

## Научный журнал "T-Comm: Телекоммуникации и транспорт"

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

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

**Свидетельство о регистрации СМИ:**

ПИ № ФС77-55956.

Дата выдачи: 07 ноября 2013 г.

**Язык публикации:** русский, английский.

**Территория распространения:**

Российская Федерация, зарубежные страны

**Тираж:** 1000 экз.

**Периодичность выхода:** 12 номеров в год

**Стоимость одного экземпляра:** 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

**Предпечатная подготовка:**

ООО "ИД Медиа Паблишер"

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

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

© ООО "ИД Медиа Паблишер", 2023

**Адрес редакции и издателя**

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

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

Тел.: +7 (495) 957-77-43

**Адрес типографии**

Москва, ул. Складочная, д. 3, корп. 6

**Индексация журнала:**

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

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

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

**Media Registration Certificate**

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

**Publication language:** Russian, English.

**Distribution Territory:** Russian Federation, foreign countries

All articles and illustrations are copyryght. All rights reserved.

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

© "Media Publisher", 2023

**Editorial and Publisher Address**

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

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

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

### ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ МЕДИА ПАБЛИШЕР

(495) 957-77-43  
(926) 218-82-43  
[info@media-publisher.ru](mailto:info@media-publisher.ru)



ПОЛНЫЙ ЦИКЛ ПОДГОТОВКИ КНИГ, ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ И РЕКЛАМНОЙ ПРОДУКЦИИ

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ЛИТЕРАТУРНОЕ И ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕДАКТИРОВАНИЕ

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННАЯ ОФСЕТНАЯ И ЦИФРОВАЯ ПЕЧАТЬ

Дата выхода: 17.07.2023 г.

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

**Учредитель**

ООО "Издательский дом Медиа Паблишер"

**Главный редактор**

Тихвинский Валерий Олегович

**Издатель**

Дымкова Светлана Сергеевна

ds@media-publisher.ru

**Редакционная коллегия**

Аджемов Артём Сергеевич  
(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Анютин Александр Павлович  
(д.ф.-м.н., профессор, член программного и оргкомитетов WSEAS), Россия, Мексика

Бугаев Александр Степанович  
(академик РАН), Россия

Вааль Альберт

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

Варламов Олег Витальевич  
(д.т.н., в.н.с. МТУСИ), Россия

Головачев Юлиус  
(управляющий консультант Detecon International GmbH), Германия

Гребенников Андрей Викторович  
(Sumitomo Electric Europe), Великобритания

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

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

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

Зубарев Юрий Борисович  
(д.т.н., член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ), Россия

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

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

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

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

Самойлов Александр Георгиевич  
(д.т.н., профессор Владимира государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых), Россия

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

Чирев Денис Сергеевич  
(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Шаврин Сергей Сергеевич  
(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

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

Яшина Марина Викторовна  
(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Исаева М.Н.

Поиск информационных совокупностей при исправлении пакетов ошибок квазициклическими кодами

4

Журавлёв А.П., Рюмин К.Ю., Атаищев О.И.,  
Титенко Е.А., Титенко М.А.

Параметры модуляции современных систем связи

13

## СВЯЗЬ

Борисовская А.В.

Модели сенсорных сетей с зависимыми источниками

21

## ИНФОРМАТИКА

Шестаков И.И., Шувалов В.П.

Моделирование противодействия скрытому перехвату информационного сигнала восходящего потока данных в пассивной сети оптического доступа

29

## ТРАНСПОРТ

Маловецкая Е.В., Мозалевская А.К.

Возможности повышения эффективности перевозочного процесса на основе построения комплексных прогнозных моделей загрузки инфраструктуры

38

## ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

## ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Хазов М.Л.

Новые квазиоптимальные алгоритмы автоворыбора антенн с низкой вычислительной сложностью

47

## СВЯЗЬ

Куделя В.Н.

Методы полного перебора в графе

57

# CONTENT

## ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Isaeva M.N.

Finding information sets when correcting error bursts  
with quasi-cyclic codes

4

Zhuravlev A.P., Ryumshin K. Yu., Atakischev O.I.,

Titenko E.A., Titenko M.A.

A Modulation parameters of new communication systems

13

## COMMUNICATIONS

Borisovskaya A.V.

Models of sensor networks with correlated sources

21

## COMPUTER SCIENCE

Shestakov I.I., Shuvalov V.P.

Simulation of counteraction to covert interception  
of an information signal of an upstream data stream  
in a passive optical access network

29

## TRANSPORT

Malovetskaya E.V., Mozalevskaya A.K.

Improving the quality of transportation based on the construction  
of complex predictive models of infrastructure loading

38

## PUBLICATIONS IN ENGLISH

## ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Khazov M.L.

New quasi-optimal algorithms of antenna selection  
with low complexity

47

## COMMUNICATIONS

Kudelya V.N.

Full enumeration methods on graphs

57

**T - Comm**

Telecommunications and transport

Volume 17. No. 7-2023

Release date: 17.07.2023

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

**Founder:** "Media Publisher", Ltd.

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

**Editor in Chief:** Dr. Valery O. Tikhvinskij

**Editorial board**

**Artem S. Adzhemov**

Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia

**Alexander P. Anyutin**

Doctor of sciences, Professor, member of the program and organizing committee WSEAS, Russia, Mexico

**Alexander S. Bugaev**

Academician of the RAS, Russia

**Corbett Rowell**

Full Professor: Electronic & Electrical Engineering  
Nazarbayev University, Hong Kong (China), USA

**Denis S. Chirov**

Doctor of sciences, MTUCI, Russia

**Vladimir G. Danilov**

Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia

**Eric Dulkeys**

Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, USA

**Julius Golovachyov**

Managing Consultant Detecon International GmbH, Germany

**Andrey Grebenников**

Ph.D., Sumitomo Electric Europe, United Kingdom

**Bayram Ibrahimov**

Ph.D., Professor of Azerbaijan Technical University (AzTU), Azerbaijan

**Tatyana A. Kuzovkova**

Doctor of sciences, MTUCI, Russia

**Georgii A. Omel'yanov**

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

**Alexander G. Samoilov**

Doctor of sciences, VLSU, Russia

**Michael Sharpe**

PhD, European Standards Institute – ETSI, United Kingdom

**Sergey S. Shavrin**

Doctor of sciences, MTUCI, Russia

**Nikolai N. Sysoev**

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

**Oleg V. Varlamov**

Doctor of sciences, MTUCI, Russia

**Albert Waal**

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

**Marina V. Yashina**

Doctor of sciences, Professor MTUCI, Russia

**Andrey A. Yelizarov**

Doctor of sciences, Professor MIEM, HSE, Russia

**Yuri B. Zubarev**

Doctor of sciences, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of Russia, Russia

# ПОИСК ИНФОРМАЦИОННЫХ СОВОКУПНОСТЕЙ ПРИ ИСПРАВЛЕНИИ ПАКЕТОВ ОШИБОК КВАЗИЦИКЛИЧЕСКИМИ КОДАМИ

Исаева Мария Николаевна,

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
[imn@guap.ru](mailto:imn@guap.ru)

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-4-12

Manuscript received 02 June 2023;  
Accepted 05 July 2023

Работа выполнена 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"

**Ключевые слова:** помехоустойчивое  
кодирование, декодирование по информационным  
совокупностям, квазициклические коды,  
исправление пакетов ошибок, низкоплотностные  
коды, каналы с памятью

В данной статье рассматривается вопрос об оценке вероятности нахождения информационных совокупностей в матрицах блочно-перестановочного и блочно-циркулянтного вида. Традиционно в помехоустойчивом кодировании рассматриваются независимые ошибки, однако, в реальных системах они могут быть сгруппированы и образовывать, так называемый, пакет ошибок. Известные оценки вероятности нахождения информационной совокупности проводятся для случайных матриц, а для исправления пакетов ошибок могут использоваться широко распространенные блочно-перестановочные коды с малой плотностью проверок на четность (LDPC-коды) или блочно-циркулянтные квазициклические коды (QC-коды). Для оценки вероятности нахождения информационных совокупностей использовалось математическое моделирование. Были проведены эксперименты, позволяющие выявить параметры для конкретных конструкций, которые дают наибольшую вероятность нахождения информационных совокупностей. В статье представлены результаты, отражающие определенные особенности в значениях вероятности нахождения информационных совокупностей для матриц различного вида, даны предположения и гипотезы о характере таких особенностей. Была выявлена зависимость наличия информационной совокупности от размера и расположения интервала ее поиска внутри блочно-перестановочной матрицы. Результаты данного исследования могут быть использованы для уменьшения сложности декодирования по информационным совокупностям, которая при рассматривании случайных матриц является экспоненциальной.

## Информация об авторе:

Исаева Мария Николаевна, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи, аспирант, г. Санкт-Петербург, Россия

## Для цитирования:

Исаева М.Н. Поиск информационных совокупностей при исправлении пакетов ошибок квазициклическими кодами // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 4-12.

## For citation:

Isaeva M.N. (2023) Finding information sets when correcting error bursts with quasi-cyclic codes. T-Comm, vol. 17, no.7, pp. 4-12.  
(in Russian)

## Введение

Во времена цифровых технологий ежедневно объем информации, циркулирующий по каналам связи, бесконечно возрастает. Информация касается практически все сферы деятельности человека. Из-за различных причин в каналах связи могут возникать ошибки, которые приводят к искажению двоичной передаваемой последовательности, что при декодировании может изменить суть передаваемого сообщения.

Среди алгоритмов декодирования сообщений существует декодирование по информационным совокупностям, которое способно исправлять ошибки. В теории помехоустойчивого кодирования чаще всего рассматривается исправление независимых ошибок [1-3]. Сложность декодирования по информационным совокупностям в данном случае является экспоненциальной для известных алгоритмов. Однако, в реальных каналах связи ошибки часто сгруппированы внутри передаваемой последовательности и образуют пакеты ошибок. При исправлении пакетов ошибок сложность декодирования по информационным совокупностям может быть заметно уменьшена [4].

Известные оценки вероятности нахождения информационной совокупности проводятся для случайных матриц, а, например, для исправления пакетов ошибок могут использоваться широко распространенные блочно-перестановочные LDPC-коды (коды с малой плотностью проверок на четность) и блочно-циркулярные квазициклические коды. В данной статье рассматривается вопрос об оценке вероятности нахождения информационной совокупности при исправлении пакетов ошибок.

## Декодирование по информационным совокупностям

Информационной совокупностью называется множество  $\gamma = \{1 \leq j_1 < j_2 < \dots < j_k \leq n\}$ , при задании компонент  $\alpha_{j_1}, \dots, \alpha_{j_k}$  однозначно определяющее кодовое слово. Если информационная совокупность свободна от ошибок, то есть не имеет на своих позициях ошибок, то принятое слово может быть восстановлено однозначно [5].

Поиск информационной совокупности в порождающей матрице  $\mathbf{G}$  может быть произведен следующим образом: возьмем произвольные  $k$  столбцов этой матрицы и составим новую матрицу  $\mathbf{M}_\gamma$ . Позиции взятых  $k$  столбцов будут являться информационной совокупностью  $\gamma$  в том случае, если матрица  $\mathbf{M}_\gamma$  будет невырожденной, то есть ее ранг будет равен числу  $k$ . Также для  $\mathbf{G}_\gamma = \mathbf{M}^{-1} \cdot \mathbf{G}$  на позициях  $\gamma$  должна образоваться единичная матрица.

Для того, чтобы верно декодировать принятое слово, необходимо, чтобы информационная совокупность была свободна от ошибок, для этого необходимо знать минимальное расстояние кода [6]. Если такой возможности нет, то можно провести полный перебор по всему множеству информационных совокупностей. При этом сложность подобного алгоритма будет экспоненциальной. Ниже приведен такой алгоритм декодирования:

- Генерируется множество информационных совокупностей  $\Gamma = \{\gamma_1, \dots, \gamma_N\}$ .

- По множеству информационных совокупностей формируется множество матриц  $\{\mathbf{G}_{\gamma_1}, \dots, \mathbf{G}_{\gamma_N}\}$ .

- При декодировании принятого слова  $\mathbf{b}$  необходимо осуществить перебор по всем матрицам  $\{\mathbf{G}_{\gamma_1}, \dots, \mathbf{G}_{\gamma_N}\}$ , и вычислить на каждой итерации  $\mathbf{z}_i = \mathbf{b}(\gamma_i) \cdot \mathbf{G}_{\gamma_i}$ , где  $\mathbf{b}(\gamma_i)$  – элементы из принятого слова  $\mathbf{b}$  на позициях  $\gamma_i$ .

- Для каждого  $\mathbf{z}_i$  проверяется условие  $d(\mathbf{z}_i, \mathbf{b}) \leq w_{\min}$ , где  $d(\mathbf{z}_i, \mathbf{b})$  – расстояние Хэмминга. Если оно выполняется, то  $\mathbf{z}_{\min} = \mathbf{z}_i$  и  $w_{\min} = d(\mathbf{z}_i, \mathbf{b})$ .

- После того, как был осуществлен перебор по всем информационным совокупностям, принимается решение  $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{z}_{\min}$ , где  $\hat{\mathbf{a}}$  – декодированное слово.

Данный алгоритм актуален при исправлении независимых ошибок. В случае рассмотрения пакетов ошибок необходимо использовать соответствующую метрику, связанную с пакетами (вместо минимального расстояния).

При передаче по каналам с памятью типичная конфигурация ошибок описывается не м помощью их количества, а с помощью понятия пакета ошибок. Пакетом ошибок называется вектор длиной  $b$ , в котором первый и последний ненулевой элемент располагаются не далее, чем на  $b$  позиций друг от друга. Пакет ошибок может быть циклическим: начинаться в конце принятого слова и заканчиваться в его начале.

При декодировании пакета ошибок все ошибочные позиции группируются и это может быть учтено при поиске информационных совокупностей: при выборе информационной совокупности можно ограничивать поиск  $k$  ее элементов позициями, не входящими в предполагаемое расположение пакета. Так как на  $k$  подряд идущих позициях может не оказаться информационной совокупности, будем расширять интервал поиска на некоторую величину  $\Delta$ , таким образом осуществляя поиск информационной совокупности на  $k + \Delta$  подряд идущих позициях. Поэтому область поиска информационной совокупности также образует собой замкнутый интервал некоторой длины  $k + \Delta$  (рис. 1).

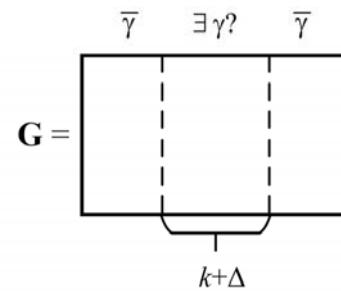


Рис. 1. Поиск информационной совокупности в порождающей матрице  $\mathbf{G}$  на случайных позициях в замкнутом интервале длиной  $k + \Delta$

При этом для сокращения числа информационных совокупностей имеет смысл выбирать длину интервала как можно меньшей, то есть значение  $\Delta$  следует минимизировать.

Известно, что вероятность того, что случайная матрица  $\mathbf{M}$  размера  $k \times (k + \Delta)$  будет иметь полный ранг оценивается как [7]:

$$P(\text{rank}(\mathbf{M}_{k,k+\Delta}) = k) = Q_{\Delta} = \prod_{i=\Delta+1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{2^i}\right), \Delta \geq 0. \quad (1)$$

Из данной формулы получим, что для  $\Delta=0$  значение этой вероятности будет:

$$Q_0 = \prod_{j=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{2^j}\right) = 0,288788... \approx 0,29. \quad (2)$$

С помощью формулы (2) можно посчитать среднее значение  $\Delta$ :

$$\bar{\Delta} = \sum_{\Delta=0}^{\infty} \Delta \cdot P_{\Delta} = \sum_{i=0}^{\infty} (1 - Q_i) = 1,6066... \approx 1,6. \quad (3)$$

Однако, структура порождающих и проверочных матриц, практически используемых помехоустойчивых кодов может быть далека от случайной. С учетом дополнительного ограничения на интервал поиска при исправлении пакетов ошибок формулы (1), (2) могут оказаться некорректными. Возникает задача оценки вероятности нахождения информационной совокупности с учетом сформулированных ограничений.

### Коды с малой плотностью проверок на четность

В настоящей статье в качестве помехоустойчивых кодов рассмотрим коды с малой плотностью проверок на четность, или LDPC-коды. Применение этих кодов для исправления пакетов ошибок рассматривалось, например, в [8-10].

LDPC-коды в 1962 году предложил Р. Галлагер [11]. Такие коды задаются с помощью разреженной проверочной матрицы  $\mathbf{H}$ . Данные коды можно задать на основе блочно-перестановочной конструкции. Такую конструкцию можно описать через базовую матрицу  $\mathbf{H}_b$ , представленную в формуле (4).

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

где  $t_{ij}$  – степени матрицы циклической перестановки, которые задают блоки  $\mathbf{C}^{t_{ij}}$  проверочной матрицы  $\mathbf{H}$ . Размер этих блоков –  $m$  на  $m$ , количество блоков –  $\gamma$  на  $\rho$ . Структура проверочной матрицы представлена ниже.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}^{t_{11}} & \mathbf{C}^{t_{12}} & \cdots & \mathbf{C}^{t_{1\rho}} \\ \mathbf{C}^{t_{21}} & \mathbf{C}^{t_{22}} & \cdots & \mathbf{C}^{t_{2\rho}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}^{t_{\gamma 1}} & \mathbf{C}^{t_{\gamma 2}} & \cdots & \mathbf{C}^{t_{\gamma\rho}} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Можно обратить внимание, что в матрице вида (5) столбцы двух подряд идущих блоков в сумме всегда образуют нулевой столбец. Это может влиять на поиск информационной совокупности в подряд идущих позициях.

Классическим способом поиска информационных совокупностей является нахождение позиций  $k$  линейно независимых столбцов, образующих невырожденную подматрицу размера  $k \times k$  порождающей матрицы размера  $k \times n$ . Однако, поиск

информационных совокупностей может быть осуществлен и по проверочной матрице следующим образом: если в проверочной матрице размера  $r \times n$  найдены  $r$  позиций столбцов, образующих невырожденную подматрицу размера  $r \times r$ , то эти позиции образуют дополнение:  $\gamma \cup \bar{\gamma} = \{1, \dots, n\}$ .

Использование проверочной матрицы вместо порождающей для поиска информационных совокупностей может быть более вычислительно эффективным для кодов со скоростью  $R > 1/2$  (рис. 2).

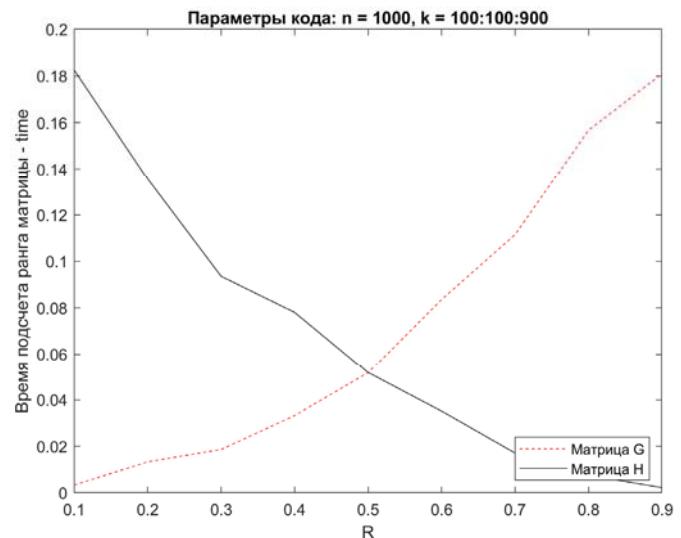


Рис. 2. График зависимости времени подсчета ранга случайных матриц от скорости кода для порождающих и проверочных матриц

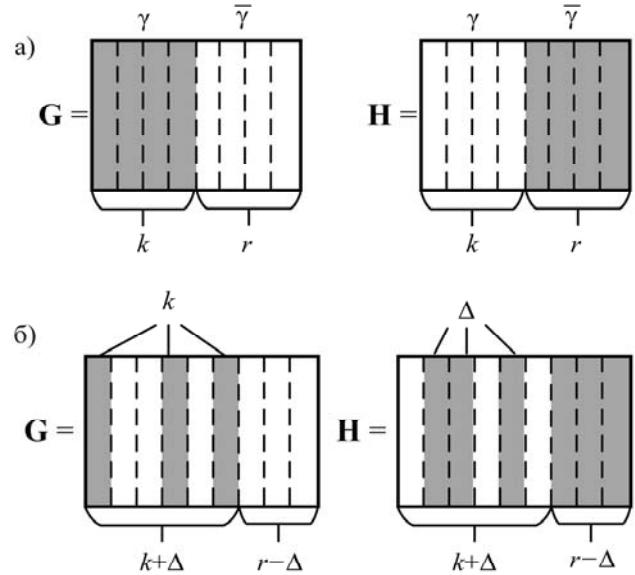


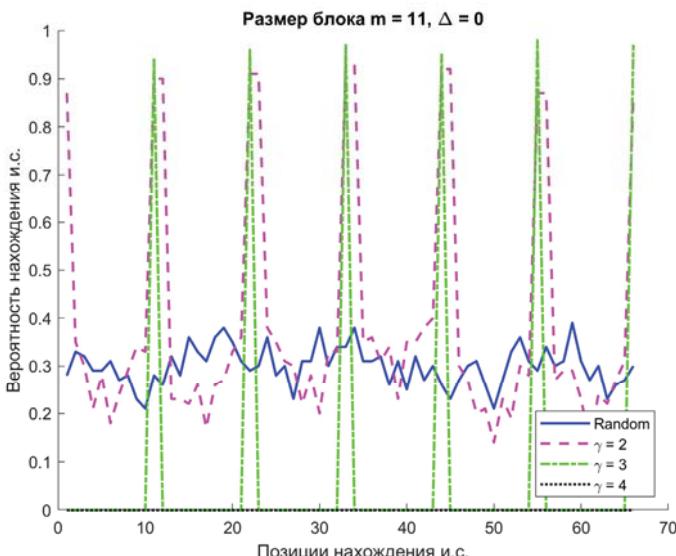
Рис. 3. Схема поиска информационных совокупностей в порождающей матрице G и проверочной матрице H:  
а) при  $\Delta = 0$ ; б) при  $\Delta \neq 0$

На рисунке 3, а) и 3, б) представлена схема поиска информационных совокупностей, демонстрирующая соответствие между порождающей матрицей G и проверочной матрицей H. Соответствующие линейно независимые столбцы порождающей и проверочной матриц обозначены серым цветом.

## Поиск информационной совокупности

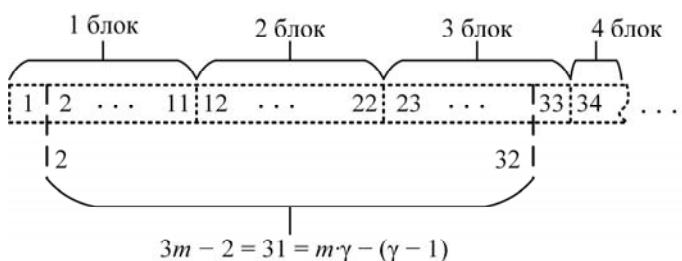
Рассмотрим случайные блочно-перестановочные конструкции, в которых блоки являются матрицей циклической перестановки,  $t_{ij}$  выбираются равномерно из интервала  $[0:m - 1]$ . Количество блоков  $\gamma = [2; 3; 4]$  (рассматривается несколько случаев) и  $\rho = 6$  (значение фиксировано), размер блоков  $m = 11$ . Кроме этого, будем рассматривать случайные матрицы схожего размера  $k = 22$ ,  $n = 66$ , в которых ненулевые элементы располагаются с вероятностью 0,5, чтобы проверить правильность выражения (2).

На рисунке 4 изображен график вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta=0$ . Обратим внимание, что при значении  $\gamma = 3$  на графике присутствуют только некоторые пики, которые возникают на позициях конца блоков блочно-перестановочной проверочной матрицы. Как говорилось выше, столбцы двух подряд идущих блоков всегда линейно зависимы, таким образом, если интервал поиска не вырожденной матрицы содержит в себе два блока целиком – такая матрица всегда вырождена. При длине интервала равного  $3m-1$  вероятность этого события равна единице. Также, как можно заметить, значение вероятности для случайной матрицы колеблется в районе отметки 0,3, что соответствует значению из формулы (2).



**Рис. 4.** График вероятности нахождения информационной совокупности при  $\Delta = 0$  для случайных матриц размера  $k = 22$ ,  $n = 66$  и для блочно-перестановочных матриц с размерами:  $\gamma = 2, \rho = 6$ ;  $\gamma = 3, \rho = 6$ ;  $\gamma = 4, \rho = 6$

Рассмотрим интервал длиной  $3m-2$ , тогда существует единственное возможное положение интервала, не включающее два подряд идущих блока (рис. 5). Оценим параметры кодов для этого случая. Будем считать, что поиск производится по проверочной матрице  $\mathbf{H}$  и рассматриваются интервалы длины  $r$ , где  $r$  – ранг матрицы  $\mathbf{H}$ .



**Рис. 5.** Схема случая, при котором находится информационная совокупность для  $\gamma = 3, \rho = 6$  и  $\Delta = 0$

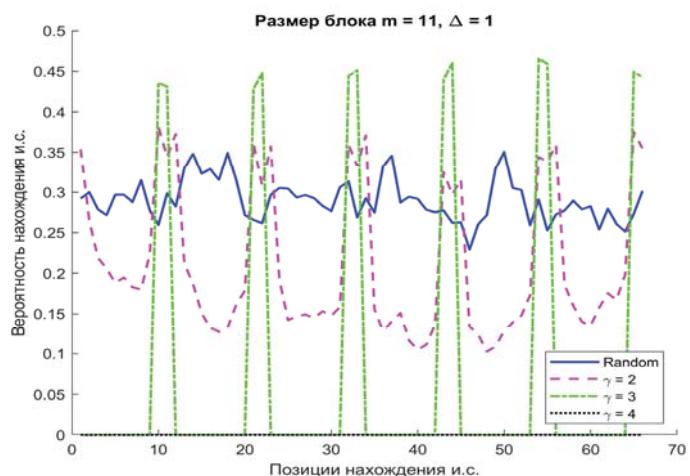
В блочно-перестановочной конструкции ранг проверочной матрицы не превышает  $m\cdot\gamma - (\gamma - 1)$ . Случай, изображенный на рисунке 5 невозможен при длине интервала  $r$  превышающем  $3m-2$ , тогда  $m\cdot\gamma - (\gamma - 1) \geq 3m - 1$ , отсюда

$$\gamma \geq \frac{3m - 2}{m - 1}. \quad (6)$$

Функция в правой части (6) равна 4 при  $m = 2$  и монотонно убывает с ростом  $m$ . Таким образом, при  $\gamma \geq 4$  блочно-перестановочная конструкция (5) не имеет информационных совокупностей из подряд идущих позиций. При  $\gamma = 3$  такая информационная совокупность возможна только для случая из Рисунка 3, при  $\gamma = 2$ , с учетом  $\text{rank}(\mathbf{H}) = r = 2m - 1$ , попадание 2 $m$  подряд идущих столбцов в окно размером  $r$  невозможно. Это объясняет форму всех кривых на рисунке 4.

Теперь рассмотрим, как изменятся формы кривых, если  $\Delta \neq 0$ . На Рисунке 6 представлен график вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 1$  для блочно-перестановочных матриц с размерами:  $\gamma = 2, \rho = 6$ ;  $\gamma = 3, \rho = 6$ ;  $\gamma = 4, \rho = 6$ .

Если сравнить график на рисунках 4 и 6, то можно заметить, что для матрицы с размерами  $\gamma = 2, \rho = 6$  вероятность нахождения информационных совокупностей на позициях конца блоков и остальных позициях стремится друг к другу, то есть становятся более равномерными. Для остальных блочно-перестановочных матриц значимых изменений пока не наблюдается, а для случайной вероятность все так же находится в пределах значения 0,3.



**Рис. 6.** График вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 1$

На рисунке 7 представлен график вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 5$ , а на рисунке 8 – график вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 10$ .

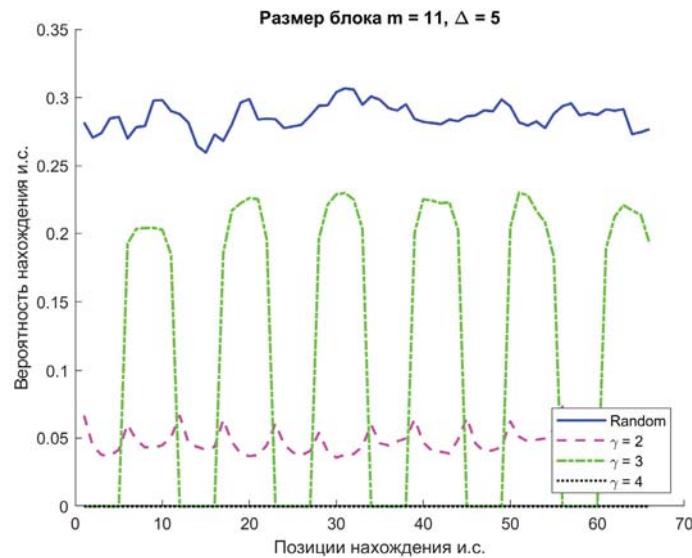


Рис. 7. График вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 5$

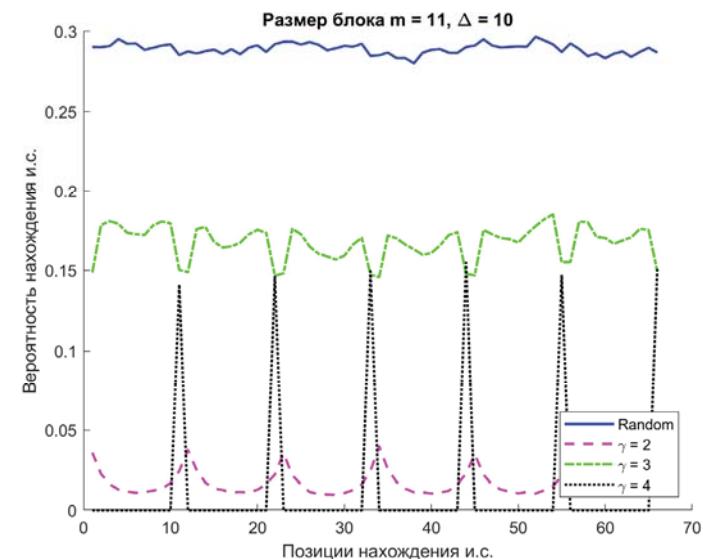


Рис. 8. График вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 10$

Как можно заметить из рисунков 7 и 8 для матрицы с размером  $\gamma = 2; \rho = 6$  последующее увеличение  $\Delta$  приводит к уменьшению вероятности нахождения информационной совокупности, что говорит о том, что после какого-то определенного значения, нет смысла увеличивать  $\Delta$ . Для блочно-перестановочной матрицы с размером  $\gamma = 3; \rho = 6$  с увеличением  $\Delta$  вероятность нахождения информационной совокупности появляется не только в позициях конца блоков, но и на других – график становится более равномерным. Для  $\gamma = 4; \rho = 6$  до значения  $\Delta = 10$  вероятность найти информационную совокупность была нулевой. Как только  $\Delta$  приблизилась к размеру блока  $m$ , появились характерные пики в районе позиций на концах блока.

Рассмотрим еще один график, изображенный на рисунке 9, чтобы проверить дальнейшие изменения графика для блочно-перестановочной матрицы с размером  $\gamma = 4; \rho = 6$ .

При значении  $\Delta = 20$  для  $\gamma = 2; \rho = 6$  вероятность нахождения информационных совокупностей стремится к нулю. Для  $\gamma = 3; \rho = 6$ , очевидно, вероятность начинает уменьшаться, что говорит о том, что дальнейшее увеличение бессмысленно, а для  $\gamma = 4; \rho = 6$ , наоборот, вероятность нахождения информационных совокупностей выросла, даже относительно пиков из предыдущего графика.

Также стоит отметить, что для любых значений  $\Delta$ , представленных на графиках, вероятность нахождения информационных совокупностей для случайной матрицы продолжает колебаться на уровне 0,3, что подтверждает выражение (2).

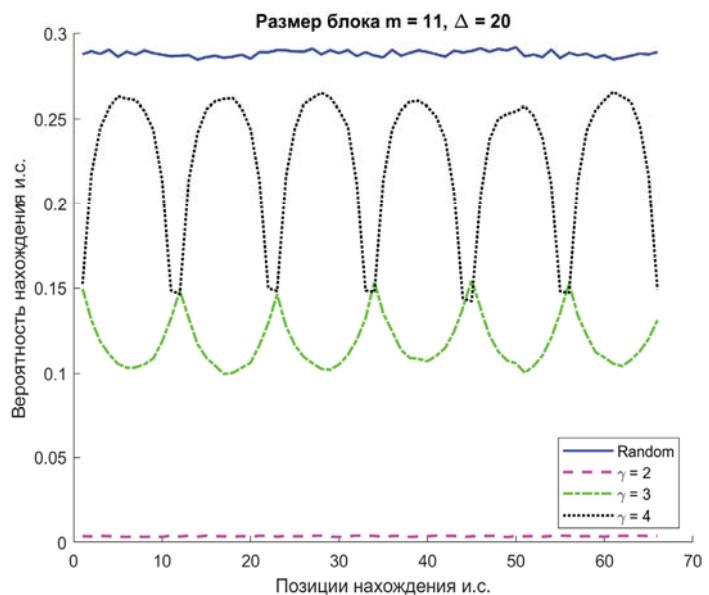


Рис. 9. График вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 20$

Исходя из приведенных графиков, можно сделать следующий вывод: для разных размеров блочно-перестановочных матриц существует свое определенное значение  $\Delta$ , при котором вероятность нахождения информационной совокупности будет максимальной, причем не только на концах блоков. Для подобных матриц можно получить свое среднее значение  $\Delta$ , аналогичное полученному в выражении (3) для случайных матриц.

Для матриц, где  $\gamma = 2$ , самая высокая вероятность из приведенных графиков была при  $\Delta = 1$ . Для матриц, у которых  $\gamma = 3$ , наиболее высокая вероятность была при  $\Delta = 1$ , но только в тех случаях, когда для поиска информационных совокупностей рассматривались позиции, находящиеся в конце блоков. При  $\Delta = 10$  график зависимости вероятности нахождения информационной совокупности стал похож на равномерный, однако само значение вероятности было значительно ниже, чем при  $\Delta = 1$ .

Для матриц, у которых  $\gamma = 4$ , при значении  $\Delta > 20$  график стремится к графику случайной матрицы и становится более равномерным, однако, для матриц, у которых  $\gamma = 2$  и  $\gamma = 3$ , в данном случае вероятность стремится к нулю.

## Квазициклические коды

Квазициклические (quasi-cyclic – QC) коды могут быть заданы аналогично LDPC-кодам с помощью проверочной матрицы вида (5). Каждый блок такой матрицы – циклический сдвиг первой строки, называемый циркулянтом, при этом вес строки может быть больше единицы [12-14]. Рассмотрим блочно-циркулянтные матрицы различного веса  $t$ , с размером блока  $m = 11$  и размерами: 1 циркулянт,  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$ .

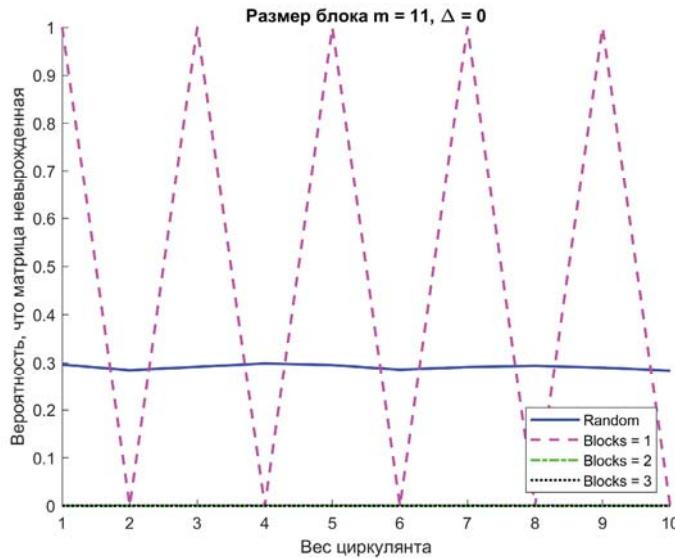


Рис. 10. График вероятности невырожденности для блочно-циркулянтных матриц разного размера и случайной матрицы размера  $k = 22, n = 66$

Из рисунка 10 видно, что для матриц  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$  вероятность того, что матрица будет невырожденная всегда равна нулю, а для одного блока циркулянта – она зависит от четности веса.

Таким образом, можно подытожить, что если размер циркулянта  $m$  – простой, то для четного веса циркулянта  $t$  – матрица всегда будет вырожденная, а для нечетного – всегда невырожденная. Если рассматривать блоки  $2 \times 2$  – матрица будет всегда вырожденная, так как у нее всегда четное число строк и столбцов. Если рассматривать блоки  $3 \times 3$  – матрица будет всегда вырожденная, так как есть  $2m$  строк четного веса.

Если размер циркулянта – составное число, то для блоков  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$  справедливо то же самое утверждение, что указано выше. Для одного блока: если вес  $t$  четный, то матрица всегда вырождена, если нечетный – то может быть вырождена или невырождена. Таким образом, однозначно можно сделать вывод, что для четного веса циркулянта матрица всегда будет вырождена.

Рассмотрим пример, похожий на пример с блочно-перестановочными конструкциями. Зафиксируем вес циркулянта  $t=3$ , размер блока  $m = 11$ , размеры матрицы  $\gamma = 2, \rho = 6; \gamma = 3, \rho = 6; \gamma = 4, \rho = 6$ . Размер циркулянта был выбран как минимальное простое число, иначе матрица будет по свойствам больше походить на случайную, чем блочно-циркулянтную.

На рисунке 11 представлен график вероятности нахождения информационной совокупности для блочно-циркулянтных матриц. Для наглядности также приведен график для случайной матрицы.

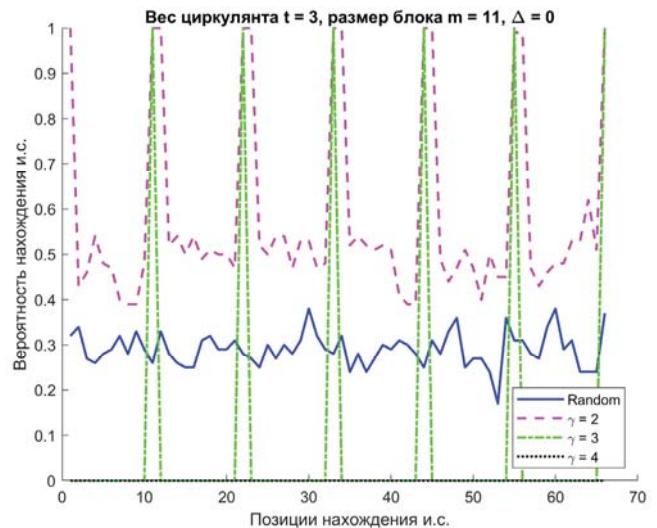


Рис. 11. График вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 0$  для блочно-циркулянтных матриц

Очевидно, что график на рисунке 11 напоминает по своему виду график на рисунке 4. Однако, при увеличении значения  $\Delta$  разница становится более очевидной.

