привести к потере передаваемой информации.

#### Заключение

Существующие методики расчета устойчивости РРЛ базируются на математических моделях, справедливых для ограниченного частотного диапазона. Однако современные РРС функционируют на частотах 80 ГГц и выше, что продиктовано требованиями к росту пропускной способности. Анализ статистических данных и выполненные расчеты в рамках данной работы выявили несоответствия расчетов по существующим методикам со статистическими данными, измеренными на РРИ с АМ.

В статье описывается разработанная методика расчета пропускной способности РРЛ с АМ в условиях замираний, характерных для миллиметрового диапазона волн. Показана взаимосвязь пропускной способности с коэффициентами неготовности интервалов РРЛ с разными градациями скорости передачи при известной функции распределения замираний. Представлены результаты обработки статистики замираний на интервалах РРЛ в диапазоне E-band и метеоданных, на основе которых была выявлена их взаимосвязь, учтенная в предлагаемом аналитическом выражении функции распределения замираний. Проведен сравнительный анализ результатов расчета коэффициентов неготовности и пропускной способности интервалов РРЛ в диапазоне E-band на основе предлагаемой функции распределения и на основе функций распределения, используемых в существующих методиках. Показано, что результаты расчетов по разработанной методике в большей степени соответствуют результатам измерений, чем результаты расчетов по существующим методикам.

Направлением дальнейших исследований является продолжение обработки статистических данных с целью уточнения аналитической зависимости параметров предложенной функции распределения вероятности замираний от параметров метеоусловий в районе планируемого развертывания интервалов РРЛ с АМ в диапазоне E-band.

### Список источников

- 1. 3GPP TS 22.261 V19.1.0 (2022) Service requirements for the 5G system. Release 19.
- 2. ITU-R M.2083-0 (2015) IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.
  - 3. ETSI GR mWT 012 V1.1.1 (2018) 5G Wireless Backhaul/X-Haul.
- 4. Степанец И.В., Степанец В.А., Зайчик Е.М., Одоевский С.М. 4. Особенности применения и планирования радиорелейной связи в сетях 5-го поколения // Информатизация и связь. 2019. № 3. С. 77–83. DOI:10.34219/2078-8320-2019-10-3-77-83
- 5. Методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2–20 ГГц. Государственный Комитет Российской Федерации по связи и информации. Москва: Инженерный центр, 1998.

- 6. ITU-R P.530-18 (2021) Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
- 7. Одоевский С.М., Ключников В.О., Степанец И.В. Модель функционирования сети связи, построенной на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 4. С. 63–76. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-63-76
- 8. Одоевский С., Степанец В. Проектирование РРЛ: программный комплекс ONEPLAN RPLS // Первая миля. 2016. № 8(61). С. 18–23.
  - 9. ITU-R P.838-3 (2005) Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Question ITU-R 201/3.
- 10. Рыбакова Ж.В. Физическая метеорология (отдельные разделы). Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2013. 384 с.
- 11. Агишева Д.К., Зотова С.А., Матвеева Т.А., Светличная В.Б. Математическая статистика: учебное пособие // Успехи современного естествознания. 2010. № 2. С. 122–123.
  - 12. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М: Кнорус, 2018. 480 с.
  - 13. Введенский Б.А. (ред.). Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1960. Т. 5.
  - 14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
- 15. Ларин Е.А. Метод расчёта ослабления радиоволн в дожде на приземных трассах // Электросвязь. 1982. № 8. С. 48–54.
  - 16. Абезгауз Г.Г. и др. Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воениздат, 1970. 536 с.

#### References

- 1. 3GPP TS 22.261 V19.1.0. Service requirements for the 5G system. Release 19. 2022.
- 2. ITU-R M.2083-0. IMT Vision–Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. 2015.
- 3. ETSI GR mWT 012 V1.1.1. 5G Wireless Backhaul/X-Haul. 2018.
- 4. Stepanets I.V., Stepanets V.A., Zaychik E.M., Odoevsky S.M. Features of the Application and Planning of the Microwave Transmission in the 5th Generation Networks. *Informatizatsiia i sviaz.* 2019;3:77–83. (in Russ.) DOI:10.34219/2078-8320-2019-10-3-77-83
- 5. Calculation Methodology for Digital Line-of-Sight Radar Routes in the 2–20 GHz Frequency Range. Moscow: Engineering Center Publ.; 1998.
  - 6. ITU-R P.530-18. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. 2021.
- 7. Odoevsky S., Kluychnikov V., Stepanets I. Functional Model of Communication Network of Microwave Link Stations with Adaptive Modulation and Package Switching. *Proc. of Telecom. Universities.* 2021;7(4):63–76. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-4-63-76
  - 8. Odoevsky S., Stepanets V. Designing Microwave Links, ONEPLAN RPLS Software. Last Mile. 2016;8(61):18-23. (in Russ.)
  - 9. ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Question ITU-R 201/3. 2005.
- 10. Rybakova Zh. V. *Physical meteorology (separate sections)*. Tomsk: National Research Tomsk State University Publ; 2013. 384 p. (in Russ.)
- 11. Agisheva D.K., Zotova S.A., Matveeva T.A., Svetlichnaya V.B. Mathematical Statistics: Textbook. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia*. 2010;2:122–123. (in Russ.)
- 12. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. *Probability Theory and its Engineering Applications*. Moscow: KNORUS Publ.; 2018. 480 p. (in Russ.)
  - 13. Vvedensky B.A. (ed.) Physical Encyclopedic Dictionary. Moscow: Soviet Encyclopedia Publ.; 1960. vol.5. (in Russ.)
  - 14. Wentzel E.S. *Probability Theory*. Moscow: Nauka Publ.; 1969. (in Russ.)
- 15. Larin E.A. Method for calculating the attenuation of radio waves in rain on near-earth routes. *Electrosvyaz*. 1982;8: 48–54. (in Russ.)
  - 16. Abezgauz G.G. et al. Handbook of Probability Calculation. Moscow; Voenizdat Publ.; 1970. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 19.04.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 29.06.2023.

