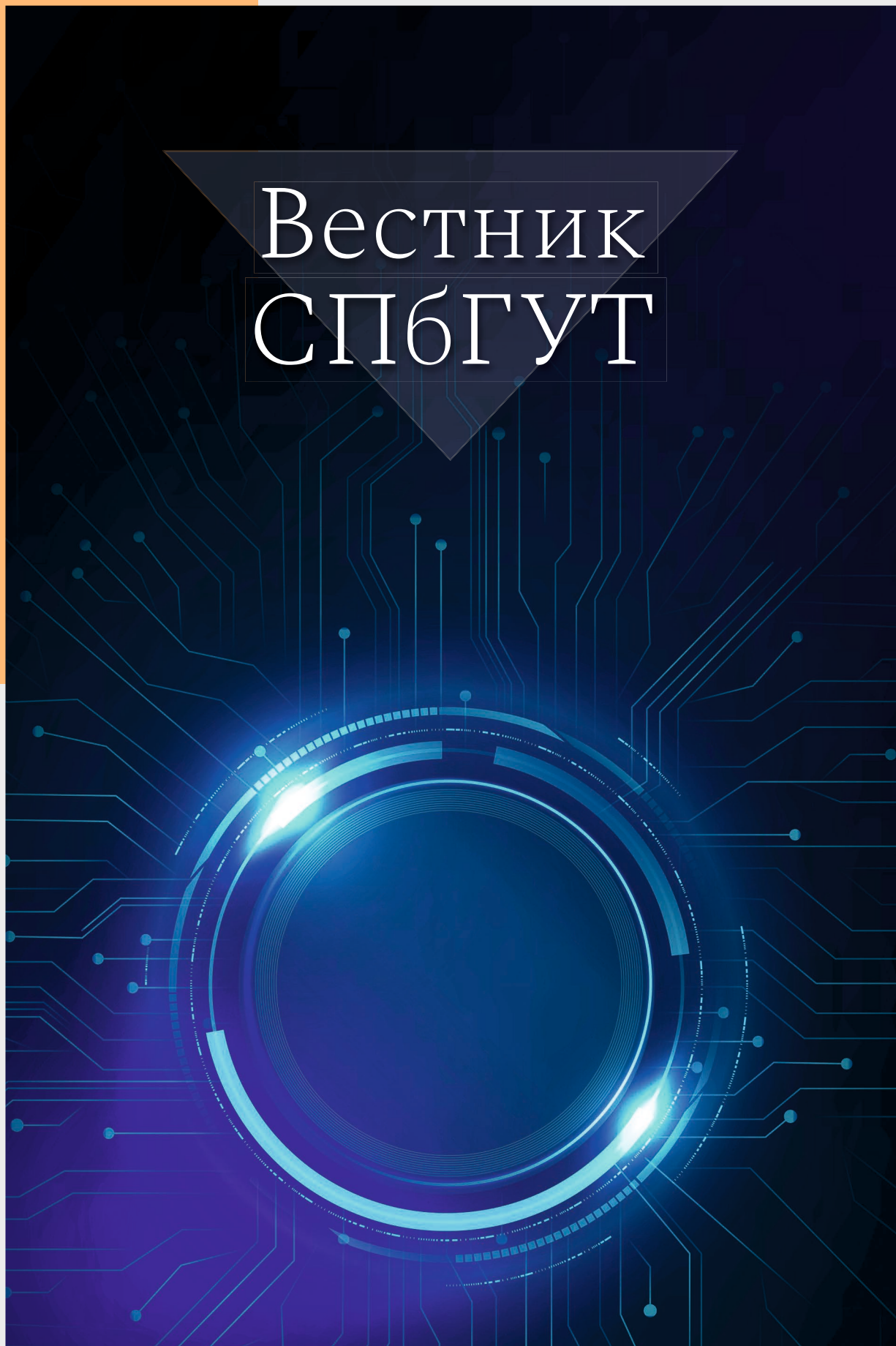


ISSN 3034-2201

Вестник СПбГУТ

Том 3. № 2. 2025



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

Научный журнал

Вестник СПбГУТ

Том 3. № 2

Herald of SPbSUT

Vol. 3. Iss. 2

Санкт-Петербург

2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Editorial Board

Главный редактор *Editor-in-Chief*

Владыко А.Г. (Санкт-Петербург)
Vladyko A.G. (St. Petersburg)