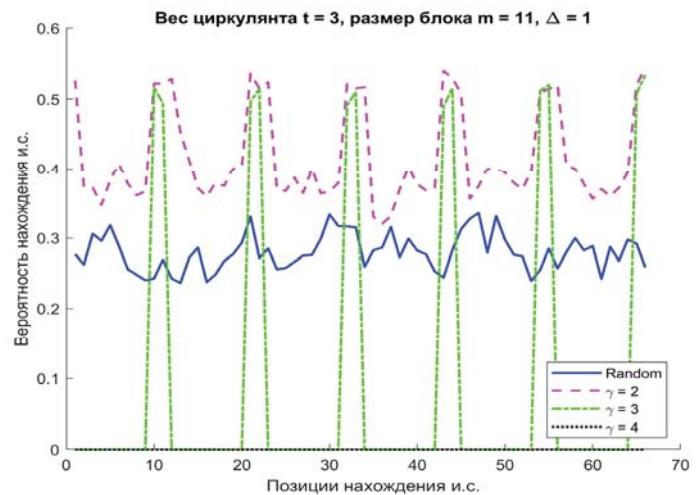


Рис. 12. График вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 1$  для блочно-циркулянтных матриц

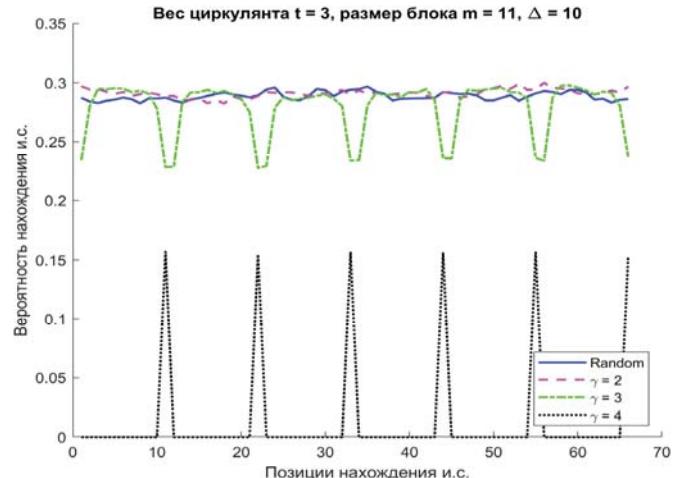
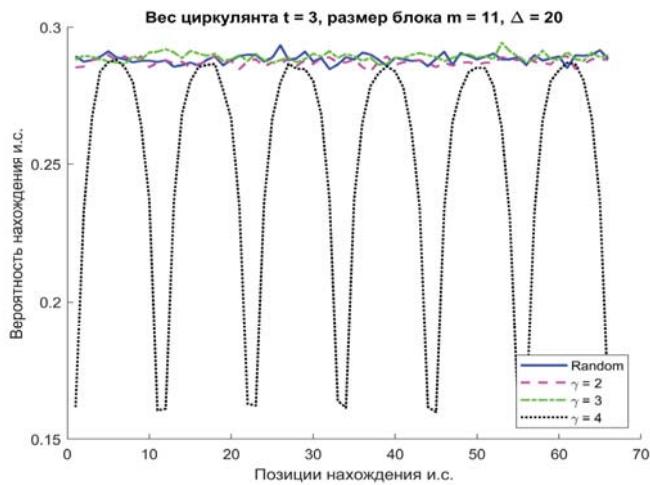


Рис. 13. График вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 10$  для блочно-циркулянтных матриц

На рисунке 12 можно заметить, как график вероятности нахождения информационных совокупностей блочно-циркулянтной матрицы стремится к графику случайно матрицы. Пики, которые были характерны для блочно-перестановочной конструкции, здесь также присутствуют. На рисунке 13 при  $\Delta = 10$  можно заметить, как графики вероятности для размеров блочно-циркулянтных матриц  $\gamma = 2, \rho = 6$  и  $\gamma = 3, \rho = 6$  становятся более равномерными и близкими к графику случайно матрицы, а для матрицы с размерами  $\gamma = 4, \rho = 6$  появились характерные пики в районе конца блока.

На рисунке 14 показано, как изменяются графики, если увеличить значение  $\Delta$  до 20. В отличие от блочно-перестановочной матрицы, для блочно-циркулянтной матрицы значение вероятности с увеличением  $\Delta$  не падает, а становится более равномерным и колеблется в районе вероятности для случайно матрицы. При дальнейшем увеличении  $\Delta$ , график вероятности для матрицы с размерами  $\gamma = 4, \rho = 6$  примет такой же вид и будет колебаться в районе  $\approx 0,28$ . Для данного типа матриц, очевидно, также возможно найти среднее значение  $\Delta$ , аналогично выражению (3), где приведено среднее значение  $\Delta$  для случайных матриц.



**Рис. 14.** График вероятности нахождения информационных совокупностей при  $\Delta = 20$  для блочно-циркулянтных матриц

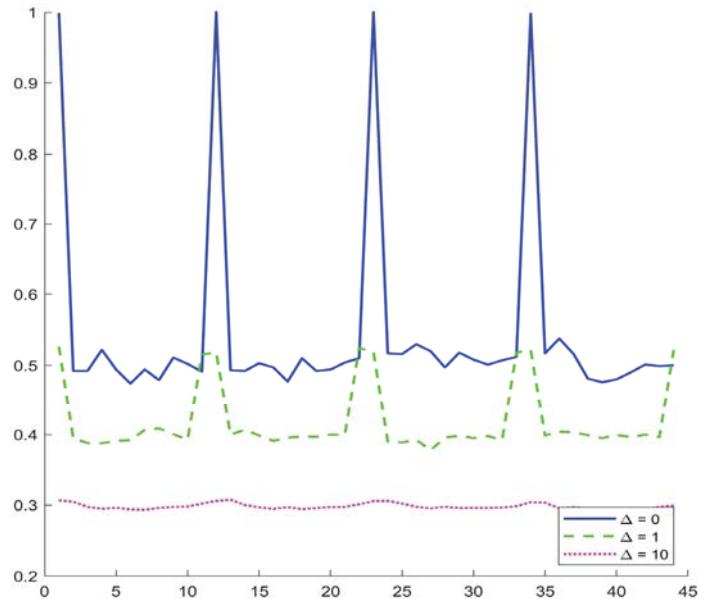
В соответствии с утверждением, что блочно-циркулянтные матрицы с числом блоков  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$  всегда вырождены, если там либо все блоки нечетного веса, либо все блоки четного, рассмотрим блоки, в которых чередуется четный и нечетный вес циркулянта. В ходе экспериментов, было определено, что даже в этом случае такие конструкции не могут быть невырожденными, потому что циркулянт четного веса всегда вырожден, т.к. сумма строк или столбцов всегда будет равна 0. Циркулянт нечетного веса может быть невырожденным, но, если идут два рядом (даже чередуясь через один четный), он всегда вырожденный.

Рассмотрим блочно-циркулянтную матрицу другого вида, изображенной на рисунке 15. Размер такой матрицы  $2 \times 4$ .

Н	Ч	Н	Ч
Ч	Н	Ч	Н

**Рис. 15.** Схема блочно-циркулянтной матрицы, где Н – циркулянты нечетного веса, Ч – циркулянты четного веса

На рисунке 16 представлен график вероятности нахождения информационной совокупности в матрице вида, представленного на Рисунке 15. Вес циркулянта каждый раз случайный, но проверялся на четность/нечетность. Из графика можно сделать вывод, что при увеличении значения  $\Delta$  вероятность становится более равномерной и в любой позиции будет равна примерно 0,3. Однако, как можно заметить, для меньшей  $\Delta$  эта вероятность выше, хоть и заметны пиковые значения на концах блока.



**Рис. 16.** График зависимости вероятности нахождения информационных совокупностей при различных  $\Delta$  для блочно-циркулянтных матриц от позиций начала поиска информационных совокупностей

Исходя из графиков, приведенных выше, можно заметить, что независимо от количества циркулянтов (значений  $\gamma$ ) при одинаковом весе циркулянтов, вероятность нахождения информационных совокупностей с увеличением  $\Delta$  стремится к значению вероятности для случайных матриц. Для матриц, у которых количество циркулянтов  $\gamma = 2$  необходимо увеличить  $\Delta$  до 10, для  $\gamma = 3$  до 20, а для  $\gamma = 4$  до 30. При этом, можно использовать особую структуру построения блочно-циркулянтной матрицы (переводить четные и нечетные веса), при которых будет сравнительно высокая вероятность нахождения информационных совокупностей, однако, на разных позициях поиска она будет разной.

## Заключение

В данной статье была рассмотрена и оценена вероятность нахождения информационных совокупностей для кодов с малой плотностью проверок на четность и квазициклических кодов. Приведены соответствия между порождающей и проверочной матрицами для поиска информационных совокупностей. Были приведены значения  $\Delta$ , при которых график вероятности нахождения информационных совокупностей достигает своих наивысших значений при различных параметрах матриц. Были найдены и обоснованы закономерности, которые примечательны для матриц, имеющих блочную структуру.

*Работа выполнена 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».*

## Литература

1. Moon T.K. Error correction coding: Mathematical methods and algorithms. Wiley, 2020 992 p.
2. Lin S., Li J. Fundamentals of Classical and Modern Error-Correcting Codes. Cambridge: Cambridge University Press; 2022, 840 p.
3. Gazi O. Forward error correction via channel coding. Cham, Springer, 2020 319 p.
4. Исаева М.Н., Овчинников А.А. О применении декодирования по информационным совокупностям при исправлении пакетов ошибок // Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации: Четвертая Всерос. Науч. Конф.: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2023. С. 188-191.
5. Ovchinnikov A.A., Veresova A.M., Fominykh A.A. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events // Information and Control Systems, 2022, no. 6, pp. 41-52. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-41-52
6. Barg A., Krouk E., van Tilborg H.C.A. On the complexity of mini-
7. Berlekamp E.R. The technology of error correcting codes // Proc. IEEE, vol. 68, pp. 564-593, 1980.
8. Ryan W., Lin S. Channel Codes: Classical and Modern. New York: Cambridge University Press, 2009. 710 p.
9. Veresova A.M., Ovchinnikov A.A. About one algorithm for correcting bursts using block-permutation LDPC-codes // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2019 P. 1-4.
10. Krouk E.A., Ovchinnikov A.A. Block-permutation LDPC codes for distributed storage systems // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2015 Vol. 40, pp. 227-238.
11. Gallager R.G. Low-Density Parity-Check Codes // IRE Transactions on Information Theory. Jan. 1962. Vol. 8. No. 1, pp. 21-28.
12. Baldi M. QC-LDPC Code-Based Cryptography. Springer, 2014. 120 p.
13. Xiao X., Vasić B., Lin S., Li J., Abdel-Ghaffar K. Quasi-cyclic LDPC codes with parity-check matrices of column weight two or more for correcting phased bursts of erasures // IEEE Transactions on Communications, May 2021. Vol. 69, no. 5, pp. 2812-2823. doi:10.1109/TCOMM.2021.3059001
14. Fossorier M.P.C. Quasi-cyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices // IEEE Transactions on Information Theory. 2004. Vol. 50 Iss. 8, pp. 1788-1793. DOI:10.1109/TIT.2004.831841

## FINDING INFORMATION SETS WHEN CORRECTING ERROR BURSTS WITH QUASI-CYCLIC CODES

**Maria N. Isaeva**, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, [imn@guap.ru](mailto:imn@guap.ru)

### Abstract

This article discusses the question of assessing the probability of finding information sets in block-permutation and block-circulant matrices. Traditionally, interference-resistant coding is considered independent errors, however, in real systems they can be grouped and generate a so-called error burst. Known estimates of the probability of finding information sets are conducted for random matrices, and for correcting error bursts widespread block-permutation low density parity check codes (LDPC-codes) or block-circulant quasi-cyclic codes (QC-codes) can be used. To estimate the probability of finding information sets mathematical modeling was used. Experiments have been carried out to identify parameters for specific structures that give the greatest probability of finding information sets. The article presents the results reflecting certain features in the values of the probability of finding information sets for matrices of different types, given assumptions and hypotheses about the features. Dependence of the presence of an information set from the size and location of its search interval inside the block permutation matrix was identified. The results of this research may be used to reduce the complexity of decoding by information sets, which, when considering random matrices, is exponential.

**Keywords:** noise-resistant coding, decoding by information sets, quasi-cyclic codes, error burst correction, low-density codes, channels with memory.

### References

1. T. K. Moon. Error correction coding: Mathematical methods and algorithms. Wiley, 2020 992 p.
2. S. Lin, J. Li. Fundamentals of Classical and Modern Error-Correcting Codes. Cambridge: Cambridge University Press; 2022, 840 p.
3. O. Gazi. Forward error correction via channel coding. Cham, Springer, 2020 319 p.
4. M.N. Isaeva, A.A. Ovchinnikov. About using of decoding by information sets when correcting error bursts. Radiotekhnicheskiye opticheskieskiye i biotekhnicheskiye sistemy. Ustroystva i metody obrabotki informatsii: IV All-Russian scientific conference: collection of reports. SPb.:SUAI, 2023, pp. 188-191. (In Russian)

5. A. A. Ovchinnikov, A. M. Veresova, A. A. Fominykh. Decoding of linear codes for single error bursts correction based on the determination of certain events. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2022, no. 6, pp. 41-52. doi:10.31799/1684-8853-2022-6-41-52
6. A. Barg, E. Krouk and H. C. A. van Tilborg, "On the complexity of minimum distance decoding of long linear codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1392-1405, July 1999, doi: 10.1109/18.771141.
7. E. R. Berlekamp, The technology of error correcting codes, *Proc. IEEE*, vol. 68, pp. 564-593, 1980.
8. W. Ryan, S. Lin. *Channel Codes: Classical and Modern*. New York: Cambridge University Press, 2009. 710 p.
9. A. M. Veresova, A. A. Ovchinnikov. About one algorithm for correcting bursts using block-permutation LDPC-codes. *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE. 2019. P. 1-4.
10. E. A. Krouk, A. A. Ovchinnikov. Block-permutation LDPC codes for distributed storage systems. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2015. Vol. 40, pp. 227-238.
11. R. G. Gallager. Low-Density Parity-Check Codes. *IRE Transactions on Information Theory*. Jan. 1962. Vol. 8. No. 1, pp. 21-28.
12. M. Baldi. QC-LDPC Code-Based Cryptography. Springer, 2014. 120 p.
13. X. Xiao, B. Vasic, S. Lin, J. Li, and K. Abdel-Ghaffar. Quasi-cyclic LDPC codes with parity-check matrices of column weight two or more for correcting phased bursts of erasures. *IEEE Transactions on Communications*, May 2021, vol. 69, no. 5, pp. 2812-2823. doi:10.1109/TCOMM.2021.3059001
14. M.P.C. Fossorier. Quasi-cyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices. *IEEE Transactionson Information Theory*. 2004 Vol. 50 Iss. 8, pp. 1788-1793. DOI:10.1109/TIT.2004.831841

**Information about author:**

**Maria N. Isaeva**, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, postgraduate student of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems (Department 25), St. Petersburg, Russia



# ПАРАМЕТРЫ МОДУЛЯЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-13-20

**Журавлёв Алексей Павлович,**  
ФГБОУ ВО "Московский технический университет связи  
и информации, Москва, Россия, [arpal@yandex.ru](mailto:arpal@yandex.ru)

**Рюмшин Константин Юрьевич,**  
ФГБОУ ВО "Московский технический университет связи  
и информации, Москва, Россия, [e8@mail.ru](mailto:e8@mail.ru)

**Атакищев Олег Игоревич ,**  
Автономная некоммерческая организация "Институт  
инженерной физики г. Серпухов, Россия, [aoi007@mail.ru](mailto:aoi007@mail.ru)

**Титенко Евгений Анатольевич,**  
ФГБОУ ВО "Юго-Западный государственный университет",  
г. Курск, Россия, [johntit@mail.ru](mailto:johntit@mail.ru)

**Титенко Михаил Андреевич,**  
ФГБОУ ВО "Юго-Западный государственный университет",  
г. Курск, Россия, [mikhail-titenko@mail.ru](mailto:mikhail-titenko@mail.ru)

**Manuscript received** 02 June 2023;  
**Accepted** 05 July 2023

Работа состоит в описании видов модуляции и их параметров для выбора и построения современных цифровых сетей связи с множественным доступом абонентов к ресурсам сети и высокоскоростного межсетевого обмена. Цель – систематизация систем связи и обеспечение множественного доступа абонентов сети к ресурсам и высокоскоростного обмена данными. Метод решения. Рассмотрены технологии и стандарты современных систем связи в части структуры построения приёмо-передающих устройств от преобразования аналогового сигнала в цифровой вид до потока символьных решений с выхода демодулятора. Проведена классификация типов проводной/беспроводной связи, стандартов связи, видов модуляции на аналоговой несущей. Рассмотрены особенности аппаратной реализации приёмо-передающих устройств, скорости передачи и условия работы каналов связи. Представлены крупнейшие производители элементной базы и специализированных чипов цифровой обработки сигналов, на которых реализуются интерфейсы физического уровня большинства приёмо-передающих устройств систем связи. В результате проведённого анализа был определен набор методов модуляции, которые в настоящее время применяются в большинстве каналов связи, а также основные параметры их работы.

**Ключевые слова:** модуляция каналов связи,  
стандарты связи, параметры модуляции,  
классификация систем связи

## Для цитирования:

Журавлёв А.П., Рюмшин К. Ю., Атакищев О.И., Титенко Е.А., Титенко М.А. Параметры модуляции современных систем связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 13-20.

## For citation:

Zhuravlev A.P., Ryumshin K. Yu., Atakischev O.I., Titenko E.A., Titenko M.A. (2023) A Modulation parameters of new communication systems. T-Comm, vol. 17, no.7, pp. 13-20. (in Russian)

## Введение

В современных Инфокоммуникационных системах модуляция сигналов занимает важнейшее место при реализации физического уровня обмена информацией. Общепринятая классификация видов модуляции информационного сигнала на аналоговой несущей включает модуляцию с аналоговым информационным сигналом (амплитудная модуляция, частотная модуляция, фазовая модуляция) и модуляцию с цифровым информационным сигналом (амплитудная манипуляция, частотная манипуляция, фазовая манипуляция) [1]. Однако, в настоящее время в большинстве систем связи используются именно цифровые информационные сигналы вместе с цифро-аналоговым/аналого-цифровым преобразователями (далее – ЦАП/АЦП). Поэтому под амплитудной, частотной или фазовой модуляцией как правило понимается манипуляция, т.е. скачкообразное изменение физического параметра.

В данной работе рассмотрены виды модуляции параметров несущего гармонического сигнала (несущей частоты) с помощью цифрового информационного сигнала. Алгоритмы модуляции реализуются в цифровом виде на базе программируемых логических интегральных схем (далее – ПЛИС), сигнальных процессоров или специализированных чипов. Затем применяется каскад ЦАП и схема аналоговой передачи (фильтрация, усиление сигнала, передающая антенна), которые формируют в соответствии с характеристиками системы связи и условиями передачи вид сигнала, передаваемого в канал связи. На приемном конце выполняется обратное преобразование: аналоговый приемный тракт, АЦП и цифровая реализация схемы демодуляции [2].

В связи с развитием электронной элементной базы и расширяющей потребностью сферы телекоммуникаций в значительном увеличении скорости передачи информации, в последние десятилетия наблюдается стремительное развитие технологий и методов модуляции сигнала вместе с методами помехоустойчивого кодирования информации. Разработаны и реализованы в стандартах связи сложные виды модуляции такие как: многопозиционная (до 4096 символьных позиций) квадратурно-амплитудная модуляция (далее – КАМ), модуляция с ортогональным частотным разделением (далее – OFDM), метод доступа с кодовым разделением сигналов (далее – МДКР, CDMA) и сопутствующие технологии модуляции, сочетающие различные комбинации видов модуляции. При этом применяемая технология модуляции, как правило, выбирается исходя из особенностей вида/канала связи и требуемых характеристик системы связи с учётом потенциальных помехоустойчивых возможностей модуляции сигнала.

Анализ параметров модуляции современных систем связи с определением характеристик и условий работы позволяет оценить границы применения и тенденции развития методов модуляции сигналов.

### Структура сети связи. Постановка задачи

Расширение сферы инфокоммуникаций характеризуется необходимостью развития высокоскоростных и мобильных средств связи, которая реализуется за счёт высокого научно-технологического потенциала и возможностей современной

элементной вычислительной базы. Свидетельством этому является появление множества технологически новых стандартов проводной и беспроводной связи за последние 20 лет.

Структура глобальной сети связи включает [3] (рис. 1):

– Абонентские устройства связи – реализуют полный набор сервисов связи (телефония, доступ в Интернет, различные мультимедиа-сервисы) с соответствующим качеством обслуживания. Характеризуются наличием нескольких интерфейсов связи и набором средств аутентификации, шифрования для работы в сетях абонентского доступа различных операторов связи. Осуществляют удобную для пользователей интерпретацию принимаемой/передаваемой информации.

– Сети абонентского доступа – осуществляют концентрацию информационных потоков, поступающих от оборудования пользователей, для передачи по высокоскоростным каналам магистральной сети. Включают физические каналы передачи данных (далее – ПД) (каналы "последней мили") до конечного абонента сети, базовые станции (далее – БС), системы аутентификации, биллинга и пр.

– Магистральные линии связи – объединяют отдельные сети доступа, обеспечивая транзит трафика между ними по высокоскоростным каналам. Включают коммутационные узлы связи и высокоскоростные магистральные каналы ПД.

– Информационные ресурсы – предоставляют конечным пользователям различную информацию и/или средства коммуникации с другими пользователями. Могут иметь как локальный, так и распределенный характер размещения.

Системы связи, в которых преобладают каналы "точка-точка", можно назвать линиями связи. А системы связи, в которых работают множество узлов связи и требуется передать информацию по цепочке узлов, называются сетями связи. В беспроводных сетях связи, как правило, реализован множественный абонентский доступ к ресурсу канала связи.

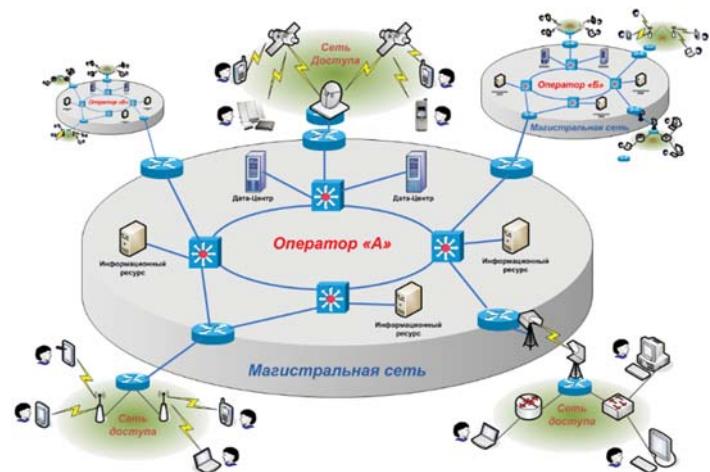


Рис. 1. Структура современной сети связи

По физическим характеристикам каналов связи, зонам покрытия и скорости передачи системы связи [4] можно классифицировать:

– волоконно-оптические линии связи (далее – ВОЛС). Магистральные сети и абонентский доступ. Позволяют надежно передавать наибольшие объемы информации (десятки Тбит/с) на расстояния до нескольких тысяч километров.

– Медные линии связи. Локальные компьютерные сети (UTP-кабели), телефонные линии связи. Составляют значительную часть сегмента реализации "последней мили" в сетях абонентского доступа. Используются для перехода от магистральных ВОЛС к коммутационному оборудованию сетей абонентского доступа.

– Радиорелейные линии связи. Наземные беспроводные системы в определенных условиях успешно конкурируют с волоконно-оптическими и спутниковых сетями, особенно для связи на сравнительно небольшие расстояния (1 – 100 км). Современные радиорелейные системы связи работают на скорости сотни мегабит в секунду.

– Спутниковые сети связи. Характеризуются возможностью передачи относительно небольших объемов информации (со скоростью 0.1 – 300 Мбит/с) на очень большие расстояния, перекрывая значительные площади земной поверхности (вплоть до построения глобальных систем).

– Сети мобильной наземной связи. Включают сотовые сети связи (GSM, UMTS, LTE), мобильный широкополосный доступ (WiFi), а также системы КВ и УКВ связи. Является наиболее популярным и востребованным типом связи. Включает очень большой набор стандартов связи различных поколений и модификаций.

– Сети беспроводной персональной связи (Wireless Personal Area Network – PAN). Обеспечивают коммуникацию устройств непосредственно вокруг человека и в пределах дома/офиса. Стандарты Bluetooth, Zigbee, IrDA. Скорость передачи – от минимальной 100 Кбит/с до максимальной 1000 Мбит/с (быстрые коммуникации).

Данные линии и сети связи являются физически и/или конструктивно специализированными системами, по отдельности они эффективно применимы в ограниченных зонах покрытия с фиксированными классами абонентов (по скорости, по объему передачи). Проблемная ситуация состоит в частичной совместимости характеристик отдельных линий и систем связи при их объединении в глобальную сеть.

Выполнение комплекса требований к современным (перспективным) сетям цифровой связи - расширение территории покрытия, увеличение скорости передачи, расширение классов абонентов сети, повышение надежности связи – связывается исследованием возможности согласования параметров отдельных систем связи для их объединения в единую сеть. Целевое место исследования возможности согласования параметров отдельных систем связи занимает изучение качественных и количественных параметров модуляции, обеспечивающих выбор (подбор) нужных согласующихся характеристик.

### **Методы модуляции и базовые параметры**

В беспроводных сетях связи при использовании общего частотно-временного ресурса канала связи, как правило, организация каналов прямого (от БС к АТ) и обратного (от АТ к БС) направления связи реализуется различными методами, часто, даже на уровне модуляции сигнала [5]. Причиной этому являются как различные характеристики прямого и обратного каналов связи (в том числе, с учетом множественного доступа абонентов), так и различные аппаратные параметры приемо-передатчиков абонента и базовой станции.

Работу большинства систем связи на физическом уровне можно свести к определенному набору видов модуляции [6], учитывающих методы множественного доступа (мультиплексирования) абонентов:

– Угловая модуляция – частотная, фазовая или квадратурно-амплитудная модуляция на одной несущей частоте. Включает ФМ, ЧМ, КАМ, ФМ-4-ко-сдвигом, ФМ-4- $\pi/4$ , СРМ, GMSK и другие. Применяется частотное, временное или частотно-временное мультиплексирование абонентов.

– Модуляция и мультиплексирование с ортогональным частотным разделением в виде модификаций – OFDMA, СР-OFDM, SC-FDMA, N-OFDM. Множество ортогональных поднесущих, на которых используются фазовая и квадратурно-амплитудная модуляция с различным количеством символьных позиций (от 2 до 256).

– Модуляция и мультиплексирование с кодовым разделением – CDMA, WCDMA. Кодовое разделение построено на базе фазовой модуляции с применением квазиортогональных кодовых последовательностей, расширяющих спектр сигнала.

Рассмотрим подробнее какие виды модуляции применяются в сетях связи различного типа.

Волоконно-оптические системы связи на рынке коммуникаций представлены в основном коммерческими запатентованными стандартами таких производителей как NEC, NTT, Huawei, Nokia и др. В современных системах ВОЛС при формировании, передаваемого в канал связи, оптического сигнала используются фазовая модуляция с небольшим количеством символьных позиций [7].

Возможность передачи света в двух ортогональных поляризациях позволяет использовать двойную фазовую модуляцию как DP-QPSK – двухполяризационная квадратурная фазовая манипуляция. Однако, при этом на приемном конце в схеме демодуляции необходимо применять специфические алгоритмы поляризационного разделения. Искажения различного типа (хроматическая дисперсия, поляризационные искажения), присутствующие в оптической линии связи, не позволяют эффективно применять квадратурно-амплитудную модуляцию с числом символьных позиций более 16. Оборудование ВОЛС представлено коммутаторами магистральных сетей, а также различными абонентскими устройствами – сетевыми платами, медиаконверторами и пр. Данные особенности определяют необходимость создания конвейеризированных схем обработки оптического сигнала с использованием специализированного вычислительного оборудования.

Проводные локальные компьютерные сети (далее – LAN) составляют большой сегмент сетей "последней мили", поэтому также рассмотрены в статье. В современных стандартах используется многопозиционная амплитудно-импульсная модуляция (до 16-РАМ), которая, строго говоря, является модуляцией на цифровой несущей.

Весьма вероятно, следующим шагом для увеличения скорости передачи в локальных сетях может стать переход на многопозиционные фазовые виды модуляции. Оборудование проводных локальных сетей включает коммутаторы/маршрутизаторы и широкий набор абонентских устройств, имеющих проводной сетевой интерфейс связи.

Телефонные линии связи как сегмент передачи данных для "последней мили" в настоящее время не развивается,

ввиду физического ограничения скорости передачи по медной линии. Однако, некоторое количество каналов связи (речевых и низкоскоростной ПД) и коммутационного оборудования обеспечивают сети связи в настоящее время. В основном, это наблюдается в регионах со слабо развивающейся инфраструктурой связи. Стандарты семейства xDSL используют многопозиционные ФМ, КАМ и OFDM виды модуляции. Оборудование представлено автоматическими телефонными станциями операторов связи и абонентскими модемами.

Радиорелейные линии связи подразумевают схему связи типа точка-точка. В основном, обеспечивают магистральные каналы связи на сравнительно небольшие расстояния, когда прокладка кабеля ВОЛС экономически не выгодна. Условия применения радиорелейных систем позволяют использовать антенные системы хорошей направленности. Стандарты радиорелейной связи работают при хороших соотношениях сигнал/шум и минимуме канальных искажений. Поэтому применяются вид модуляции КАМ с большим количеством символьных позиций (до 4096) [8].

К сегменту радиорелейных систем также можно отнести и тропосферные системы связи, которые используют принципы рассеивания тропосферного слоя атмосферы. Однако, применение данного типа связи ограничено ввиду наличия искажений в каналах связи и низких ОСШ, что значительно ограничивает скорость передачи. Оборудование радиорелейных линий связи представляют модемы различного класса применения.

Спутниковые каналы связи характеризуются малыми отношениями сигнал/шум. Ввиду ограниченного частотного ресурса в спутниковых сетях используется физическое (пространственное, поляризационное) разнесение и частотно-временное мультиплексирование каналов связи. Современные спутниковые системы используют ФМ/КАМ модуляцию с количеством символьных позиций до 64 и шириной канала от 0.1 до 100 МГц. Существуют спутниковые системы связи, использующие модуляцию CDMA. Однако, проблемы с усилением сигнала на спутниках-ретрансляторах не позволили CDMA стать более применимой в спутниковом сегменте связи.

В сегменте спутниковой связи можно выделить: магистральные линии связи, сети спутниковой связи VSAT (линейка стандартов DVB) и сети персональной спутниковой связи. Достаточно современной в сегменте спутниковой связи является технология дуплексной передачи на одной несущей (carrier in carrier – CIC). Данная технология позволяет в два раза уменьшить частотный ресурс системы при некоторых потерях (до 3 дБ) в помехоустойчивости. Оборудование спутниковых сетей включает координирующие и базовые станции, спутники-ретрансляторы и модемы фиксированной или подвижной связи.

Сотовые сети связи представляют наиболее востребованный сегмент персональной связи. Сотовая связь базируется на линейке последовательно развивающихся стандартов 3GPP: 2G (GSM, GPRS), 3G (UMTS, WCDMA), 4G (LTE) и 5G. В настоящее время в последних поколениях сотовой связи используется модификации модуляции OFDM с широким набором изменяемых параметров модуляции [9]. OFDM имеет хорошие характеристики помехоустойчивости при

сильных переотражениях сигнала, что характерно для радиосвязи в условиях городской застройки. Более того, современные технологии пространственно-временного кодирования и MIMO позволяют использовать многолучность канала связи для увеличения пропускной способности в несколько раз. Адаптивные антенные системы и алгоритмы пространственной селекции позволяют устанавливать индивидуальные параметры модуляции для абонента в локальной зоне. Оборудование сотовых сетей включает базовые станции и абонентские устройства – мобильные телефоны, модемы.

Сети широкополосного доступа или беспроводные локальные сети обеспечивают высокоскоростную передачу данных в сегменте "последней мили". Наиболее востребованные сети представлены линейкой стандартов WiFi IEEE 802.11 [10]. Практически сразу в данных стандартах стала применяться модуляция OFDM. В стандартах WiFi последних модификаций применяются технологии пространственно-временного кодирования такие же как в сотовых сетях связи. Оборудование беспроводных локальных сетей включает точки доступа и широкий набор абонентских устройств, имеющих беспроводной сетевой интерфейс связи.

Системы и сети УКВ (ОВЧ/УВЧ) связи предоставляют абонентам низкоскоростные сервисы связи на базе мобильных устройств (радиостанций). Особенностью данного типа связи является возможность быстрого развертывания сети без участия оператора связи. Данные системы используются на расстоянии до десяти км в случае, когда нецелесообразно или невозможно использование сотовой связи. Например, для связи экстренных служб. Системы УКВ связи представлены большим набором стандартов, в том числе, не публикуемых коммерческих. Оборудованием является большой набор радиостанций различного назначения, модемы и базовые станции УКВ связи.

Системы КВ (ВЧ) связи являются низкоскоростными, но позволяют организовать связь на большие расстояния. Если не учитывать системы радиовещания, в настоящее время системы КВ радиосвязи рассматриваются только с точки зрения связи экстренных ситуаций и в специальных целях, когда невозможно использование других видов связи. КВ связь характеризуется очень ограниченной полосой передачи и наличием большого количества искажений в канале связи. Оборудование представлено приёмо-передающими устройствами различного класса и назначения.

Сети беспроводной персональной связи описывается линейкой стандартов IEEE 802.15 [11]. Линейка разделена на несколько групп целевого применения: Bluetooth устройства, высокоскоростные WPAN, низкоскоростные WPAN, сети Mesh, мониторинг показателей тела человека (Body Area Network – BAN), связь с помощью видимого света. В статье данные группы объединены в два направления – "низкоскоростные" и "высокоскоростные" PAN. Сети персональной связи используют разрешённые для общего использования диапазоны частот (например, 2.4 ГГц).

Поэтому одной из основных проблем физического уровня является коллизия разделения общего частотно-временного ресурса множеством радиопередающих устройств разных стандартов. Решение коллизии осуществляется применением технологии псевдослучайной перестройки рабочей частоты (далее – ППРЧ) (frequency-hopping spread spectrum – FHSS)

[12], которая в некоторых стандартах реализуется на базе модуляции OFDM.

"Низкоскоростные" персональные сети. Данный сегмент представляет относительно низкоскоростную связь с энергетически ограниченными персональными устройствами. Оборудование включает устройства "умного дома", пульты управления, наушники, датчики показателей здоровья и пр. Данный сегмент связи также реализует торгово-промышленные логистические сервисы связи – например, метки складского учета.

"Высокоскоростные" персональные сети. Динамично развивающийся сегмент систем персональной связи. Позволяет организовать быстрые коммуникации (в настоящее время до 1 Гбит/с) между "умными" устройствами в пределах одного помещения.

Оборудование включает широкий набор устройств с беспроводным интерфейсом персональной связи; в том числе специализированные периферийные устройства, расширяющие функционал смартфонов.

## Результаты и обсуждение

Основные параметры модуляции современных систем связи представлены в таблице 1. Максимальная полоса показана для работы канала связи на одной несущей частоте, без учета возможностей частотной агрегации каналов связи.

Диапазон скоростей представлен для одного абонента/устройства и округлен до ближайших значений десятичного порядка.

В таблице 2 представлены основные производители специальных микропроцессоров, показана их роль в реализации интерфейсов физического уровня, на которых построено оборудование современных систем связи. Представлены крупнейшие производители элементной базы и специализированных микропроцессоров в сфере цифровой обработки сигналов.

Также возможно применение элементной базы ПЛИС для создания параллельных потоковых вычислителей процессов цифровой обработки сигналов [13].

Таблица 1

Характеристики систем связи (*x* – цифровой код спецификации)

Тип связи	Технология связи	Стандарт	Модуляция	Несущие частоты	Полоса (макс.) МГц	Скорость Мбит/с
ВОЛС	xGBASE CTDM DWDM	10GBASE-Lx, 10GBASE-Ex, 10GBASE-Zx ITU G.694.2 ITU G.694.1	PSK DP-QPSK 16QAM	180-380 ТГц (780-1620 нм)	100000	1000-100000
Проводная/медная LAN	Ethernet 1G Ethernet 10G Ethernet	IEEE 802.3xx IEEE 802.3ab xGBASE-T (IEEE 802.3an, 802.3bz и пр.)	PAM 2-16	-	500	100-10000
Телефонные линии	xDSL ISDN	ITU G991.x, ITU G992.x, ITU G993.x ITU-T Q.921	PSK, QAM OFDM-QAM	0.002-20 МГц	30	0.01-100
Радиорелейная связь	ITU Fix. service ETSI DRRS	ITU-R F.xxx ETSI EN 301 xxx	PSK, QAM	0.3-80 ГГц	1000	100-10000
Спутниковая связь	VSAT Personal Sat.	DVB-S2, DVB-S2X, DVB-RCS GMR-1, GMR-2, IAI-2	PSK, QAM CDMA	0.4-50 ГГц	100	0.01-100
Сотовые 2G, 3G	GSM CDMA2000 UMTS	ETSI GSM xx.xx cdma2000 1x EV-DO, 3GPP2 S.x 3GPP TS xx.xx (Rel 99, Rel 4-7), ETSI TS xxx	GMSK CDMA WCDMA	0.8-2.2 ГГц	5	0.01-10
Сотовые 4G, 5G	LTE WiMAX 5G, 5G NR	3GPP TS xx.xx (Rel 8-12), ETSI TS xxx IEEE 802.16x 3GPP TS xx.xx (Rel 13-18), ETSI TS xxx	OFDMA SC-FDMA N-OFDM	0.45-6, 24-56 ГГц	100 400	10-10000
Беспроводная WLAN	Wi-Fi	IEEE 802.11x	DSSS OFDM	2.4-2.5, 5.1-5.9 ГГц	160	1-1000
ОВЧ/УВЧ связь	DMR APCO 25 TETRA NXDN	ETSI TS 102 361 APCO 25 TETRA V+D, TETRA 2 NXDN CAI	FSK PSK QAM	50-1000 МГц	0.05	0.01-0.1
ВЧ связь	ALE STANAG PACTOR	MIL-STD-188-141A, MIL-STD-188-141B STANAG 5066 PACTOR-3, PACTOR-4	FSK PSK QAM OFDM	1-30 МГц	0.05	0.01-0.1
Низкоскоростная PAN	Bluetooth ZigBee Z-Wave	Bluetooth 1.0-1.2/2.0-2.1/3.0/4.0-4.2/5.0-5.3 IEEE 802.15.4 ITU-T G.9959	FSK PSK OFDM	2.4-2.5 ГГц 0.8-1 ГГц	20	0.001-100
Высокоскоростная PAN	Wireless USB	IEEE 802.15.3	UWB OFDM	3-10 ГГц	500	10-1000

Таблица 2

Производители микропроцессоров для оборудования систем связи

Производитель	Производимые микропроцессоры	Интерфейсы связи	Производимое оборудование
Texas Instruments	Сигнальные процессоры Чипы проводных и беспроводных интерфейсов АЦП/ЦАП Генераторы частоты Конвертеры частоты Усилители Фильтры Трансиверы	2G/3G/4G/5G Wi-Fi Bluetooth ZigBee Собственный 2.4 ГГц Мультистандарт Ethernet ВОЛС	Обширная элементная база различных компонентов сетей связи
Analog Devices	Сигнальные процессоры Чипы проводных и беспроводных интерфейсов АЦП/ЦАП Генераторы частоты Конвертеры частоты Усилители Фильтры Трансиверы	2G/3G/4G/5G Wi-Fi Bluetooth ZigBee Мультистандарт Ethernet ВОЛС	Обширная элементная база различных компонентов сетей связи
Qualcomm	Процессоры ARM Чипы беспроводных интерфейсов Беспроводные интерфейсы на базе CDMA модуляции	4G/5G Wi-Fi Bluetooth ZigBee Мультистандарт Ethernet	Многофункциональные компоненты мобильных терминалов, смартфонов, модемов
Broadcom	Чипы сетевых устройств Чипы беспроводных интерфейсов Чипы интерфейсов ВОЛС Усилители Фильтры	4G/5G Wi-Fi Bluetooth PAN ВОЛС	Комплектующие сетевых устройств, чипсеты сетевых интерфейсов
Intel	Процессоры Чипы проводных и беспроводных интерфейсов	Wi-Fi Bluetooth Ethernet	Комплектующие ЭВМ, сетевое оборудование, чипсеты сетевых интерфейсов
MediaTek	Чипы беспроводных интерфейсов Многофункциональные чипы	3G/4G/5G Wi-Fi Bluetooth Мультистандарт	Компоненты сетевых устройств
Marvell	Чипы проводных интерфейсов	Ethernet ВОЛС	Сетевые устройства

Данные таблицы определяют возможности совместимости различных систем связи при их объединении в цифровую сеть связи, уделяя внимание прежде всего множественному доступу абонентов сети к ресурсам и высокоскоростному обмену данными.