The article was submitted 19.04.2023; approved after reviewing 19.06.2023; accepted for publication 29.06.2023.

### Информация об авторе:

СТЕПАНЕЦ Ирина Валерьевна аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

https://orcid.org/0000-0003-1167-1590

Научная статья УДК 504.054 DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-104-111



## **Hybrid-NOMA for Wireless Communication System**

Rabia Khan, rabi.khan14@gmail.com

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russian Federation

**Abstract:** The demand for spectral efficiency, security, energy efficiency, power efficiency, high data rate, and throughput increases with the advancement of wireless communication systems. Power domain non-orthogonal multiple access (NOMA) is one the famous algorithms to achieve the essential requirement of a wireless communication setup. This paper proposes a novel algorithm called hybrid NOMA (H-NOMA). The hybrid NOMA can improve power efficiency (PE), spectral efficiency (SE), symbol error rate (SER), and sum secrecy. It is based on Hybrid Constellation Shaping to support a wireless communication system. Security is another primary concern for all communication systems; the proposed H-NOMA also provides better secrecy capacity as compared to NOMA. This paper contains the basic structure of the proposed algorithm. Simulation analysis is done for the symbol error rate, energy efficiency, and secrecy capacity. Machine learning genetic algorithm is also used for the optimization of system parameters.

**Keywords:** dynamic power, genetic algorithm, hybrid constellation shaping, machine learning, NOMA, wireless communication

**For citation**: Khan R. Hybrid-NOMA for Wireless Communication System. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2023;9(3): 104–111. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-104-111

## Hybrid-NOMA для беспроводной системы связи

🔟 Хан Рабиа, rabi.khan14@gmail.com

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Российская Федерация

Аннотация: С развитием систем беспроводной связи возрастает потребность в спектральной эффективности, безопасности, энергоэффективности, высокой скорости передачи данных и пропускной способности. Неортогональный множественный доступ в домене мощности (NOMA) — один из известных алгоритмов для выполнения основного требования к настройке беспроводной связи. В этой статье предлагается новый алгоритм, называемый гибридным NOMA (H-NOMA). Н-NOMA может улучшить энергоэффективность, спектральную эффективность, коэффициент ошибок по символам и секретность суммы. Он основан на Hybrid Constellation Shaping для поддержки системы беспроводной связи. Безопасность — еще одна первостепенная задача для всех систем связи; предлагаемый Н-NOMA также обеспечивает лучшую секретность по сравнению с NOMA. Эта статья содержит базовую структуру предлагаемого алгоритма. Анализ моделирования выполняется для коэффициента ошибочных символов, энергоэффективности и секретности. Генетический алгоритм машинного обучения также используется для оптимизации параметров системы.

**Ключевые слова:** динамическая мощность, генетический алгоритм, формирование гибридного созвездия, машинное обучение, NOMA, беспроводная связь.

**Ссылка для цитирования:** Хан Р. Hybrid-NOMA для беспроводной системы связи // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 3. С. 104–111. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-3-104-111

### 1. LITERATURE REVIEW

The demand for modern wireless technology is leading the world towards a better but more complex wireless communication system. The gigantic, anticipated data transformation necessitates better Energy Efficiency (EE), reliability, massive connectivity, and low latency. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) is one of the algorithms that offers the use of the same frequency band for the transmission of multiple signals. Several research analysis show that the NOMA outperform OFDMA [1]. In NOMA, the source broadcasts each signal after Superposition Coding (SC) to the respective consumers [2]. Each consumer receives superposed signals, which contain the signal of all users. Users that are closer to the source receive high power signals from all other users and the signal strength decreases for the distant users accordingly. For N consumers, each consumer (Un-nth consumer) performs Successive Interference Cancellation (SIC) for users with  $g_n < g$  to decode its own signal. However, distant users receive very low power signals of near consumers, consequently they consider near users' signals as interference.

The M-NOMA [3], target to reduce the SIC complexity of the system with the offer of minimal interference with the help of created orthogonality/slicing during the modulation process rather than spectrum. Generally, slicing prevents interference between far and near consumers. Therefore, the consumers closer to the message source receive message signals without interference with distant users' signal. Hence, they need to apply SIC only to subtract message signals of near users for  $g_n > g$ . Therefore, near and distant users need to perform SIC only within the same cluster of near or far users. Comparatively, the near consumers in M-NOMA perform N/2 times less SIC than NOMA but far users perform same number of SICs.