Гехт А.Б. (Санкт-Петербург)
Gekht A.B. (St. Petersburg)

Дунайцев Р.А. (Санкт-Петербург)
Dunaytsev R.A. (St. Petersburg)

Зикратов И.А. (Санкт-Петербург)
Zikratov I.A. (St. Petersburg)

Калимуллина О.В. (Санкт-Петербург)
Kalimullina O.V. (St. Petersburg)

Литвинов В.Л. (Санкт-Петербург)
Litvinov V.L. (St. Petersburg)

Маколкина М.А. (Санкт-Петербург)
Okuneva D.V. (St. Petersburg)

Симонина О.А. (Санкт-Петербург)
Simonina O.A. (St. Petersburg)

Сотников А.Д. (Санкт-Петербург)
Sotnikov A.D. (St. Petersburg)

Фокин Г.А. (Санкт-Петербург)
Fokin G.A. (St. Petersburg)

Шутман Д.В. (Санкт-Петербург)
Shutman D.V. (St. Petersburg)

Юрова В.А. (Санкт-Петербург)
Yurova V.A. (St. Petersburg)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Уравнение сбалансированного дуплекса
и бюджеты нисходящего и восходящего
каналов в соте системы мобильной
связи на его основе
Мелихов С. В.

1 *Balanced Duplex Equation and Budgets
of Downlink and Uplink Channels in a Cell
of a Mobile Communication System
Based on It*
Melikhov S.

Анализ применения технологий связи для
удаленной идентификации беспилотных
воздушных судов с использованием
электронных идентификаторов
на территории Российской Федерации
Антропов М. В., Усс В. С.

2 *Analysis of the Application of Communication
Technologies for Remote Identification
of Unmanned Aerial Vehicles Using
Electronic Identifiers in the Russian
Federation*
Antropov M., Uss V.

Математический анализ финансовых
пузырей через фрактальную размерность
**Плотников П. В., Назаров Д. В.,
Чуева А. А., Ким З. В.**

3 *Mathematical Analysis of Financial Bubbles
through Fractal Dimensionality*
Plotnikov P., Nazarov D.,
Chueva A., Kim Z.

Актуальные проблемы социальной
адаптации людей с нарушенным
слухом и их решение посредством
информационных технологий
Волошинов Д. В., Зюриков М. А.

4 *Current Problems of Social Adaptation
of People with Hearing Impairments
and their Solution through Information
Technology*
Voloshinov D., Zurikov M.

Метод балансировки задержки и потерь
данных в гетерогенных сетях высокой
плотности Интернета вещей
Хоанг Ф. Н., Парамонов А. И.

5 *A Method for Balancing Latency and Data
Loss in High-Density Heterogeneous
Internet of Things Networks*
Hoang Ph. N., Paramonov A.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций: Эл № ФС77-85553 от 28 июня 2023 г.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Адрес 191186, Санкт-Петербург, набережная реки Мойки,
учредителя: д. 61, литера А

Адрес редакции: 193232, Санкт-Петербург,
пр. Большевиков, 22/1, к. 334/2
Тел.: +7 (812) 326-31-63, м. т. 2022,
+79643759970

E-mail: vestnik@sut.ru
Web: <http://vestnik-sut.ru>

УДК 621.396.41
EDN: ZVYCEM

Уравнение сбалансированного дуплекса и бюджеты нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи на его основе

Мелихов С. В.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Томск, 634034, Российская Федерация

Цель работы: вывод уравнения сбалансированного дуплекса и разработка методики расчета бюджетов нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи GSM-2G. **Методы исследования:** схемотехнический анализ условий дуплексной радиосвязи для типовых структур нисходящего и восходящего каналов соты. **Новизна:** по предложенной методике максимальная дальность радиосвязи в соте системы GSM-2G из-за ограниченной мощности абонентской станции рассчитывается на основе параметров восходящего канала, а необходимая мощность передатчика базовой станции определяется с использованием уравнения сбалансированного дуплекса на основе параметров приема-передающей аппаратуры базовой и абонентской станций, а также характеристик нисходящего и восходящего радиоканалов. **Результат:** получено новое уравнение сбалансированного дуплекса и предложена методика расчета бюджетов нисходящего и восходящего каналов сотовой системы GSM-2G. **Практическая / Теоретическая значимость:** результаты работы могут быть полезны для разработчиков приема-передающей аппаратуры различных радиосистем.