Современные системы и стандарты связи в зависимости от протяжённости линий связи и используемых видов модуляции в каналах связи можно представить в виде диаграммы (рис. 2). Слева-направо уменьшается протяжённость линий связи.

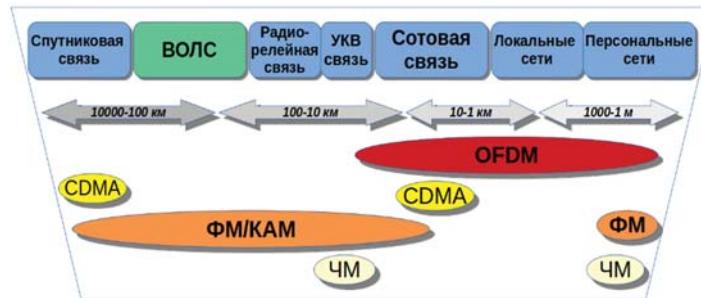


Рис. 2. Диаграмма распределения видов модуляций в зависимости от протяжённости линий связи

### Заключение

Анализ физического уровня современных систем связи показал, что наиболее развивающимся являются виды модуляции линейки OFDM в сегменте сотовых сетей связи и широкополосного доступа. Помимо этого, виды фазовой модуляции (ФМ/КАМ) активно развиваются в сегментах ВОЛС, спутниковой и радиорелейной связи.

На основе анализа характеристик систем связи и распределения видов модуляции по дальности применения выделяются основные тенденции развития методов модуляции сигналов для различных прикладных задач [14, 15]:

– Использование динамического частотно-временного мультиплексирования каналов связи для обеспечения множественного доступа абонентов в сотовых сетях, спутниковых сетях.

– Использование сложных адаптивных методов формирования сигнала на физическом уровне. Адаптивные схемы модуляции в сочетании с помехоустойчивым кодированием высокой вычислительной сложности с поддержкой параллельных вычислений сигнальными микропроцессорами или специализированными потоковыми вычислителями на ПЛИС.

– Многократное использование частотных ресурсов связи. Технологии пространственно-временного кодирования, MIMO, адаптивные антенные системы, технология carrier-in-carrier.

– Включение механизмов качества обслуживания в современные стандарты связи на уровне модуляции. Разбиение информационных потоков в зависимости от типа нагрузки на приоритетные подпотоки, поддержка QoS на всей протяженности линии связи.

## Литература

1. Modulation. <https://en.wikipedia.org/wiki/Modulation>.
2. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
3. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2000. 530 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
5. Wyglinski A., Nekovee M., Hou Y.T. Cognitive radio communications and networks: principles and practice. 2010. DOI: 10.1002/9781118376270. 737 p.
6. Gyasi-Agyei A. Telecommunications Engineering, Principles and Practice. World Scientific, 2019. ISBN: 978-981-120-027-4. 760 p.
7. Fiber-Optic Communication Standards. <https://what-when-how.com/fiber-optics/fiber-optic-communication-standards/>.
8. Huawei Technologies Co. Product Description, Full-outdoor microwave RTN 310/320 Radio Transmission System. 2021. <https://carrier.huawei.com/en/products/wireless-network/microwave/fo>.
9. Ndujiuba C. Comparative Analysis of Digital Modulation Techniques in LTE 4G Systems. Journal of Wireless Networking and Communications 5(2). 2015. DOI: 10.5923/j.jwnc.20150502.02, pp. 60-66.
10. Banerji S., Chowdhury R. On IEEE 802.11: Wireless Lan Technology. International Journal of Mobile Network Communications & Telematics 3(4), 2013. DOI: 10.5121/ijmnct.2013.3405.
11. IEEE 802.15 Working Group for Wireless Specialty Networks (WSN). <https://grouper.ieee.org/groups/802/15/>.
12. Sultan G. Slow Frequency-Hopping Spread-Spectrum Modulation. In book: Digital Frequency Synthesis Technique to Implement a Novel Frequency-Hopping Spread-Spectrum Modulator. ProQuest, 2020.
13. Titov V.S., Konovalchik A.P., Titenko E.A. High-performance computing systems based on FPGA // Proceedings of the South-Western State University. 2012. No. 4. (43). Part 2. C.73-77.
14. Tatarnikova T.M., Bogdanov P.Yu. Metric characteristics of detecting abnormal traffic in networks of the Internet of things // T-Comm: Telecommunications and transport. 2022. T. 16, No. 1. P. 15-21.
15. Abramova E.S., Pavlov I.I., Adamov E.V., Abramova E.S., Adamov E.V. et al. Formation of a cryptographic key in coupled transceiver atmospheric laser systems // T-Comm: Telecommunications and transport. 2023. Vol. 17, No. 2. P. 33-41.
13. Титов В.С., Коновалчик А.П., Титенко Е.А. Высокопроизводительные вычислительные системы на основе ПЛИС // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №4. (43). Ч.2 С. 73-77.
14. Татарникова Т.М., Богданов П.Ю. Метрические характеристики обнаружения аномального трафика в сетях интернета вещей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 1. С. 15-21.
15. Абрамова Е.С., Павлов И.И., Адамов Е.В. и др. Формирование криптографического ключа в сопряженных приемо-передающих атмосферных лазерных системах // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 2. С. 33-41.

## MODULATION PARAMETERS OF MODERN COMMUNICATION SYSTEMS

**Alexey P. Zhuravlev**, MTUCl, Moscow, Russia, [arpal@yandex.ru](mailto:arpal@yandex.ru)

**Konstantin Yu. Ryumshin**, MTUCl, Moscow, Russia, [e8@mail.ru](mailto:e8@mail.ru)

**Oleg I. Atakischev**, IIF, Serpukhov, Russia, [aoi007@mail.ru](mailto:aoi007@mail.ru)

**Evgeny A. Titenko**, South West State University, Kursk, Russia, [johntit@mail.ru](mailto:johntit@mail.ru)

**Mikhail A. Titenko**, South West State University, Kursk, Russia, [mikhail-titenko@mail.ru](mailto:mikhail-titenko@mail.ru)

### Abstract

The work consists in describing the types of modulation and their parameters for the selection and construction of modern digital communication networks with multiple subscriber access to network resources and high-speed interconnection. The goal is to systematize communication systems and provide multiple access of network subscribers to resources and high-speed data exchange. Solution method. The article discusses the technologies and standards of modern communication systems in terms of the structure of the construction of receiving and transmitting devices from the conversion of an analog signal into a digital form to the flow of symbolic solutions from the output of the demodulator. The classification of types of wired/wireless communication, communication standards, types of modulation on an analog carrier is carried out. The features of the hardware implementation of receiving and transmitting devices, transmission speeds and operating conditions of communication channels were taken into account. The largest manufacturers of the element base and specialized digital signal processing chips are presented, on which the interfaces of the physical layer of most receiving and transmitting devices of communication systems are implemented. As a result of the analysis, a set of modulation types that are currently used in most communication channels was determined, as well as the main parameters of their operation.

**Keywords:** modulation of communication channels, communication standards, modulation parameters, classification of communication systems

## References

1. Modulation. <https://en.wikipedia.org/wiki/Modulation>.
2. Prokis J. Digital communication. Moscow: Radio and communication, 2000. 800 p.
3. K. Feer. Wireless digital communication. Methods of modulation and spread spectrum. Moscow: Radio and communication, 2000. - 530 p.
4. B. Sklyar. Digital communication. Theoretical foundations and practical application. Moscow: Williams, 2003, 1104 p.
5. A. Wyglinski, M. Nekovee, Y. T. Hou. Cognitive radio communications and networks: principles and practice. 2010. DOI: 10.1002/9781118376270. 737 p.
6. A. Gyasi-Agyei. Telecommunications Engineering, Principles and Practice. World Scientific, 2019. ISBN: 978-981-120-027-4. 760 p.
7. Fiber-Optic Communication Standards. <https://what-when-how.com/fiber-optics/fiber-optic-communication-standards/>.
8. Huawei Technologies Co. Product Description, Full-outdoor microwave RTN 310/320 Radio Transmission System. 2021. <https://carrier.huawei.com/en/products/wireless-network/microwave/fo>.
9. C. Ndudiuba. Comparative Analysis of Digital Modulation Techniques in LTE 4G Systems. *Journal of Wireless Networking and Communications* 5(2). 2015. DOI: 10.5923/j.jwnc.20150502.02, pp. 60-66.
10. S. Banerji, R. Chowdhury. On IEEE 802.11: Wireless Lan Technology. *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics* 3(4), 2013. DOI: 10.5121/ijmnct.2013.3405.
11. IEEE 802.15 Working Group for Wireless Specialty Networks (WSN). <https://grouper.ieee.org/groups/802/15/>.
12. G. Sultan. Slow Frequency-Hopping Spread-Spectrum Modulation. In book: Digital Frequency Synthesis Technique to Implement a Novel Frequency-Hopping Spread-Spectrum Modulator. ProQuest, 2020.
13. V. S. Titov, A. P. Konovalchik, E. A. Titenko. High-performance computing systems based on FPGA. *Proceedings of the South-Western State University*. 2012. No. 4. (43). Part 2, pp. 73-77.
14. T. M. Tatarnikova, P. Yu. Bogdanov. Metric characteristics of detecting abnormal traffic in networks of the Internet of things. *T-Comm*. 2022. Vol. 16, No. 1, pp. 15-21.
15. E. S. Abramova, I. I. Pavlov, E. V. Adamov, E. S. Abramova, E. V. Adamov et al. Formation of a cryptographic key in coupled transceiver atmospheric laser systems. *T-Comm*. 2023. Vol. 17, No. 2, pp. 33-41.

## Information about authors:

**Alexey P. Zhuravlev**, head of laboratory, MTUSI, Moscow, Russia

**Konstantin Yu. Ryumshin**, Doctor of Technical Sciences, Department Professor, MTUSI, Moscow, Russia

**Oleg I. Atakischev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy General Director for Special Projects, IIF, Serpukhov, Russia

**Evgeny A. Titenko**, Leading Researcher South West State University, Kursk, Russia

**Mikhail A. Titenko**, Postgraduate South West State University, Kursk, Russia

# МОДЕЛИ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С ЗАВИСИМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

**Борисовская Анна Владимировна,**  
**Санкт-Петербургский государственный университет**  
**аэрокосмического приборостроения,**  
**г. Санкт-Петербург, Россия,**  
**[borisovskaya@k36.org](mailto:borisovskaya@k36.org)**

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-21-28

**Manuscript received** 28 May 2023;  
**Accepted** 20 June 2023

Работа выполнена 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".

**Ключевые слова:** интернет вещей, сенсорные сети, зависимые источники, средний возраст информации, случайный множественный доступ

Одним из важных научных направлений исследований интернета вещей является анализ систем мониторинга случайных событий с зависимыми источниками, основанных на случайном множественном доступе. Учет зависимости данных от близкорасположенных сенсоров повышает энергоэффективность системы и обеспечивает стабильность её работы. Существуют различные модели таких систем, однако отсутствует связь между ними. Целью данной работы является разработка единой системы допущений для описания моделей систем со случайным доступом и зависимыми источниками. В данной работе описаны основные сценарии интернета вещей и выделен сценарий с большим числом сенсоров, на основе которого строятся системы мониторинга случайных событий. Проведен обзор работ, в которых исследуются системы со случайным доступом и зависимыми источниками. Предложен способ разделения существующих моделей на два класса: модели с появлением событий и модели с появлением абонентов. Предложена единая система допущений для моделей обоих классов, которая позволяет описывать и сравнивать различные модели между собой. Представлена упрощенная модель системы со случайным доступом и зависимыми источниками, которая сохраняет главные свойства систем интернета вещей. Эта модель легко поддается анализу и не имеет "краевых эффектов". Также приведен краткий обзор исследований среднего возраста информации в различных системах передачи данных. Результаты обзора показали, что эта характеристика является важной для систем с зависимыми источниками, но на данный момент практически не изучена в таких системах. Предложенная система допущений для описания различных моделей с зависимыми источниками и представленная упрощенная модель могут быть использованы для теоретического анализа систем мониторинга случайных событий.

#### Информация об авторе:

**Борисовская Анна Владимировна**, ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий и систем связи,  
 Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, Россия

#### Для цитирования:

Борисовская А.В. Модели сенсорных сетей с зависимыми источниками // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 21-28.

#### For citation:

Borisovskaya A.V. (2023) Models of sensor networks with correlated sources. T-Comm, vol. 17, no.7, pp. 21-28. (in Russian)

## Введение

С каждым годом количество сенсоров в системах мониторинга случайных событий растет, что ведет к возникновению такого количества конфликтов, при котором информация перестанет приходить на базовую станцию. В этом случае задержка поступления данных на базовую станцию будет бесконечной, то есть система начнет работать не стабильно. Кроме того, рост количества конфликтов приводит к увеличению числа повторных передач, что в свою очередь влияет на время работы источников питания сенсоров.

Таким образом, в сценариях с большим числом сенсоров, можно выделить две глобальные проблемы: стабильность и энергоэффективность. Для борьбы с высоким энергопотреблением сенсоров можно изменять мощность передачи. Но этот параметр часто бывает зафиксирован, поэтому влиять на энергопотребление сенсоров можно только с помощью уменьшения числа повторных передач. Для обеспечения стабильной работы системы необходимо уменьшать среднюю задержку. Этого можно добиться ограничением числа повторных передач или количества сенсоров в системе. Однако оба способа могут привести к потери данных. Поэтому как ограничение числа повторных передач, так и ограничение количества сенсоров в системе не подходят для полноценного улучшения качества работы таких систем.

В системах мониторинга случайных событий близкорасположенные сенсоры часто детектируют одни и те же события и, как следствие, отправляют полностью или частично совпадающую информацию на базовую станцию. В русскоязычной литературе устройства, которые передают похожие или одинаковые данные, называют зависимыми источниками, а в англоязычной литературе – «correlated sources». Учет зависимости данных от соседних сенсоров можно использовать для решения вышеизложенных проблем. На данный момент существуют различные модели систем со случайным доступом и зависимыми источниками, однако отсутствует связь между ними. Следовательно, разработка единой системы допущений для различных моделей таких систем является актуальной задачей.

### Интернет вещей: сценарии и характеристики

Согласно предварительному национальному стандарту Российской Федерации «Информационные технологии. Интернет вещей. Термины и определения» Интернет вещей (Internet of Things – IoT) – «Инфраструктура взаимосвязанных сущностей, систем и информационных ресурсов, а также служб, позволяющих обрабатывать информацию о физическом и виртуальном мире и реагировать на неё» (см. пункт 3.13 ПНСТ 518 – 2021). Вначале системы интернета вещей работали на основе радиочастотной идентификации (Radio Frequency IDentification – RFID), а сейчас они построены на различных беспроводных технологиях, таких как Bluetooth, Zigbee, WiFi, SigFox, LoRa, NB-IoT (в зависимости от зоны покрытия) [1]. Интернет вещей применяется в здравоохранении, промышленности, сельском хозяйстве, экологии, городском управлении, в системах «умного» дома и других сферах.

Эта концепция включает в себя различные сценарии. Международный союз электросвязи в документе «Рекомендации МСЭ-R M.2150-1».

Подробные спецификации наземных радиоинтерфейсов Международной подвижной электросвязи 2020 (IMT-2020)» приводят два сценария систем интернета вещей для сетей 5G: массовая межмашинная связь (massive Machine-Type Communication – mMTC) и сверхнадежная передача данных с малой задержкой (Ultra-Reliable Low Latency Communications – URLLC). А в сетях 6G выделяют три сценария [2]: повсеместную мобильную сверхширокополосную связь (ubiquitous Mobile Ultra-Broadband – uMUB), сверхвысокую плотность данных (ultra-High Data Density – uHDD) и связь со сверхвысокой скоростью и малой задержкой (ultra-High Speed and Low-Latency Communications – uHSLLC). Наиболее популярным в настоящее время является сценарий mMTC [3], включающий большое число сенсоров и не обладающий жесткими требованиями к задержке и надежности доставки данных на базовую станцию. Этот сценарий лежит в основе современных систем мониторинга случайных событий, построенных на сенсорных сетях.

В сценариях с большим числом сенсоров используются алгоритмы случайного множественного доступа для передачи данных на базовую станцию. Одним из таких алгоритмов является алгоритм АЛОХА. Он применяется в технологии LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [4,5], на которой построено большинство современных систем мониторинга [6]. LoRaWAN обладает рядом преимуществ: представляет несколько частотных каналов для передачи данных, использует нелицензируемый частотный диапазон и позволяет передавать небольшие объемы данных на дальние расстояния.

Если в системе находится  $N$  сенсоров, то идентификатор сенсора будет занимать  $\log_2 N$  бит. При большом числе сенсоров ( $N \rightarrow \infty$ ) идентификатор сенсора нельзя отправить в сообщении, так как он будет занимать неограниченное число бит. В работах [7-9] рассматривается подход к решению данной проблемы, который называют Unsourced Random Access (U-RA). В системах мониторинга случайных событий не требуется однозначная идентификация сенсора, поэтому для идентификации сенсоров в таких системах можно использовать координаты его местоположения, как предложено в работе [10].

В теории случайного множественного доступа базовыми характеристиками работы систем являются: средняя задержка, среднее число успешных передач и среднее число повторных передач. Данные характеристики уже достаточно хорошо изучены для различных систем, в том числе и для систем интернета вещей. Однако ни одна из этих характеристик не несет в себе информации о свежести передаваемых данных. Сравнительно недавно была предложена характеристика, которая позволяет оценить актуальность данных о проходящих в системе изменениях. Она получила название – возраст информации (Age of Information – AoI) [11].

Данная характеристика достаточно хорошо исследована для систем массового обслуживания, но мало исследована для систем случайного множественного доступа, в том числе и систем интернета вещей. Средний возраст информации является важной характеристикой для систем мониторинга случайных событий, ведь в таких системах необходимо получать информацию о событиях вовремя [12].

## Существующие модели сенсорных сетей с зависимыми источниками

В работах [13-21] рассматриваются централизованные сенсорные сети с большим числом устройств и зависимыми источниками. Предполагается, что системы содержат ограниченное количество сенсоров, которые расположены в зоне действия общего центра сбора информации. В случайные моменты времени в системах происходят изменения условий окружающей обстановки (повышение уровня вредных веществ, повышение температуры воздуха и т.п.), которые в работах [13-21] называются случайными событиями. Считается, что сенсор способен обнаружить событие, если оно произошло недалеко от него.

Сенсоры передают данные на общий центр только в том случае, если обнаружили событие. Для передачи данных от сенсоров на общий центр используется алгоритм случайного множественного доступа АЛОХА или его модификации. В большинстве работ рассматриваются вопросы улучшения пропускной способности канала и повышения энергоэффективности сети. Предлагаются различные методы декодирования данных от близкорасположенных сенсоров, а также способы распределения ресурсов канала с учетом корреляции данных от соседних устройств.

В работе [13] рассматривается модель сети с алгоритмом случайного доступа многоканальная АЛОХА и предлагается адаптивный способ передачи данных, основанный на распределенном кодировании сигналов зависимых источников. Данный подход позволяет сократить общее время передачи данных и тем самым повысить энергоэффективность сети.

В работе [14] предлагается способ распределенной оценки целевого сигнала в сенсорных сетях на основе алгоритма АЛОХА с учетом корреляции данных от соседних сенсоров. Вероятность доступа к общему каналу связи в модифицированном алгоритме зависит от локальной оценки наблюдений сенсора, которая вычисляется как среднеквадратичная ошибка (Mean Squared Error – MSE). Предложенная схема передачи данных позволяет улучшить выполнение распределенной оценки целевого сигнала. Также рассматривается обобщенная схема передачи данных с несколькими подканалами, что равносильно алгоритму «многоканальная АЛОХА».

В работе [15] предлагаются алгоритмы распределения ресурсов канала с учетом зависимости данных от соседних сенсоров. Результаты, полученные в работе [15], показывают, что предложенные алгоритмы позволяют снизить вероятность конфликтов в системе и соответственно повысить пропускную способность канала. Работы [16,17] являются продолжением работы [15]. В этих работах рассматривается такая же модель только с расширениями. В обеих работах добавляется возможность декодирования сигналов от зависимых источников в случае конфликта. Декодирование сигналов осуществляется с применением технологии последовательного подавления помех (Successive Interference Cancellation – SIC). В отличие от работ [15,16], в работе [17] есть дополнительное расширение – повторные передачи. В работах [16,17] предлагаются стохастические алгоритмы распределения ресурсов канала для моделей с расширениями.

Модель сенсорной сети из работы [18] совмещает случайный доступ без идентификации источника и случайный доступ с зависимыми источниками. Для обоих типов доступа используется байесовский декодер на основе суперпозиции разреженных кодов (Sparse Superposition with Bayesian Detection). Анализируется взаимодействие двух типов доступа, а также проверяется их воздействие на характеристики системы.

В работе [19] изучается модель сенсорной сети с двумя видами передаваемых данных: обычными и аварийными. Такое разделение передаваемых данных позволяет увеличить вероятность декодирования аварийных сообщений, а также уменьшить вероятность их декодирования при ложных срабатываниях. Методы доступа, предложенные в [19], используют не только зависимость в активации сенсоров, но и в информационном наполнении данных.

В работах [20, 21] рассматривается модель, похожая на модель из работы [15]. В работе [20] исследуется среднее число успешно переданных сообщений об одном событии и предлагается способ определения оптимального числа сенсоров в системе. В работе [21] исследуется вероятность доставки информации о событии и предлагается аналитический способ вычисления этой характеристики.

Средний возраст информации для сенсорной сети с зависимыми источниками исследуется в работе [22]. Рассматривается два сценария: случайный доступ и доступ с разделением времени. В сценарии со случайным доступом модель описывается Марковской цепью и путем имитационного моделирования оценивается зависимость среднего возраста информации от количества соседей. Также в работе [22] рассматривается вопрос оптимизации политики передачи данных с целью экономии ресурсов на основе методов машинного обучения и с использованием среднего возраста информации.

В работе [23] рассматривается система с зависимыми источниками и исследуется характеристика, которую авторы работы называют ценностью информации (Value of Information – Vol). Эта характеристика включает в себя средний возраст сенсора, стоимость передачи данных от сенсора и средний возраст информации соседних с ним сенсоров. Для оценки этой характеристики предлагается две модели, которые можно описать Марковской цепью. С помощью имитационного моделирования и аналитического расчета получены зависимости ценности информации от вероятности передачи данных и от коэффициента стоимости.

Вопросы стабильности в работах [13-23] не рассматриваются, т.к. количество сенсоров в исследуемых системах конечно и повторные передачи отсутствуют. Однако существуют системы с зависимыми источниками и потенциально неограниченным числом сенсоров. Для таких систем необходимо исследовать вопросы стабильности. В работе [10] предлагается модель системы с зависимыми источниками и бесконечным числом сенсоров и приводится доказательство того, что она обеспечивает стабильную работу системы при любой интенсивности входного потока. Эта модель получила название – модель с множественным выходом. В данной модели абоненты покидают систему группами, поэтому даже при большой интенсивности входного потока задержка в системе остается конечной.

Модель с множественным выходом также рассматривается в работах [24,25]. В работе [24] исследуется средняя задержка, а в работе [25] – средний возраст информации.

В вышеуказанных работах предложены различные модели систем со случайным доступом и зависимыми источниками, сохраняющие базовые особенности таких систем. Данные модели похожи и в то же время отличаются друг от друга. В настоящее время связь между существующими моделями отсутствует, т.к. они стали изучаться сравнительно недавно. В данной работе предлагается способ классификации и единая система допущений для описания моделей с зависимыми источниками.

### **Единая система допущений для моделей с зависимыми источниками**

В системах случайного множественного доступа абонентские устройства называют абонентами, по этой причине устройства в системах интернета вещей, т.е. сенсоры, тоже будем называть абонентами. Событиями в системах интернета вещей называют различные изменения значений показателей экологической обстановки. Модели сенсорных сетей с зависимыми источниками можно разделить на две группы: модели с появлением событий и модели с появлением абонентов. Данные группы моделей можно описать единой системой допущений.

Система допущений для моделей с появлением событий и моделей с появлением абонентов:

*Допущение 1:* В системе есть общий центр – базовая станция. Предполагается, что базовая станция может принимать данные от абонентов только в пределах некоторой области. Эта область называется зоной действия базовой станции.

*Допущение 2:* Время в системе разделено на окна – периоды времени одинаковой длины. Каждое окно содержит интервал для отправки данных, а также может включать интервалы для иных действий, например, для сбора информации об изменениях в системе. Как правило, интервал для отправки данных находится в начале окна. Все абоненты знают моменты разделения окон и отправляют данные только в выделенном для этого интервале, т.е. в начале окна.

*Допущение 3:* Считается, что система предоставляет  $K$  каналов для передачи данных. Все каналы разделены на окна одинаковым образом. В любом окне независимо от канала возможны три случая: никто из абонентов не передавал – «пусто»; передавал один абонент – «успех»; передавало несколько абонентов – «конфликт».

*Допущение 4:* В системе может существовать или отсутствовать обратная связь. Если в системе есть обратная связь, то в конце окна абоненты получают от базовой станции информацию о том, какой случай был в канале. В системе возможны два вида обратной связи: полная или частичная. При полной обратной связи базовая станция распознает три случая: успех, пусто и конфликт, а при частичной обратной связи – только два: успех или неуспех.

*Допущение 5.1:* Предполагается, что событие может быть обнаружено абонентом, находящимся в некоторой окрестности места появления события. Окрестность имеет форму круга радиуса  $r$  с центром в месте появления события. Абоненты, которые обнаружили событие переходят с активное

состояние и отправляют данные о событии на базовую станцию.

*Допущение 5.2:* Считается, что все абоненты, имеющиеся в системе, находятся в активном состоянии и готовы передавать данные на базовую станцию.

*Допущение 6:* Если в системе отсутствует обратная связь, абоненты, находящиеся в активном состоянии, передают данные на базовую станцию с вероятностью  $p = 1$ . Если в системе имеется обратная связь, то абоненты, находящиеся в активном состоянии, в начале каждого окна, согласно некоторому алгоритму, делают выбор: передавать данные в текущем окне или нет. Абоненты, которые собираются передавать в окне, определяют случайным образом один из  $K$  каналов для передачи данных.

*Допущение 7.1:* Число абонентов в системе ограничено и равняется  $N$ . Абоненты равномерно разбросаны внутри зоны действия базовой станции. Процесс возникновения случайных событий в зоне действия базовой станции задается пространственным точечным пуассоновским процессом с параметром  $\lambda$ .

*Допущение 7.2:* Процесс появления абонентов в зоне действия базовой станции задается пространственным точечным пуассоновским процессом с параметром  $\lambda$ . Считается, что при появлении абонента в системе, он уже имеет данные для передачи. Абонент выходит из системы после успешной передачи данных.

*Допущение 8.1:* Количество пакетов данных, выходящих из системы в одном окне, равняется количеству каналов, в которых был «успех».

*Допущение 8.2:* В одном окне выходят из системы: абонент, успешно передавший данные в этом окне, и абоненты, находящиеся на расстоянии не больше чем  $r$  от этого абонента.

В седьмом допущении говориться о пространственном точечном пуассоновском процессе с параметром  $\lambda$ . В англоязычной литературе он называется spatial Poisson point process. Строгое определение данного процесса дано в книге [45]. При использовании этого процесса в моделях сенсорных сетей временные промежутки между возникновениями событий/абонентов в системе имеют экспоненциальное распределение, а число событий/абонентов, возникших в одном окне на единице площади, имеет распределение Пуассона.

В большинстве моделей систем интернета вещей зона действия базовой станции представляет собой ограниченную часть плоскости, обычно являющуюся кругом или квадратом. В реальности зона действия базовой станции может быть круглой, если базовая станция находится на открытом пространстве, и квадратной, если базовая станция находится в городской среде. В таких моделях вероятность, что в радиусе  $r$  от сенсора возникнет событие, будет зависеть от положения сенсора относительно края зоны действия базовой станции. Такие проблемы называются «краевыми эффектами». «Краевые эффекты» усложняют имитационное моделирование и анализ моделей. Известны различные методы учета этих проблем. Например, в работах [14-16] для устранения «краевых эффектов» предлагается расширить область возникновения событий. Зоной действия базовой станции в этих работах является квадрат со стороной  $L$ , но предлагается генерировать события в квадрате со стороной  $L+2r$ .

Такой подход позволяет избавиться от «краевых эффектов», но увеличивает сложность анализа модели. В работе [10] рассматривается модель с появлением абонентов, в которой зона действия базовой станции является поверхность сферы. Такая зона действия базовой станции позволяет избежать «краевых эффектов», но затрудняет анализ и имитационное моделирование модели.

Для исследования моделей с появлением событий и моделей с появлением абонентов можно использовать окружность в качестве зоны действия базовой станции. Во-первых, модель с окружностью отражает основные свойства систем интернета вещей. Во-вторых, эта модель, как и модель со сферой, не имеет «краевых эффектов», но, в отличие от модели со сферой, её легче моделировать и анализировать. На рисунке 1 представлены примеры моделей с окружностью: а – модель с появлением событий, б – модель с появлением абонентов. Впервые подобные модели рассматривались в работах [21, 24, 25].

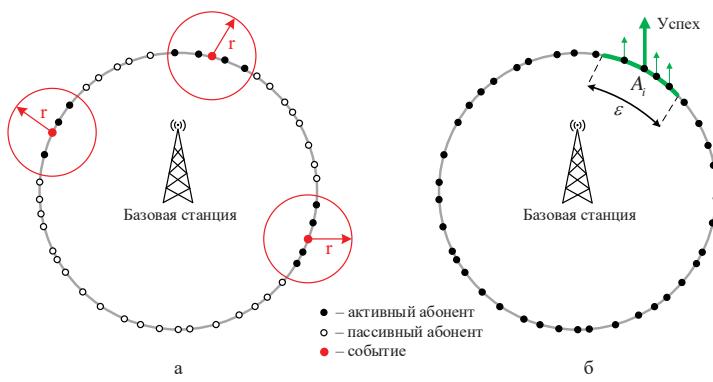


Рис. 1. Примеры моделей с окружностью: а – модель с появлением событий; б – модель с появлением абонентов

### Средний возраст информации в сенсорных сетях с зависимыми источниками

В теории систем массового обслуживания возраст информации определяют, как функцию от времени, линейно возрастающую до момента окончания обслуживания очередной заявки и убывающую в момент, когда заявка покинула систему. Эту функцию обозначают следующим образом:  $\Delta(t)$ . Считается, что изначально  $\Delta(0) = 0$ . Допустим, что  $t_i$  и  $t_{i-1}$  – моменты возникновения заявок с номерами  $i$  и  $i-1$ , а  $l_i$  – момент окончания обслуживания заявки с номером  $i$ . В соответствии с этими обозначениями возраст информации в момент времени  $l_i$  снизится на  $t_i - t_{i-1}$ .

Средний возраст информации на интервале  $[0, T]$  определяют, как отношение площади под графиком функции  $\Delta(t)$  к времени наблюдения за системой  $T$ :

$$\bar{\Delta}_T = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta(t) dt.$$

Средний возраст информации при  $T \rightarrow \infty$  определяют следующим образом:

$$\bar{\Delta} = \lim_{T \rightarrow \infty} \bar{\Delta}_T.$$

В работах [11, 26-28] приведены способы вычисления среднего возраста информации для систем массового обслуживания  $M|D|1$  и  $M|M|1$  с прямым порядком обслуживания (First-Come-First-Served – FCFS) и получены замкнутые математические выражения следующего вида:

$$\bar{\Delta}_{M|D|1} = \frac{1}{\mu} \left( \frac{1}{2(1-\rho)} + \frac{1}{2} + \frac{(1-\rho)e^\rho}{\rho} \right),$$

$$\bar{\Delta}_{M|M|1} = \frac{1}{\mu} \left( 1 + \frac{1}{\rho} + \frac{\rho^2}{1-\rho} \right),$$

в которых  $\lambda$  – интенсивность возникновения заявок,  $\mu$  – интенсивность обслуживания заявок, а  $\rho = \lambda / \mu$ . Заметим, что выражение среднего возраста информации для  $M|D|1$  применимо только для асинхронной системы. Во многих современных системах передачи данных вводится синхронизация времени, поэтому больший интерес представляет получение выражения для синхронной системы  $M|D|1$ . Однако пока данный вопрос остается открытым.

Анализ среднего возраста информации в системах массового обслуживания с обратным порядком обслуживания (Last-Come-First-Served – LCFS) представлен в работах [29, 30]. В работе [31] данная характеристика исследуется для систем массового обслуживания с несколькими очередями. Совсем недавно средний возраст информации начал исследоваться и для систем случайного множественного доступа [32-39], однако математические выражения этой характеристики для таких систем пока не получены.

В работах [22, 23, 25] средний возраст информации исследуется для сенсорных сетей со случаем доступом и зависимыми источниками. В работах [22, 23] рассматриваются модели с появлением событий, а в работе [25] – модель с появлением абонентов. В настоящее время проведено мало исследований в данной области и большинство результатов получено с помощью имитационного моделирования, поэтому задача исследования среднего возраста информации в таких системах по-прежнему является актуальной.

### Заключение

В данной работе описаны основные сценарии и особенности систем интернета вещей. Определен сценарий с большим числом сенсоров, который является основой построения систем мониторинга случайных событий. Выполнен обзор работ, в которых рассматриваются системы случайного множественного доступа с зависимыми источниками. Предложен способ классификации и единая система допущений для моделей таких систем. Приведены примеры описания различных классов систем с зависимыми источниками упрощенной моделью, в которой зона действия базовой станции является окружностью.

Представленной моделью можно описывать как модели с появлением событий, так и модели с появлением абонентов. Преимуществами этой модели являются доступный анализ и простая реализация имитационного моделирования, а также отсутствие «краевых эффектов». Результаты, полученные для упрощенной модели, могут быть обобщены для более реалистичных моделей систем мониторинга случайных событий.

Таким образом, единая система допущений и упрощенная модель могут использоваться для теоретического анализа характеристик различных систем с зависимыми источниками.

Кроме того, в данной работе представлен обзор существующих исследований среднего возраста информации в различных системах связи, а точнее в системах массового обслуживания, в системах случайного множественного доступа и в системах с зависимыми источниками.

По результатам обзора выявлено, что эта характеристика является важной для систем с зависимыми источниками, но на данный момент практически не исследована в таких системах. Цель дальнейших исследований – получение теоретических значений или оценок среднего возраста информации для систем со случайным доступом и зависимыми источниками.