For the secrecy of NOMA, several authors are focused on providing secure regions to the legitimate users for healthier security. In [4], authors suggested to provide protected zones around the legitimate users or establish a prohibiting region for eavesdropper/s. In [5], a perfect cooperative scheme is presented that is contingent on the number of relays and their distances from the BS and eavesdroppers.

There are several other modulation-based techniques which are used to improve the overall performance of a system. Recently, the more focused and targeted techniques involve constellation shaping like Probabilistic Constellation Shaping (PCS), Geometric Constellation Shaping (GCS) and Hybrid Constellation Shaping (HCS) [6]. Constellation shaping was introduced to approach the Shannon capacity and better power efficiency. GCS contains equiprobable constellation points with non-uniform distribution is Euclidean space. On the other hand, PCS is more attractive due to closer approach towards Shannon capacity [7]. HCS improves the Spectral Efficiency by rearranging the con-

stellation points to a non-equidistant and non-uniform arrangement [8]. In a HCS method, the total amount of energy of each constellation point remains same, just like the conventional *M*-QAM. However, the total constellation point energy varies in probabilistic and geometric shaping.

Machine Learning (ML) techniques have been explored for several OMA algorithms in different scenarios including smart cities. Several ML algorithms have been introduced in a couple of year as Anderson-Darling test provided a ML based blind detection of modulation order opportunity in NOMA interference signals. Several future research works are open for ML-NOMA [9].

Genetic Algorithm (GA) is based on the principles of natural assortment and genetics. The complications with irregular variables, assorted continuous discrete variables and non-convex spaces involve optimization for the method design [10]. The GA is a suitable optimization ML process for an unconstrained optimization. It practices survival-of-the-fittest principle of nature to maximize the fitness function of the existing problem. MLGA is used in the few research articles of wireless communication systems. MLGA has been use for increasing the speed of the process of selection parameters [11], the optimization the BER in wavelength division multiplexing for four wave-mixing phenomena [12] and the optimization of major parameters in Vivaldi Antenna or Ultra-Wideband Communication [13]. MLGA is also useful to optimize parameters like data rate and energy efficiency [14].

The high energy consumption, limitation of power, SE, and band-width limitation, offers a great challenge for the implementation of an efficient wireless communication system. The requirements are the motivation towards proposing a novel Hybrid constellation-shaped NOMA (H-NOMA). The focus is to provide suitable way to efficiently use the available resources with maximum required output.

In this paper, the target is to use the required modulation constellation in a better way, by using the high energy level constellation point to modulate the high demand or far users and low energy levels to modulate the low demand or near users. As the users are modulated on one or more constellations, follows the same time and frequency, therefore, a name of H-NOMA is given.

H-NOMA can be used in several ways to avail yourself of the existing resources and algorithms. Depending on the distance of users from the source. If the distance is comparatively closer, there is no need to add additional power and only constellation point energies can be used. In the case of extremely far users, it can also be combined with NOMA, where far users are modulated on the high energy constellation point and allocated power to achieve the required Quality of Service. In the proposed H-NOMA, HCS is used to differentiate near and far users. The high energy constellation points

of a 16-QAM are used to modulate a distant user and the near user is modulated on comparatively low energy level constellation point. Therefore, it leads to a power efficient system with low symbol error rate (SER) and high Achievable Data Rate (ADR).

### 2. SYSTEM MODEL

### 2.1. System Description

Figure 1 shows the considered downlink H-NOMA scenario, where each user is mapped on the respective energy level of the 16-QAM constellation; U<sub>1</sub> is mapped on the minimal and U<sub>4</sub> is mapped on the highest energy level. The system contains total four users  $U_1 < U_2 < U_3 < U_4$ , Rayleigh flat fading channel, distance  $d_1 < d_2 < d_3 < d_4$  and 16-QAM constellation modulation. Four legitimate users and an Eavesdropper (Eve) with channel  $g_4 \& g_3 \approx g_{\text{Eve}} < g_1 < g_2$  is considered in the system as shown in the Figure 1Fig. . The channel condition of the Eve is worse than near users  $U_1 \& U_2$  and approximately same as far users:  $< U_3 < U_4$ . Therefore, Eve cannot eavesdrop on the message sent to near users with better channel conditions. There are two types of eavesdroppers: internal and external. In the considered scenario, there is only one external passive Eve. Since the Eve is external, therefore, it does not have the Channel State Information (CSI) information of any of any user to perform SIC.

### 2.2. Power Allocation

In the proposed scenario, the power of each source of the system is given as the set:  $P_s = \{P_{s1}, P_{s2}, ..., P_{sN}\}$ . The sum of all power allocation coefficients, from each

source to each user,  $A = \{\alpha_{V1}, \dots, \alpha_{Vn}, \dots, \alpha_{VN/2}, \dots, \alpha_{VN}\}$  is given as:

$$\alpha = \sum_{m=1}^{N} \alpha_{V_m} = 1, \tag{1}$$

where  $\alpha$  is the sum of coefficients of each user  $\alpha_{Vm}$  involved in the transmission.