### Финансовая поддержка

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

### Литература

1. Ding J., Nemati M., Ranaweera C., Choi J. IoT connectivity technologies and applications: A survey // IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 67646-67673. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985932
2. Araniti G., Iera A., Pizzi S., Rinaldi F. Toward 6G non-terrestrial networks // IEEE Network, 2021, vol. 36(1), pp. 113-120. doi: 10.1109/MNET.011.2100191
3. Burkov A. A. Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems // Information and Control Systems, 2021, №. 5 (114), pp. 51-58. doi:10.31799/1684-8853-2021-5-51-58
4. Silva F. S. D., Neto E. P., Oliveira H., Rosario D., Cerqueira E., Both C., Zeadally S., Neto A. V. A Survey on Long-Range Wide-Area Network Technology Optimizations // IEEE Access, vol. 9, pp. 106079–106106, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3079095
5. Kim D. K., Georgiev G. D., Markovskaya N. V. A Model of Random Multiple Access in Unlicensed Spectrum Systems // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), 2022, pp. 1-4. doi: 10.1109/WECONF55058.2022.9803810
6. Ragnoli M., Leoni A., Barile G., Ferri G., Stornelli V. LoRa-Based Wireless Sensors Network for Rockfall and Landslide Monitoring: A Case Study in Pantelleria Island with Portable LoRaWAN Access // Journal of Low Power Electronics and Applications, 2022, vol. 12, №. 3, pp. 47. doi:10.3 /jlppea12030047
7. Kotaba R., Kalør A. E., Popovski P., Leyva-Mayorga I., Soret B., Guillaud M., Ordóñez L. G. How to Identify and Authenticate Users in Massive Unsourced Random Access // IEEE Communications Letters, 2021, vol. 25(12), pp. 3795-3799. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3118882
8. Polyanskiy Y. A perspective on massive random-access // 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2017, pp. 2523-2527. doi: 10.1109/ISIT.2017.8006984
9. Calderbank R., Thompson A. CHIRUP: a practical algorithm for unsourced multiple access // Information and Inference: A Journal of the IMA, 2020, vol. 9, №4, pp. 875-897. doi: 10.48550/arXiv.1811.00879
10. Foss S., Turlikov A., Grankin M. Spatial random multiple access with multiple departure // IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), IEEE, 2017, pp. 2728-2731. doi:10.1109/ISIT.2017.8007025
11. Kaul S., Yates R., Gruteser M. Real-time status: How often should one update? // 2012 Proceedings IEEE INFOCOM, IEEE, 2012, pp. 2731-2735. doi: 10.1109/INFOM.2012.6195689
12. Abd-Elmagid M. A., Pappas N., Dhillon H. S. On the role of age of information in the Internet of Things // IEEE Communications Magazine, 2019, vol. 57(12), pp. 72-77. doi: 10.1109/MCOM.001.1900041
13. Choi J. On Multichannel Random Access for Correlated Sources // IEEE Transactions on Communications, 2018, vol. 66, №8, pp. 3444-3454. doi: 10.1109/TCOMM.2018.2823318
14. Choi J. Local reliability aware random access for correlated sources in WSNs // IEEE Transactions on Communications, 2017, vol. 66, №3, pp. 1153-1163. doi: 10.1109/TCOMM.2017.2775226
15. Kalør A. E., Hanna O. A., Popovski P. Random access schemes in wireless systems with correlated user activity // 2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/SPAWC.2018.8445866
16. Zheng C., Egan M., Clavier L., Kalør A. E., Popovski P. Stochastic resource optimization of random access for transmitters with correlated activation // IEEE Communications Letters, 2021, 25(9), 3055-3059. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3090110
17. Zheng C., Egan M., Clavier L., Kalør A. E., Popovski P. Stochastic Resource Allocation for Outage Minimization in Random Access with Correlated Activation // In 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2022, pp. 1635-1640. doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771709
18. Agostini P., Utkovski Z., Stańczak S. Sparse Superposition Coding with Bayesian Detection for Correlated Unsourced Random Access // 2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 2021, pp. 1470-1476. doi: 10.1109/IEEECONF53345.2021.9723293
19. Stern K., Kalør A. E., Soret B., Popovski P. Massive random access with common alarm messages // In 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/ISIT.2019.8849678
20. Борисовская А. В., Тюриков А. М. Методика определения числа сенсоров в системах мониторинга экологической обстановки с использованием LPWAN сетей // Вопросы радиоэлектроники, 2022, С. 93-100.
21. Борисовская А. В. Определение вероятности доставки информации о событии в системах мониторинга на основе сетей, построенных по технологиям LoRaWAN // Успехи современной радиоэлектроники, 2022, Т. 76, № 12, С. 82–89. doi:10.18127/j20700784-202212-11
22. Zancanaro A., Cisotto G., Badia L. Tackling Age of Information in Access Policies for Sensing Ecosystems // Sensors, 2023, vol. 23, №. 7, pp. 3456. doi: 10.3390/s23073456
23. Zancanaro A., Cisotto G., Badia L. Modeling value of information in remote sensing from correlated sources // Computer Communications, 2023, vol. 203, pp. 289-297. doi: 10.1109/MedComNet55087.2022.9810457
24. Borisovskaya A., Glebov A., Turlikov A. Estimation of average delay in systems with unsourced random access and multiple departure // 2021 XVII International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY), IEEE, 2021, pp. 28-33. doi:10.1109/REDUNDANCY52534.2021.9606453
25. Борисовская А. В., Тюриков А. М. Оценка среднего возраста информации в системах со случайным доступом и множественным выходом // Информационно-управляющие системы. 2023. №. 1. С. 51-60. doi: 10.31799/1684-8853-2023-1-51-60
26. Kosta A., Pappas N., Angelakis V. Age of information: A new concept, metric, and tool // Foundations and Trends® in Networking, 2017, vol. 12(3), pp. 162-259. doi: 10.1561/1300000060
27. Sun Y., Kadota I., Talak R., Modiano E. Age of information: A new metric for information freshness // Synthesis Lectures on Communication Networks, 2019, vol. 12(2), pp. 1-224. doi: 10.1007/978-3-031-79293-9

28. Yates R. D., Sun Y., Brown D. R., Kaul S. K., Modiano E., Ulukus S. Age of information: An introduction and survey // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, vol. 39(5), pp. 1183-1210. doi: 10.1109/JSAC.2021.3065072
29. Inoue Y., Masuyama H., Takeine T., Tanaka T. A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues // IEEE Transactions on Information Theory, 2019, vol. 65(12), pp. 8305-8324. doi: 10.1109/TIT.2019.2938171
30. Kaul S. K., Yates R. D., Gruteser M. Status updates through queues // 2012 46th Annual conference on information sciences and systems (CISS), 2012, pp. 1-6. doi: 10.1109/CISS.2012.6310931
31. Yates R. D., and Kaul S. K. The age of information: Real-time status updating by multiple sources // IEEE Transactions on Information Theory, 2019, vol. 65(3), pp. 1807-1827. doi: 10.1109/TIT.2018.2871079
32. Chen X., Gatsis K., Hassani H., Bidokhti S. S. Age of information in random access channels // IEEE Transactions on Information Theory, 2022, vol. 68, №10, pp. 6548-6568. doi: 10.1109/TIT.2020.9174254
33. Pan H., Chan T. T., Li J., and Leung V. C. Age of information with collision-resolution random access // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, vol. 71(10), pp. 11295-11300. doi: 10.1109/TVT.2022.3189399
34. Feng J., Pan H., and Chan T. T. Low-Power Random Access for Timely Status Update: Packet-based or Connection-based? arXiv preprint arXiv:2210.03962, 2022.
35. Munari A., and Frolov A. Average age of information of irregular repetition slotted ALOHA // GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference, IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322355
36. Chen H., Gu Y., and Liew S. C. Age-of-information dependent random access for massive IoT networks // IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), IEEE, 2020, pp. 930-935. doi: 10.1109/INFOCOM-WKSHPS50562.2020.9162973
37. Yates R. D., and Kaul S. K. Age of information in uncoordinated unslotted updating // IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), IEEE, 2020, pp. 1759-1764. doi: 10.1109/ISIT44484.2020.9174098
38. Munari A. Modern random access: An age of information perspective on irregular repetition slotted ALOHA // IEEE Transactions on Communications, 2021, vol. 69(6), pp. 3572-3585. doi: 10.1109/TCOMM.2021.3060429
39. De Jesus G. G. M., Rebelatto J. L., and Souza R. D. Age-of-Information Dependent Random Access in Multiple-Relay Slotted ALOHA // IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 112076-112085. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3216616

## MODELS OF SENSOR NETWORKS WITH CORRELATED SOURCES

**Anna V. Borisovskaya**, State University of Aerospace Instrumentation, St-Petersburg, Russia, [borisovskaya@k36.org](mailto:borisovskaya@k36.org)

### Abstract

One of the important scientific directions in the research of the Internet of things is the analysis of monitoring systems for random events with correlated sources based on random multiple access. Taking into account the correlation of data from nearby sensors increases the energy efficiency of the system and ensures the stability of its operation. There are various models of such systems, but there is no connection between them. The purpose of this paper is to develop a unified system of assumptions for describing models of systems with random access and correlated sources. In this paper, the main scenarios of the Internet of Things are described and a scenario with a large number of sensors is selected, on the basis of which systems for monitoring random events are built. A review of papers in which systems with random access and correlated sources are studied is carried out. A method for separating existing models into two classes is proposed: models with the arrival of events and models with the arrival of users. A unified system of assumptions for models of both classes is proposed, which allows describing and comparing different models with each other. A simplified model of a system with random access and dependent sources is presented, which retains the main properties of the Internet of things systems. This model is easy to analyze and has no "edge effects". A brief overview of the research on the average age of information in various data transmission systems is also given. The results of the review showed that this characteristic is important for systems with correlated sources, but at the moment it is practically not studied in such systems. The proposed system of assumptions for describing various models with correlated sources and the presented simplified model with a circle can be used in the theoretical analysis of monitoring systems for random events.

**Keywords:** Internet of Things; sensor networks; correlated sources; Age of Information; random multiple access.

### References

1. J. Ding, M. Nemati, C. Ranaweera, J. Choi IoT connectivity technologies and applications: A survey. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 67646-67673. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2985932
2. G. Araniti, A. Iera, S. Pizzi, F. Rinaldi Toward 6G non-terrestrial networks. *IEEE Network*, 2021, vol. 36(1), pp. 113-120. doi: 10.1109/MNET.011.2100191
3. A. A. Burkov Signal power and energy-per-bit optimization problems in mMTC systems. *Information and Control Systems*, 2021, no. 5 (114), pp. 51-58. doi: 10.31799/1684-8853-2021-5-51-58
4. F. S. D. Silva, E. P. Neto, H. Oliveira, D. Rosario, E. Cerqueira, C. Both, S. Zeadally, A. V. Neto A Survey on Long-Range Wide-Area Network Technology Optimizations. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 106079-106106, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3079095

5. D. K. Kim, G. D. Georgiev, N. V. Markovskaya A Model of Random Multiple Access in Unlicensed Spectrum. 2022 *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2022, pp. 1-4. doi: 10.1109/WECOMF55058.2022.9803810
6. M. Ragnoli, A. Leoni, G. Barile, G. Ferri, V. Stornelli LoRa-Based Wireless Sensors Network for Rockfall and Landslide Monitoring: A Case Study in Pantelleria Island with Portable LoRaWAN Access. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 47. doi: 10.3390/jlpel20230047
7. R. Kotaba, A. E. Kalor, P. Popovski, I. Leyva-Mayorga, B. Soret, M. Guillaud, L. G. Ordóñez How to Identify and Authenticate Users in Massive Unsourced Random Access. *IEEE Communications Letters*, 2021, vol. 25(12), pp. 3795-3799. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3118882
8. Y. Polyanskiy A perspective on massive random-access. 2017 *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2017, pp. 2523-2527. doi: 10.1109/ISIT.2017.8006984
9. R. Calderbank, A. Thompson CHIRUP: a practical algorithm for unsourced multiple access. *Information and Inference: A Journal of the IMA*, 2020, vol. 9, no.4, pp. 875-897. doi: 10.48550/arXiv.1811.00879
10. S. Foss, A. Turlikov, M. Grankin Spatial random multiple access with multiple departure. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2017, pp. 2728-2731. doi: 10.1109/ISIT.2017.8007025
11. S. Kaul, R. Yates, M. Gruteser Real-time status: How often should one update? 2012 *Proceedings IEEE INFOCOM*, IEEE, 2012, pp. 2731-2735. doi: 10.1109/INF-COM.2012.6195689
12. M. A. Abd-Elmagid, N. Pappas, H. S. Dhillon On the role of age of information in the Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 2019, vol. 57(12), pp. 72-77. doi: 10.1109/MCOM.001.1900041
13. J. Choi On Multichannel Random Access for Correlated Sources. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, vol. 66, no.8, pp. 3444-3454. doi: 10.1109/TCOMM.2018.2823318
14. J. Choi Local reliability aware random access for correlated sources in WSNs. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, vol. 66, no.3, pp. 1153-1163. doi: 10.1109/TCOMM.2017.277526
15. A. E. Kalor, O. A. Hanna, P. Popovski. Random access schemes in wireless systems with correlated user activity. 2018 *IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/SPAWC.2018.8445866
16. C. Zheng, M. Egan, L. Clavier, A. E. Kalor, P. Popovski Stochastic resource optimization of random access for transmitters with correlated activation. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(9), pp. 3055-3059. doi: 10.1109/LCOMM.2021.3090110
17. C. Zheng, M. Egan, Clavier, L., Kalor, A. E., Popovski, P. Stochastic Resource Allocation for Outage Minimization in Random Access with Correlated Activation. 2022 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2022, pp. 1635-1640. doi: 10.1109/WCNC51071.2022.9771709
18. P. Agostini, Z. Utkovski, S. Stanczak Sparse Superposition Coding with Bayesian Detection for Correlated Unsourced Random Access. 2021 *55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, 2021, pp. 1470-1476. doi: 10.1109/IEECONF53345.2021.9723293
19. K. Stern, A. E. Kalor, B. Soret, P. Popovski Massive random access with common alarm messages. In *2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/ISIT.2019.8849678
20. A. V. Borisovskaya, A. M. Turlikov Methodology for determining the number of sensors in environmental monitoring systems using LPWAN networks. *Questions of Radioelectronics*, 2022, pp. 93-100.
21. A.V. Borisovskaya Event information delivery probability calculation in monitoring systems based on networks with LoRaWAN technology. *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2022, vol. 76, no. 12, pp. 82-89. doi: 10.18127/j20700784-202212-11
22. A. Zancanaro, G. Cisotto, L. Badia Tackling Age of Information in Access Policies for Sensing Ecosystems. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 7, pp. 3456. doi: 10.3390/s23073456
23. A. Zancanaro, G. Cisotto, L. Badia Modeling value of information in remote sensing from correlated sources. *Computer Communications*, 2023, vol. 203, pp. 289-297. doi: 10.1109/MedComNet5087.2022.9810457
24. A. Borisovskaya, A. Glebov, A. Turlikov Estimation of average delay in systems with unsourced random access and multiple departure. 2021 *XVII International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY)*, IEEE, 2021, pp. 28-33. doi: 10.1109/REDUNDANCY52534.2021.9606453
25. A. V. Borisovskaya, A. M. Turlikov Estimation of the average age of information in random access systems with multiple departure. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2023, no. 1, pp. 51-60 (In Russian). doi: 10.31799/1684-8853-2023-1-51-60
26. A. Kosta, N. Pappas, V. Angelakis Age of information: A new concept, metric, and tool. *Foundations and Trends® in Networking*, 2017, vol. 12(3), pp. 162-259. doi: 10.1561/1300000060
27. Y. Sun, I. Kadota, R. Talak, E. Modiano Age of information: A new metric for information freshness. *Synthesis Lectures on Communication Networks*, 2019, vol. 12(2), pp. 1-224. doi: 10.1007/978-3-031-79293-9
28. R. D. Yates, Y. Sun, D. R. Brown, S. K. Kaul, E. Modiano, S. Ulukus Age of information: An introduction and survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, vol. 39(5), pp. 1183-1210. doi: 10.1109/JSC.2021.3065072
29. Y. Inoue, H. Masuyama, T. Takine, T. Tanaka A general formula for the stationary distribution of the age of information and its application to single-server queues. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65(12), pp. 8305-8324. doi: 10.1109/TIT.2019.2938171
30. S. K. Kaul, R. D. Yates, M. Gruteser Status updates through queues. 2012 *46th Annual conference on information sciences and systems (CISS)*, 2012, pp. 1-6. doi: 10.1109/CISS.2012.6310931
31. R. D. Yates, S. K. Kaul The age of information: Real-time status updating by multiple sources. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2019, vol. 65(3), pp. 1807-1827. doi: 10.1109/TIT.2018.2871079
32. X. Chen, K. Gatsis, H. Hassani, S. S. Bidokhti Age of information in random access channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2022, vol. 68, no.10, pp. 6548-6568. doi: 10.1109/ISIT44484.2020.9174254
33. H. Pan, T. T. Chan, J. Li, V. C. Leung Age of information with collision-resolution random access. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, vol. 71(10), pp. 11295-11300. doi: 10.1109/TVT.2022.3189399
34. J. Feng, H. Pan, T. T. Chan Low-Power Random Access for Timely Status Update: Packet-based or Connection-based? arXiv preprint arXiv:2210.03962, 2022.
35. A. Munari, A. Frolov Average age of information of irregular repetition slotted ALOHA. *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference*, IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322355
36. H. Chen, Y. Gu, S. C. Liew Age-of-information dependent random access for massive IoT networks. *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, IEEE, 2020, pp. 930-935. doi: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162973
37. R. D. Yates, S. K. Kaul Age of information in uncoordinated unslotted updating. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2020, pp. 1759-1764. doi: 10.1109/ISIT44484.2020.9174098
38. A. Munari Modern random access: An age of information perspective on irregular repetition slotted ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, vol. 69(6), pp. 3572-3585. doi: 10.1109/TCOMM.2021.3060429
39. G. G. M. De Jesus, J. L. Rebelatto, R. D. Souza Age-of-Information Dependent Random Access in Multiple-Relay Slotted ALOHA. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 112076-112085. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3216616

**Information about author:**

**Borisovskaya Anna**, Assistant of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems, State University of Aerospace Instrumentation, St-Petersburg, Russia

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ СКРЫТОМУ ПЕРЕХВАТУ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ДАННЫХ В ПАССИВНОЙ СЕТИ ОПТИЧЕСКОГО ДОСТУПА

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-29-37

**Шестаков Иван Игоревич,**

Уральский технический институт связи и информатики  
(филиал) ФГБОУ ВО "Сибирского государственного  
университета телекоммуникаций и информатики" в  
г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), Екатеринбург, Россия,  
[ivansche2007@rambler.ru](mailto:ivansche2007@rambler.ru)

**Шувалов Вячеслав Петрович,**

ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики, г. Новосибирск, Россия,  
[shvp04@mail.ru](mailto:shvp04@mail.ru)

**Manuscript received** 10 June 2023;  
**Accepted** 07 July 2023

**Ключевые слова:** скрытый перехват информации,  
пассивная сеть оптического доступа P2MP PON-TDM,  
источник фоновой помехи

В статье рассмотрено моделирование противодействия скрытому перехвату конфиденциальной информации, передаваемой в восходящем потоке данных пассивной сети оптического доступа архитектуры "точка – многоточка" (P2MP PON-TDM). Скрытность перехвата обусловлена наличием обратно отраженных сигналов в разъемных соединениях магистрального участка волоконно-оптической линии связи пассивной сети оптического доступа. Для противодействия такому способу перехвата информации предложено передавать в нисходящем направлении помеховой сигнал на длине волны 1310 нм. Оценка эффективности применения этого метода выполнена путем моделирования в САПР OptiSystem. Результатом моделирования являются графики зависимости Q-фактора от обратных оптических потерь в разъемных соединениях и от уровня оптической мощности помехового сигнала. На основании анализа графиков, предложенный метод считается эффективным при условии равенства уровня оптической мощности помехового и информационного сигнала, отраженного от разъемного соединения магистральной ВОЛС на стороне абонентов. Для противодействия достаточно применить один источник помехи, параметры которой должны быть схожими с параметрами сигнала восходящего потока данных. Также даны рекомендации по противодействию скрытому перехвату информации восходящего потока данных в оптической сети доступа P2MP PON-TDM.

#### Информация об авторах:

**Шестаков Иван Игоревич**, Уральский технический институт связи и информатики (филиал) ФГБОУ ВО "Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики" в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ), старший преподаватель кафедры Многоканальной электрической связи, г. Екатеринбург, Россия

**Шувалов Вячеслав Петрович**, ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, д.т.н., профессор кафедры Инфокоммуникационных систем и сетей, г. Новосибирск, Россия

#### Для цитирования:

Шестаков И.И., Шувалов В.П. Моделирование противодействия скрытому перехвату информационного сигнала восходящего потока данных в пассивной сети оптического доступа // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 29-37.

#### For citation:

Shestakov I.I., Shuvalov V.P. Simulation of counteraction to covert interception of an information signal of an upstream data stream in a passive optical access network. T-Comm, vol. 17, no.7, pp. 29-37. (in Russian)

## Введение

Одной из главных проблем технологии связи P2MP PON-TDM, в частности GPON, является возможность нарушения информационной безопасности путем перехвата информации, передаваемой в восходящем и нисходящем направлениях. Как правило, перехват осуществляется по техническим каналам утечки информации [1-7]. Одним из таких каналов является канал, образованный за счет френелевского отражения в разъемных соединениях разветвленной ВОЛС сети PON. Обратно отраженный сигнал восходящего потока данных можно скрытно принимать, без каких-либо воздействий на ВОЛС путем подмены абонентского терминала на аппаратно-программный комплекс (АПК) с высокочувствительным фотоприемником. Для противодействия скрытому перехвату информации восходящего потока данных, в работе [8] предложен метод преднамеренного искажения отраженного сигнала путем передачи одновременно в нисходящем направлении сигнала помехи на длине волны 1310 нм. Подобный метод рассмотрен в работах [9,10], но для сети точка-точка (Р2Р).

Оценка эффективности предложенного метода представлена в работе [11]. Как показали результаты расчетов, метод эффективно работает при условии, что уровень помехового сигнала на входе приемника третьих лиц будет не меньше уровня отраженного информационного сигнала. Для подтверждения этого вывода выполняется моделирование в САПР.

## Постановка задач

Задачей моделирования является:

1) оценка возможности приема и обработки информационного сигнала, который представляет собой сумму отраженных сигналов в однокаскадной и двухкаскадной схемах сети PON в отсутствии фоновой помехи при различных значениях оптических возвратных потерь (ORL) разъемных соединений;

2) оценка возможности приема и обработки информационного сигнала, представляющего собой сумму отраженных сигналов в однокаскадной и двухкаскадной сетях сети PON на фоне помехового процесса при различных значениях уровня шума и параметра ORL разъемных соединений.

Оценка возможности приема и обработки полезного сообщения будет определяться величиной Q-фактора. Результатами моделирования будут представлены графиками зависимости  $Q(OLR)$  и  $Q(P_{noise})$ .

Моделирование сети PON будет выполнено согласно схеме, рассмотренной в работе [8]. Для упрощения моделирования, достаточно рассмотреть схему без OLT с одним терминалом ONU, в которой выполняется прием суммы четырех сигналов. Три сигнала отраженных от трех разъемных соединений магистральной волоконно-оптической линии связи пассивной сети доступа, и сигнала от источника помехи.

Моделирование OLT является нецелесообразным, поскольку передача данных осуществляется на длине волны 1490 нм, которая не будет оказывать никакого воздействия на прием и обработку отраженных информационных сигналов и сигнала помехи на длине волны 1310 нм.

В качестве источников информационного сигнала и фонового шума можно применить генератор оптической несущей на длине волны 1310 нм, модулированной по закону NRZ псевдослучайной последовательностью единиц и нулей, с битовой скоростью 1,25 Гбит/с.

При этом, эти два источника должны быть независимы относительно друг друга.

В качестве приемника отраженных сигналов целесообразно применить лавинный фотодиод, работающий в связке с регенератором и оптическим усилителем. Применение лавинного фотодиода оправдано его большей чувствительностью [12-15], в сравнении с pin-фотодиодом. Применение оптического усилителя обосновано тем, что уровень отраженного сигнала много меньше чувствительности лавинного фотодиода. Следует использовать идеальный оптический усилитель, задачей которого является усиление оптического сигнала до номинального значения без внесения собственных шумов в усиливаемый сигнал.

Для простоты чтения схем и анализа полученных графических зависимостей  $Q(OLR)$  и  $Q(P_{noise})$ , условимся, что нумерация разъемных соединений магистральной ВОЛС начинается со стороны абонента, то есть с магистрального порта оптического разветвителя, к которому непосредственно подключаются абонентские терминалы ONU. Первый разъем на стороне абонента в ОРШ или ОРМ (оптический распределительный шкаф или оптическая распределительная муфта), остальные два на стороне оператора сети (в узле связи).

Значение ORL следует взять из диапазона от 30 до 70 дБ, что соответствует реальным значениям на практике. Уровень оптической мощности шумового сигнала на выходе генератора следует взять в пределах от минус 100 дБм до минус 30 дБм, что позволит определить при каких значениях (равных, больше или меньше) уровня оптической мощности помехи будет наблюдаться наиболее надежное зашумление информационного сигнала, отраженного от разъемных соединений. Для повышения разрешающей способности графиков зависимости  $Q(OLR)$  и  $Q(P_{noise})$ , количество значений ORL и  $P_{noise}$  примем равным 20.

Моделирование следует провести для однокаскадной и двухкаскадной схем сети PON. При этом, в двухкаскадной схеме, целесообразно рассмотреть вариант, когда оптический разветвитель первого каскада интегрирован в линию связи посредством сварки на участке между OLT и оптическим разветвителем второго каскада.

## Моделирование в САПР OptiSystem

Моделирование выполнено в САПР OptiSystem для трех блок-схем (см. рис. 1-3), которые представляют собой как однокаскадную, так и двухкаскадную схемы сети PON.

Моделирование прямых (0,3 дБ) и обратных оптических потерь (55 дБ) [16] в трех разъемных соединениях, а также совокупных оптических потерь в линии длиной 5 км [8,11], выполнено посредством оптических аттенюаторов. Моделирование оптической линии длиной три метра на стороне оператора не целесообразно, так как затухание на таком участке крайне мало.

Моделирование разветвителя первого каскада выполнено путем увеличения затухания в аттенюаторах, которые моделируют затухание в волоконно-оптической линии связи протяженностью 5 км. В качестве разветвителя первого каскада применен оптический делитель 1×2 с вносимыми потерями 4 дБ. С учетом этого, суммарные потери в линии составят 6 дБ. Разница между однокаскадной и двухкаскадной схемами сети PON отражена в затухании.

В качестве абонентского терминала ONU и генератора шума применены передатчики оптического сигнала на длине волны 1310 нм, интенсивность излучения которых модулировалась независимыми псевдослучайными бинарными последовательностями. Фотоприемник третьих лиц (ONU\*) представляет собой оптический приемник с предварительным оптическим усилителем.

Качество приема информационного сигнала определялось анализатором цифрового потока данных (BER Analyzer), который вычислял параметр Q-фактор в зависимости от обратных оптических потерь в разъемных соединениях и от уровня оптической мощности помехового сигнала.

Контроль процесса моделирования осуществлялся измен-

рительными приборами, такими как измеритель уровня оптической мощности и осциллограф. Их подключение к блок-схеме выполнено на абонентской стороне в шести контрольных точках.

Для исследования влияния ORL трех разъемных соединений на Q-фактор в отсутствии помехового сигнала, в блок-схеме №1 (см. рис. 1) разработано три сценария, в которых линейно изменялся параметр *Attenuation* одного из трех оптических аттенюаторов. В соответствии условиям моделирования, параметр *Attenuation* изменялся линейно в пределах от 30 до 70 дБ. Отсутствие фонового помехового сигнала было смоделировано путем установки в блоке Gen.Noise уровня оптической мощности минус 100 дБм.

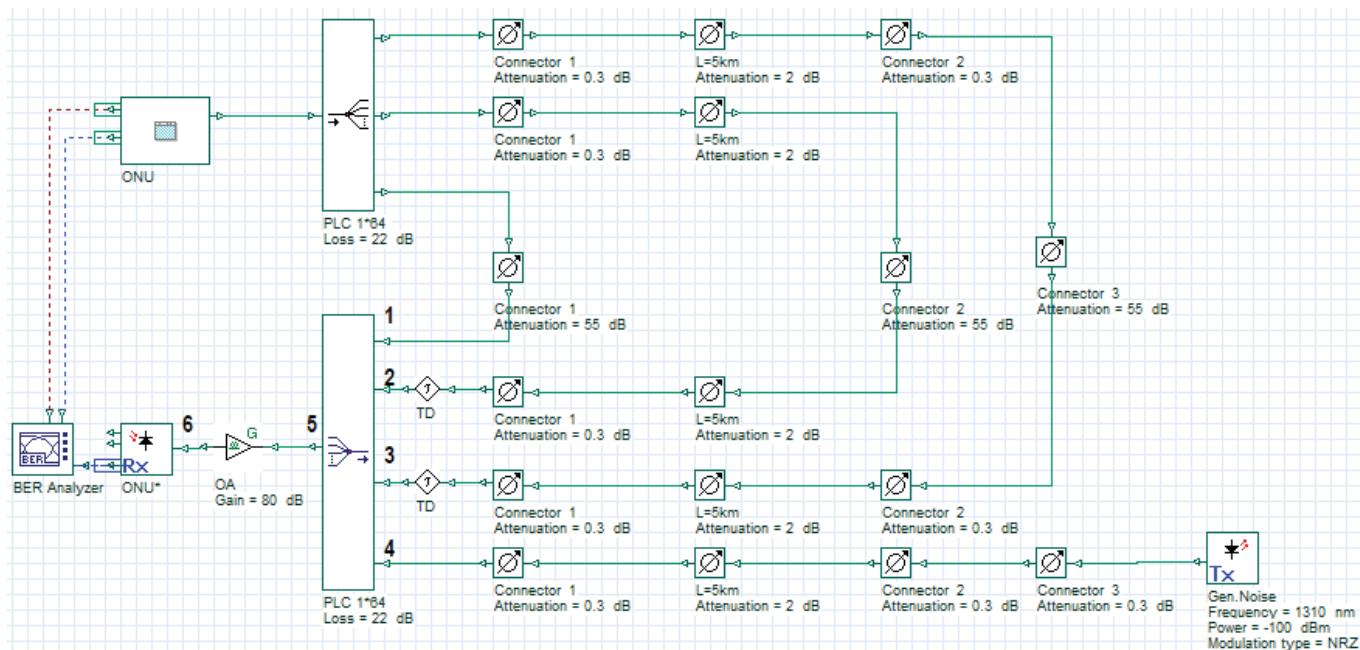


Рис. 1. Блок-схема №1

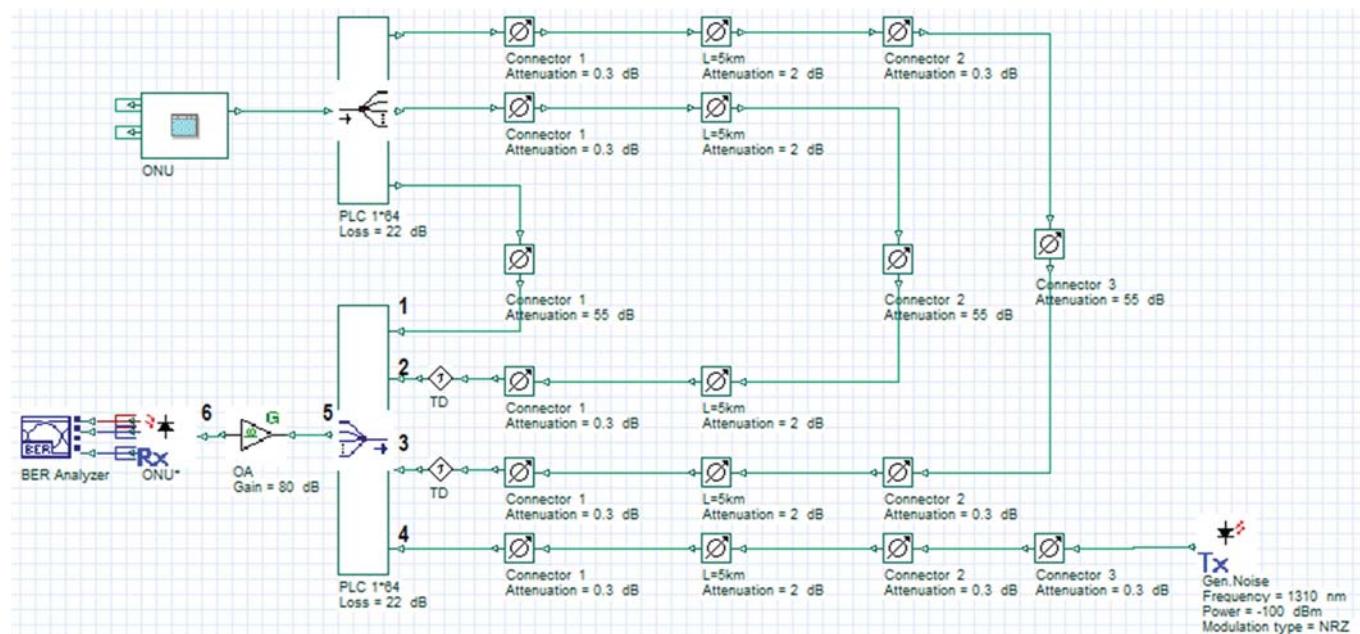
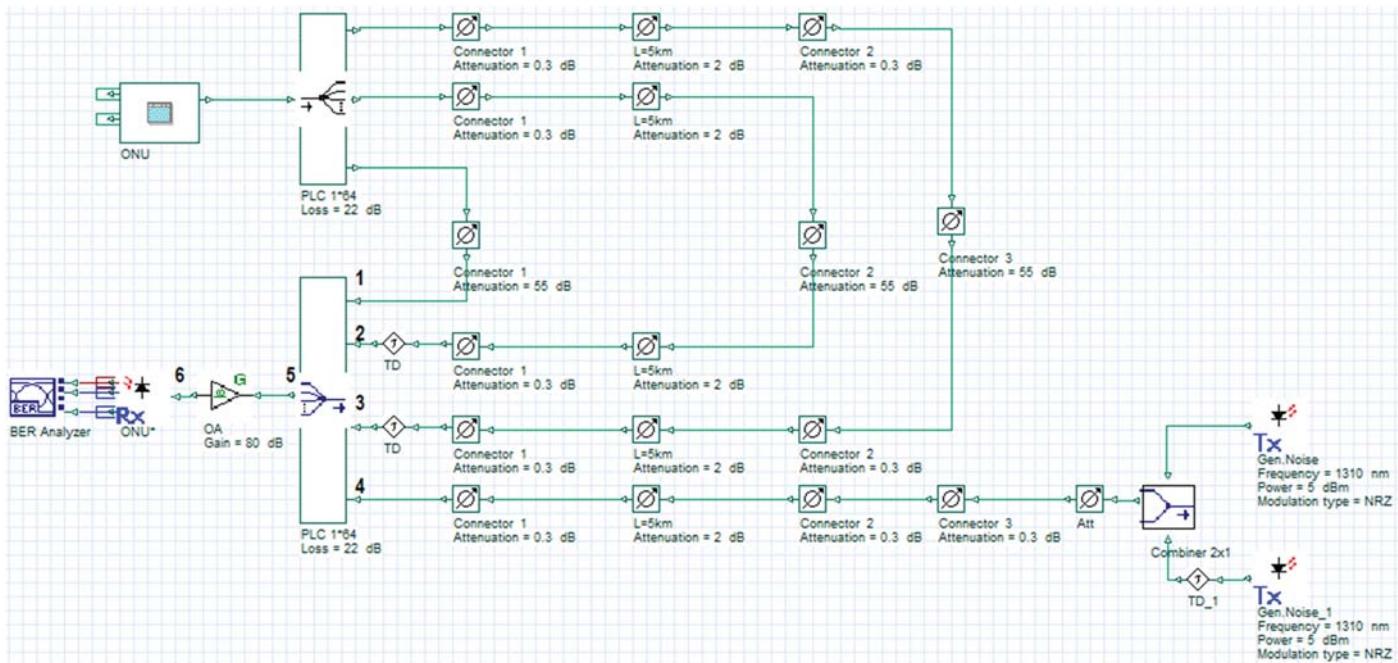


Рис. 2. Блок-схема №2



**Рис. 3.** Блок-схема №3

В блок-схеме №1, для подтверждения достоверности приема информационного сообщения, подключение анализатора цифрового потока данных выполнено к передатчику ONU и к фотоприемнику ONU\*. Анализатор сравнивает переданную ONU информационную последовательность с принятой ONU\*. Результатом сравнения является значение Q-фактора.

Для двухкаскадной схемы также разработано три сценария, в которых линейно изменялся параметр *Attenuation* одного из трех оптических аттенюаторов, моделирующих возвратные оптические потери разъемных соединений.

Исследование влияния уровня оптической мощности помехового процесса на Q-фактор, выполнено при различных значениях ORL в первом разъемном соединении, которые составили 55, 50, 48, 46 и 44 дБ. Для этого было разработано пять сценариев для однокаскадной и двухкаскадной сети PON. В каждом из пяти сценариев линейно изменялась мощность помехового сигнала в диапазоне от минус 100 дБм до минус 30 дБм. Изменения ORL в первом разъемном соединении (Connector 1) обосновано тем, что именно оно в большей степени влияет на качество приема информационного сигнала.

Учитывая реальные условия перехвата отраженного сигнала в сети TDM-PON, где достоверность принимаемого информационного сообщения не известна, снятие зависимости  $Q(P_{NOISE})$  выполнено при непосредственном подключении BER Analyze к фотоприемнику ONU\*, как показано на рисунке 2. Количество сценариев и итераций вычислений в блок-схеме №2 аналогично блок-схеме №1.

Уровень оптической мощности помехового сигнала в блок-схемах №1 и №2 контролировался в точке №4 при помощи инструмента «Измеритель оптической мощности».

Из результатов численного моделирования, представленных в работе [11], следует что для увеличения коэффициента ошибки выделения информационного сообщения на фоне помехового процесса, генерируемого одним источником, уровень оптической мощности сигнала помехи должен быть

больше уровня информационного сигнала. Однако, можно предположить, что в таком случае, третья сторона будет принимать помеховый сигнала с наилучшим качеством, что позволит скомпенсировать помеху и выделить информационный сигнал. Учитывая это, разработана блок-схема №3 с двумя источниками фоновой помехи (см. рис. 3).

В блок-схеме №3 снятие зависимости  $Q(P_{\text{NOISE}})$  на фоне двух независимых помеховых процессов в однокаскадной и двухкаскадной сети PON реализовано аналогично блок-схеме №2, для пяти сценариев. Регулировка уровня оптического сигнала выполнялась аттенюатором (Att), установленным на выходе объединителя (Combiner 2×1).

## **Анализ результатов моделирования**

Результатами моделирования оценки противодействия скрытому перехвату конфиденциальной информации, передаваемой в восходящем направлении сети TDM-PON, являются графики зависимости  $Q(\text{ORL})$  и  $Q(P_{\text{NOISE}})$  для разработанных блок-схем однокаскадной и двухкаскадной сети PON.

Результат моделирования блок-схемы №1 представлен на рисунках 4 и 5 в виде зависимости  $Q(\text{ORL})$  при различных значениях ORL в разъемных соединениях и отсутствии фонового шумового процесса. Значения ORL изменялись в пределах от 30 до 70 дБ.

Анализируя эти зависимости, можно утверждать следующее.

1. На качество выделения и обработки отраженного информационного сигнала восходящего потока данных, представляющего собой сумму трех сигналов, в большей степени влияет качество магистрального разъемного соединения оптического разветвителя (первое разъемное соединение), к которому непосредственно подключаются абонентские терминалы. За качество разъемного соединения в данном случае отвечает

величина ORL. Чем меньше ORL, тем хуже качество разъемного соединения, тем лучше качество приема отраженного сигнала третьими лицами, в противном случае, качество приема отраженного сигнала при увеличении ORL ухудшается.

Качество смонтированного разъемного соединения зависит от квалификации технического персонала, который занимается эксплуатацией сети PON. Так, в случае монтажа разъемного соединения, может быть, не выполнена чистка торца керамического наконечника коннектора, либо коннектор подключен неправильно. Очевидным является то, что для пассивного противодействия перехвату отраженного сигнала третьими лицами, обратные оптические потери в разъемных соединениях должны быть как можно больше.

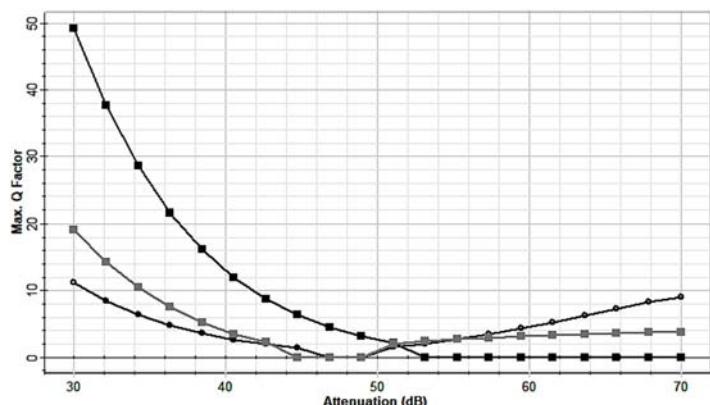


Рис. 4. Графики зависимости  $Q(\text{ORL})$  однокаскадной сети PON при отсутствии шумового процесса (блок-схема №1)

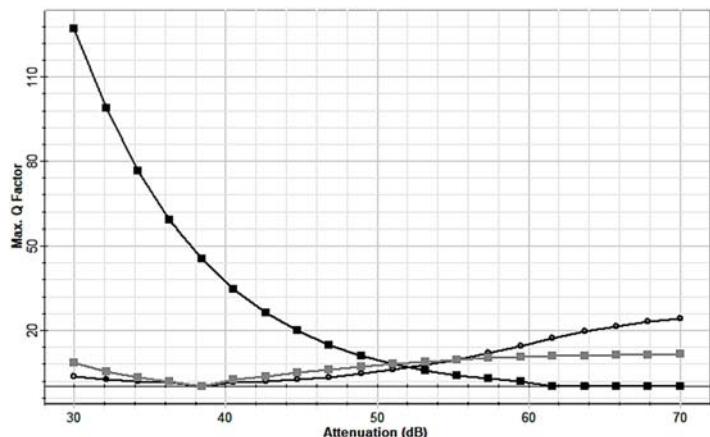


Рис. 5. Графики зависимости  $Q(\text{ORL})$  двуххаскадной сети PON при отсутствии шумового процесса (блок-схема №1)

Стоит отметить то, что в двуххаскадной сети PON, где оптический разветвитель  $1 \times 2$  первого каскада подключен в линии связи посредством сварных соединений, наблюдается двукратное увеличение качества приема отраженного сигнала. Объясняется это большей разницей уровней отраженных сигналов  $s_{\text{ref\_us\_2}}(t, \lambda(t))$  и  $s_{\text{ref\_us\_3}}(t, \lambda(t))$  по сравнению с уровнем сигнала  $s_{\text{ref\_us\_1}}(t, \lambda(t))$ . Разница вызвана дополнительным затуханием сигналов в оптическом разветвителе  $1 \times 2$ .

2. В случае увеличения обратных оптических потерь в разъемных соединениях на стороне оператора связи (второе и третье разъемное соединение), также наблюдается улучшение качества приема и обработки отраженного сигнала. Объясняется это достаточно просто: при увеличении обратны-

оптических потерь, уровень оптической мощности двух отраженных сигналов  $s_{\text{ref\_us\_2}}(t, \lambda(t))$  и  $s_{\text{ref\_us\_3}}(t, \lambda(t))$  уменьшается относительно уровня оптической мощности первого сигнала  $s_{\text{ref\_us\_1}}(t, \lambda(t))$  отраженного от первого разъемного соединения, что ведет к уменьшению их влияния на степень пространственной модуляции сигнала  $s_{\text{ref\_us\_1}}(t, \lambda(t))$ .

3. Замечено, что в случае приблизительно равных значений ORL во всех разъемных соединениях, качество приема отраженных сигналов третьими лицами будет низким, что затрудняет выделению конфиденциальной информации.

4. Сравнение полученных зависимостей  $Q(\text{ORL})$  в однокаскадной и двуххаскадной схемах сети PON, говорит о том, что их характер не имеет существенных отличий.

Полученные результаты моделирования в виде графиков зависимости  $Q(\text{ORL})$ , показывают потенциальную возможность скрытого перехвата информации в восходящем потоке данных как в однокаскадной, так и в двуххаскадной схемах сети P2MP PON-TDM.

Другим результатом моделирования блок-схемы №1 являются графики зависимости  $Q(P_{\text{NOISE}})$ , которые позволяют оценить эффективность предложенного метода противодействия перехвату информации путем передачи в нисходящем направлении фонового шумового процесса на длине волны 1310 нм. Результаты моделирования представлены на рисунках 6 и 7.

Графики зависимостей  $Q(P_{\text{NOISE}})$  получены при различных значениях ORL первого разъемного соединения и значении ORL 55 dB во втором и в третьем разъемном соединениях, а также при значениях уровня оптической мощности отраженных сигналов  $P_{\text{ref\_us\_2}} = -84,3$  дБм и  $P_{\text{ref\_us\_3}} = -84,9$  дБм для однокаскадной сети и  $P_{\text{ref\_us\_2}} = -92,3$  дБм и  $P_{\text{ref\_us\_3}} = -92,9$  дБм для двуххаскадной сети. Уровень отраженного сигнала  $P_{\text{ref\_us\_1}}$  в однокаскадной и двуххаскадной схеме сети PON изменился от минус 79,7 дБм до минус 68,7 дБм при различных значениях ORL.

Анализируя эти зависимости, можно утверждать следующее. Характер полученных графических зависимостей  $Q(P_{\text{NOISE}})$  для однокаскадной и двуххаскадной схемы сети PON можно считать коррелируемым, а сам результат моделирования положительным, показывающим возможность применения источника фонового шума для противодействия скрытому перехвату информационных сообщений восходящего потока данных в сети PON-TDM.

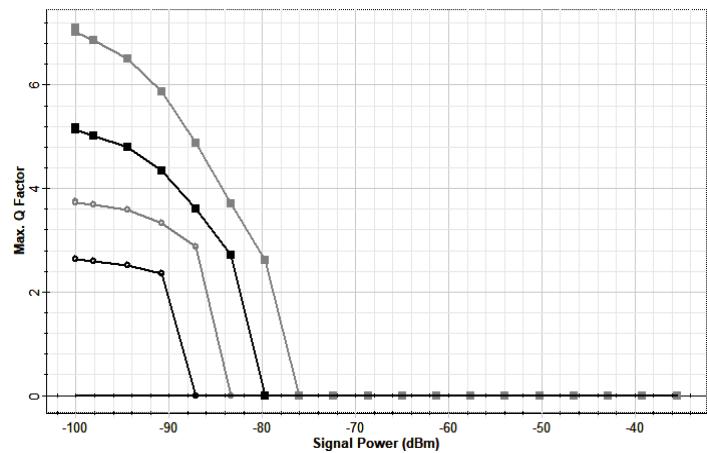


Рис. 6. График зависимости  $Q(P_{\text{NOISE}})$  однокаскадной сети PON при отсутствии помехи (блок-схема №1)

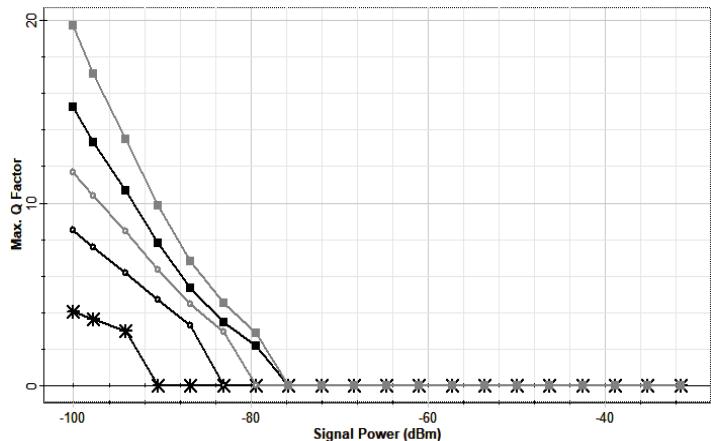


Рис. 7. График зависимости  $Q(P_{NOISE})$  двухкаскадной сети PON в отсутствии помехи (блок-схема №1)

Важно отметить, что эти зависимости получены за счет параллельного подключения анализатора BER к источнику информационного сообщения и фотоприемнику третьих лиц для обеспечения достоверности приема информационной цифровой последовательности на фоне помехи.

В реальных условиях, у третьей стороны нет возможности сравнивать выделенное информационное сообщение на фоне помехового процесса с истинным для подтверждения его достоверности. В таком случае, графики зависимостей  $Q(P_{NOISE})$  полученные для блок-схемы №2 будут выглядеть иначе, (см. рис. 8 и 9).

Анализируя эти зависимости, стоит обратить внимание на прослеживаемую зависимость  $Q$ -фактора как от мощности помехового сигнала, так и от обратных оптических потерь разъемного соединения. Так, при уменьшении обратных оптических потерь в разъемном соединении и уменьшении уровня помехового процесса на входе фотоприемника третьих лиц, качество приема отраженного информационного сигнала улучшается, поскольку уровень полезного сигнала на входе фотоприемника возрастает. Но, при уменьшении обратных оптических потерь и увеличении уровня помехи на входе фотоприемника третьих лиц, наблюдается снижение качества выделения помехи, из-за увеличения уровня информационного сигнала.

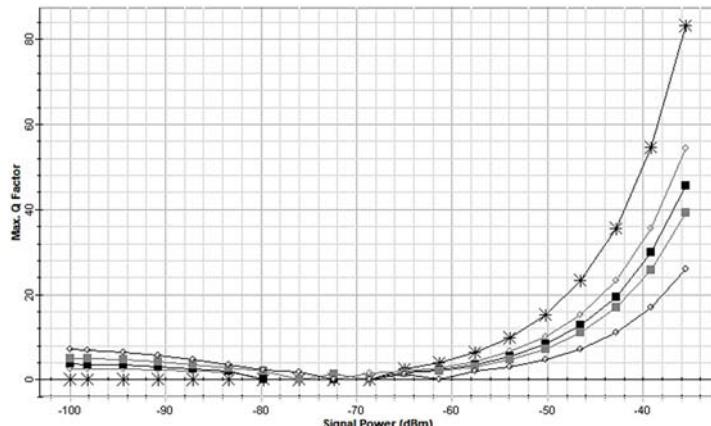


Рис. 8. Графики зависимости  $Q(P_{NOISE})$  однокаскадной сети PON в присутствии помехи (блок-схема №2)

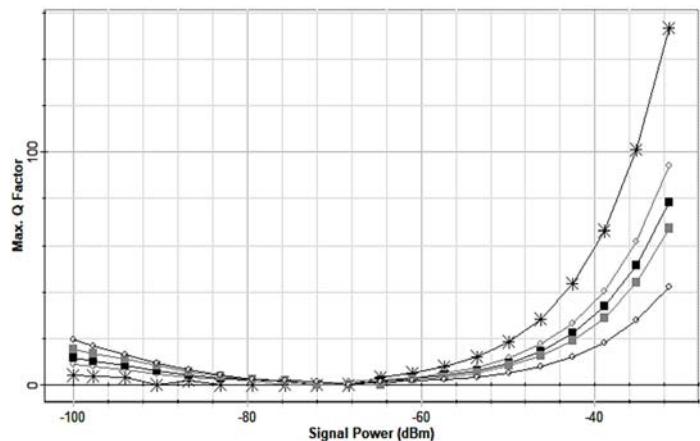


Рис. 9. Графики зависимости  $Q(P_{NOISE})$  двухкаскадной сети PON в присутствии помехи (блок-схема №2)

Очевидным является то, что эффективность применения источника фоновой помехи обеспечивается в том случае, когда уровни помехового процесса и отраженного информационного сигнала, на входе фотоприемника третьих лиц будут примерно одинаковы.

Также следует обратить особое внимание на то, что, если уровень помехового процесса на входе фотоприемника третьих лиц будет больше уровня отраженного сигнала, то фотоприемник третьих лиц будет выделять с наилучшим качеством помеховый сигнал, что явно следует из графиков зависимости  $Q(P_{NOISE})$ .

Выделение помехового процесса в чистом виде позволит скомпенсировать его, например, согласующим фильтром, и тем самым, выделить информационный сигнал на фоне помехи.

Решить эту проблему можно путем применения двух независимых источников фонового шума, генерирующих псевдослучайную бинарную последовательность. Так, для разработанной блок-схемы №3, результат моделирования представлен на рисунках 10 и 11 в виде графиков зависимости  $Q(P_{NOISE})$ .

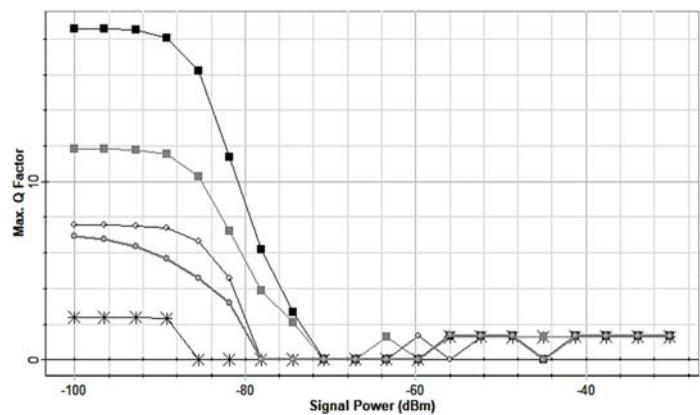


Рис. 10. Графики зависимости  $Q(P_{NOISE})$  однокаскадной сети PON при наличии двух независимых источников шума (блок-схема №3)

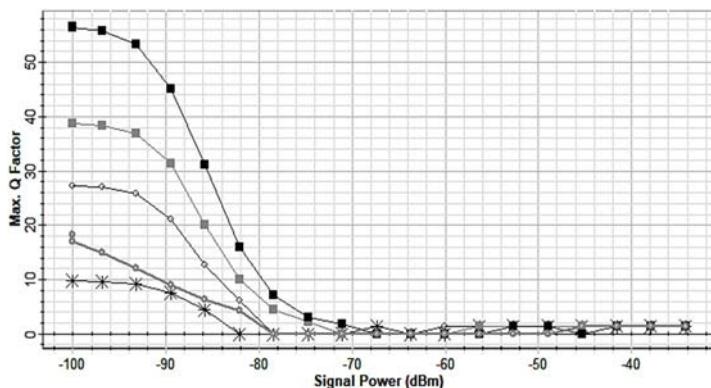


Рис. 11. Графики зависимости  $Q(P_{NOISE})$  двуххаскадной сети PON при наличии двух независимых источников шума (блок-схема №2)

Анализируя эти зависимости, можно утверждать, что характер полученных зависимостей схож с графиками представленными на рисунках 6 и 7. Полученные зависимости  $Q(P_{NOISE})$  показывают, что задействование двух независимых источников помехового сигнала в большей степени затрудняет прием отраженных информационных сигналов, нежели в случае когда задействован один источник фоновой помехи.

Анализируя зависимости  $Q(P_{NOISE})$  в области от минус 60 дБм до минус 30 дБм видно, что значение Q-фактора не превышает двух, что также говорит о возможности компенсации помеховых сигналов при помощи согласующего фильтра, поскольку уровень помеховых процессов превышает уровень отраженных информационных сигналов.

Таким образом, обеспечение скрытности отраженного информационного сигнала, уровень помехи должен быть соизмерим с уровнем отраженных сигналов, действующих на входе фотоприемника третьих лиц. Это отчетливо видно на графиках  $Q(P_{NOISE})$  (на рисунках 8-11 в диапазоне от минус 75 дБм до минус 65 дБм), где значение Q-фактора равно нулю. Кроме этого, обратные оптические потери во всех разъемных соединениях должны быть примерно одинаковы.

### Заключение

Подводя итоги, можно утверждать, что скрытый перехват информационного сигнала восходящего направления сети PON-TDM, вследствие его отражения в разъемных соединениях магистральной ВОЛС, является потенциально-возможным.

Качество перехвата зависит от качества разъемных соединений и уровня каскадирования сети PON. Так, качество перехвата улучшается в случае ухудшения качества (уменьшение возвратных оптических потерь) разъемного соединения в магистральной линии на стороне ONU. Уменьшение ORL в разъемном соединении возможно умышленно третьей стороной, или случайно, работником телекоммуникационной компанией, который занимается техническим обслуживанием сети PON. Преднамеренное уменьшение ORL третьей стороной возможно только в случае свободного доступа к оптическому разветвителю. Уменьшение ORL можно выполнить путем загрязнения торца керамического наконечника коннектора или увеличения расстояния между коннекторами. Согласно результату моделирования, для улучшения качества перехвата сигнала восходящего потока данных сети PON, достаточно уменьшить на 4-6 дБ возвратные потери разъемного

соединения. Такое вмешательство не повлияет на работу всего дерева сети PON, поскольку такие манипуляции с разъемным соединением не оказывают значительного влияния на увеличение затухания в разъемном соединении, и ORL остается для оператора связи в пределах нормы.

Что касается случайного уменьшения ORL работником телекоммуникационной компании, такие случаи вполне возможны, и уменьшение ORL подобно умышленному вмешательству третьих лиц: загрязнение коннекторов или неправильное их соединение в розетке. Обусловлено это некомпетентностью и неграмотностью работника телекоммуникационной компании, занимающейся эксплуатацией сети PON.

Для эффективной борьбы скрытым перехватом информации, передаваемой в восходящем направлении сети PON-TDM, рекомендуется:

- 1) при вводе в эксплуатацию ВОЛС сети PON и последующей эксплуатации, возвратные потери в разъемных соединениях должны быть не менее 65 дБ, а совокупные возвратные потери в сети PON должны быть более 32 дБ [17];
- 2) обеспечить равенство обратных оптических потерь во всех разъемных соединениях на всем периоде эксплуатации ВОЛС сети PON;
- 3) при организации двуххаскадной сети PON, подключение оптических разветвителей первого и второго каскада к магистральной ВОЛС выполнять через разъемные соединения;
- 4) применить два независимых источника фоновых помех, устанавливаемых на стороне OLT;
- 5) обеспечить примерное равенство уровня оптической мощности помехового и информационного сигнала, отраженного от разъемного соединения магистральной ВОЛС на стороне абонентов;
- 6) выполнять измерения ORL со стороны абонентов при помощи оптических тестеров или оптических рефлектометров;
- 7) на участке от приемо-передающего оптического модуля OLT до приемо-передающего модуля ONU применить коннекторы с одним типом полировки: полировка под углом восемь градусов (APC полировка).

### Литература

1. Каторин Ю.Ф., Разумовский А.В., Сивак А.И. Защита информации техническими средствами: Учебное пособие / Под редакцией Ю.Ф. Каторина – СПб: НИУ ИТМО, 2012. 416 с.
2. Roka R. Performance analysis of TDM-PON protection schemes by means of the PON network availability // Yang, XS., Sherratt, S., Dey, N., Joshi, A. (eds) Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 464. London: Springer, Singapore. 2022. Vol. 3. P. 295-303.
3. Денисов И. В., Кипер А. В., Седов В. А. и др. Расчет параметров макроизгиба отвода оптического излучения из волоконных световодов // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 2. С. 18-26.
4. Балина А. В., Былина М. С. Возможности несанкционированного доступа к волокнам в пассивных оптических сетях // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей: в 4х томах. Том 1. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. С. 78-83.
5. Ладошкин К. П. Исследование и разработка системы обнаружения несанкционированных подключений в пассивных оптических

сетях доступа // Инновации и научно-техническое творчество молодежи: Материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск, 20-21 апреля 2022 года. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. С. 1109-1112.

6. Кылмаштаева Т. В. Исследования методов обнаружения несанкционированного подключения в пассивных волоконно-оптических сетях доступа // Инновации и научно-техническое творчество молодежи: Материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск, 20-21 апреля 2022 года. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. С. 1102-1108.

7. Селезнев А. В., Островерхий С. М., Пелогейко А. В. и др. Система несанкционированного доступа к информации в волоконных световодах // Технологии. Инновации. Связь: Сборник материалов научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 2022. С. 89-100.

8. Шестаков И.И. Меры и средства по противодействию перехвата информации циркулируемой в сетях P2MP PON-TDM // Информационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики. Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.П. Шувалова. Сост. М.П. Каракарова. Екатеринбург, 2022. С. 107-111.

9. Рахимов Н. Р., Трушин В. А., Бакшун Д. И., Кнутов В. А. Современные методы разработки информационной безопасности ВОЛС // Автоматика и программная инженерия. 2015. №4 (14). С. 85-89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennoye-metody-razrabotki-informatsionnoy-bezopasnosti-vols> (дата обращения: 10.03.2023).

10. Кокорев Л. Е. Противодействие несанкционированному доступу к информации, передаваемой по волоконно-оптическим каналам связи // Научное обозрение: актуальные вопросы теории и практики: сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». 2023. С. 58-63

11. Шестаков И.И. Оценка эффективности использования источника фоновой помехи для противодействия скрытого перехвата конфиденциальной информации в сетях P2MP PON-TDM // Информационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики. III Международная научно-практическая конференция; Сб. науч. ст. в 1 т. / Под ред. Шувалова В.П.; Сост.: М.П. Каракарова. УрГИСИ СибГУТИ, 2023. С. 92-96.

12. Ziqian Zhang, Yang Liu, Benjamin J. Eggleton. Photonic generation of 30 GHz bandwidth stepped-frequency signals for radar applications // Journal of Lightwave Technology. 2022. Vol. 40(14). P. 4521-4527.

13. Гулаков И.Р., Зеневич А.О., Кочергина О.В., Матковская Т.А. Исследование характеристик германиевых лавинных фотодиодов в режиме счета фотонов // Известия национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2022. Т. 67(2). С. 222-229.

14. Gary G. Gimmetad, David W. Roberts. Lidar Engineering: Introduction to Basic Principles. Cambridge University Press, 2023. 366 p.

15. Козий А. А., Лосев А. В., Заводиленко В. В. и др. Современные методы детектирования одиночных фотонов и их применение в квантовых коммуникациях // Квантовая электроника. 2021. Т. 51, № 8. С. 655-669.

16. IEC 61754-4:2022. Fibre optic interconnecting devices and passive components – Fibre optic connector interfaces – Part 4: Type SC connector family English and French language: Publication date 2022-02-28, 73 p.

17. Rec. ITU-T G.984.2 (08/2019) - Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification.

## SIMULATION OF COUNTERACTION TO COVERT INTERCEPTION OF AN INFORMATION SIGNAL OF AN UPSTREAM DATA STREAM IN A PASSIVE OPTICAL ACCESS NETWORK

**Ivan I. Shestakov**, Urals Technical Institute of Communication and Computer Sciences (Branch) of the Federal State Educational Establishment of Higher Learning "Siberian State University of Telecommunications and Informatics" in Yekaterinburg, Russia,  
**ivansche2007@rambler.ru**

**Vyacheslav P. Shuvalov**, Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Doctor of Technical Sciences, Novosibirsk, Russia, **shvp04@mail.ru**

### Abstract

The article considers the simulation of countering the covert interception of confidential information transmitted in the upstream data stream of the passive optical access network of the point-to-multipoint architecture (P2MP PON-TDM). The secrecy of the interception is due to the presence of back-reflected signals in the split connections of the backbone section of the fiber-optic communication line of the passive optical access network. To counteract this method of information interception, it is proposed to transmit an interference signal in the downward direction at a wavelength of 1310 nm. Evaluation of the effectiveness of this method is carried out by modeling in OptiSystem CAD. The result of the simulation are graphs of the dependence of the Q-factor on the inverse optical losses in the split connections and on the optical power level of the interference signal. Based on the analysis of graphs, the proposed method is considered effective provided that the level of optical power of the interference and information signal reflected from the split connection of the main fiber optic cable on the subscribers' side is equal. To counteract, it is enough to apply one source of interference, the parameters of which are similar should be similar to the parameters of the upstream signal. Recommendations are also given to counteract the covert interception of upstream data in the P2MP PON-TDM optical access network.

**Keywords:** hidden interception of information, passive optical access network P2MP PON-TDM network, source of background noise.

**References**

1. Katorin, Y.F., Razumovsky, A.V. and Spivak, A.I. (2012), Information protection by technical means, in Katorin, Y.F (ed.), NIU ITMO, St. Petersburg, Russia.
2. R?ka, R. (2023), Performance Analysis of TDM-PON Protection Schemes by Means of the PON Network Availability Evaluator. In: Yang, XS., Sherratt, S., Dey, N., Joshi, A. (eds) *Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 464. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2394-4\\_27](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2394-4_27)
3. Denisov, I., Kiper, A. and Sedov, V. A. (2021), "Calculation of the parameters of macrobending removal of optical radiation from optical fibers", *Radiotekhnika*, 2021, vol.82, no.2, pp. 18-26.
4. Balina, A. (2021), "Possibilities of unauthorized access to fibers in passive optical networks", Actual problems of infotelecommunications in science and education: collection of scientific articles: in 4 volumes. Vol. 1, St. Petersburg, 2021, pp. 78-83.
5. Ladoshkin, K. P. (2022), "Research and development of a system for detecting unauthorized connections in passive optical access networks", *Innovacii i nauchno-tehnicheskoe tvorchestvo molodezhi: Materialy Rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, [Innovations and scientific and technical creativity of youth: Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference], Novosibirsk, April 20-21, 2022, pp. 1109-1112.
6. Kyymashtayeva, T. (2022), "Research on tamper detection methods in passive fiber optic access networks", *Innovacii i nauchno-tehnicheskoe tvorchestvo molodezhi: Materialy Rossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, [Innovations and scientific and technical creativity of youth: Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference], Novosibirsk, April 20-21, 2022, pp. 1102-1108.
7. Seleznev, A., Ostroverkhyy, S., and Pelogieko, A. (2022), "A system of unauthorized access to information in fiber light guides", *Tekhnologii. Innovacii. Svyaz': Sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferencii*, [Technologies. Innovation. Communication: Collection of materials of the scientific-practical conference], St. Petersburg, 2022, pp. 89-100.
8. Shestakov, I.I. (2022), "Measures and means to counteract the interception of information circulating in P2P PON-TDM networks", *Infokommunikatsionnye tekhnologii: aktualnyye voprosy tsifrovoy ekonomiki. Sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*, [Infocommunication technologies: current issues of the digital economy. Collection of scientific papers of the II International Scientific and Practical Conference], Yekaterinburg, 2022. pp. 107-111.
9. Rakhimov, N. R., Trushin, V. A., Bakshun, D. I. and Knutov, V. A. (2015), "Modern methods of developing information security of FOCL", *Avtomatika i programmnaya inzheneriya*, vol. 4, no. 14, pp. 85-89, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-razrabotki-informatsionnoy-bezopasnosti-vols> (accessed 10 March 2023).
10. Kokorev, L. E. (2023), "Countering unauthorized access to information transmitted by fiber-optic communication channels", *Nauchnoe obozrenie: aktual'nye voprosy teorii i praktiki: sbornik statej IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, [Scientific Review: Topical Issues of Theory and Practice: Collection of Articles of the IV International Scientific and Practical Conference], Penza, 2023, pp. 58-63.
11. Shestakov, I.I. (2023), "Evaluation of the effectiveness of using a background noise source to counteract covert interception of confidential information in P2MP PON-TDM networks", *Infokommunikatsionnye tekhnologii: aktualnyye voprosy tsifrovoy ekonomiki. III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*, [Infocommunication technologies: current issues of the digital economy. In the III Scientific and Practical International Conference], Yekaterinburg, 2023. pp. 92-96.
12. Ziqian Zhang, Yang Liu, Benjamin J. Eggleton, (2022), "Photonic Generation of 30 GHz Bandwidth Stepped-Frequency Signals for Radar Applications", *Journal of Lightwave Technology*, vol.40, no.14, pp. 4521-4527.
13. Gulakov, I., Zenevich ,A., Kochergina, O. and Matkovskaya, T. (2022), "Investigation of the characteristics of germanium avalanche photodiodes in the photon counting mode", *Izvestiya nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tehnicheskikh nauk*, vol.67, no. 2, pp. 222-229.
14. Gary G. Gimmestad and David W. Roberts. (2023) Lidar Engineering: Introduction to Basic Principles. Cambridge University Press, p. 366.
15. Koziy, A., Losev, A., and Zavodilenko, V. (2021), "Modern methods of detecting single photons and their application in quantum communications", *Kvantovaya elektronika*, vol. 51, no. 8, pp. 655-669.
16. IEC 61754-4:2022. Fiber-optic connecting devices and passive components – Interfaces of fiber-optic connectors - Part 4: SC connector family English and French: Publication date 2022-02-28, p. 73.
17. Recommendation ITU-T G.984.2 (08/2019) – Passive Optical Networks with Gigabit Support (GPON): Specification of the physical carrier-dependent layer (PMD).

# ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОЗЧОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗАГРУЗКИ ИНФРАСТРУКТУРЫ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-38-46

**Manuscript received** 12 June 2023;  
**Accepted** 03 July 2023

**Маловецкая Екатерина Викторовна,**  
 Иркутский государственный университет путей сообщения,  
 г. Иркутск, Россия, [katerina8119@mail.ru](mailto:katerina8119@mail.ru)

**Мозалевская Анна Константиновна,**  
 Иркутский государственный университет путей сообщения,  
 г. Иркутск, Россия, [Mozalevskay@mail.ru](mailto:Mozalevskay@mail.ru)

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

Точное построение прогнозов временных рядов является ключевым элементом в системе поддержки и принятия управленческих решений. В данной статье представлен метод многоэтапного системного прогнозирования временных рядов. Эффективность предложенного метода экспериментально обоснована на примере поступления вагонопотоков на стыковые пункты железных дорог. Наиболее важным вкладом является внедрение системного прогноза, при котором способы прогнозирования транспортных потоков будут взаимно согласованными и дополняющими друг друга, поскольку применение только статистических способов не даст в полной мере отразить все изменения, которые происходят в транспортном комплексе Российской Федерации. Эта гибридная комбинация обеспечивает более конкурентоспособные прогнозы по сравнению с другими методами. Более того, такая гибридная модель легче поддается интерпретации лицами, принимающими решения, при моделировании трендовых рядов.

#### Информация об авторах:

**Маловецкая Екатерина Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры "Управление эксплуатационной работой" ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

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

#### Для цитирования:

Маловецкая Е.В., Мозалевская А.К. Возможности повышения эффективности перевозочного процесса на основе построения комплексных прогнозных моделей загрузки инфраструктуры // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 38-46.

#### For citation:

Malovetskaya E.V., Mozalevskaya A.K. (2023) Improving the quality of transportation based on the construction of complex predictive models of infrastructure loading. T-Comm, vol. 17, no. 7, pp. 38-46. (in Russian)

## Введение

Выход железнодорожного транспорта на качественно новые рубежи – процесс небыстрый и требует надежной перспективы в развитии. Ее можно разработать только тогда, когда будут разработаны устойчивые прогнозы потоков транспорта на всех существующих уровнях.

В таких условиях просчеты как в технической, экономической и технологической стратегиях не будут допущены

(допустим, переоцененность или недооцененность резервов, которые имеются в наличии; неправильный выбор приоритетов в процессе распределения капиталовложений между различными подсистемами).

Исходя из динамики погрузки грузов на сети РЖД за 2019-2022 гг., становится очевидным ожидаемый тренд. Возрастающая погрузка за истекшие годы в разрезе 2016-2019 гг. показывала нарастающие значения несмотря на пандемию. Поэтому 2019 г. показал рост погрузки (рис. 1).



Рис. 1. Помесячная динамика погрузки грузов по сети РЖД, тыс. тонн

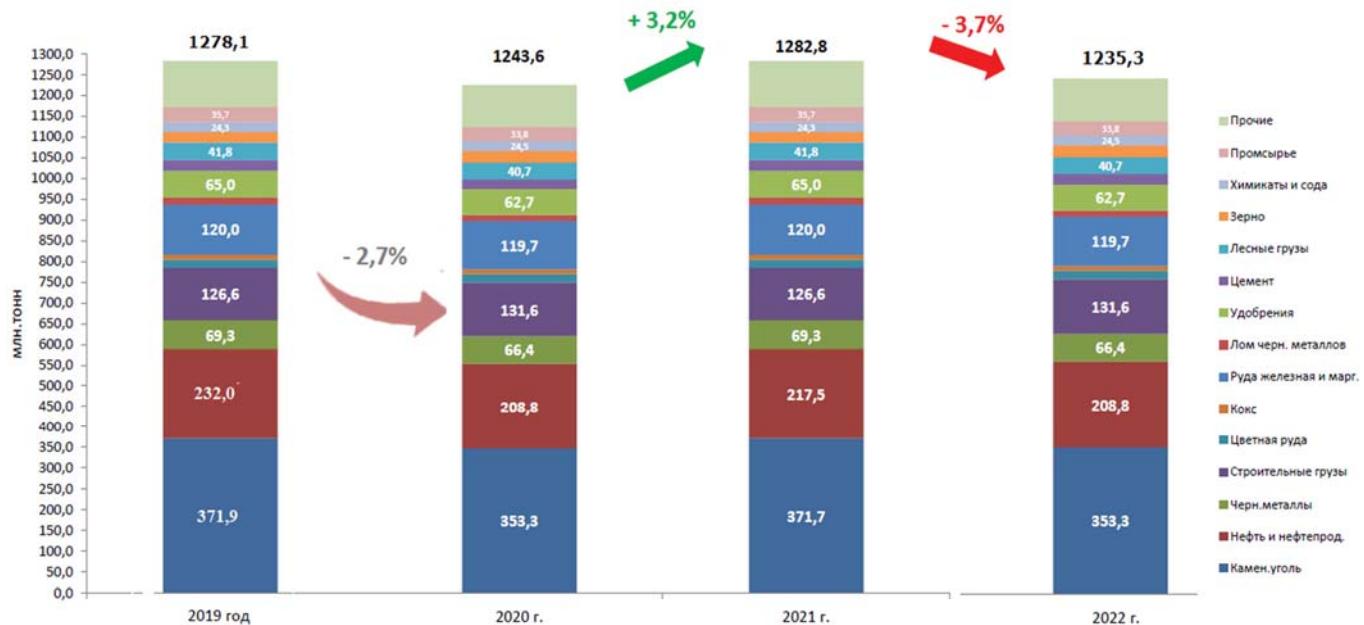


Рис. 2. Погрузка важнейших грузов по сети РЖД за 2019 - 2022 гг., млн. тонн

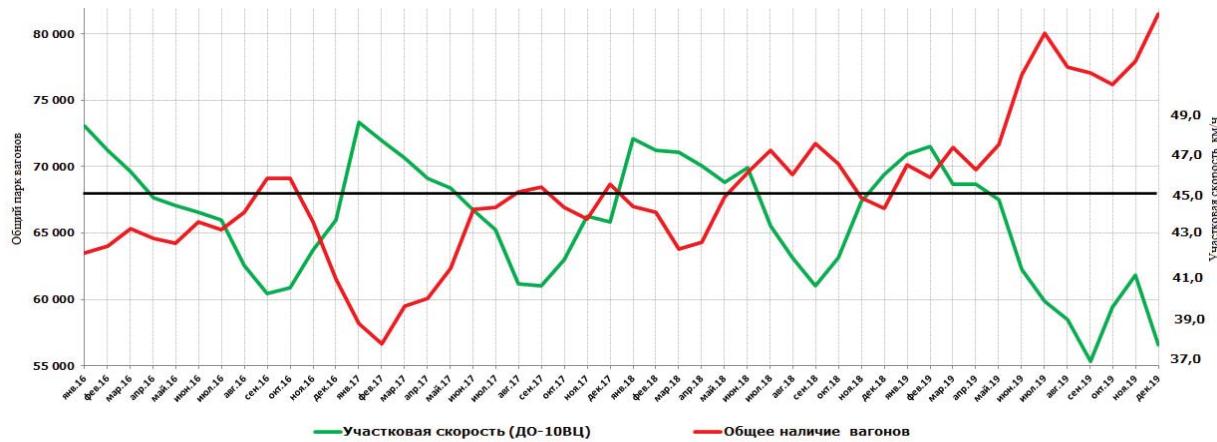


Рис. 3. Динамика наличия общего парка вагонов и участковой скорости

Последствие пандемии можно было наблюдать в 2020 г., падение погрузки составило 2,7%. После падения и влияния внешних факторов, системе нужен период восстановления для выхода на прежний уровень. Период восстановления мы могли наблюдать в 2021 г. (+ 3,2% к погрузке). Необходимо отметить, что система смогла выйти на допандемийный уровень и даже показала прирост по сравнению с 2019 г., подтвердив тренд на возрастание. И 2022 г., очередное внешнее воздействие на систему (СВО) показало падение погрузки на 3,7% (рис. 2).

При этом размеры общего парка вагонов, находящихся на инфраструктуре, оказывают непосредственное влияние на ряд показателей. На примере работы Восточного полигона можно увидеть неравномерность распределения вагонного парка между дорогами, входящими в его состав.

И эти показатели далеко не везде соответствуют плановым значениям. Как следствие, влияние общего парка вагонов на размеры участковой скорости. Чем больше общее количество вагонов, тем соответственно ниже участковая скорость (рис. 3).

Значительное отклонение от плановых показателей наглядно демонстрирует нестабильность прогнозных значений. В связи с этим, нужно выработать систему, при которой способы прогнозирования транспортных потоков будут взаимно согласованными и дополняющими друг друга. Кроме того, значительного развития требует теория системного прогнозирования, при которой неофициальные способы будут соединены с формальными, поскольку введение статистических способов не дает в полной мере отразить все изменения в структуре, которые происходят в транспортном комплексе Российской Федерации в согласовании с намечаемыми и реализуемыми планами.

Основу полигонной технологии составляет возможность интегрировать базы данных различных автоматизированных систем (АС) объектов железнодорожного транспорта для возможности построения перспективных планов перевозок, а также оперативного контроля с возможностью корректировок управлений решений. Разрабатываемые сегодня АС нового поколения должны позволять проводить не только мониторинг основных показателей, но и осуществлять многофакторный анализ эксплуатационной работы с возможностью построения перспективных целевых вариантов на расчетный период. Поставленная задача достаточно масштабна,

а ее решение поэтапными шагами продолжает реализовываться в отдельных модулях автоматизированных систем разных уровней.

В разработках АО «ИЭРТ» основа нового функционального состава строится на решениях интеграционного характера, при которых предусматривается обусловленность и взаимосвязь АС организации вагонопотоков (сокращенно – АСОВ) с автоматизированной системой «Паспорт наличной пропускной способности железных дорог ОАО «РЖД» (далее также – АС Паспорт НПС), а также с системами имитационного моделирования железнодорожных направлений и узлов АС ПРОГРЕСС и ее подсистемой – предиктивной бизнес-моделью грузовых перевозок (АС ПБМ) [2]. АС ПБМ встроена в систему сквозного производственного планирования и управления, позволяет осуществлять расчет производственно-экономических показателей филиалов ОАО «РЖД» на заданный период.

Однако, на практике достаточно сложно увидеть результаты работы данной системы и оценить качество прогнозов.

В качестве основных методов прогнозирования и планирования грузоперевозок можно отметить следующие: логистические, маркетинговые, оптимизационные (в процессе которых применяются компьютерные технологии), балансовые. В целях разработки перевозочных планов используются математико-экономические методы прогнозирования и планирования. Сам по себе процесс прогнозирования грузоперевозок состоит из множества этапов.

Для начала производится расчет общего объема грузовых перевозок. Для того чтобы определить потребности как предприятия, так и отрасли, нужно изучить воздействие на них объема и структуры продукции, с учетом характера связей между регионами, специализации и кооперации производства, макроэкономических показателей, размещения и развития инфраструктуры транспорта, размещения производства по регионам, организации снабжения и сбыта продукции.

Объем перевозок можно определить исходя из важнейших видов продуктов. Прогноз грузооборота осуществляется по 20-30 главным позициям: кокс, каменный уголь, руда, минерально-строительные материалы, нефть и нефтепродукты, лесные грузы, газ, зерно, черные металлы, крупа, минеральные удобрения и т.п. Вычисление объема других товаров производится при помощи расчетного метода. Из общего количества перевозок выделяются грузы, которые перевозятся в контейнерах.