### 2.3. Sum Secrecy Capacity of the System

The data rate of Eve with NOMA is denoted as  $R_e$  and H-NOMA as  $R_{Me}$ . As per the considerations, the Eve's channel condition is worse than near users i. e.,  $g_e < g_{N/2}$ ; therefore, it cannot decode the near users' signals. For NOMA, the secrecy capacity for  $n^{th}$  user and the sum secrecy capacity can be written as:

$$S_{Mn} = R_{Mn} - R_{Me} \tag{2}$$

and

$$S_{MT} = \sum_{n=\frac{N}{2}}^{N} S_{Mn}.$$
 (3)

For H-NOMA, the secrecy capacity for  $n^{th}$  user and the sum secrecy capacity can be written as:

$$S_{Mn} = R_{Mn} - RM_{e} \tag{4}$$

and

$$S_{MT} = \sum_{n=\frac{N}{2}}^{N} S_{Mn}.$$
 (5)

It must be noted that the above equations are changed for the simulation results of section *V*.

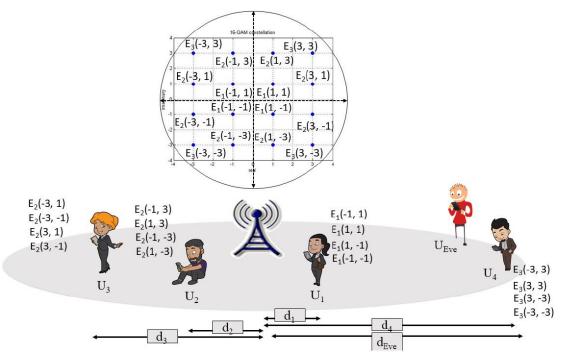


Fig. 1. Graphical Representation of H-NOMA with Four Users

# 3. THE NEW POWER EFFICIENT HYBRID CONSTELLATION SHAPING BASED NOMA (HCS-NOMA) WITH M-QAM SHAPING

There are three types of Constellation Shaping techniques, for making the data rate or capacity of a system close to the ideal Shannon capacity. In this paper, HCS is used to design a novel NOMA technique called H-NOMA. In HCS, the Constellation Points (CPs) are shaped according to their amplitude and symbol occurrences which changes the ratio of amplitude and symbol in each CP. In HCS, the total energy in each CP is constant irrespective of the degree of shaping.

The CPs  $A^{[s]}$  can be represented in its complex form as given below:

$$A^{[s]} = \pm \frac{\rho_{\mu}}{\rho} a \pm \frac{\rho_{\mu}(ja)}{\rho(ia)} ja, \tag{6}$$

where in the equation,  $\rho(a)$ ,  $\rho_{\mu}(a)$ ,  $\rho(ja)$  and  $\rho_{\mu}(ja)$  show the non-uniform and uniform probability of occurrences of a and ja.

To satisfy the HCS of QAM, the signal stream  $x^{[k]}$  of each  $A^{[s]}$  must satisfy the following condition:

$$\mathbb{E}\left[\pm\frac{\rho_{\mu}}{\rho}a\pm\frac{\rho_{\mu}(ja)}{\rho(ja)}ja\right] = \mathbb{E}\left[\pm\rho_{\mu}(a)ja\pm\rho_{\mu}(ja)ja\right]. \tag{7}$$

For the above condition the expected value is the same of HCS and uniform symbol distribution.

### 3.1. Channel Description

For the H-NOMA, four users are modulated on a 16-QAM constellation for the transmission of the signal. It is helpful for developing a PE system. In H-NOMA, there is no need to allocate high power to the far user with weak channel condition  $g_n < g_{n-1}$ . Rather for fulfilling the quality of service requirement, the distant user of worst channel condition is modulated on the constellation point with better energy level and the near user of better channel condition is modulated on the low energy level constellation point.

For a conventional power domain NOMA, power is allocated to each user with respect to its distance and channel condition. A superposed NOMA signal for four user can be written as:  $x = \sum_{n=1}^4 \sqrt{\alpha_n P_T x_n}$ , where  $\alpha$  is the power coefficient and it is given as;  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$ .

The superposed signal of four users for H-NOMA with 16-QAM can be written as:

$$X = \sqrt{P_T} X_{Hn}(x_1, x_2, x_3, x_4), \tag{8}$$

where in the equation, PT represents the total transmission power of the constellation's signal;  $x_1, x_2, x_3, x_4$  are the symbols of four different users, modulated in one 16-QAM constellation  $X_{Hn}$ . 16-QAM has four energy levels, therefore, four users are modulated on each constellation,

as each user needs to have a unique energy/power level with respect to its distance. For more traffic, higher modulations with more energy levels like 64-QAM and 256-QAM can be used. The modulation higher than 16-QAM is not the scope of this paper. However, it will be explored in future research. In H-NOMA, N constellations can be superposed together with SC before broadcasting. It is possible to modulate more than four users in a single transmission, with each constellation  $X_{Hn}$  carrying four users' symbols. Hence, for N consumers, (8) can be written as  $X = \sqrt{P_T} X_{Hn}(x_1, x_2, x_3, x_4) + \sqrt{P_T} X_{Hn}(x_5, x_6, x_7, x_8)$ .

$$\mathbb{Y}_n = \sqrt{g_n \mathbb{X}} + W(t). \tag{9}$$

Each user will receive the same signal with different power dissipation. Each receiver is considered to know the level of energy at which its signal is modulated. Knowing the energy level, each user will simply decode its signal. For *n* users, if transmitter transmitted n symbols and four users are modulated on each constellation, then transmitter needs to distinguish the signal by encapsulating code of different users on the transmitted signal. Addition of code is out of scope of this paper and will be addressed in the extended version.