Таблица 1

Информационные потоки в системе прогнозных моделей транспортной сети

Базы данных	Входная-выходная информация	Задачи	Вариации моделей	Модели
$P$ – множество предприятий, транспортных узлов, населенных пунктов и др.	$\{R(x(t))\} t=0, -1, -2, \dots$ $\{R(x(t))\} t=1, 2 \dots T$	Прогнозирование производства и потребления	1, 2	1. Модели тр спортивно-экономического баланса
$N$ – множество родов продукции предприятий, подлежащих транспортировке	$S(Z), Z, X(t), 1 \leq t \leq T$ $U(t), 1 \leq t \leq T$	Планирование и прогнозирование транспортных затрат	1, 2	2. Вычислительные модели общего равновесия (CGE-модели)
$X \in P \times N$ – множество, определяющее рассредоточение отраслей в регионе	$S(Z), Z, X(t), 1 \leq t \leq T$ $R(x(t)), 1 \leq t \leq T$	Прогнозирование строительства и размещения новых транспортных объектов	3, 7, 8	3. Модель линейной регрессии скользящего среднего (ARMA)
$R(x(t))$ – объем производства ( $x(t) > 0$ ) или потребления ( $x(t) < 0$ ) пунктов	$Q(U(t)), 1 \leq t \leq T$ $U(t), S(Z), Z,$ $R(x(t)), 1 \leq t \leq T$	Прогнозирование объемов производства и потребления	4, 5, 6, 8	4. Модели экспоненциального сглаживания
$Z \in P \times P \times V$ – общая транспортная сеть, $S(Z)$ – ресурсы транспортной сети, $V$ – различные виды транспорта	$E(U(t))$ $Q(U(t)), S(Z), Z, E(U(t))$	Прогнозирование транспортных потоков и их «скачков»	5, 6, 7	5. Модели экстраполяции тренда
$U(u(t))$ – удельные затраты на перевозки	$S(Z), Z, W(U(t), Z),$ $1 \leq t \leq T$ $W(U(t), Z), S(Z), Z$	Прогнозирование затрат на перевозки	6, 7, 8	6. Модели гистограммного прогнозирования
$Q(u(t))$ – грузопотоки на транспортной сети	$S(Z), Z(t), t \geq 1$ $\tilde{E}(U(t), Z), S(Z), Z$	Прогнозирование объемов грузопотоков сети	3, 4, 5, 6, 7, 8, 11	7. Модели многофакторной регрессии
$W(u(t))$ – транспортные потоки сети	$S(Z), Z(t), t \geq 1$ $W(U(t), S(Z), Z)$	Прогнозирование колебаний интенсивности транспортных потоков	8, 9, 11	8. Интегрированная модель авторегрессионного скользящего среднего (ARIMA)
$Q(u(t))$ – грузопотоки на транспортной сети	$S(Z), Z(t), t \geq 1$ $\tilde{E}(U(t), Z), S(Z), Z$	Прогнозирование объемов грузопотоков сети	3, 4, 5, 6, 7, 8, 11	7. Модели многофакторной регрессии
$W(u(t))$ – транспортные потоки сети	$S(Z), Z(t), t \geq 1$ $W(U(t), S(Z), Z)$	Прогнозирование колебаний интенсивности транспортных потоков	8, 9, 11	8. Интегрированная модель авторегрессионного скользящего среднего (ARIMA)
$S(Z+dZ)$ – ресурсы транспортной сети с учетом запасов	$S(Z), t > T$ $S(Z), t \leq 1$	Прогнозирование резерва пропускных способностей транспортной сети	10, 11, 3, 7, 8	10. Модели на основе четкой логики
$W(U(t), Z)$ – план маршрутизации транспортных потоков, $t$ -момент времени $Z(0)$ – состояние транспортной системы в исходный момент времени; $Z$ – состояние транспортной системы в исходный момент времени $t$	$S(Z), Z, W(U(t), Z)$ $S(Z), Z(t), t \geq 1$ $S(Z), Z, \tilde{E}(U(t), Z)$	Прогнозирование пропускных способностей транспортной сети	9, 10, 11, 3, 7, 8	9. Вероятностные модели прогноза
$C(S(Z), Z, W(U(t)))$ – вектор, характеризующий надежность транспортной сети	$S(Z+dz)$ $S(Z), W(U(t))$	Прогнозирование отказов транспортной сети	10, 11, 3, 7, 8	11. Модели на основе нейронных сетей

Для осуществления прогнозирования на современном этапе используют от 300 до 400 различных методов, разносторонне зарекомендовавших себя и применяемых для различных целей исследований.

К основным прогнозируемым транспортным показателям относят:

- грузооборот;
- объем перевозок согласно номенклатуре;
- средний срок доставки;
- дальность транспортировки.

В современной практике среди большого количества методов прогнозирования объема перевозок применяются:

- 1) формализованные (транспортная задача);
- 2) интуитивные (экспертные оценки).

Кроме того, используются комбинированные методы, с помощью которых можно получить более высокие показатели в расчетах.

Часто применяются методы:

1. Сетевого планирования и управления.
2. Укрупненных нормативов.
3. Макроэкономического прогнозирования спроса.
4. Балансовый.
5. Экономико-статистические.
6. Сценариев прогноза.
7. Технико-экономических расчетов.
8. Экстраполяции трендов и регрессионного анализа временных рядов.
9. Эвристические.
10. Экономико-математические
11. Моделирования транспортных процессов.

Данные методы, модели и информационные потоки представлены в сводной таблице 1.

### Зарубежный опыт

Применяемые методы прогнозирования на Западе базируются в основном на экспертных методах и сценарных прогнозах. Использование данных методов позволяет оценить вектор направленности происходящих изменений с разных сторон, заложив различные возможные варианты развития.

В работах бельгийских и американских ученых отражен класс эксперто-зависимых методов, которые применяются как для моделирования, так и для прогнозирования грузоперевозок. Данный класс характерен для задач планирования транспортного потока.

В процессе решения задачи прогнозирования перевозок грузов часто появляется проблема не только хранения, но и обработки большого объема информации, которая мало того, что является динамической, при этом не несет важных данных. Испанские ученые для решения данного вопроса рекомендуют создать краткое описание признаков данных для того, чтобы выделить информативные шаблоны, а последующее сравнение полученных прогнозов осуществлять с помощью модели авторегрессионного скользящего среднего (ARMA) [5, 13].

При этом необходимо отметить, что для построения моделей временных рядов с явно выраженной периодичностью, наиболее целесообразно использовать модель сезонного авторегрессивного интегрированного скользящего среднего (SARIMA). В работах китайских ученых предлагается рассматривать различные подходы к прогнозированию временных рядов в зависимости от их характера и дальности

прогноза (краткосрочный или долгосрочный) с применением искусственных нейронных сетей, методов и техник анализа Big Data. В европейских исследованиях отражены такие инструменты прогнозирования грузоперевозок, как PRIMEST REMOVE, который использовался для эталонного сценария развития транспортной сети ЕС, или TRANS-TOOLS – для стратегии развития транспортной сети ЕС iTren-2030 [6, 14].

Однако, ввод достаточно большого количества параметров предполагаемого развития сети в дальнейшем, при построении прогноза, может привести к значительной его неточности. Создание стратегических моделей, таких как модель грузоперевозок BasGoed, созданная в Нидерландах [11] для прогноза спроса на перевозки, позволяет осуществить прогноз развития всей транспортной системы на перспективу, заложив в качестве исходных данных варианты развития отдельных транспортных подсистем (автомобильной, железнодорожной, речной, морской и т.д.).

### Основные тренды прогнозов грузоперевозок в РФ

Кроме статистико-математических методов, которые указаны ранее, в РФ для осуществления прогнозов объемов перевозок грузов используются макроэкономические методы прогнозирования. Они представляют собой анализ метода баланса и поиск конкурентного равновесия. В последние годы российскими исследователями при выборе стандартного алгоритма прогнозов грузоперевозок, который учитывает влияние экзогенных факторов, анализируются базовые методы непараметрической регрессии, такие как: сглаживание сплайнами, скользящее среднее, ядерное сглаживание, авторегрессия.

Алгоритмы экспоненциального и ядерного сглаживания, модели Model Selection, ARIMA, SSA, Local Forecasting при использовании на сроках прогнозирования с различной протяженностью, по-разному демонстрируют свои возможности, зачастую с не самыми хорошими параметрами прогноза, что необходимо учитывать на первоначальном этапе прогнозирования при выборе последующей модели прогноза. Горизонт прогнозирования – это еще один аспект, который необходимо учитывать при решении проблем прогнозирования временных рядов. Методы прогнозирования обычно фокусируются на прогнозировании на один шаг вперед, то есть на прогнозировании следующего значения временного ряда. Иногда кто-то заинтересован в прогнозировании на много шагов в будущее. Эти задачи часто называют многоэтапным прогнозированием. Более высокие горизонты прогнозирования, как правило, приводят к более сложной задаче прогнозирования из-за возросшей неопределенности.

Теория комплексного прогнозирования, которая объединяет неофициальные и формальные методы, все еще нуждается в существенном развитии, поскольку введение статистических данных не дает в полном объеме отразить изменения в структуре, происходящие в транспортном комплексе Российской Федерации в согласовании с намечаемыми и реализуемыми планами.

В представленной работе для анализа были взяты ж.д.стыковые пункты Мариинск КРЖД, Тайшет ВСЖД, Петровский завод ЗабЖД и Архара ДВЖД. Динамика размеров передачи вагонов по одному из исследуемых стыков (Мариинск) представлена на рисунке 4. По данным графиков достаточно хорошо прослеживаются значительные отклонения фактических размеров вагонопотоков от плановых.



Рис. 4. Размеры передачи вагонов на Красноярскую ж.д. по междорожному стыку Мариинск в 2021-2022 гг.

Аналогичную картину можно увидеть при анализе сдачи поездов по другому исследуемому стыковому пункту Архара (рис. 5).



Рис. 5. Сдача поездов по стыковому пункту Архара за 6 месяцев 2022 г.

Анализ работы стыковых пунктов наглядно показывает, что вопросам развития планирования и прогнозирования транспортных потоков необходимо уделять больше внимания, а также осуществлять комплексный подход при составлении прогнозов.

В указанной работе была отражена идентификация моделей временного ряда колебаний потока вагонов, а также были предложены модели для того, чтобы в последующем построить прогноз. Кроме того, был использован комплексный подход, который тоже способствует решению проблемы прогнозирования объемов потоков вагонов.

Построение прогноза включает 5 стадий:

- пред прогнозная;
- аналитическая;
- сценарное прогнозирование;
- экспертная;
- корректировочная.

1. Пред прогнозный этап.

В рамках предшествующего прогноза осуществляется выгрузка исходных данных по объемам поступающего вагонопотоков, выгружаемая из автоматизированной системы организации вагонопотоков.

Для определения основных параметров временных рядов и построения линий тренда в качестве исходной информации принимаются исторические данные о поступлении вагонопотоков на стыковые пункты железных дорог Восточного полигона с различными временными периодами, предшествующими прогнозному:

- период 15 лет;
- период 10 лет;
- период 5 лет.

Для характеристик объемов вагонопотоков в качестве входной информации принимаются исторические данные периода 2015-2019 годы.

Для улучшения качества прогноза на расчетный период историческая база данных по вагонопотокам может быть взята на первоначальном этапе по каждой железной дороге, входящей в полигон, а в дальнейшем объединена для всего полигона в целом.

2. Аналитический этап.

Аналитический этап базируется на использовании комплекса связанных аналитико-статистических методов, являющихся основой для построения прогноза и позволяющих осуществить оценку изменения объемов вагонопотоков.

3. Ценарное прогнозирование.

Осуществляется анализ факторов как дальнего, так и ближнего окружения и определяется их влияние. Выбираются драйверы, которые оказывают наибольший уровень влияния на формирование базы грузов.

4. Этап экспертизы оценки.

В процессе реализации данного этапа осуществляется экспертная оценка расчетные параметры прогнозных значений вагонопотоков. На основе величин изменения вагонопотоков, спрогнозированных экспертами, а также их веса (значимости) для каждого из сценариев определяют взвешенные прогнозные величины изменения вагонопотоков, поступающих на стыковые пункты на расчетный период.

5. Корректировка прогнозных значений вагонопотоков.

В ходе данного этапа осуществляется корректировочное моделирование изменения вагонопотоков, поступающих на стыковые пункты железных дорог Восточного полигона,

согласно полученных прогнозных значений на основе исторических данных, и уточнения прогноза изменения вагонопотоков с соответствующей заменой исходных данных для составления прогноза (с ежегодным сдвигом исходного и прогнозного периода на 1 год).

Для анализа были взяты стыки ж.д. ВП Мариинск, Тайшет, Петровский Завод и Архара. Первоначальный расчет был проведен на исторических данных за 5 лет (графики исследуемых временных рядов представлены на рисунке 6) с построением прогноза на 2019 г.

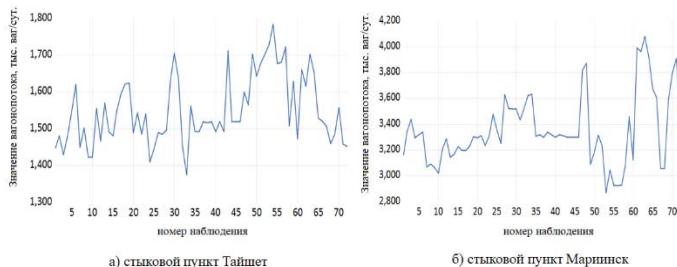


Рис. 6. Графики исследуемых временных рядов

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

Адекватность модели была доказана. В результате ее построения была осуществлена корректировка результатов прогнозов на базе данных экспертов [7].

Итогом корректировки является сопоставление модели и ряда с экспертной корректировкой, представленной на рисунке 7. Модель, которая была построена методом сезонности и тренда, – максимально точная, у нее наименьшее значение среднеквадратического отклонения [8].

После сравнения реальных объемов погрузки в адрес дальневосточных портов, по итогам 2019 года был сделан вывод о состоятельности прогноза.

Результатом проведенного анализа является разработанный программный код (рис. 8), позволяющий в автоматическом режиме проводить анализ изменений вагонопотоков, поступающих на стыковые пункты железных дорог Восточного полигона, за расчетный период [9].

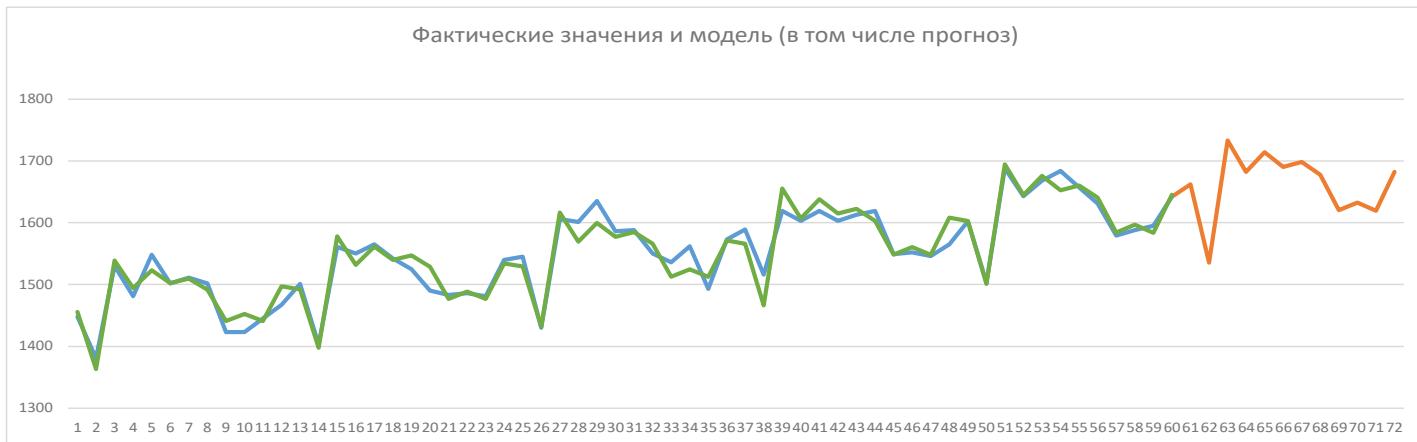


Рис. 7. Графики сопоставления фактических значений ряда со значениями, полученными с помощью прогнозной модели (для исследуемых значений по стыковому пункту Тайшет)

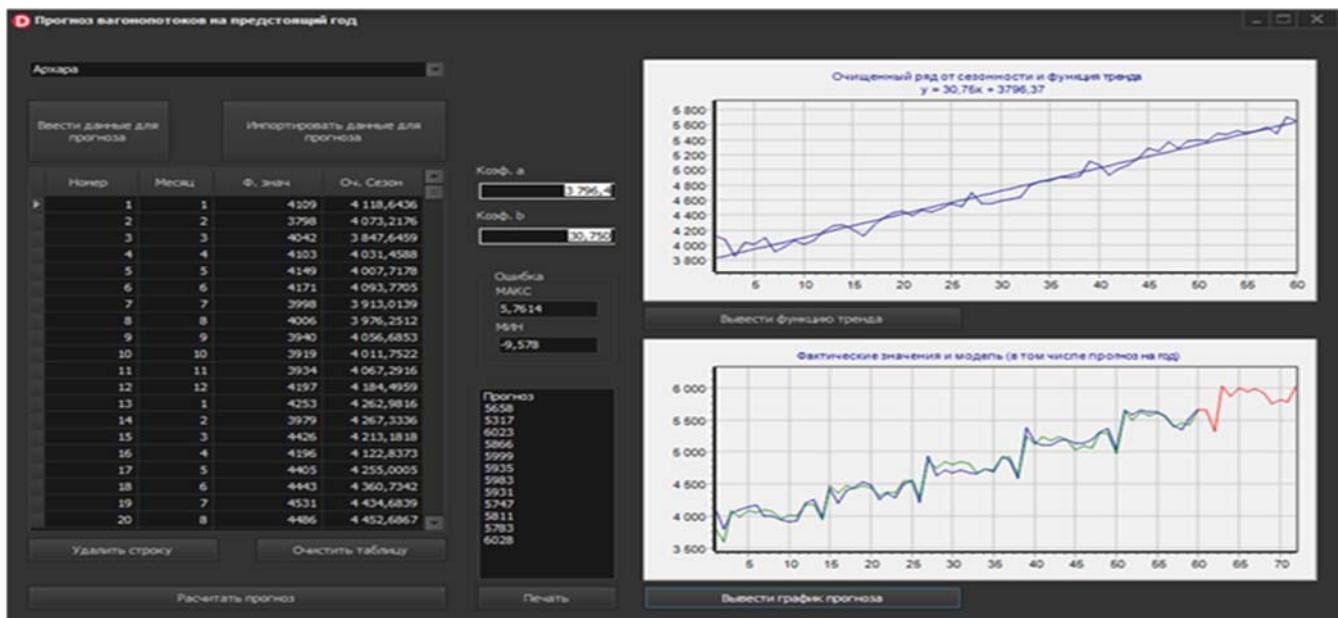


Рис. 8. Интерфейс диалогового окна программы расчета вагонопотоков на прогнозный период

Необходимо отметить, что построение прогноза вагонопотоков – первоначальный этап прогнозирования, на основе которого в дальнейшем можно осуществить:

1. прогноз подвода локомотивов под поезда (в расчете на пару поездов) по стыкам ж.д.;

2. прогноз баланса локомотивного парка с определением возможного резерва, используемого в дальнейшем при подъеме «брошенных» или «отставленных от движения» поездов;

3. прогноз отказов технических средств;

4. прогноз погрузки на предстоящий период.

По итогам проводимого исследования при построении комплексной модели прогноза можно сделать ряд выводов:

1. Модель, построенная в нормальных (стабильных) условиях по историческим данным, дает достаточно точный прогноз;

2. Последние четыре года показали, что на систему могут значительно влиять другие факторы, не связанные с развитием самой системы;

3. Для учета таких факторов в модель прогноза необходимо вводить дополнительные коэффициенты и критерии оценки прогноза;

4. В дальнейшем при построении модели прогноза необходимо осуществить переход к искусственным нейронным сетям, позволяющим заложить больше параметров на входе и учитывающим скрытые связи;

5. Проводить построение прогнозов оптимистичных и пессимистичных сценариев и ориентироваться на прогнозный «коридор» при принятии решений развития системы в перспективе.

## Заключение

Несмотря на разнообразие методов и моделей прогнозирования, система построения комплексных прогнозов в транспортной отрасли РФ нуждается в существенном развитии. Данное развитие предполагает интегрированное взаимодействие отдельных транспортных подсистем (автомобильной, железнодорожной, речной, морской и т.д.), а также разработку общероссийского межотраслевого баланса, что будет способствовать в дальнейшем построению качественных прогнозных моделей для каждой из подсистем и транспортной системы в целом.

Для большей части сети дорог характерна значительная внутрисуточная и внутримесячная неравномерность поездной и грузовой работы, причем в отдельные периоды объемы работ приближаются к проектным мощностям объектов управления, поэтому учесть конкретную обстановку на полигоне планирования в технологически ограниченное время в условиях многочисленных ограничений возможно только при диалоговом общении человека и машины.

Для планирования показателей эксплуатационной работы необходимо знать те последствия, которые вызовут управляющие воздействия на систему. Ответ на этот вопрос дает расчет оперативного прогноза показателей поездной и грузовой работы, учитывающий конкретно складывающуюся обстановку, использующий реальную информационную базу вычислительных центров (ДВЦ и ГВЦ). Таким образом, задача оперативного прогноза должна решаться на первом этапе составления плана, результаты прогноза являются информационной базой задач оперативного планирования и управления перевозочным процессом.

Применение прогнозных моделей направлено не только на получение точного значения прогнозируемого показателя, а в первую очередь обеспечивает понимание и видение транспортного процесса в перспективе, что в последующем дает

возможность принятия качественных управленческих решений.

Всё вышеуказанное будет способствовать увеличению уровня не только планирования, но также анализа развития и функционирования ж.д. В полный спектр мероприятий входит как возможность построения прогнозных моделей для производственного блока холдинга «РЖД», так и возможность актуализации структуры эксплуатационных показателей сети.

## Литература

1. Кужель А. Л., Шапкин И. Н., Вдовин А. Н. Эффективность продвижения вагонопотоков при переходе на полигонные технологии // Железнодорожный транспорт. 2016. № 8. С. 4-10. EDN WIAAGD.

2. Бородин А. Ф., Панин В. В., Рубцов Д. В., Щепанов С. Л. Развитие и интеграция информационных технологий управления перевозочным процессом при создании Цифровой Генеральной схемы развития сети ОАО "РЖД" в рамках проекта "Цифровая железная дорога" // Бюллетень учченого совета АО "ИЭРТ". 2021. № 6. С. 5-14. EDN ANZOWN.

3. Бородин А. Ф., Панин В. В., Лаханкин Е. А. и др. О предiktivnoy biznes-moedeli zheleznodorozhnykh pererovozok OAO "RJD" // Bullettenev uchenogo soveta AO "IERT". 2020. № 5. С. 5-14. EDN DEMPNM.

4. Куллман Б. С. Модель конкуренции железнодорожных и грузовых автомобилей на рынке междугородних перевозок: диссертация. Массачусетс: Массачусетский технологический институт, кафедра гражданского строительства, 1973. 318 с.

5. Гульельминетти П., Лейвраз Дж.-П., Ривье Р. Планирование грузовых перевозок: модель оптимизации трансальпийской железнодорожной сети. Швейцарская конференция по транспортным исследованиям. 2001. 20 с.

6. Бедрин Д. С. Трансформация методологии планирования и прогнозирования перевозок грузов на железнодорожном транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 4. С. 5-23.

7. Маловецкая Е. В., Мозалевская А. К. Возможности применения моделей ARIMA при построении прогнозных значений вагонопотоков // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17, № 1. С. 33-41. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-1-33-41. EDN CXMLBK.

8. Маловецкая Е. В. Возможности корректировки вагонопотоков в адрес морских портов по средствам имитационного моделирования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 10. С. 36-42. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-10-36-42. EDN ZLQWJE.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661676 Российской Федерации. Программа для определения технико-эксплуатационных показателей работы стыковой железнодорожной станции на основе использования статистических данных и варианты прогнозных сценариев колебаний поступающих вагонопотоков : № 2022660561 : заявл. 07.06.2022 : опубл. 24.06.2022 / Е. В. Маловецкая, А. В. Супруновский, А. К. Мозалевская; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения». EDN SJVAYJ.

10. Qadrini L., Asrirawan A., Mahmudah N., Fahmuddin M., Amri I. F. Forecasting bank Indonesia currency inflow and outflow using ARIMA, time series regression (TSR), ARIMAX, and NN approaches in lampung // Journal Matematika, Statistika dan Komputasi, vol. 17, no. 2, pp. 166-177, 2021.

11. Gamboa J. Deep learning for time series analysis // Preprint arXiv arXiv:1701.01887. 2017.

12. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2015.

13. Fildes R., Harvey A. C., West M., Harrison J. Forecasting, structural time series models and the kalman filter // Journal of the Operational Research Society, vol. 42, no. 11, p. 1031, 1991.

14. Lim B., Zohren S. Time-series forecasting with deep learning: a survey // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, vol. 379, no. 2194, Article ID 20200209, 2021.

15. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: pretraining of deep bidirectional transformers for language understanding // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Minneapolis, MIN, USA, June 2019.

16. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural Computation, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 1997.

17. Bai S., Kolter J. Z., Koltun V. An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling. 2018, <https://arxiv.org/abs/1803.01271>

## IMPROVING THE QUALITY OF TRANSPORTATION BASED ON THE COMPLEX PREDICTIVE MODELS CONSTRUCTION OF INFRASTRUCTURE LOADING

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

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

### **Abstract**

Accurate construction of time series forecasts is a key element in the system of support and management decision-making. This article presents a method of multi-stage system forecasting of time series. The effectiveness of the proposed method is experimentally justified by the example of the arrival of car traffic at the junction points of railways. The most important contribution is the introduction of a system forecast, in which the methods of forecasting traffic flows will be mutually consistent and complementary, since the use of statistical methods alone will not fully reflect all the changes that occur in the transport complex of the Russian Federation. This hybrid combination provides more competitive forecasts compared to other methods. Moreover, such a hybrid model is easier to interpret by decision makers when modeling trend series..

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

### **References**

1. A. L. Kuzhel, I. N. Shapkin, A. N. Vdovin. Efficiency of car traffic promotion during the transition to landfill technologies. *Rail transport*. 2016. No. 8, pp. 4-10.
2. A. F. Borodin, V. V. Panin, D. V. Rubtsov, S. L. Shchepanov. Development and integration of information technologies for the management of the transportation process when creating a Digital General Scheme for the development of the network of JSC "Russian Railways" within the framework of the Digital Railway project. *Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"*. 2021. No. 6, pp. 5-14.
3. A. F. Borodin, V. V. Panin, E. A. Lokhankin et al. On the predictive business model of railway transportation of JSC "Russian Railways". *Bulletin of the Scientific Council of JSC "IERT"*. 2020. No. 5, pp. 5-14.
4. B. S. Kullman. Model of competition of rail and trucks in the market of intercity transportation: dissertation. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, 1973. 318 p.
5. P. Guglielminetti, J.-P. Leivraz, R. Rivier. Cargo transportation planning: a model for optimizing the Transalpine railway network. *Swiss Conference on Transport Research*. 2001. 20 p.
6. D. S. Bedrin. Transformation of methodology of planning and forecasting of cargo transportation on railway transport. *Bulletin of the results of scientific research*. 2020. No. 4, pp. 5-23.
7. E. V. Malovetskaya, A. K. Mozalevskaya. Possibilities of using ARIMA models in constructing forecast values of car traffic. *T-Comm*. 2023. Vol. 17, No. 1, pp. 33-41. DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-1-33-41
8. E. V. Malovetskaya. Possibilities of correcting car traffic to seaports by means of simulation modeling. *T-Comm*. 2022. Vol. 16, No. 10, pp. 36-42. DOI 10.36724/2072-8735-2022-16-10-36-42
9. Certificate of state registration of the computer program No. 2022661676 Russian Federation. The program for determining the technical and operational performance of a butt railway station based on the use of statistical data and variant forecast scenarios of fluctuations in incoming car traffic : No. 2022660561 : application 07.06.2022 : publ. 24.06.2022 / E. V. Malovetskaya, A.V. Suprunovsky, A. K. Mozalevskaya; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk State University of Railways messages".
10. L. Qadrini, A. Asrirawan, N. Mahmudah, M. Fahmuddin, and I. F. Amri, "Forecasting bank Indonesia currency inflow and outflow using ARIMA, time series regression (TSR), ARIMAX, and NN approaches in lampung," *Journal Matematika, Statistika dan Komputasi*, vol. 17, no. 2, pp. 166-177, 2021.
11. J. Gamboa. Deep learning for time series analysis. Preprint arXiv arXiv:1701.01887. 2017.
12. G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2015.
13. R. Fildes, A. C. Harvey, M. West, and J. Harrison, "Forecasting, structural time series models and the kalman filter," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 42, no. 11, p. 1031, 1991.
14. B. Lim and S. Zohren, "Time-series forecasting with deep learning: a survey," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, vol. 379, no. 2194, Article ID 20200209, 2021.
15. J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, "BERT: pretraining of deep bidirectional transformers for language understanding," *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, Minneapolis, MIN, USA, June 2019.
16. S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory," *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 1997.
17. S. Bai, J. Z. Kolter, and V. Koltun, "An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling," 2018, <https://arxiv.org/abs/1803.01271>.

### **Information about authors:**

***Ekaterina V. Malovetskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia***

***Anna K. Mozalevskaya, Applicant, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia***

# NEW QUASI-OPTIMAL ALGORITHMS OF ANTENNA SELECTION WITH LOW COMPLEXITY

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-47-56

**Mikhail G. Bakulin,**  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [m.g.bakulin@gmail.com](mailto:m.g.bakulin@gmail.com)*

**Vitaly B. Kreyndelin,**  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [vitkrend@gmail.com](mailto:vitkrend@gmail.com)*

**Mikhail L. Khazov,**  
*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [mikekhazov@mail.ru](mailto:mikekhazov@mail.ru)*

**Manuscript received** 08 June 2023;  
**Accepted** 07 July 2023

**Keywords:** MIMO communication system, spectral efficiency, bit error-rate, antenna selection, channel capacity, radio path, selection criteria, computational complexity

**Classical MIMO system model without antenna selection and MIMO system model with antenna selection are presented. New quasi-optimal low complexity algorithms of antenna selection are proposed for MIMO communication systems. These algorithms allow to achieve high spectral efficiency without significant increase of complexity. The statistical modeling method is used to evaluate the efficiency of the proposed algorithms and to compare their characteristics with the characteristics of the known algorithms of full and partial combined selection. The computational complexity of the proposed algorithms is evaluated and been compared with the computational complexity of the well-known algorithms of full and partial combined selection in low-order and high-order MIMO system configurations. The possibility of practical application of new quasi-optimal algorithms in real communication systems is clearly demonstrated by comparative analysis of error-rate performance in conjunction with an assessment of computational complexity. These applications provide significantly improving of the energy performance of MIMO communication systems and it allows to improve quality characteristics of communications for subscribers or could be exchanged to the lower price of construction and maintenance of real communication systems.**

#### Information about authors:

**Mikhail G. Bakulin**, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Associate Professor, Moscow, Russia

**Vitaly B. Kreyndelin**, Moscow Technical University of Communications and Informatics, chief of the Department, Moscow, Russia

**Mikhail L. Khazov**, Moscow Technical University of Communications and Informatics, post-graduate student, Moscow, Russia

#### Для цитирования:

Бакулин М.Г., Крейндельин В.Б., Хазов М.Л. Новые квазиоптимальные алгоритмы автоворыбора антенн с низкой вычислительной сложностью // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 47-56.

#### For citation:

Bakulin M.G., Kreyndelin V.B., Khazov M.L. New quasi-optimal algorithms of antenna selection with low complexity. T-Comm, vol. 17, no.7, pp. 47-56.

## Introduction

Wireless communication systems with many transmit and many receive antennas (Multiply-Input-Multiply-Output – MIMO) have recently attracted serious attention from developers of promising communication systems due to their advantages in capacity and spectral efficiency. The advantages of using MIMO technology communication systems increase with an addition of the number of receive and/or transmit antennas compared to traditional communication systems with one transmitting and one receiving antenna (Single-Input-Single-Output – SISO). However, the increasing at the same time hardware complexity is a key limiting factor. A large number of radio frequency paths are required in order to obtain good system performance, but at the same time there is a high cost and large size of communication systems equipment (user terminals, base stations).

The article proposes new algorithms of antenna selection at the transmitting and receiving sides which allows to reduce the complexity of the system while preserving the main advantages of MIMO technology. For a limited set number of radio frequency chains, receive and/or transmit antennas could be selected and optimally assigned. The proposed algorithms allow to achieve high spectral efficiency without significant increase of complexity, reduce the size of devices, increase of their energy efficiency by reducing the number of active elements.

A large number of antenna selection algorithms have known up to now [1], [2], [3]. Some of the known approaches are based on maximizing the signal-to-noise ratio, while others are based on maximizing of channel capacity.

Well-known works in this area include simple algorithms for antenna selection [4], as well as more complex algorithms [5], [6], [7] which have slightly improved characteristics, but at the same time significantly higher computational complexity. For the MIMO communication system new quasi-optimal low complexity algorithms of antenna selection compared to known algorithms, and with the characteristics are close to the characteristics of the optimal (full combined selection) algorithms are proposed.

### 1. Classical MIMO system model without antenna selection

Assume that there are  $M$  receive antennas and  $N$  transmit antennas in the MIMO communication system. Let's also assume that the number of receive radio chains is equal to  $L$ , and the number of transmit radio chains is equal to  $P$ .

Consider a situation with Rayleigh fadings and Gaussian noise in the communication channel. When all transmitting and receiving antennas ( $L = M$  and  $P = N$ ) are involved, the model of the received signal in the MIMO communication system has the following form [9], [10]:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{\rho}{N}} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \boldsymbol{\eta}, \quad (1)$$

where  $\mathbf{y}$  – is  $M$ -dimensional column-vector of complex counts of received signals;  $\mathbf{s}$  – is  $N$ -dimensional vector of transmitted QAM-symbols;  $\rho$  – average signal-to-noise ratio (SNR) in each receive antenna;  $N$  – amount of transmit antennas;  $\boldsymbol{\eta}$  – is  $M$ -dimensional column-vector of complex numbers with zero mathematical expectation of additive white Gaussian noise with a unit correlation

matrix;  $\mathbf{H}$  – is  $M \times N$  – dimensional complex matrix of MIMO communication channel:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & h_{ij} & \dots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

where  $h_{ij}$  – is channel coefficient between  $i$ 's receive antenna and  $j$ 's transmit antenna. We will assume that the coefficients  $h_{ij}$  are uncorrelated complex Gaussian random variables with zero mathematical expectations and with equal to one variances. Let's here and further consider the MIMO system without spatial correlation of fading, as well as in the absence of direct sight between all transmit and receive antennas (only reflected signals are received) [9], [10].

### 2. MIMO system model with antenna selection

Consider MIMO system where selection of antennas is present both on the transmitting side ( $P < N$ ) and on the receiving side ( $L < M$ ). Follows that only  $P$  antennas uses from all set amount of  $N$  transmit antennas and  $L$  antennas uses from all set amount of  $M$  receive antennas. Therefore, instead of  $N$  active transmitting radio chains for antenna selection system uses only  $P$  of these radio chains, and instead of  $M$  active receiving radio chains uses only  $L$  of these chains.

Expression for the model of the received signal in the MIMO communication system has the following form [1], [8], [11], [12], [13]:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \sqrt{\frac{\rho}{P}} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \mathbf{s} + \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \quad (3)$$

where  $\tilde{\mathbf{y}}$  – is  $L$  – dimensional column-vector of receive signal which contains complex samples of received signals from all selected antennas at receiver side;  $\tilde{\mathbf{H}}$  – is  $L \times P$  – dimensional complex submatrix of MIMO channel.  $\tilde{\mathbf{H}}$  matrix – it is submatrix of full channel matrix  $\mathbf{H}$ . Matrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  consist of selected elements of matrix  $\mathbf{H}$ , corresponding to selection of some subset  $P$  from  $N$  available transmit antennas and of some subset  $L$  from  $M$  available receive antennas.

To select the matrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  from full matrix of the channel  $\mathbf{H}$ , it is necessary to use the selection criteria (criteria of optimality), which allows to select the best submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  according to this criteria. In fact, according to a given criteria of optimality, the selected submatrices  $\tilde{\mathbf{H}}$  are compared. Finally we get best combination of subset  $P$  from  $N$  available transmit antennas and subset  $L$  from  $M$  available receive antennas, according to a given criteria of optimality.

A number criteria of optimality are known. These include the following: the maximum of capacity criteria, the maximum of SNR criteria, and the minimum trace of the correlation matrix of information symbols demodulation errors [4], [8].

The expression for the maximum of capacity criteria (MaxCapacityFull):

$$C_{\max} = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} \log \det \left( \mathbf{1} + \frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \right). \quad (4)$$

The expression for the maximum of the Frobenius norm criteria (the maximum of SNR criteria, FrobeniusFull):

$$\max_{\tilde{\mathbf{H}}} \left\| \tilde{\mathbf{H}} \right\|_F^2 = \max_{\tilde{\mathbf{H}}} \sum_{m=1}^L \sum_{n=1}^P \left| \tilde{h}_{mn} \right|^2. \quad (5)$$

The minimum trace of the correlation matrix of information symbols demodulation errors criteria (MinTrVmmse, MinTrVzf) is aimed at selection such a submatrix of the channel, in which the minimum summary variance of errors in the evaluation of demodulated information symbols is achieved.

$$\min_{\tilde{\mathbf{H}}} \text{tr}(\mathbf{R}) = \min_{\tilde{\mathbf{H}}} \text{tr} \left( \left( \frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \cdot \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{1} \right)^{-1} \right). \quad (6)$$

### 3. Full combinations or optimal antenna selection algorithm

The optimal algorithm of antenna selection in the MIMO system assumes a complete reselection of all possible sets of submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  inside the matrix  $\mathbf{H}$ . The number of all variants of the submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  is [16]:

$$Q(N, P, M, L) = C_N^P C_M^L = \frac{N!}{(N-P)! P!} \cdot \frac{M!}{(M-L)! L!} \quad (7)$$

In

Table 1 is demonstrated the results of counting the number of all possible variants of submatrices  $\tilde{\mathbf{H}}$  with a complete reselection for a various values of equal total number of transmit and receive antennas ( $N = M$ ) and a various values of equal number of radio paths or in other words selected by the criteria of optimality of transmit and receive antennas ( $L = P$ ).

Table 1

The number of submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  with an optimal antenna selection

$N = M$	8	12	16	24
$L = P$	4	6	8	12
$Q(N, P, M, L)$	$4,9 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^8$	$7,3 \cdot 10^{12}$

From

Table 1, it is obvious that with an increase in the number of antennas, the number of all possible variants of submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  rises rapidly. So it is impossible to implement the optimal algorithm of antenna selection even with a relatively several number of antennas.

Therefore an approach of using an optimal antenna selection algorithm in real conditions, starting with MIMO 16(8)x16(8), is simply impossible due to the rapid growth in the volume of calculations (computational complexity).

Than consider some of the well-known antenna selection algorithms which do not require a complete selection of all the variants of the reselected submatrix.

### 4. Well-known quasi-optimal algorithms of antenna selection

#### NSA algorithm.

A simple quasi-optimal antenna selection algorithm is well-known. In the literature it is called NSA (Norm based Antenna Selection). Antenna in NSA are selected using criteria of the maximum Euclidean norm of the columns and then rows of the communication channel matrix [1], [4].

A submatrix  $\hat{\mathbf{H}}$  which has a  $M \times P$  dimension and are containing  $P$  columns with maximal Euclidean norms is selected from the full channel matrix  $\mathbf{H}$ , while matrix  $\hat{\mathbf{H}}$  still having the same number of rows  $M$  as in the full channel matrix  $\mathbf{H}$ . Then, from the submatrix  $\hat{\mathbf{H}}$ , the target submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  is selected, which has a  $L \times P$  dimension and contains  $L$  rows with maximal Euclidean norms.

So quasi-optimal antenna selection algorithm NSA uses Euclidean norm as a criteria of optimality. Algorithm NSA cannot use other criteria of optimality.

In addition to the mentioned simplest version of the NSA algorithm, iteration modifications of NSA algorithm are also well-known both with a decrease (Iteration Decrement) and with an increase (Iteration Increment) in the dimension of the reselected matrix [17], [19], [20].

#### IDNSA iterative algorithm

Initial conditions:  $\tilde{\mathbf{H}}^0 = \mathbf{H}$ .

Step 1. Euclidean norms are calculated for all columns of the matrix  $\mathbf{H}$ .

Step 2. Among  $\mathbf{h}_j, j = 1 \dots N$  is selected one column with a minimal Euclidean norm  $\|\mathbf{h}_{\min}\| = \min_{1 \leq j \leq N} \|\mathbf{h}_j\|$  and it is excluded from matrix  $\mathbf{H}$ . So we obtain  $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}$  matrix with  $M \times (N-1)$  dimension.

Step 3. Euclidean norms are calculated for all rows of the matrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}$

Step 4. Among  $\mathbf{h}_i, i = 1 \dots M$  is selected one row with a minimal Euclidean norm  $\|\mathbf{h}_{\min}\| = \min_{1 \leq i \leq M} \|\mathbf{h}_i\|$  and it is excluded from matrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}$ . As a result we obtain  $\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}$  matrix with  $(M-1) \times (N-1)$  dimension.

Repeat Steps 1-4, but using a matrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(z)}$  instead of a matrix  $\mathbf{H}$ . The process of excluding rows and columns is repeated until we get an aimed matrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  of  $L \times P$  dimension.

#### IINSA iterative algorithm

Initial conditions: equal amount of antennas at receive and at transmit sides. Initial matrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(0)} = [\ ]$ , so it is empty matrix without any of elements with  $0 \times 0$  dimension.

Step by step the dimension of initial matrix is increased, while before the required aimed  $\tilde{\mathbf{H}}$  submatrix with  $L \times P$  dimension will be formed. Thus, a square matrix  $\hat{\mathbf{H}}_{target}^{(k)}$  should be formed at the  $k$ 's step.

Step 1. Pick the maximal by module element  $h_{i(1)j(1)}$  from  $\mathbf{H}$  matrix. In fact, this means selection of one transmit and one receive antenna with the maximal of transmission coefficient between them.

Matrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}$  consist of selected element  $h_{i(1)j(1)}$ , and has a dimension  $1 \times 1$ .

$$\tilde{\mathbf{H}}^{(1)} = \left[ h_{i(1)j(1)} \right] = \left[ \max_{1 \leq i \leq M} \max_{1 \leq j \leq N} |h_{ij}| \right]. \quad (8)$$

Step 2. Select from matrix  $\mathbf{H}$  submatrix  $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$ , with  $2 \times 2$  dimension. Submatrix  $\hat{\mathbf{H}}^{(2)} = \begin{bmatrix} h_{i(1)j(1)} & h_{i(1)j(2)} \\ h_{i(2)j(1)} & \hat{h}_{i(2)j(2)} \end{bmatrix}$  includes selected at the first step element  $h_{i(1)j(1)}$ , which actually added by element  $\hat{h}_{i(2)j(2)}$  selected at the second step from matrix  $\mathbf{H}$  and bordered by elements  $h_{i(1)j(2)}, h_{i(2)j(1)}$  of matrix  $\mathbf{H}$ . Submatrix  $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$  will be find by reselecting through all possible combinations of second-order submatrix  $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$  from the full matrix of channel  $\mathbf{H}$ , each of it contains an element  $h_{i(1)j(1)}$  and the Frobenius norm for it is maximal  $\|\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}\|_F = \max \|\hat{\mathbf{H}}^{(2)}\|_F$ .

Thus, in Step 2, one more transmitting and one receiving antenna is selected. In Step 3, we use the logic described in Step 2. As a result, we select one more transmitting and one receiving antenna.

Next steps up to  $k$ 's, where  $k = L = P$ , repeat iterative selection of elements from the matrix of channel  $\mathbf{H}$ . The selected matrix  $\hat{\mathbf{H}}_{target}^{(k)}$  will be the formed required matrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  with  $L \times P$  dimension, where  $L = P$ .

## 5. New quasi-optimal low complexity antenna selection algorithms

### New quasi-optimal iterative algorithm IIZF

IIZF (Iterative Incremental Zero Forcing algorithm), an iterative algorithm with a step-by-step increase in the dimension of the formed matrix of channel and as a selection criterion minimum trace of the correlation matrix of errors of demodulation of information symbols.

Initial conditions:  $\hat{\mathbf{H}}^{(0)} = [\ ]$ , so it is empty (without any elements) matrix with  $0 \times 0$  dimension.

Step-by-step increase the dimension of the initial matrix until the required submatrix  $\tilde{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{H}}_{target}^{(k)}$  is formed with  $L \times P$  dimension. Thus, a square matrix  $\hat{\mathbf{H}}_{target}^{(k)}$  is formed at the  $k$ 's step based on calculation and comparison the values of the antenna selection criterion of optimality for each of the available at current step submatrix.

First step of the algorithm coincides with the first step of well-known algorithm IINSA, represented in the section 4. From full

matrix of channel  $\mathbf{H}$  select maximal by module  $h_{i(1)j(1)}$  element. In other words, will be selected pair of antennas on transmit and receive with a maximal transmission ratio. Element  $h_{i(1)j(1)}$  is formed matrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)} = \hat{\mathbf{H}}_{target}^{(1)}$  with  $1 \times 1$  dimension.

At the second Step, taking into account criterion of optimality the submatrix  $\hat{\mathbf{H}}^{(2)} = \begin{bmatrix} h_{i(1)j(1)} & h_{i(1)j(2)} \\ h_{i(2)j(1)} & \hat{h}_{i(2)j(2)} \end{bmatrix}$  with  $2 \times 2$  dimension are sequentially reselected from the full matrix of channel and sorted.  $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$  contains selected at the first step element  $h_{i(1)j(1)} = \tilde{\mathbf{H}}^{(1)}$ . Target submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(2)} = \hat{\mathbf{H}}_{target}^{(2)}$  is find from full matrix of channel  $\mathbf{H}$  by reselection through all existing combinations of second-order submatrix  $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$ , each of it contains element  $h_{i(1)j(1)}$ . Selection condition of submatrix  $\hat{\mathbf{H}}^{(2)}$  is:

$$\{i(2)j(2)\} = \arg \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i \neq i(1)}} \min_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j \neq j(1)}} f(\hat{\mathbf{H}}^{(2)}), \quad (9)$$

where  $f(\hat{\mathbf{H}}^{(2)})$  – the trace of the correlation matrix of estimation errors  $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(2)}$ , determined by the formula:

$$f(\hat{\mathbf{H}}^{(2)}) = \text{tr}(\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(2)}) = \text{tr}\left[\left(\hat{\mathbf{H}}^{(2)} \hat{\mathbf{H}}^{(2)} + 2\sigma_{\eta}^2 \cdot \mathbf{1}\right)^{-1}\right]. \quad (10)$$

As a result of the described actions, another transmits and receives antenna will be selected and a matrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(2)} = \hat{\mathbf{H}}_{target}^{(2)} = \begin{bmatrix} h_{i(1)j(1)} & h_{i(1)j(2)} \\ h_{i(2)j(1)} & h_{i(2)j(2)} \end{bmatrix}$  will be formed.

According to the formulated rule, at the step  $n - 1$  will be formed submatrix

$$\tilde{\mathbf{H}}^{(n-1)} = \hat{\mathbf{H}}_{target}^{(n-1)} = \begin{bmatrix} h_{i(1)j(1)} & \dots & h_{i(1)j(n-1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ h_{i(n-1)j(1)} & \dots & h_{i(n-1)j(n-1)} \end{bmatrix}.$$

Selection condition of element of matrix  $\mathbf{H}$  at step  $n$  is:

$$\{i(n)j(n)\} = \arg \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i \neq i(1) \\ \dots \\ i \neq i(n-1)}} \min_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j \neq j(1) \\ \dots \\ j \neq j(n-1)}} f(\hat{\mathbf{H}}^{(n)}), \quad (11)$$

where  $f(\hat{\mathbf{H}}^{(n)})$  – the trace of the correlation matrix of estimation errors  $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(n)}$ , determined by the formula similar to (10):

After sorting through all possible combinations, the work of the IIZF algorithm will be completed and the target matrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  with  $L \times P$  dimension, where  $L = P$  will be formed.

### New quasi-optimal iterative algorithm IDZF

IDZF (Iterative Decremental Zero Forcing algorithm), an iterative algorithm with a step-by-step decrease in the dimension of

the matrix of channel until formed target submatrix started from full matrix of channel and with a selection criterion minimum trace of the correlation matrix of errors of demodulation of information symbols

Consider new antenna selection algorithm based on iteration decrement of dimension of matrix  $\mathbf{H}$ .

Initial conditions:  $\tilde{\mathbf{H}}^{(0)} = \mathbf{H}$ . Inside of matrix  $\mathbf{H}$  by turns exclude one row and one column at the same time, then calculate the values of the antenna selection criterion of optimality for each of the available submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(1)}$  with  $(M-1) \times (N-1)$  dimension, remember the best of got selection.

After selection of target submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}_{target}^{(1)}$  with a best calculated criterion of optimality value, necessary repeat all upper described actions for submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}_{target}^{(1)}$  by turns exclude from analyzes one row and one column at the same time, after that to calculate values of the antenna selection criterion of optimality for each of the available submatrix  $\tilde{\mathbf{H}}^{(2)}$  with  $(M-2) \times (N-2)$  dimension, putting into a memory the best selection  $\tilde{\mathbf{H}}_{target}^{(2)}$ .

Excludes rows and columns in the matrix  $\mathbf{H}$  and search for the submatrix with the best criterion of optimality value of the form (10) do until the dimension of the selected submatrix becomes equal  $L \times P$ , where  $L = P$ , and the matrix  $\tilde{\mathbf{H}}_{target}^{(n)}$  itself

will actually be the matrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  that we are forming.

At the step  $n$ , iterate over the matrices  $\tilde{\mathbf{H}}^{(n)}$  that are obtained from the matrix  $\tilde{\mathbf{H}}_{target}^{(n-1)}$  by excluding the row  $i(n)$  and column  $j(n)$ . The condition for choosing a matrix is as follows:

$$\{i(n), j(n)\} = \arg \min_{\substack{1 \leq i \leq M \\ i(n) \neq i(1) \\ \dots \\ i(n) \neq i(n-1)}} \min_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j(n) \neq j(1) \\ \dots \\ j(n) \neq j(n-1)}} f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)}[i(n), j(n)]) \quad (12)$$

where  $f(\tilde{\mathbf{H}}^{(n)})$  – the trace of the correlation matrix of estimation errors  $\tilde{\mathbf{R}}_{\mathbf{H}}^{(n)}$ , determined by the formula similar to (10).

Result of work of algorithm IDZF at the step  $n$  is the matrix  $\tilde{\mathbf{H}} = \tilde{\mathbf{H}}^{(n)} = \tilde{\mathbf{H}}_{target}^{(n)}$ , with  $(M-n) \times (M-n)$  dimension, where  $1 \leq n \leq M-L$ .

## 6. Simulation results

Let's perform a comparative analysis of the known and proposed algorithms. The effectiveness of the algorithms was evaluated by statistical modeling method [14].

The simulation was carried out for two configurations of the selected and total number of antennas, the same values on the receive and transmit sides (4 of 8; 4 of 12) under the following general conditions:

- modulation method – 64-QAM;
- demodulation method – MMSE;
- type of noise-resistant coding – Turbo coding (speed – 1/2, number of decoding iterations – 4);

- simulated algorithms of antenna selection in their various combinations:

- optimal (full selection) with maximal capacity criterion (4) (MaxCapFull);

- optimal (full selection) with Frobenius norm criterion (5) (FrobeniusFull);

- quasi-optimal algorithm NSA (section 4);

- quasi-optimal algorithm IDNSA (section 4);

- proposed algorithm IIZF (11);

- proposed algorithm IDZF (12);

- channel matrix  $\mathbf{H}$  is known on the receiving side;

- number of transmit antennas  $N = 8; N = 12$ ;

- number of transmit radio chains  $P = 4$ ;

- number of receive antennas  $M = 8; M = 12$ ;

- number of receive radio chains  $L = 4$ ;

- type of fading – uncorrelated Rayleigh;

- frame length – 573 bits;

- number of experiments – 100000.

Error rates curves for known optimal algorithms with selection criteria (4), (5) and the proposed optimal algorithm with a selection criterion (6) in a MIMO system 4(8)x4(8) are studied in [3], [12].

Figures 1 and 2 shows simulation results for well-known optimal algorithms (4), (5), well-known (section 4) and proposed quasi-optimal algorithms (11), (12) for MIMO configurations 4(8)x4(8) and 4(12)x4(12).

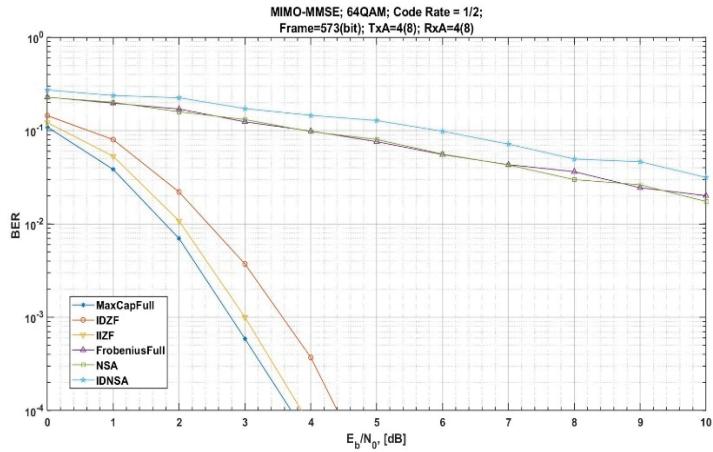


Fig. 1. Error rate of MIMO system in configuration 4(8)x4(8)

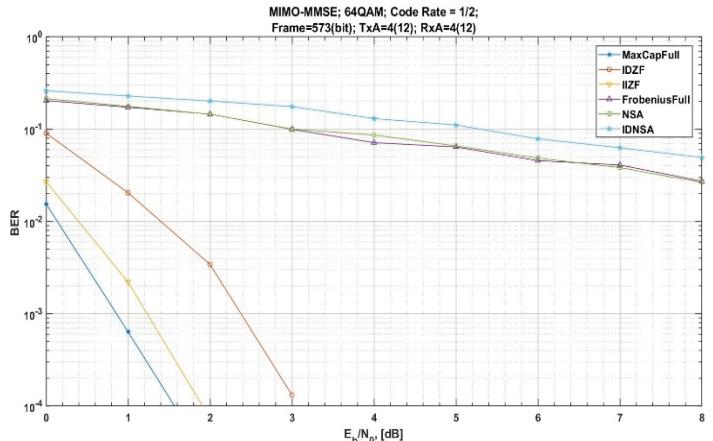


Fig. 2. Error rate of MIMO system in configuration 4(12)x4(12)

From quasi-optimal iterative algorithms (see Fig. 1, Fig. 2) the best results, independently of the antenna configuration, are provided by algorithms using the minimum trace criterion of the correlation matrix of demodulation errors (6), noticeably exceeding the characteristics of the optimal algorithm with the maximum Frobenius norm criterion (5).

The proposed quasi-optimal IIZF algorithm (11) has small losses about 0.2 – 0.4 dB vs. the optimal (full selection) algorithm with a best of known maximal capacity criterion of optimality (4). At the same time, as will be shown below, the algorithm IIZF (11) has significantly less computational complexity. The proposed quasi-optimal IDZF algorithm (12) has additional 0.6 – 1.2 dB gain relatively of proposed IIZF algorithm (11). At the same time, as will be shown later, it has also a slightly higher computational complexity.

The well-known quasi-optimal iterative algorithms NSA and IDNSA (section 4) demonstrate low efficiency, being inferior to the worst-evaluated optimal (full selection) algorithm with the Frobenius norm criterion (5) and significantly inferior in characteristics to the new proposed quasi-optimal algorithms.

## 7. Computational complexity of algorithms

Now will calculate the computational complexity of the described antenna selection algorithms by estimating the total number of operations required to perform calculations. Such operations include operations of real addition  $V_{\Sigma}^{add}$  and real multiplication operations  $V_{\Sigma}^{mult}$ . Write's down the following expressions to calculate the computational complexity for optimal (full selection) algorithms:

$$\begin{aligned} V_{\Sigma}^{mult} &= Q \cdot V_n^{mult}, \\ V_{\Sigma}^{add} &= Q \cdot V_n^{add} + Q \end{aligned} \quad (13)$$

where  $Q$  – is the number of all possible combinations of reselected active antennas on the receive and transmit sides for the exacted configuration of passive and active antennas, determined by the formula (7);  $V_n^{mult}$  – is the number of arithmetic operations of real multiplications required to perform one combination;  $V_n^{add}$  – is the number of arithmetic operations of real additions required to perform one combination.

**Computational complexity of the optimal (full selection) algorithm with maximal capacity criterion (MaxCapacityFull) (4).**

Find the number of arithmetic operations required for the processor to process the expression:

$$\log \det \left( 1 + \frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \right). \quad (14)$$

The channel matrix  $\tilde{\mathbf{H}}$  selected during the operation of this algorithm has a  $L \times P$  dimension. Matrix  $\tilde{\mathbf{T}} = \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}'$  has a  $L \times L$  dimension and includes elements  $\tilde{\mathbf{T}}_{ij} = \sum_{k=1}^P h_{ik} h'_{kj}$ , where  $i, j = 1 \dots L$ .

To calculate one value  $h_{ik} h'_{kj}$  require to perform one complex multiplication. To calculate one value  $\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$  require  $P$  of complex multiplications and  $2 \cdot (P - 1)$  of complex additions, which corresponds to  $4P$  real multiplications and  $4P - 4$  real additions. For complete multiplication of matrix  $\tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}'$  require to execute  $L^2$  of similar operations. Taking into account the Hermitian nature of the matrix  $\tilde{\mathbf{T}} = \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}'$  value of  $\tilde{\mathbf{T}}_{ij}$  necessary to perform about  $L^2 / 2$  operations.

So to calculate  $\tilde{\mathbf{T}} = \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}'$  real operations will be required:  $V_1^{mult} = 4 \cdot P \cdot \frac{L^2}{2}$  multiplications and  $V_1^{add} = (4 \cdot P - 4) \cdot \frac{L^2}{2}$  additions.

Value  $\frac{\rho}{P}$  from the expression (14) is known in advance (not in real time). Thus, to calculate complexity of matrix  $\tilde{\mathbf{D}} = \left( 1 + \frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \right)$  from (14) requires the following values are the number of real multiplications and real additions:

$$V_2^{mult} = (4 \cdot P + 1) \cdot \frac{L^2}{2}. \quad (15)$$

$$V_2^{add} = (4 \cdot P - 4) \cdot \frac{L^2}{2} + L. \quad (16)$$

To understand the complexity of calculating the determinant of the matrix  $\det \tilde{\mathbf{D}} = \det \left( 1 + \frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \right)$  we perform the following steps. The QR-decomposition of the matrix is known [5]. For the matrix  $\tilde{\mathbf{D}}$  the record of its QR decomposition is:  $\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{R}$ , where  $\mathbf{Q}$  – is unitary matrix with  $L \times L$  dimension,  $\mathbf{R}$  – is upper triangular matrix.

Further take into account the following property of the determinant of the matrix  $\mathbf{C} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$  [15],  $\det \mathbf{C} = \det \mathbf{A} \cdot \det \mathbf{B}$ . Apply this property to the matrix  $\tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{R}$ .

So the  $\det \tilde{\mathbf{D}} = \det \mathbf{Q} \cdot \det \mathbf{R} = 1 \cdot \det \mathbf{R} = \det \mathbf{R}$ . Determinant  $\det \mathbf{R} = \prod_{i=1}^L R_{ii}$  for matrix  $\mathbf{R}$  require to perform  $L - 1$  of complex multiplications.

The computational complexity of the QR decomposition of the matrix is  $\frac{2}{3} L^3 + L^2 + \frac{1}{3} L - 2$  complex multiplications and the same number of complex additions. A complex multiplication is equivalent to four real multiplications and two real additions. A complex addition consists of two real additions.

Thus, to calculate the determinant of the matrix, the following number of operations will be required:

$$V_{\det}^{mult} = 4 \cdot \left( \frac{2}{3} L^3 + L^2 + \frac{1}{3} L - 2 \right). \quad (17)$$

$$\nu_{\text{det}}^{\text{add}} = 4 \cdot \left( \frac{2}{3} L^3 + L^2 + \frac{1}{3} L - 2 \right). \quad (18)$$

Accordingly, given (14), (15), (16), (17), (18), the following number of real operations is required to perform an optimal (full selection) algorithm with maximal capacity criterion (MaxCapacityFull) (4):

$$\begin{aligned} \nu_{\text{maxCapFull}}^{\text{mult}} &= Q \cdot (\nu_2^{\text{mult}} + \nu_{\text{det}}^{\text{mult}}) = \\ &= Q \cdot \left[ (4 \cdot P + 1) \cdot \frac{L^2}{2} + 4 \cdot \left( \frac{2}{3} L^3 + L^2 + \frac{1}{3} L - 2 \right) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \nu_{\text{maxCapFull}}^{\text{add}} &= Q \cdot (\nu_2^{\text{add}} + \nu_{\text{det}}^{\text{add}}) + Q = \\ &= Q \cdot \left[ (4 \cdot P - 4) \cdot \frac{L^2}{2} + L + 4 \cdot \left( \frac{2}{3} L^3 + L^2 + \frac{1}{3} L - 2 \right) \right] + Q. \end{aligned}$$

It is obvious from expression (19), that the algorithm optimal (full selection) with criterion (4), has a third order of complexity.

**Computational complexity of the optimal (full selection) algorithm with minimum trace of correlation matrix criterion (MinTrVmmse, MinTrVzf) (6).**

Let's turn to the criterion (6). For the matrix  $\tilde{\mathbf{D}} = \left( \mathbf{1} + \frac{\rho}{P} \cdot \tilde{\mathbf{H}} \cdot \tilde{\mathbf{H}}' \right)$  got formulas (15) and (16) to calculate it computational complexity. Criterion (6) includes analogical matrix  $\tilde{\mathbf{G}} = \frac{\rho}{P} \tilde{\mathbf{H}}' \tilde{\mathbf{H}} + \mathbf{1}$  to calculate the complexity of which it is not difficult to obtain the expression:

$$\nu_1^{\text{mult}} = (4 \cdot L + 1) \cdot \frac{P^2}{2}, \quad (20)$$

$$\nu_1^{\text{add}} = (4 \cdot L - 4) \cdot \frac{P^2}{2} + P. \quad (21)$$

It is known that for the inversion of a complex Hermitian matrix with  $P \times P$  dimension requires about  $2P^3 - 2P^2$  of real multiplications,  $2P^3 - 4P^2 + 2P$  of real additions and  $P$  divisions, which is about equal to  $2P^3$  of real multiplications and  $2P^3$  real additions [14], [15].

Calculating the trace of the matrix with  $P \times P$  dimension requires  $P - 1$  of real additions, since on the main diagonal of the matrix  $\tilde{\mathbf{G}}$  are real numbers. Thus, taking into account (20) and (21) have the following expression for the computational complexity of the criterion (6):

$$\begin{aligned} \nu_2^{\text{mult}} &= \left[ 2 \cdot P^3 + (4 \cdot L + 1) \cdot \frac{P^2}{2} \right], \\ \nu_2^{\text{add}} &= \left[ 2 \cdot P^3 + (4 \cdot L - 4) \cdot \frac{P^2}{2} + P - 1 \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

So for optimal (full selection) algorithm with a criterion (6) requires to perform the following number of real operations:

$$\begin{aligned} \nu_{\text{MinTrVzf}}^{\text{mult}} &= Q \cdot \nu_3^{\text{mult}} = Q \cdot \left[ 2 \cdot P^3 + (4 \cdot L + 1) \cdot \frac{P^2}{2} \right], \\ \nu_{\text{MinTrVzf}}^{\text{add}} &= Q \cdot \nu_3^{\text{add}} + Q = Q \cdot \left[ 2 \cdot P^3 + (4 \cdot L - 4) \cdot \frac{P^2}{2} + P - 1 \right] + Q. \end{aligned} \quad (23)$$

#### Computational complexity of proposed new quasi-optimal algorithms using minimum trace of correlation matrix criterion.

At first estimate the computational complexity of the quasi-optimal partial (combined selection) algorithm of antenna selection IIZF (11).

Thus estimate the complexity of the algorithm at the first step. From full matrix of channel  $\mathbf{H}$  the maximum by module of element  $h_{i(1)\hat{j}(1)}$  is selected. It's requires to calculate of modules and then comparing of all complex elements of matrix  $\mathbf{H}$ . Calculation of modules for all elements of matrix  $\mathbf{H}$  require  $2 \cdot N^2$  of real multiplications and  $N^2$  of real additions (the operation of calculating the square root can be not taken into account, since it is performed by table), and comparison of values of all elements  $h_{ij}$  require  $N^2$  of real additions.

Further estimate the complexity of the algorithm at the second step. Here is doing reselection of submatrix with  $(N-1)^2$  number of reselections. Taking into account of expression (23), where  $Q = (N-1)^2$  and  $L = P = 2$  get required number of operations for the second step:

$$\begin{aligned} \nu_2^{\text{mult}} &= 34 \cdot (N-1)^2 \\ \nu_2^{\text{add}} &= 25 \cdot (N-1)^2 \end{aligned} \quad (24)$$

At the  $n$ 's step doing reselection of  $(N-n+1)^2$  submatrices. Taking into account of expression (23), where  $Q = (N-n+1)^2$  and  $L = P = n$  get required amount of operation for the  $n$ 's step:

$$\begin{aligned} \nu_n^{\text{mult}} &= (N-n+1)^2 \cdot \left[ 2 \cdot n^3 + (4 \cdot n+1) \cdot \frac{n^2}{2} \right], \\ \nu_n^{\text{add}} &= (N-n+1)^2 \cdot \left[ 2 \cdot n^3 + (4 \cdot n-4) \cdot \frac{n^2}{2} + n - 1 \right], \end{aligned} \quad (25)$$

where  $n = 1 \dots L$ .

To complete the estimation of computational complexity, it is necessary to sum up the values of computational complexity at all steps:

$$\begin{aligned} \nu_{\text{IIZF}}^{\text{mult}} &= \sum_{n=1}^L \nu_n^{\text{mult}} = \sum_{n=1}^L \left[ (N-n+1)^2 \cdot \left[ 2 \cdot n^3 + (4 \cdot n+1) \cdot \frac{n^2}{2} \right] \right], \\ \nu_{\text{IIZF}}^{\text{add}} &= \sum_{n=1}^L \nu_n^{\text{add}} = \sum_{n=1}^L \left[ (N-n+1)^2 \cdot \left[ 2 \cdot n^3 + (4 \cdot n-4) \cdot \frac{n^2}{2} + n - 1 \right] \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

The computational complexity of the IDZF partial selection algorithm is performed similarly. As a result, we have the following expression:

$$\begin{aligned}
 V_{IDZF}^{mult} &= \sum_{n=1}^{N-L} V_n^{mult} = \\
 &= \sum_{n=1}^{N-L} \left[ 2 \cdot (N-n)^3 + (4 \cdot (N-n)+1) \cdot \frac{(N-n)^2}{2} \right] \cdot (N-n+1)^2, \\
 V_{IDZF}^{add} &= \sum_{n=1}^{N-L} V_n^{add} = \\
 &= \sum_{n=1}^{N-L} \left[ 2 \cdot (N-n)^3 + (4 \cdot (N-n)-4) \cdot \frac{(N-n)^2}{2} + (N-n)-1 \right] \cdot (N-n+1)^2.
 \end{aligned} \tag{27}$$

## 8. Comparative analysis of computational complexity of algorithms

In Table 2 and

Table 3 present the results of the computational complexity estimation for optimal (full selection) algorithms with a best of known MaxCapFull (4) and MinTrVzf (6), and also for simplified quasi-optimal algorithms IIZF (11), IDZF (12). The estimates are given also for high-order MIMO system with the number of passive antennas equal to 64.

Table 2  
Results of estimation of computational complexity for various antenna selection algorithms in the MIMO system

Number of real multiplication operations					
Path	Antennas	MaxCapFull	MinTrVzf	IIZF	IDZF
2	12	$2,18 \cdot 10^5$	$1,48 \cdot 10^5$	$4,76 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10^6$
4	12	$9,02 \cdot 10^7$	$6,47 \cdot 10^7$	$3,74 \cdot 10^4$	$1,73 \cdot 10^6$
6	12	$9,99 \cdot 10^8$	$7,53 \cdot 10^8$	$1,13 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^6$
8	12	$6,57 \cdot 10^8$	$5,10 \cdot 10^8$	$2,16 \cdot 10^5$	$1,89 \cdot 10^6$
2	8	$3,92 \cdot 10^4$	$2,67 \cdot 10^4$	$1,95 \cdot 10^3$	$1,33 \cdot 10^5$
4	8	$1,80 \cdot 10^6$	$1,29 \cdot 10^6$	$1,26 \cdot 10^4$	$1,58 \cdot 10^5$
6	8	$9,17 \cdot 10^5$	$6,91 \cdot 10^5$	$2,87 \cdot 10^4$	$1,60 \cdot 10^5$
Number of real addition operations					
Path	Antennas	MaxCapFull	MinTrVzf	IIZF	IDZF
2	12	$1,87 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^5$	$3,31 \cdot 10^3$	$1,19 \cdot 10^6$
4	12	$8,16 \cdot 10^7$	$5,59 \cdot 10^7$	$3,09 \cdot 10^4$	$1,63 \cdot 10^6$
6	12	$9,28 \cdot 10^8$	$6,81 \cdot 10^8$	$9,90 \cdot 10^4$	$1,75 \cdot 10^6$
8	12	$6,20 \cdot 10^8$	$4,72 \cdot 10^8$	$1,93 \cdot 10^5$	$1,77 \cdot 10^6$
2	8	$3,37 \cdot 10^4$	$2,04 \cdot 10^4$	$1,35 \cdot 10^3$	$1,21 \cdot 10^5$
4	8	$1,63 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^4$	$1,43 \cdot 10^5$
6	8	$8,52 \cdot 10^5$	$6,26 \cdot 10^5$	$2,48 \cdot 10^4$	$1,45 \cdot 10^5$

Table 3

Results of estimation of computational complexity for various antenna selection algorithms in the high-order MIMO system

Total operations for high-order MIMO					
Path	Antennas	MaxCapFull	MinTrVzf	IIZF	IDZF
8	64	$1,0 \cdot 10^{23}$	$7,9 \cdot 10^{22}$	$3,4 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^{10}$
16	64	$9,5 \cdot 10^{33}$	$7,7 \cdot 10^{33}$	$3,9 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^{10}$
32	64	$1,0 \cdot 10^{42}$	$8,8 \cdot 10^{41}$	$3,5 \cdot 10^9$	$8,9 \cdot 10^{10}$
40	64	$3,8 \cdot 10^{40}$	$3,2 \cdot 10^{40}$	$5,9 \cdot 10^9$	$9,0 \cdot 10^{10}$
48	64	$2,5 \cdot 10^{35}$	$2,1 \cdot 10^{35}$	$8,2 \cdot 10^9$	$9,1 \cdot 10^{10}$

Data in Table 2 and Table 3 demonstrate the possibility of practical application of the new quasi-optimal algorithm of partial selection IIZF (11).

At Figure 3 the results of computational complexity estimation for various antenna selection algorithms in a high-order MIMO system are presented graphically.

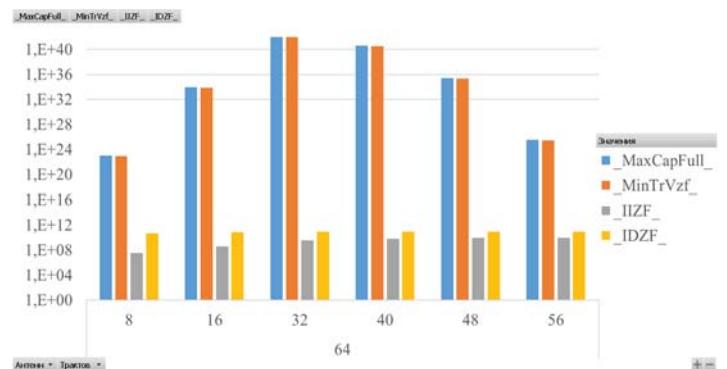


Fig. 3. The results of computational complexity estimation for various antenna selection algorithms in a high-order MIMO system

At Figure 3 obviously demonstrated the difference in computational complexity of the best of all represented algorithms for MIMO with a total of 64 antennas on the receive side and 64 on the transmit side. New quasi-optimal algorithms IIZF (11) и IDZF (12) demonstrate much less of computational complexity compared to the best algorithms.

## Conclusions

The proposed quasi-optimal algorithm of partial combined selection which is step-by-step increase of dimension of forming matrix of channel IIZF (11) has about 0.2 – 0.4 dB loss vs. assigned to the optimal (full selection) algorithm with a best of known maximal capacity criterion of optimality (4).

At the same time new proposed algorithm IIZF (11) has significantly less computational complexity in comparison to the best algorithms in terms of error rates performance (6), (4) and demonstrates up to two-tree orders of magnitude lower computational complexity for low-order MIMO configurations and up to fifteen – thirty orders of magnitude for a high-order MIMO configuration with 64 passive antennas.

Optimal (full selection) algorithm with a criterion (6) also demonstrates slightly less computational complexity compared to the best of known optimal algorithms with a criterion (4), at the same time, it demonstrates the best error rates performance which are studied in [3], [12].

## References

- S. Sanayei and A. Nosratinia, "Antenna selection in MIMO systems," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 68-73, Oct. 2004, doi: 10.1109/MCOM.2004.1341263.
- V. Kreyndelin, M. Khazov. Antenna selection algorithms in MIMO systems. *Elecrosvyaz*. 2017. No. 10, pp. 59-64.
- V. Kreyndelin, M. Khazov Compare of MIMO systems with different antenna selection criteria. Materials of the XIII International Industrial Scientific and Technical Conference «Informational society technologies». Moscow: MTUCI. 20-21 march 2019.

4. P. J. Smith, T. W. King, L. M. Garth and M. Dohler, "An Analysis of Low Complexity Algorithms for MIMO Antenna Selection," *2006 IEEE International Conference on Communications*, Istanbul, Turkey, 2006, pp. 1380-1385, doi: 10.1109/ICC.2006.254941.
5. WH. Teukolsky, SA. Vetterling, WT. Flannery, BP (2007), "Section 2.10. QR Decomposition", *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing* (3rd ed.), New York: Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-88068-8 - [https://dev.abcdef.wiki/wiki/QR\\_decomposition](https://dev.abcdef.wiki/wiki/QR_decomposition).
6. M. I. As-Saafani, S. J. Sadi, E. F. Badran, D. A. E. Mohamed and S. Shaaban, "Antenna Selection Algorithms in Correlated Fading MIMO Channels," *Proceedings of the Twenty Third National Radio Science Conference (NRSC'2006)*, Menouf, Egypt, 2006, pp. 1-8, doi: 10.1109/NRSC.2006.386326.
7. X. Zhou, B. Bai and W. Chen, "Iterative Antenna Selection for Multi-Stream MIMO under a Holistic Power Model," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 82-85, February 2014, doi: 10.1109/WCL.2013.111713.130754.
8. M. Bakulin, V. Kreyndelin, M. Khazov Antenna selection criteria at MIMO systems. *Electrosvyaz*. 2018. No. 10, pp. 78-81.
9. M. Bakulin, L. Varukina, V. Kreyndelin MIMO system technology: entity and algorithms. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom, 2014. 272 p.
10. Emil Björnson, Jakob Hoydis and Luca Sanguinetti (2017), "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency", *Foundations and Trends in Signal Processing*. Vol. 11, No. 3-4, pp. 154-655.
11. Molisch A. F, Win M. Z. MIMO systems with antenna selection. *IEEE Microwave Magazine*, 2004, No. 5, pp. 46-56.
12. V. Kreyndelin, M. Khazov Investigation of antenna selection benefits in MIMO systems as compare to base MIMO system without antenna selection. *Tsifrovaya obrabotka signalov*. 2018. No.4, pp. 63-68.
13. V. Kreyndelin, M. Khazov Advantages and open questions of antenna selection in multi-antenna MIMO systems. *Materials of the International scientific and technical conference INTERMATIC-2015*. Vol. 5, 1-5 December 2015, pp. 236-238.
14. M. Bakulin, V. Kreyndelin, D. Pankratov. Radio communication technology on the way to 5G. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom, 2018. 272 p.
15. E. Tyrtyshnikov. Matrix analysis and linear algebra. Moscow: Phizmatlit, 2007. 480 p.
16. Lin Yisong, Zhuang Mingjie, «The complexity analysis and performance comparison of MIMO systems based on antenna selection techniques», *Computer modelling & New technologies*, 2014, no. 18(11), pp. 1380-1386.
17. A. Gorokhov. Antenna selection algorithms for MEA transmission systems. *IEEE ICASSP*, 2002. Vol. 3, pp. 2857-2860.
18. Yang-Seok Choi, A. F. Molisch, M. Z. Win and J. H. Winters, "Fast algorithms for antenna selection in MIMO systems," *2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall* (IEEE Cat. No.03CH37484), Orlando, FL, USA, 2003, pp. 1733-1737 Vol.3, doi: 10.1109/VETECF.2003.1285322.
19. Hyunsub Kim, Hyukyeon Lee, Jihye Koo and Jaeseok Kim Low-complexity lattice reduction algorithm for MIMO detectors with tree searching, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* (2017) 2017:17.
20. Sudhanshu Gaur and Mary Ann Ingram. Transmit/Receive antenna selection for MIMO systems to improve error performance of linear receivers, School of ECE, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0250 USA, Ph: 404-894-9482

## НОВЫЕ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ АВТОВЫБОРА АНТЕНН С НИЗКОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТЬЮ

**Бакулин Михаил Германович**, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, [m.g.bakulin@gmail.com](mailto:m.g.bakulin@gmail.com)

**Крейндельин Виталий Борисович**, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, [vitkrend@gmail.com](mailto:vitkrend@gmail.com)

**Хазов Михаил Леонидович**, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, [mikekhazov@mail.ru](mailto:mikekhazov@mail.ru)

### Аннотация

Для систем связи MIMO предлагаются новые квазиоптимальные алгоритмы переключения (автовыбора) антенн (алгоритмы неполного перебора), позволяющие достичь высокую спектральную эффективность без существенного увеличения аппаратной сложности. Методом статистического моделирования выполнены оценка эффективности предложенных алгоритмов и сравнение их характеристик с характеристиками известных алгоритмов полного и неполного перебора. Проведена оценка вычислительной сложности предложенных алгоритмов и ее сравнение с вычислительной сложностью известных алгоритмов полного и неполного перебора. Сравнительный анализ помехоустойчивости в совокупности с оценкой вычислительной сложности наглядно демонстрируют возможность практического применения новых квазиоптимальных алгоритмов в реальных системах связи, существенно улучшая энергетические характеристики систем связи MIMO.

**Ключевые слова:** система связи MIMO, спектральная эффективность, помехоустойчивость, автовыбор (переключение) антенн, пропускная способность канала связи, радиотракт, критерий автовыбора, вычислительная сложность.

### Литература

1. Sanaye S., Nosratinia A. Antenna selection in MIMO systems // *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 68-73, Oct. 2004, doi: 10.1109/MCOM.2004.1341263.
2. Крейндельин В.Б., Хазов М.Л. Алгоритмы переключения антенн в системах MIMO // Электросвязь. 2017. № 10. С. 59-64.