### 3.2. Symbol Error Rate

This section explores the discussion of the symbol error rate of the constellation shaping of M-QAM. In a general M-QAM scheme, there are three CPs regions for symbols. The distribution of the symbols' location contains four symbols in the corner,  $\left(\sqrt{M}-2\right)^2$  symbols inside and  $\sqrt[4]{M}-2$  symbols are on the edges of CPs. Hence, the SER distribution is also affected by the corner, inside and edge location of respective CPs symbols,  $2\kappa_C$ ,  $4\kappa_I$  and  $3\kappa_E$ .

The SER  $\kappa_{xi}$  for each CPs' symbol, with respect to the respective position of the constellation map,  $\kappa_{xi} \Box 2\kappa_C$ ,  $4\kappa_I$  and  $3\kappa_E$  is given as:

$$\kappa_{xi} = \int_{0}^{\infty} Q\left(2d_{x_{i}^{[k]}}\right) 2L \exp\left(-(L^{2})dL\right) = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{d_{x_{i}^{[k]}}\zeta}{1 + d_{x_{i}^{[k]}}\zeta}}\right), \tag{10}$$

where in the above equation,  $\boldsymbol{L}$  – the amplitude of the channel.

The average SER of modulated shaping is derived on the bases of the conventional uniform shaping SER. However, the SER of non-uniformly shaped constellation with  $d_{x_i^{[k]}, x_i^{[k]}}$  and  $A_i^{[s]}$  differs from the conventional one. The probability of error decreases with the distance  $d_{x_i^{[k]}, \cdot}$ . Hence, when the symbol x moves away from its neighbouring CPs and towards the distant CPs then the chance of error decreases.

The SER for individual symbol for  $x_i^{[k]}$  with non-uniform HCS of M-QAM is given as in (11), where for 16-QAM,  $m_i=1$ , for M>16,  $m_i=\left\{1,\dots,\frac{\sqrt{M}}{2}-1\right\}$  and the corner CPs have not been considered.

For Modulation Shaping (MS), the average SER of the symbols of  $x_i$  is  $\zeta_M \approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \kappa_M \left[ x_i^{[k]} \right]$  where k is the number of symbols in the constellation.

$$\kappa_{M}\left[x_{i}^{[k]}\right] \approx \begin{cases}
3\kappa_{E}, & = \left\{\pm\frac{\rho_{\mu}(a)}{\rho(a)}a \pm\frac{\rho_{\mu}(ja)}{\rho(ja)}j\right\} \\
3\kappa_{E}, & = \left\{\pm\frac{\rho_{\mu}(a)}{\rho(a)}a \pm\frac{\rho_{\mu}(ja)}{\rho(ja)}ja\right\} \\
4\kappa_{I}, & = \left\{\pm\frac{\rho_{\mu}(a)}{\rho(a)}(2m_{i}-1) \pm\frac{\rho_{\mu}(ja)}{\rho(ja)}ja(2m_{i}-1)\right\}
\end{cases} (11)$$

### 3.3. Achievable Data Rate

In this paper, the achievable data rate is optimized by HCS. The symbol energy  $E_s$  is supposed to be constant for the whole constellation, that the total energy of the constellation is always constant.

The ADR for the probabilistic and geometric shaping can be defined according to [15] as:

$$R_{cs_p}(SNR, \mathbf{X}) \triangleq \max_{p_s: E_s = 1} I^{cs_p}(SNR, \mathbf{X}, p_s)$$
 (12)

and

$$R_{cs_g}(SNR, \boldsymbol{p_s}) \triangleq \max_{\boldsymbol{X}: E_S = 1} I^{cs_g}(SNR, \boldsymbol{X}, p_s). \tag{13}$$

It can be seen from the above equations that in the PCS, the probabilities of the constellation symbols are being optimized and, in the GCS, constellation symbols are being optimized.

As the HCS involves the optimization of probabilities of constellation symbols and the symbols, therefore, the ADR of the HCS can be written as:

$$R_{cs_h}(SNR, p_s, \mathbf{X}) \triangleq \max_{\mathbf{X}, p: E_s = 1} I^{cs_h}(SNR, \mathbf{X}, p_s). \tag{14}$$

In this paper, Rayleigh fading channel is considered for the transmission of signal. Therefore, according to the fading application of Shannon capacity, the ADR can be written as:

$$R_{cs_h}(SNR, p_s, \mathbf{X}) = \log_2(1 + \zeta_{V_{MT}})$$
 (15)

# 4. IMPLEMENTATION OF GENETIC ALGORITHM WITH MACHINE LEARNING

There are several methods for the optimization of physical parameters. In this paper, MLGA is being used for the optimization of multi-source system with respect to EE and the secrecy.

### 4.1. Energy Efficiency Optimization Problems

The use of power is a focus of attention for the integration of modern technology and therefore is highly subjected to energy limitations. For the proposed Intelligent Transportation System H-NOMA system, the EE is optimized for better system capability.

The EE of the system is given as:

$$\eta_{EE} = \frac{R_{M_{\text{sum}}}}{2P_{sn}} = \frac{\sum_{n=1}^{N} \log_2(1 + \zeta_{V_{MT}})}{2P_{sn}}.$$
 (16)

It is clear from (16), that the EE is directly related to the sum data rate of the system and inversely proportional to twice the total power of each transmitter since each user receives the same signal with two transmitters. The optimized sum data rate consequently optimizes the system's EE.

For the problem formulation, eight users are supposeed according to the system model of Figure 1. The sum data rate maximization problem can be formulated as:

P1: max: 
$$R_{M_{\text{sum}}} = \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} R_{V_n} + \sum_{n=1}^{N} R_{V_n} \hat{\imath}$$
. (17)

For the optimization of data rate, the sum data rate is set as the fitness function in the genetic algorithm. The data rate is subjected to the respective NOMA power coefficients and the received SINR. The constraints are the power coefficients. According to NOMA, the offered constraints are:

C1: 
$$A(\alpha_1, ..., \alpha_N) = \sum_{n=1}^{N} \alpha_n = 1$$
,  
C2:  $\alpha_n > 0$ ,  $n = \{1, ..., N\}$ .

### 4.2. Sum Secrecy Capacity Optimization Problems

Alongside EE and demands the system, the security of the system is being focused to meet the security demand of the modern Intelligent Transportation System. Security is the basic requirement of any modern system of IoT due to the connection of plenty of objects and systems together.

In this section, the proposed system's sum secrecy capacity of the system is optimized as shown below:

$$S_{M_n} = R_{M_n} - R_{M_e} (18)$$

and

$$S_{MT} = \sum_{n=\frac{N}{2}}^{N} S_{M_n}.$$
 (19)

It can be seen from (19) that the sum secrecy capacity depends on the capacity or data rate of each individual user of the system and the Eve. Hence, it is highly subjected to the individual's characteristics. It includes the channel, power, power coefficient, SINR and the interference. For the MLGA optimization, only system power, data rate and power coefficients of the system have been targeted.

For the formulation of problem, eight users are considered as given is the system model of Fig. , however due to worst channel condition of Eve as compared to near users, it cannot decode their signals. The sum data rate maximization problem for affected four far users can be formulated as:

$$P2: \max: S_{M_T}.$$
 (20)

For the optimization of sum secrecy capacity of the affected users, the sum secrecy capacity is used as the fitness function. The constraints for this case are again the NOMA power coefficients and the data rate. The reason for choosing the secrecy capacity as fitness function is to keep the difference of data rate optimized. Since the optimization of the power coefficients also optimizes the interference of both Eve and the affected users.

$$\begin{array}{l} C3{:}\,A(\alpha_1,\ldots,\alpha_N)=\sum_{n=1}^N\alpha_n=1,\\ \\ C4{:}\,\alpha_n,n=\{1,\ldots,N\}\\ \\ C5{:}\,R_{M_n}>R_T \text{ Threshold, }n=\{1,\ldots,N\} \end{array}$$

### 5. PERFORMANCE EVALUATION

This section presents the simulation results of the proposed H-NOMA comparison with the base line conventional power domain NOMA. The first simulation result shows the basic comparison, the other two show the comparison with MLGA. For simulating the comparative results, 16-QAM, Rayleigh flat fading channel is used with four users. For more than four users, higher modulation techniques are required, which is not the scope of this paper.

Two different fitness functions are used including EE and sum secrecy capacity. MLGA works on the optimization of the fitness functions with respect to constraints. By checking all the combined possibilities, it provides the maximum possible output. Each simulation result in this section is the output of the similar MLGA procedure.

Figure 2 shows the simulated result of SER, for the comparison of NOMA with H-NOMA for four users. The comparison results show that H-NOMA transmission overall outperforms NOMA. In Figure 2,  $n=\{1,2,3$  and 4 $\}$  is used to differentiate between each user. Where n=1 is the nearest user with better channel condition and n=4 is the furthest with the worst channel condition. It can be noticed that even when no extra power is used for the H-NOMA transmission, it

performs approximately the same or better in some of the users' cases.

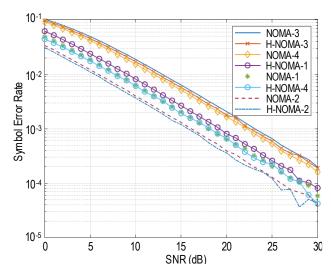


Fig. 2. Comparison for NOMA, HCS-NOMA and HCS-MSNOMA with and without HCS

Figure 3 shows the simulated comparison for the EE of H-NOMA and NOMA. The simulation is done with four users' sum data rate and their EE. ADR and EE are directly related to power, and power coefficients are possible constraints in power domain NOMA. Therefore, for a fair comparison, the same power coefficient is used for H-NOMA as well.

If constellation energy levels will be used for ML iteration, then the number of possible iterations will remain 4 (total no. of energy levels in a 16-QAM constellation), which will affect comparison fairness. Result shows the better EE for H-NOMA than NOMA. It is interesting to notice that H-NOMA outperforms ML-HNOMA, this is since H-NOMA itself is an optimization technique. Therefore, in this case of EE, HCS-NOMA outperforms due to its optimized nature.