3. Крейнделин В.Б., Хазов М.Л. Сравнение систем MIMO, использующих различные критерии автovыбора антенн // Материалы XIII международной отраслевой научно-технической конференции "Технологии информационного общества". М.: МТУСИ. 20-21 марта 2019 г.
4. Smith P.J., King T.W., Garth L.M., Dohler M. An Analysis of Low Complexity Algorithms for MIMO Antenna Selection // 2006 IEEE International Conference on Communications, Istanbul, Turkey, 2006, pp. 1380-1385, doi: 10.1109/ICC.2006.254941.
5. Тейкольский С.А., Феттерлинг, штат Вашингтон; Фланнери, Б.П. (2007), "Раздел 2.10. QR-разложение", Численные рецепты: Искусство научных вычислений (3-е изд.), Нью-Йорк: Cambridge University Press, ISBN. 978-0-521-88068-8. [https://dev.abcdef.wiki/wiki/QR\\_decomposition](https://dev.abcdef.wiki/wiki/QR_decomposition).
6. As-Saafani M.I., Sadi S.J., Badran E.F., Mohamed D.A.E., Shaaban S. Antenna Selection Algorithms in Correlated Fading MIMO Channels // Proceedings of the Twenty Third National Radio Science Conference (NRSC'2006), Menouf, Egypt, 2006, pp. 1-8, doi: 10.1109/NRSC.2006.386326.
7. Zhou X., Bai B., Chen W. Iterative Antenna Selection for Multi-Stream MIMO under a Holistic Power Model // IEEE Wireless Communications Letters, vol. 3, no. 1, pp. 82-85, February 2014, doi: 10.1109/WCL.2013.111713.130754.
8. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Хазов М.Л. Критерии автovыбора антенн в системах MIMO // Электросвязь. 2018. № 10. С. 78-81.
9. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 272 с.
10. Emil Bjornson, Jakob Hoydis, Luca Sanguinetti. Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency // Foundations and Trends in Signal Processing. 2017, Vol. 11, No. 3-4, pp. 154-655.
11. Molisch A.F, Win M.Z. MIMO systems with antenna selection // IEEE Microwave Magazine, 2004, № 5, pp. 46-56.
12. Крейнделин В.Б., Хазов М.Л. Исследование преимуществ автovыбора антенн в системах MIMO в сравнении с базовой системой MIMO без автovыбора антенн // Цифровая обработка сигналов. 2018. №4. С. 63-68.
13. Крейнделин В.Б., Хазов М.Л. Преимущества и открытые вопросы при переключении антенн в многоантенных системах MIMO. Материалы международной научно-технической конференции INTERMATIC-2015, Часть 5, 1-5 декабря 2015 г. С. 236-238.
14. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю. Технология радиосвязи на пути к 5G. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 272 с.
15. Тыртышников Е.Е. Матричный анализ и линейная алгебра. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
16. Lin Yisong, Zhuang Mingjie. The complexity analysis and performance comparison of MIMO systems based on antenna selection techniques // Computer modelling & New technologies 2014 18(11), pp. 1380-1386.
17. Gorokhov A. Antenna selection algorithms for MEA transmission systems // IEEE ICASSP, 2002, Vol. 3, pp. 2857-2860
18. Choi Yang-Seok, Molisch A.F., Win M.Z., Winters J.H. Fast algorithms for antenna selection in MIMO systems // 2003 IEEE 58th Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall (IEEE Cat. No.03CH37484), Orlando, FL, USA, 2003, pp. 1733-1737 Vol.3, doi: 10.1109/VETECF.2003.1285322.
19. Hyunsub Kim, Hyukyeon Lee, Jihye Koo, Jaeseok Kim. Low-complexity lattice reduction algorithm for MIMO detectors with tree searching, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2017) 2017:17.
20. Sudhanshu Gaur and Mary Ann Ingram Transmit/Receive antenna selection for MIMO systems to improve error performance of linear receivers, School of ECE, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0250 USA, Ph: 404-894-9482

**Информация об авторах:**

**Бакулин Михаил Германович**, Московский технический университет связи и информатики, доцент кафедры ТЭЦ, к.т.н. Москва, Россия

**Крейнделин Виталий Борисович**, Московский технический университет связи и информатики, заведующий кафедрой ТЭЦ, профессор, д.т.н., Москва, Россия

**Хазов Михаил Леонидович**, Московский технический университет связи и информатики, соискатель, Москва, Россия

# FULL ENUMERATION METHODS ON GRAPHS

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-7-57-64

Manuscript received 02 June 2023;  
Accepted 30 June 2023

**Viktor N. Kudelya,**  
Institute for Networking Technology, Saint-Petersburg, Russia,  
[Kudelia.Viktor@int.spb.ru](mailto:Kudelia.Viktor@int.spb.ru)

**Keywords:** graph, path, Hamiltonian path,  
enumeration problem

Requirements for algorithms for specific problems of discrete mathematics are changing. This is dictated by an urgent need to increase calculation accuracy in technology-related problems brought about by rapid digitization and virtualization, which actively permeated various scientific areas and changes the approach to previously studied objects. These objects include n-dimensional structures, known as circular structures, that describe global processes occurring in communication networks, multi-processor systems, in collective communications, stock market structures etc. Given that, both the development of new mathematical methods of solving problems and the solution of related calculation problems are deemed important. The enumeration method, based on various modifications of systematic viewing (traversal) of graph elements and labeling, has been widely used and quite fully developed for a long time. The purpose of the article is to announce graphs presentation and the enumeration methods on graphs presentations: the transposition method and the node-graph method. This publication presents the basic results of the author's work on reducing the severity of the NP-complete problem class.

**Для цитирования:**

Куделя В.Н. Методы полного перебора в графе // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №7. С. 57-64.

**For citation:**

Kudelya V.N. Full enumeration methods on graphs. *T-Comm*, vol. 17, no.7, pp. 57-64.

## Introduction

Humans have always strived for total knowledge, and as accurate as possible. The natural method of constructing accurate knowledge is a total enumeration of links between available autonomous facts. However, the modern approach considers full enumeration inefficient, but doesn't answer the question set in [1] – "can full enumeration be eliminated when solving discrete tasks"? Even though "approximate" methods vary [2], they have a few common features:

- here are no  $\varepsilon$ -approximate polynomial algorithms for some problems in discrete mathematics [3];
- they do not give facts, instead offering some probable results and, even given small deviations [2], give knowledge that can be relied upon only with caution.

At the present moment, requirements for algorithms for specific problems of discrete mathematics are changing. This is dictated by an urgent need to increase calculation accuracy in technology-related problems brought about by rapid digitization and virtualization, which actively permeated various scientific areas and changes the approach to previously studied objects. These objects include  $n$ -dimensional structures, known as circular structures, that describe global processes occurring in communication networks, multi-processor systems, in collective communications, stock market structures etc. Given that, both the development of new mathematical methods of solving problems and the solution of related calculation problems are deemed important.

The enumeration method, based on various modifications of systematic viewing (traversal) of graph elements and labeling, has been widely used and quite fully developed for a long time. Even though this method is very appealing, thanks to its simplicity, it likely doesn't pose much theoretical significance due to its low and non-current prominence in scientific literature [2-9]. Another method – the successive matrix multiplication method – has not received such prominence [6]. Given that modern advances in creating new methods have been quite meager, the author has focused on developing and researching the aforementioned methods and the possibility of compressing the factorial range of enumeration results while preserving its qualitative properties: versatility, comprehensiveness and accuracy. The author defines "compression" as conversion of enumeration results into some mathematical object.

The developed enumeration methods are showcased on the problem of listing Hamiltonian paths in a graph. The solution list problem (determining the numbers in the enumerated set) has been chosen for a few reasons:

- Solving the enumeration problem helps solve both the existence and optimization problems;
- Even if it's assumed that there is a method to recognize the Hamiltonian-ness of a graph and  $P = NP$ , it's not certain that the enumeration problem will be similarly "easy".

In the materials, a path means a sequence of arcs where the end vertex of any arc, unlike the last one, is the starting vertex for the next one [6]. In other words, a path is a sequence of adjacent vertices. A simple path is a path in which vertices are not repeated. Since only simple paths are being considered here, simple paths will be called just "paths" here and throughout the paper for the sake of brevity. The length of a path is the number of arcs forming it. The end result of enumeration is the number of Hamiltonian paths.

A Hamiltonian path is a simple path containing all vertices of a graph.

The problem of enumeration of Hamiltonian paths is defined as follows: a graph  $G[V, E]$  is given. What is the  $m$  power of the Hamiltonian path set, meaning how many of them are in a graph.

### 1. Transposition method

#### 1.1 Graph presentation

A graph  $G[V, E]$  is given,  $v = |V|$  is the power of the set  $V$ .

Let's present the given graph as an arc matrix  $V$  with the size of  $V \times V$ . Elements of the matrix  $V$  are linked with the following relationships:

$$v_{ij} = \begin{cases} i, j - \text{if } E(G) \text{ exist path } (ij) \text{ из } i \text{ в } j, i \text{ и } j \in V(G) \\ 0 - \text{another} \end{cases}$$

In the matrix  $V$ , a comma is used to separate the values defining adjacent vertices.

The matrix  $V$  for a full graph of five vertices without loops looks like this:

		$j$				
		1	2	3	4	5
$i$	1	0	1,2	1,3	1,4	1,5
	2	2,1	0	2,3	2,4	2,5
	3	3,1	3,2	0	3,4	3,5
	4	4,1	4,2	4,3	0	4,5
	5	5,1	5,2	5,3	5,4	0

Elements  $v_{ij}$  of the matrix  $V$  show if there is a positively aimed arc  $(ij)$  from vertex  $i$  into vertex  $j$ . Since the state of each graph element is associated with the concept of incidence and adjacency, then  $i$  (row number) shows which vertex can be used to enter (input or source) into an element of the matrix  $V$ , and  $j$  (column number) shows which vertex can be used to exit it (output or sink).

#### 1.2 Enumeration of paths in a graph

Enumeration of paths in graph  $G[V, E]$  set by matrix  $V$  is done via forming tables of paths  $A^p$  with the size of  $U \times V$ , where  $U$  is the number of rows in table  $A^p$ . The element  $a_{ij}^p$  of table  $A^p$  is a sequence of vertices, a path with the length of  $p$ ,  $p = \overline{1, (v-1)}$ . The set of tables forms the enumeration map.

The element  $a_{ij}^p$  is formed by supplying the output  $j$  of element  $a_{ij}^{p-1}$  to input  $i$  of element  $v_{ij}$ , meaning when  $j = i$ . The following is a process of path table formation using the matrix transposition operation and operations on graphs - adding a vertex. Adding a vertex allows a transition from a path of length  $p$  to a path of length  $p = p + 1$ .

A possible algorithm for enumerating all graph paths using the transposition method is shown below. The algorithm is described as a step-by-step procedure and ends after  $p = \overline{1, (v-1)}$  iterations by recording the power of Hamiltonian path set  $m$ .

Let's assume that the graph is set by the arc matrix  $V$ .

Step 1.  $p = 1, m = 0, A^p = V$ , elements of table  $A^p$  are sorted: null elements are replaced with values from the top down in the column. Rows that only contain null elements are deleted. The remaining rows are numbered from the top down,  $u = \max_{1,2,\dots} i$

. Go to step 2.

Step 2. Put  $p = p + 1, q = 0$  and go to step 3.

Step 3. Put  $q = q + 1$ . For  $j = \overline{1, v}$ , the element  $c_{qj}$  of the transfer table-row  $C$  of size  $1 \times v$  is defined as follows:  $c_{qj} = a_{qj}^{p-1}$ . Go to step 4.

Step 4. Each element  $b_{ij}^q$  of intermediate table  $B^q$  of size  $v \times v$  is defined as follows: if  $j \neq i \wedge c_{qj}^T \neq 0 \wedge v_{ij} \neq 0 \wedge j \notin c_{qj}^T$ , then  $b_{ij}^q = c_{qj}^T + j$ , where + is the addition operation of the graph vertex, otherwise  $b_{ij}^q = 0$ . If  $p = (v-1) \wedge b_{ij}^q \neq 0$ , then  $m = m + 1$ . Go to step 5.

Step 5. If  $q = u$ , then go to step 6, otherwise go to step 3.

Step 6. If  $p = v - 1$ , record  $m$  (answer) and go to step 8, otherwise go to step 7.

Step 7. Create table  $A^p = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & B^1 & & & \\ \hline \dots & & & & \\ \hline & B^q & & & \\ \hline \end{array}$  by composing tables  $B^q$  vertically, sort elements of table  $A^p$ ,  $u = \max_{1,2,\dots} i$ . Go to step 2.

Step 8. End.

The presented algorithm implements the enumeration strategy "from" all vertices  $i$  "to" all vertices  $j$ . The transposition method also allows implementing all the other strategies.

### 1.3 Example

A graph  $G[V, E]$ , figure 1, is given.

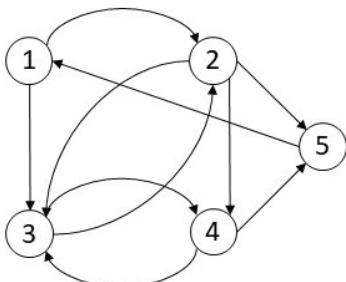


Figure 1. Graph  $G[V, E]$

Matrix  $V$  of graph  $G[V, E]$  looks like this:

	1	2	3	4	5
1	0	1,2	1,3	0	0
2	0	0	2,3	2,4	2,5
3	0	3,2	0	3,4	0
4	0	0	4,3	0	4,5
5	5,1	0	0	0	0

Step 1.  $p = 1, m = 0, A^p = V$ , sort elements of tabael  $A^1$

	1	2	3	4	5
1	5,1	1,2	1,3	2,4	2,5
2	0	3,2	2,3	3,4	4,5
3	0	0	4,3	0	0

$u = 3$  and go to step 2.

Step 2.  $p = p + 1 = 2, q = 0$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 1$ .

	1	2	3	4	5
$c_{1j}$	5,1	1,2	1,3	2,4	2,5

Go to step 4.

Step 4.

$c_{1j}^T$	$V$					$B^1$	1	2	3	4	5
1	5,1	0	1,2	1,3	0	0	0	5,1,2	5,1,3	0	0
2	1,2	0	0	2,3	2,4	2,5	0	0	1,2,3	1,2,4	1,2,5
3	1,3	0	3,2	0	3,4	0	0	1,3,2	0	1,3,4	0
4	2,4	0	0	4,3	0	4,5	0	0	2,4,3	0	2,4,5
5	2,5	5,1	0	0			2,5,1	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Go to step 5.

Step 5.  $q \neq 3$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 2$ .

$c_{2j}$	1	2	3	4	5
	0	3,2	2,3	3,4	4,5

Go to step 4.

Step 4.

$c_{2j}^T$	$V$					$B^2$	1	2	3	4	5
1	0	0	1,2	1,3	0	0	0	0	0	0	0
2	3,2	0	0	2,3	2,4	2,5	0	0	0	3,2,4	3,2,5
3	2,3	0	3,2	0	3,4	0	0	0	0	2,3,4	0
4	3,4	0	0	4,3	0	4,5	0	0	0	0	3,4,5
5	4,5	5,1	0	0	0	0	4,5,1	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Go to step 5.

Step 5.  $q \neq 3$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 3$ .

$c_{3j}$	1	2	3	4	5
	0	0	4,3	0	0

Go to step 4.

Step 4.

$c_{3j}^T$	$V$					$B^3$	1	2	3	4	5
1	0	0	1,2	1,3	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	2,3	2,4	2,5	0	0	0	0	0	0
3	4,3	0	3,2	0	.4	0	0	4,3,2	0	0	0
4	0	0	4,3	0	4,5	0	0	0	0	0	0
5	0	5,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$p \neq 4$ . Go to step 5.

Step 5.  $q = 3$  and go to step 6.

Step 6.  $p \neq 4$  and go to step 7.

## COMMUNICATIONS

Step 7. Create table  $A^2$  by composing table  $B^q$  vertically, sort elements of table  $A^2$

	1	2	3	4	5
1	2,5,1	5,1,2	5,1,3	1,2,4	1,2,5
2	4,5,1	1,3,2	1,2,3	1,3,4	2,4,5
3	0	4,3,2	2,4,3	3,2,4	3,2,5
4	0	0	0	2,3,4	3,4,5

$u = 4$ , go to step 2.

Step 2.  $p = p + 1 = 3$ ,  $q = 0$ .

Step 3.  $q = q + 1 = 1$ .

	1	2	3	4	5
$c_{1j}$	2,5,1	5,1,2	5,1,3	1,2,4	1,2,5

Step 4.

	$c_{1j}^T$	$V$	$B^1$
1	2,5,1	0 1,2 1,3 0 0	0 0 2,5,1,3 0 0
2	5,1,2	0 0 2,3 2,4 2,5	0 0 5,1,2,3 5,1,2,4 0
3	5,1,3	+ 0 3,2 0 3,4 0	= 0 5,1,3,2 0 5,1,3,4 0
4	1,2,4	0 0 4,3 0 4,5	0 0 1,2,4,3 0 1,2,4,5
5	1,2,5	5,1 0 0 0 0	0 0 0 0 0

$p \neq 4$ . Go to step 5.

Step 5.  $p \neq 4$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 2$ .

	1	2	3	4	5
$c_{2j}$	4,5,1	1,3,2	1,2,3	1,3,4	2,4,5

Step 4.

	$c_{2j}^T$	$V$	$B^2$
1	4,5,1	0 1,2 1,3 0 0	0 0 4,5,1,2 4,5,1,3 0 0
2	1,3,2	0 0 2,3 2,4 2,5	0 0 0 0 1,3,2,4 1,3,2,5
3	1,2,3	+ 0 3,2 0 3,4 0	= 0 0 0 0 1,2,3,4 0
4	1,3,4	0 0 4,3 0 4,5	0 0 0 0 0 1,3,4,5
5	2,4,5	5,1 0 0 0 0	2,4,5,1 0 0 0 0 0

$p \neq 4$ . Go to step 5.

Step 5.  $p \neq 4$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 3$ .

	1	2	3	4	5
$c_{3j}$	0	4,3,2	2,4,3	3,2,4	3,2,5

Step 4.

	$c_{3j}^T$	$V$	$B^3$
1	0	0 1,2 1,3 0 0	0 0 0 0 0
2	4,3,2	0 0 2,3 2,4 2,5	0 0 0 0 4,3,2,5
3	2,4,3	+ 0 3,2 0 3,4 0	= 0 0 0 0 0
4	3,2,4	0 0 4,3 0 4,5	0 0 0 0 3,2,4,5
5	3,2,5	5,1 0 0 0 0	3,2,5,1 0 0 0 0

$p \neq 4$ . Go to step 5.

Step 5.  $p \neq 4$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 4$ .

	1	2	3	4	5
$c_{4j}$	0	0	0	2,3,4	3,4,5

Step 4.

	$c_{4j}^T$	$V$	$B^4$
1	0	0 1,2 1,3 0 0	0 0 0 0 0
2	0	0 0 2,3 2,4 2,5	0 0 0 0 0
3	0	+ 0 3,2 0 3,4 0	= 0 0 0 0 0
4	2,3,4	0 0 4,3 0 4,5	0 0 0 0 2,3,4,5
5	3,4,5	5,1 0 0 0 0	3,4,5,1 0 0 0 0

$p \neq 4$ . Go to step 5.

Step 5.  $q = 4$  and go to step 6.

Step 6.  $p \neq 4$  and go to step 7.

Step 7. Create table  $A^3$  by composing table  $B^q$  vertically, sort elements of table  $A^3$

	1	2	3	4	5
$A^3$	2,4,5,1	5,1,3,2	2,5,1,3	5,1,2,4	1,2,4,5
2	3,2,5,1	4,5,1,2	5,1,2,3	5,1,3,4	1,3,2,5
3	3,4,5,1	0	1,2,4,3	1,3,2,4	1,3,4,5
4	0	0	4,5,1,3	1,2,3,4	4,3,2,5
5	0	0	0	0	3,2,4,5
6	0	0	0	0	2,3,4,5

$u = 6$  and go to step 2.

Step 2.  $p = p + 1 = 4$ ,  $q = 0$ .

Step 3.  $q = q + 1 = 1$ .

	1	2	3	4	5
$c_{1j}$	2,4,5,1	5,1,3,2	2,5,1,3	5,1,2,4	1,2,4,5

Step 4.

	$c_{1j}^T$	$V$	$B^1$
1	2,4,5,1	0 1,2 1,3 0 0	0 0 2,4,5,1,3 0 0
2	5,1,3,2	0 0 2,3 2,4 2,5	0 0 0 0 5,1,3,2,4 0
3	2,5,1,3	+ 0 3,2 0 3,4 0	= 0 0 0 0 2,5,1,3,4 0
4	5,1,2,4	0 0 4,3 0 4,5	0 0 0 0 5,1,2,4,3 0 0
5	1,2,4,5	5,1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0

$p = 4$ ,  $m = 4$ .

Step 5.  $q \neq 6$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 2$ .

	1	2	3	4	5
$c_{2j}$	3,2,5,1	4,5,1,2	5,1,2,3	5,1,3,4	1,3,2,5

Step 4.

	$c_{2j}^T$	$V$	$B^2$
1	3,2,5,1	0 1,2 1,3 0 0	0 0 3,2,5,1,2 0 0
2	4,5,1,2	0 0 2,3 2,4 2,5	0 0 0 0 4,5,1,2,3 0 0
3	5,1,2,3	+ 0 3,2 0 3,4 0	= 0 0 0 0 5,1,2,3,4 0 0
4	5,1,3,4	0 0 4,3 0 4,5	0 0 0 0 0 0 0
5	1,3,2,5	5,1 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0

$p = 4, m = 6$ .

Step 5.  $q \neq 6$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 3$ .

	1	2	3	4	5
$c_{3j}$	3,4,5,1	0	1,2,4,3	1,3,2,4	1,3,4,5

Step 4.

	1	2	3	4	5
$c_{3j}^T$	V	B <sup>3</sup>			
1	3,4,5,1	0	1,2	1,3	0 0
2	0	0	2,3	2,4	2,5
3	1,2,4,3	+ 0	3,2	0	3,4 0
4	1,3,2,4		0	0	4,3 4,5
5	1,3,4,5		5,1	0	0 0 0

$p = 4, m = 8$ .

Step 5.  $q \neq 6$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 4$ .

	1	2	3	4	5
$c_{4j}$	0	0	4,5,1,3	1,2,3,4	4,3,2,5

Step 4.

	1	2	3	4	5
$c_{4j}^T$	V	B <sup>4</sup>			
1	0	0	1,2	1,3	0 0
2	0	0	2,3	2,4	2,5
3	4,5,1,3	+ 0	3,2	0	3,4 0
4	1,2,3,4		0	0	4,3 4,5
5	4,3,2,5		5,1	0	0 0 0

$p = 4, m = 11$ .

Step 5.  $q \neq 6$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 5$ .

	1	2	3	4	5
$c_{5j}$	0	0	0	0	3,2,4,5

Step 4.

	1	2	3	4	5
$c_{5j}^T$	V	B <sup>5</sup>			
1	0	0	1,2	1,3	0 0
2	0	0	2,3	2,4	2,5
3	0	0	3,2	0	3,4 0
4	0	0	4,3	0	4,5
5	3,2,4,5	+ 0	5,1	0	0 0 0

$p = 4, m = 12$ .

Step 5.  $q \neq 6$  and go to step 3.

Step 3.  $q = q + 1 = 6$ .

	1	2	3	4	5
$c_{6j}$	0	0	0	0	2,3,4,5

Step 4.

	$c_{6j}^T$	$V$	$B^6$
1	0	0	0 0 0 0 0
2	0	0	0 0 0 0 0
3	0	0	0 0 0 0 0
4	0	0	0 0 0 0 0
5	2,3,4,5	+ 5,1	0 0 0 0 0

$p = 4, m = 13$ .

Step 5.  $q = 6$  and go to step 6.

Step 6.  $p = 4$ . Answer:  $m = 13$  and go to step 8.

Step 8. End.

Therefore, given an arbitrary graph, the method ceases operation after a finite number of iterations ( $p = v - 1$ ) and allows full and accurate knowledge of all paths in a graph.

#### 1.4 Some conclusions

Solving the problem of full enumeration of Hamiltonian paths in a graph using the transposition method allowed to make the following conclusions:

1. Unlike methods that create a spanning tree rooted at a vertex, the transposition method creates:

- A map of Hamiltonian paths between one pair of vertices;
- A map of Hamiltonian paths between one vertex and all the other ones;

– A full enumeration map – paths from all vertices to all the others.

2. T transposition method also works with an adjacency matrix.

3. An enumeration map visualizes the enumeration process, allowing to research its patterns.

4. The volume of enumeration (intermediate results and answer) while solving the problem of enumerating Hamiltonian paths in a graph does not exceed  $ev!$ .

## 2. The node-graph method

### 2.1 Graph presentation

The graph  $G[V, E]$  is described with a set  $V$  of objects, called a «node-graph». Each node-graph looks like this:

$$\begin{bmatrix} y \\ s \end{bmatrix} U \begin{bmatrix} w \\ t \end{bmatrix},$$

where  $U$  is the body of the node-graph, the sequence of adjacent vertices (path)  $U \subset V$ ,  $u = |U|$  is the power of set  $U$ . Assume that the path from some vertex into itself always exists, and is of length  $p = 0$ . Then, to present the graph using node-graphs, take  $U = k$ , where  $k = \overline{1, v}$  is the number of the graph vertex.

$S$  is the input of the node-graph, an unlinked subset of vertices  $S \subset V$ ,  $s = |S|$  is the power of set  $S$ . Each vertex out of  $S$  only has an outgoing arc to the vertex out of  $U$ ,  $S \not\subset U$ . The input of the node-graph is placed to the left of the body.

$T$  is the output of the node-graph, an unlinked subset of vertices  $T \subset V$ ,  $t = |T|$  is the power of set  $T$ . Each vertex from  $T$  only has an incoming arc from the vertex into  $U$ ,  $T \not\subset U$ .

The output is placed to the right of the body.

$y, w$  are the process parameters of the node-graph that characterize the object, for example, the number of elements in a node-graph, weight etc. Let us assume that  $y$  is the number of paths going through the body  $U$ , while  $w = p$ .

Then the symbolic representation of the graph  $G[V, E]$  shown on Figure 1 is the following sorted set of node-graphs:

$j$	1	2	3	4	5
$c_{1j}$	$[2]1[2]$ $[5]1[2;3]$	$[5]2[2]$ $[1;3]2[3;4;5]$	$[4]3[2]$ $[1;2;4]3[2;4]$	$[3]4[2]$ $[2;3]4[3;5]$	$[2]5[2]$ $[2;4]5[1]$

The semicolon is used to separate the numbers representing vertices that do not have an adjacency property in the subset. Node-graphs represent  $G[V, E]$  as a combination of paths of length  $p = 2$  through each vertex of the graph. Meaning, each of  $v$  node-graphs can compress (concentrate)  $y \leq (v-1) \times (v-2)$  paths, since no more than  $(v-2)$  outputs exist for  $(v-1)$  inputs of each vertex. Moreover, no complicated procedure is required to obtain such a representation. It's not difficult to calculate that in such a presentation, the input size of the problem is substantially smaller than when the graph is presented in other ways.

## 2.2 Operation on node-graphs

The presented materials use the operations of vertex and arc addition (deletion) to (from) the body of the node-graph.

Addition of vertex  $i$  ( $j$ ) into the body from input  $S \neq \emptyset$  (output  $T \neq \emptyset$ ) is performed as follows:

- Adding this vertex to the set of vertices of body  $U = i + U$  ( $U = U + j$ ) while preserving all arcs of the graph,  $i \in S, j \in T$ ;
- Substituting inputs (outputs)  $S$  ( $T$ ) for outputs (inputs) of node-graph  $i$  ( $j$ ) in the initial presentation;
- Deleting vertices  $i$  ( $j$ ) belonging to  $U$ , together with their incidental arcs, from  $S$  ( $T$ ).

## 2.3 Enumeration of paths in a graph

The enumeration process using the node-graph method consists of regulated addition of a vertex from the input (output) into the body of the node-graph. Regulation algorithms may vary, but the author presents the following algorithm.

Let us assume that graph  $G[V, E]$  is defined by a sorted combination  $v$  of node-graphs.

Step 1.  $p = 2, m = 0$ . If  $p = v - 1$ , then  $m = m + \sum y$  and go to step 8, otherwise go to step 2.

Step 2. If  $v = 2n + 1 | n \in N$ , then  $r = v$  and go to step 6, otherwise go to step 3.

Step 3.  $q = \overline{1, r}, j = \overline{1, t}, j \in T$  for  $\forall c_{1j}$ , if  $T \neq \emptyset$ , create table-rows  $D$ , enter  $d_{qj} = c_{1q}$  into each cell of the table. Number the table columns after each vertex of the output. Go to step 4.

Step 4.  $p = p + 1, q = \overline{1, r}, j = \overline{1, t}$ . For  $\forall d_{qj} \neq 0$ , add the vertex to the body of the node-graph from output  $U = U + j$ , where  $j$  is the table column number. If  $T = \emptyset \vee (s = t = 1 \wedge S = T)$ , the node-graph is deleted.

If  $p = v - 1$ , then  $m = m + \sum y$  and go to step 8, otherwise go to step 5.

Step 5.  $r = 0$ . Create table  $C = \begin{matrix} d_{1j} \\ \dots \\ d_{vj} \end{matrix}$  of size  $(v-1) \times (v-1)$

by composing tables  $D$  vertically, for  $i = \overline{1, v}, j = \overline{1, t}$  sort elements of table  $C$ , if  $c_{ij} \neq 0$ , then  $r = r + 1$  and go to step 6.

Step 6. For  $\forall c_{ij}$ , create tables  $D^q$  of size  $s \times t, q = \overline{1, r}$ .

Number the table rows after each vertex of the input. Number the table columns after each vertex of the output. If  $i \neq j$ , enter one element from table  $d_{ij}^q = c_{ij}$  into each table cell. Go to step 7.

Step 7.  $p = p + 2$ . For  $\forall d_{ij}^q$ , if  $d_{ij}^q \neq 0$ , add the vertex into the body of each node-graph from input and output  $U = i + U + j$ , where  $i$  is the table row number,  $j$  is the table column number. If  $S = \emptyset \vee T = \emptyset \vee (s = t = 1 \wedge S = T)$  the node-graph is deleted. If  $p = v - 1$ , then  $m = m + \sum y$  and go to step 8, otherwise go to step 5.

Step 8. End.

## 2.4 Example

Let us assume that graph  $G[V, E]$  (Figure 1) is defined by a combination of node-graphs

$j$	1	2	3	4	5
$c_{1j}$	$[2]1[2]$ $[5]1[2;3]$	$[5]2[2]$ $[1;3]2[3;4;5]$	$[4]3[2]$ $[1;2;4]3[2;4]$	$[3]4[2]$ $[2;3]4[3;5]$	$[2]5[2]$ $[2;4]5[1]$

Step 1.  $p = 2, m = 0$ .  $p \neq 4$  - go to step 2.

Step 2.  $v = 5$  - odd number  $r = 5$  - go to step 6.

Step 6. For  $\forall c_{ij}$ , create tables  $D^q$  of size  $s \times t, q = \overline{1, r}$ .

Number the table rows after each vertex of the input. Number the table columns after each vertex of the output. If  $i \neq j$ , enter one element from table  $d_{ij}^q = c_{ij}$  into each table cell.

$5$	$2$	$3$
	$[2]1[2]$ $[5]1[2;3]$	$[2]1[2]$ $[5]1[2;3]$

$1$	$3$	$4$	$5$
	$[5]2[2]$ $[1;3]2[3;4;5]$	$[5]2[2]$ $[1;3]2[3;4;5]$	$[5]2[2]$ $[1;3]2[3;4;5]$
$3$	0	$[5]2[2]$ $[1;3]2[3;4;5]$	$[5]2[2]$ $[1;3]2[3;4;5]$

$1$	$2$	$4$
	$[4]3[2]$ $[1;2;4]3[2;4]$	$[4]3[2]$ $[1;2;4]3[2;4]$
$2$	0	$[4]3[2]$ $[1;2;4]3[2;4]$
$4$	$[4]3[2]$ $[1;2;4]3[2;4]$	0

	3	5
2	$[3]4[2]$ [2;3][3;5]	$[3]4[2]$ [2;3][3;5]
3	0	$[3]4[2]$ [2;3][3;5]

	1
2	$[2]5[2]$ [2;4][1]
4	$[2]5[2]$ [2;4][1]

Go to step 7.

Step 7.  $p = p + 2 = 4$  and add vertices to the body of each node-graph.

	2	3
5	$[1]5,1,2[4]$ [4][3;4]	$[2]5,1,3[4]$ [2;4][2;4]

$$p = v - 1 = 4, m = 0 + 3 = 3$$

	3	4	5
1	$[1]1,2,3[4]$ [5][4]	$[1]1,2,4[4]$ [5][3;5]	0
3	0	$[1]3,24,[4]$ [1][5]	$[1]3,2,5[4]$ [1;4][1]

$$p = 4, m = 3 + 4 = 7$$

	2	4
1	$[1]1,3,2[4]$ [5][4;5]	0
2	0	$[1]2,3,4[4]$ [1][5]
4	0	0

$$p = 4, m = 7 + 2 = 9$$

	3	5
2	0	$[1]2,4,5[4]$ [1;3][1]
3	0	$[1]3,4,5[4]$ [1;2][1]

$$p = 4, m = 9 + 2 = 11$$

	1
2	0
4	$[2]4,5,1[4]$ [2;3][2;3]

$$p = 4, m = 11 + 2 = 13 \text{ go to step 8.}$$

Step 8. End.

The node-graph method, like the transposition method, works properly on an arbitrary graph and allows for searching of paths not only "from" and "into", but also "through" the graph vertex.

#### 2.5 Some conclusions

Solving the problem of full enumeration of Hamiltonian paths in a graph with the node-graph method allowed to make the following conclusions:

1. The node-graph method allows for decreasing the input size (volume of input data) of the problem.

2. The node-graph method creates paths through a certain set of vertices (body of the node-graph) in various directions.

3. The node-graph method transforms (concentrates) a certain combination of paths into one mathematical object.

4. The volume of enumeration (intermediate results and answer) while solving the problem of enumerating Hamiltonian paths in a graph does not exceed  $\frac{e}{5}v!$ .

#### Conclusion

The following conclusions were made:

1. Modern government and enterprise control systems, communication and automation networks, information and power supply systems, transport systems are characterized by a vast territorial reach, a huge number of objects, high-intensity streams (of information, energy, cargo etc.), a complex connection structure and unpredictable quality of resources. Accurate analysis and optimization of operation of distributed systems is a very complex problem, which the discrete mathematics apparatus currently has no solutions for. Usually, the graph theory apparatus is used to describe and analyze such systems in the most convenient way [10-12].

2. A graph is the only mathematical object combining the structural and flow content of discrete mathematical problems. As a consequence, it's exceptionally popular in science fields related to network structures [13-15].

3. Any enumeration method on a graph is a theoretical base for development of algorithms, for both optimization and existence problems.

4. A new presentation of a mathematical object usually also defines new forms of processing of such objects. This means that if there is a goal to develop a new mathematical method, including one that solves calculation problems, first of all, it's necessary to try to change the presentation form of the mathematical object - in our case, a graph.

5. A new presentation form also defines new procedures (operations) and its own specific set of algorithms for working with graphs. This means that the possibility of using a specific method for various discrete mathematical problems is equally defined by the graph presentation quality and the set of operations and variety of options for their applications.

6. A graph can be presented as a graphic, as an arc matrix, as a set of node-graphs and in a multitude of other ways. All of them are equivalent, since any graph presentation can be obtained from another one.

7. As the results show, graph presentation using a set of node-graphs is the most compact option. As a consequence, it's possible to compress enumeration results while preserving its qualitative properties: versatility, comprehensiveness and accuracy.

#### References

- M. Gary, D. Johnson. Computing machines and intractable problems. Moscow: Mir, 1982. p. 6.
- V.K. Leontiev. Discrete optimization. *Journal of computational mathematics and mathematical physics*. 2007. Vol. 47. No. 2, pp. 338-352.
- H. Papadimitriou, K. Steiglitz. Combinatorial optimization. Algorithms and complexity. Moscow: Mir, 1982. 440 p.
- Yu.A. Kochetov. Computational possibilities of local search in combinatorial optimization. *Journal of computational mathematics and mathematical physics*. 2008. Vol. 48. No. 5, pp. 788-807.

5. L.A. Levin. Universal enumeration problems. *Information transfer problems*, 1973. Vol. 9, issue 3, pp. 115-116.
6. H. Christoffides. Graph theory. Algorithmic approach. Moscow: Mir, 1978.
7. V. Lipsky. Combinatorics for programmers. Moscow: Mir Publ., 1988, 213 p.
8. R. Stanley. Combinatorics for programmers. Moscow: Mir Publ., 1990, 440 p.
9. V.N. Burkov, S.E. Lovetsky. Methods of solving extremal problems of combinatorial type (review). *Automation and telemechanics*, 1968. Vol. 11, pp. 68-93.
10. V.G. Burlav, M.I. Grachev. Application of network models in social and economic systems. *T-Comm*, 2021. Vol. 15, no. 2, pp. 33-38.
11. A.S. Volkov, A.E. Baskakov. Development of a multipath routing algorithm in software-defined communication networks. *T-Comm*, 2021. Vol. 15, no. 9, pp. 17-23.
12. G.A. Ptitsyn. Estimation methods and mathematical models of communication networks survivability. *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No. 4, pp. 47-51.
13. O. Darintsev, A. Migranov. Analytical review of approaches to the distribution of tasks for mobile robot teams based on soft computing technologies. *Informatics and Automation*. 2022. Vol. 21. No. 4.
14. A.V. Smirnov. Polynomial algorithm of finding the shortest path in a divisible multiple graph. *Modeling and analysis of information systems*. Vol. 29, No. 4, 2022, pp. 372-387.
15. A.M. Kovshov. A parallel algorithm for iterating partitions of a finite set into subsets of a given cardinality. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2020, vol. 16, iss. 1, pp. 50-61.

## МЕТОДЫ ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА В ГРАФЕ

**Куделя Виктор Николаевич**, ЗАО "Институт Сетевых Технологий", г. Санкт-Петербург, Россия,  
[Kudelia.Viktor@int.spb.ru](mailto:Kudelia.Viktor@int.spb.ru)

### Аннотация

Целью статьи является анонсирование нескольких способов задания графов и разработанных для этих представлений методов перебора: метода транспонирования и метода узел-графов. Данная публикация представляет базовые результаты работы автора над снижением остроты проблемы класса NP-полных задач.

**Ключевые слова:** граф, путь, гамильтонов путь, задача перечисления

### Литература

- Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. С. 6.
- Леонтьев В.К. Дискретная оптимизация // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т. 47. №2. С. 338-352.
- Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. М.: Мир, 1982. С. 440.
- Кочетов Ю.А. Вычислительные возможности локального поиска в комбинаторной оптимизации // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2008. Т. 48. №5. С. 788-807.
- Левин Л.А. Универсальные задачи перебора // Проблемы передачи информации, 1973, том 9, выпуск 3. С. 115-116.
- Кристофидес Н. Теория графов Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978.
- Липский В. Комбинаторика для программистов /пер. с польск. В.А. Евстигнеева, О.А. Логиновой; под ред. А.П. Ершова. М.: Мир, 1988. 213 с.
- Стенли Р. Перечислительная комбинаторика /пер. с англ. Барвинка А.И., Лодкина А.А.; под ред. А. М. Вершика. М.: Мир, 1990. 440 с.
- Бурков В.Н., Ловецкий С.Е. Методы решения экстремальных задач комбинаторного типа (обзор) // Автоматика и телемеханика, 1968, выпуск 11. С. 68-93.
- Бурлов В.Г., Грачев М.И. Применение сетевых моделей в социальных и экономических системах // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №. 2. С. 33-38
- Волков А.С., Баскаков А.Е. Разработка алгоритма многопутевой маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №. 9. С. 17-23.
- Птицын Г.А. Методы оценки и математические модели живучести сетей связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. №. 4. С. 47-51.
- Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Аналитический обзор подходов к распределению задач в группах мобильных роботов на основе технологий мягких вычислений // Информатика и автоматизация, 2022, выпуск 21, том 4. С. 729-757.
- Смирнов А.В. Полиномиальный алгоритм поиска кратчайшего пути в делимом кратном графе // Моделирование и анализ информационных систем, 2022, том 29, №4. С. 372-387.
- Ковшов А.М. Разделяемый алгоритм перебора разбиений конечного множества на подмножества заданной мощности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления, 2020, том 16, выпуск 1. С. 50-61.

### Информация об авторе:

**Куделя Виктор Николаевич**, ЗАО "Институт Сетевых Технологий", ведущий специалист, доктор технических наук, г. Санкт-Петербург, Россия