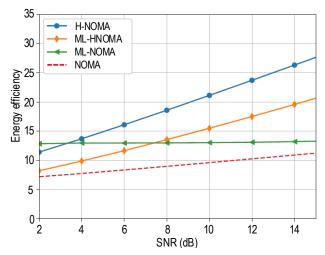


Fig. 3. Comparison Results for the Effect of MLGA on HCS-NOMA and NOMA for EE

Figure 4 shows the simulated comparison of H-NOMA and NOMA for the sum secrecy capacity. It is considered that the near users 1 and 2 are not affected by the eavesdropper, therefore, Eve can overhear only user 3 and 4.

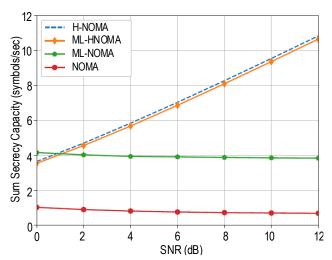


Fig. 4. Comparison Results for the Effect of MLGA on HCS-NOMA and NOMA

The Eve does not have the information about hybrid shaping and CSI. Eve cannot differentiate between the signals; therefore, it always receives the signal with high interference and cannot decode the exact signal. The high interference at the Eve's node results in the

better sum secrecy capacity of the H-NOMA system. The sum secrecy capacity increases with SNR. However, only a slight difference is observed with the use of MLGA for H-NOMA, due to ideal interference amongst each symbol. HCS-NOMA accomplishes better secrecy capacity, even without MLGA. For the positive secrecy capacity of NOMA, SIC is performed at the receiver of the intended user and no SIC at Eve.

### 6. CONCLUSION

In this paper, a novel H-NOMA is proposed to support PE, SER, and security. The proposed algorithm is a new type of NOMA with HCS called H-NOMA. In H-NOMA, an approach is made to save the power for distant users by utilizing the higher power of the constellation point, to modulate the signal of distant users. It supports the transmission of multiple signals for all users. The simulation results also show the better SER, ADR, Sum Secrecy Capacity, and EE performance as compared to the traditional scheme with and without MLGA.

The main motivation of this paper was towards the efficient usage of the power levels of the modulation constellation and save enough additional power added for distant users in NOMA. Alongside power, it also provides better utilization of Band Width. Not only due to same channel usage but also by sending multiple users' signals on the same constellation.

### References

- 1. Khan R., Asif R. Reflective In-Band Full Duplex NOMA Communications for Secure 5G Networks. *Proceedings of the International Conference on Smart Applications, Communications and Networking, SmartNets, 22–24 September 2021, Glasgow, United Kingdom.* IEEE; 2021. DOI:10.1109/SmartNets50376.2021.9555418
- 2. Khan R., Jayakody Nalin D.N.K. An ultra-reliable and low latency communications assisted modulation based non-orthogonal multiple access scheme. *Physical Communication*. 2020;43:101035. DOI:10.1016/j.phycom.2020.101035
- 3. Khan R., Jayakody D.N.K., Parvaiz H., Tafazolli R. Modulation Based Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Resilient Networks. *IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps, 09–13 December 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates.* IEEE; 2018. DOI:10.1109/GLOCOMW.2018.8644085
- 4. Gomez G., Martin-Vega F.J., Lopez-Martinez F.J., Liu Y., Elkashlan M. Uplink NOMA in Large-Scale Systems: Coverage and Physical Layer Security. arXiv. 2017. DOI:10.48550/arXiv.1709.04693
- 5. Arafa A, Shin W., Vaezi M, Poor H.V. Securing Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Systems by Trusted Relays. *Proceedings of the Global Communications Conference, GLOBECOM, 09–13 December 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates.* IEEE; 2018. DOI:10.1109/GLOCOMW.2018.8648037
- 6. Szczecinski L., Alvarado A. *Bit-Interleaved Coded Modulation: Fundamentals, Analysis and Design*. John Wiley and Sons, 2015. 320 p.
- 7. Batshon H.G., Mazurczyk M.V., Cai J-X., Sinkin O.V., Paskov M., Davidson C.R., et el. Coded Modulation based on 56APSK with Hybrid Shaping for High Spectral Efficiency Transmission. *Proceedings of the European Conference on Optical Communication, ECOC, 17–21 September 2017, Gothenburg, Sweden*. IEEE; 2017. DOI:10.1109/ECOC.2017.8346117
- 8. Rajaram A., Jayakody D.N.K., Chen B., Dinis R., Affes S. Modulation-Based Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. *IEEE Communications Letters*. 2020;24:136–140. DOI:10.1109/LCOMM.2019.2946236
- 9. Khan R., Kumar P., Jayakody D.N.K., Liyanage M. A Survey on Security and Privacy of 5G Technologies: Potential Solutions, Recent Advancements, and Future Directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020;22(1):196–248. DOI:10.1109/COMST.2019.2933899
  - 10. Rao S.S. Engineering Optimization: Theory and Practice. John Wiley and Sons; 2019. 832 p.
- 11. Yakzan A., Green R., Hines E. A Neuro-Genetic Hybrid Algorithm Utilizing Outdoors LOS Optical Wireless Channels. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, 24–26 July 2012, Phuket, Thailand.* DOI:10.1109/CICSyN.2012.18
- 12. Singh K., Bhattacharjee R. Bit error rate performance of genetic algorithm optimized WDM systems. *Proceedings of the IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 11–13 April 2006, Bangalore, India*. IEEE; 2006. DOI:10.1109/WOCN.2006.1666661

- 13. Behera B.R. Vivaldi antenna for UWB communications: Design modelling and analysis of Vivaldi Antenna with genetic algorithm. Proceedings of the International Conference on Control, Computing, Communication and Materials, ICCCCM, 21-22 October 2016, Allahbad, India. IEEE; 2016. DOI:10.1109/ICCCCM.2016.7918252
- 14. Khan R., Tsiga N., Asif R. Interference Management with Reflective In-Band Full Duplex NOMA for Secure 6G Wireless Communication System. Sensors. 2022;22(7):2508. DOI:10.3390/s22072508

#### Список источников

- 1. Khan R., Asif R. Reflective In-Band Full Duplex NOMA Communications for Secure 5G Networks // Proceedings of the International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets, Glasgow, United Kingdom, 22-24 September 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/SmartNets50376.2021.9555418
- 2. Khan R., Jayakody D.N.K. An ultra-reliable and low latency communications assisted modulation based non-orthogonal multiple access scheme // Physical Communication. 2020. Vol. 43. P. 101035. DOI:10.1016/j.phycom.2020.101035
- 3. Khan R., Jayakody D.N.K., Parvaiz H., Tafazolli R. Modulation Based Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Resilient Networks // IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 09-13 December 2018). IEEE, 2018. DOI:10.1109/GLOCOMW.2018.8644085
- 4. Gomez G., Martin-Vega F.J., Lopez-Martinez F.J., Liu Y., Elkashlan M. Uplink NOMA in Large-Scale Systems: Coverage and Physical Layer Security // arXiv. 2017. DOI:10.48550/arXiv.1709.04693
- 5. Arafa A, Shin W., Vaezi M, Poor H.V. Securing Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Systems by Trusted Relays // Proceedings of the Global Communications Conference (GLOBECOM, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 09–13 December 2018). IEEE, 2018. DOI:10.1109/GLOCOMW.2018.8648037
- 6. Szczecinski L., Alvarado A. Bit-Interleaved Coded Modulation: Fundamentals, Analysis and Design. John Wiley and Sons, 2015. 320 p.
- 7. Batshon H.G., Mazurczyk M.V., Cai J-X., Sinkin O.V., Paskov M., Davidson C.R., et el. Coded Modulation based on 56APSK with Hybrid Shaping for High Spectral Efficiency Transmission // Proceedings of the European Conference on Optical Communication (ECOC, Gothenburg, Sweden, 17-21 September 2017). IEEE, 2017. DOI:10.1109/ECOC.2017.8346117
- 8. Rajaram A., Jayakody D.N.K., Chen B., Dinis R., Affes S. Modulation-Based Simultaneous Wireless Information and Power Transfer // IEEE Communications Letters. 2020. Vol. 24. PP. 136-140. DOI:10.1109/LCOMM.2019.2946236
- 9. Khan R., Kumar P., Jayakody D.N.K., Liyanage M. A Survey on Security and Privacy of 5G Technologies: Potential Solutions, Recent Advancements, and Future Directions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2020. Vol. 22. Iss. 1. PP. 196-248. DOI:10.1109/COMST.2019.2933899
  - 10. Rao S.S. Engineering Optimization: Theory and Practice. John Wiley and Sons, 2019. 832 p.
- 11. Yakzan A., Green R., Hines E. A Neuro-Genetic Hybrid Algorithm Utilizing Outdoors LOS Optical Wireless Channels // Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (Phuket, Thailand, 24-26 July 2012). DOI:10.1109/CICSyN.2012.18
- 12. Singh K., Bhattacharjee R. Bit error rate performance of genetic algorithm optimized WDM systems // Proceedings of the IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (Bangalore, India, 11-13 April 2006). IEEE, 2006. DOI:10.1109/WOCN.2006.1666661
- 13. Behera B.R. Vivaldi antenna for UWB communications: Design modelling and analysis of Vivaldi Antenna with genetic algorithm // Proceedings of the International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM, allahbad, India, 21–22 October 2016). IEEE, 2016. DOI:10.1109/ICCCCM.2016.7918252
- 14. Khan R., Tsiga N., Asif R. Interference Management with Reflective In-Band Full Duplex NOMA for Secure 6G Wireless Communication System // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 7. P. 2508. DOI:10.3390/s22072508

Статья поступила в редакцию 01.05.2023; одобрена после рецензирования 24.05.2023; принята к публикации 02.06.2023.

The article was submitted 01.05.2023; approved after reviewing 24.05.2023; accepted for publication 02.06.2023.

### Информация об авторе:

аспирант Инженерной школы информационных технологий и робототехники Националь-Хан Рабиа ного исследовательского Томского политехнического университета

https://orcid.org/0000-0001-8169-7177

### Выходные данные



Товарный знак №929373, правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 61, литера А (RU) Зарегистрирован в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 13.03.2023 г. Заявка №2022733914

План издания научной литературы 2023 г., п. 7

Дата выхода в свет Усл.-печ. л. Формат Тираж Заказ Свободная цена 10.07.2023 13  $60 \times 84_{1/8}$  1000 экз. № 1401

Ответственный редактор **Татарникова И.М.** Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.** Дизайн: **Коровин В.М.** 

Адрес СПбГУТ:

193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22/1

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича"

E-mail: tuzs@sut.ru Web: tuzs.sut.ru VK: vk.com/spbtuzs