Ключевые слова: мобильная связь, базовая станция, абонентская станция, нисходящий канал, восходящий канал, сбалансированный дуплекс, мощность, передатчик, затухание радиоволн, радиоприемник, радиотракт, полосовой фильтр, мал шумящий усилитель, фидер, усилитель-селектор, коэффициент шума, реальная чувствительность радиоприемника

Введение

В работе [1] для вывода уравнения сбалансированного дуплекса в соте мобильной связи GSM-2G использованы структурные схемы приема-передающей аппаратуры (ППА) базовой станции (БС) и абонентской станции (АС) системы GSM, изображенные на рисунке 1, где П — передатчик; УС — усилитель-селектор; К — комбайнер; Ф — фидер; МШУ — мал шумящий усилитель; ПФ — полосовой фильтр; А_п — передающая антенна; А_{пр} — приемная антенна.

Структурные схемы ППА БС и АС имеют ряд особенностей. В составе ППА БС используется комбайнер — блок объединения-распределения радиосигналов, позволяющий нескольким передатчикам работать с одной передающей антенной и нескольким приемникам — с одной приемной антенной. Для улучшения чувствительности приемного тракта БС используется антенный МШУ с ПФ на входе. ПФ необходим для защиты МШУ от внеполосных мешающих радиосигналов.

Структурная схема ППА АС содержит два фидера и две антенны, что необходимо для вывода уравнения сбалансированного дуплекса. На практике в малогабаритных переносных АС нет необходимости

Библиографическая ссылка на статью:

Мелихов С. В. Уравнение сбалансированного дуплекса и бюджеты нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи на его основе // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 2. С. 1. EDN: ZVYCEM

Reference for citation:

Melikhov S. Balanced Duplex Equation and Budgets of Downlink and Uplink Channels in a Cell of a Mobile Communication System Based on It // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 2. P. 1. EDN: ZVYCEM

в фидерах, и используется одна приемо-передающая антенна. УС приемных трактов БС и АС выполняют функции основного усиления и селекции радиосигнала.

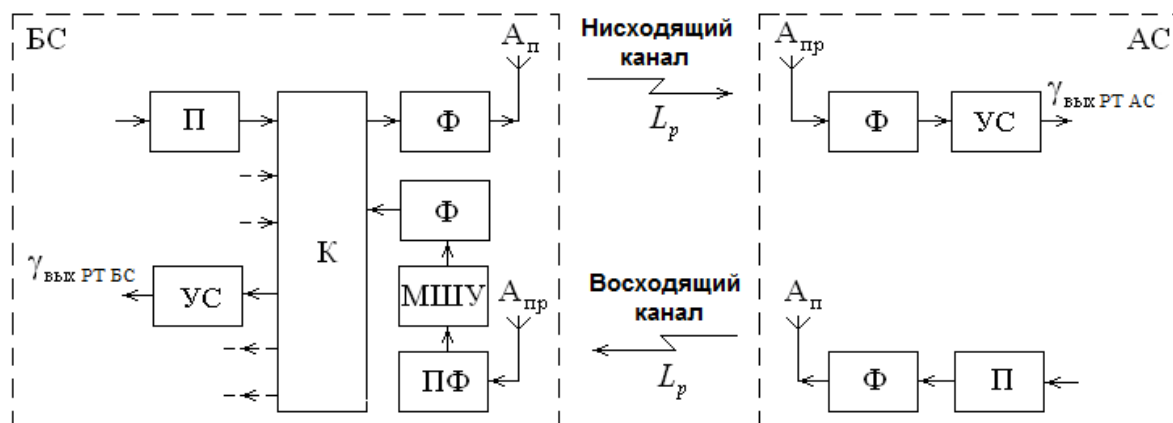


Рис. 1. Структурные схемы ППА БС и АС

Полученное в работе [1] уравнение сбалансированной дуплексной радиосвязи между БС и АС в соте мобильной системы имеет вид:

$$\frac{P_{\text{БС}} G_{\text{п_БС}} G_{\text{пр_АС}} \eta_{\text{п_Ф_АС}}}{P_{\text{АС}} G_{\text{п_АС}} G_{\text{пр_БС}} \eta_{\text{п_Ф_БС}}} = \frac{(N_{\text{внеш_АС}} - 2) + \eta_{\text{пр_Ф_АС}} N_{\text{УС_АС}}}{(N_{\text{внеш_БС}} - 2) + \eta_{\text{п_Ф}} [N_{\text{МШУ}} + (\eta_{\text{пр_БС}} N_{\text{УС_БС}} - 1) / k_{\text{МШУ}}]}, \quad (1)$$

где $P_{\text{БС}}$ — мощность передатчика БС; $P_{\text{АС}}$ — мощность передатчика АС; $G_{\text{п_БС}}$, $G_{\text{пр_БС}}$ — коэффициенты усиления антенны БС в режимах передачи и приема соответственно; $G_{\text{п_АС}}$, $G_{\text{пр_АС}}$ — коэффициенты усиления антенны АС в режимах передачи и приема соответственно; $\eta_{\text{п_БС}} = \eta_{\text{п_Ф_БС}} \eta_{\text{п_К_БС}}$ — потери мощности радиосигнала в фидере ($\eta_{\text{п_Ф_БС}}$) и в комбайнере ($\eta_{\text{п_К_БС}}$) БС в режиме передачи; $\eta_{\text{пр_БС}} = \eta_{\text{пр_Ф_БС}} \eta_{\text{пр_К_БС}}$ — потери мощности радиосигнала в фидере ($\eta_{\text{пр_Ф_БС}}$) и комбайнере ($\eta_{\text{пр_К_БС}}$) БС в режиме приема; $\eta_{\text{п_Ф_АС}}$, $\eta_{\text{пр_Ф_АС}}$ — потери в фидере АС в режимах передачи и приема соответственно; $\eta_{\text{п_Ф}}$ — потери полосового фильтра; $N_{\text{УС_АС}}$, $N_{\text{УС_БС}}$ — коэффициенты шума УС приемников АС и БС соответственно; $N_{\text{МШУ}}$, $k_{\text{МШУ}}$ — коэффициент шума и коэффициент усиления по мощности МШУ; $N_{\text{внеш_АС}}$, $N_{\text{внеш_БС}}$ — результирующие коэффициенты внешнего шума для приемников АС и БС соответственно.

Термин «сбалансированная дуплексная радиосвязь», используемый в работе [1], характеризует одинаковое качество радиосвязи в нисходящем и восходящем каналах:

$$\gamma_{\text{вых_РТ_АС}} = \gamma_{\text{вых_РТ_БС}},$$

где $\gamma_{\text{вых_РТ_АС}}$, $\gamma_{\text{вых_РТ_БС}}$ — отношения средней мощности сигнала к средней мощности шума на выходах радиотрактов (РТ) приемников АС и БС соответственно (см. рисунок 1) при максимальном удалении АС от БС (т. е. при нахождении АС на границе соты).

Однако при выводе уравнения (1) в [1] использованы выражения для реальной чувствительности приемников АС и БС, имеющие систематическую ошибку, значения которой, как показано в работе [2], лежат в пределах от 2 до 5 дБ при значениях результирующего коэффициента внешнего шума от 0 до 40 дБ. Кроме этого, дуплексная радиосвязь возможна и при условии, что $\gamma_{\text{вых_РТ_АС}} \neq \gamma_{\text{вых_РТ_БС}}$. Целесообразно поэтому вывести новое уравнение сбалансированной дуплексной радиосвязи в соте системы GSM-2G на основе новых выражений для реальной чувствительности приемников АС и БС, полученных в [2], а также с учетом возможного отличия значений $\gamma_{\text{вых_РТ_АС}}$ и $\gamma_{\text{вых_РТ_БС}}$.

Вывод нового уравнения сбалансированной дуплексной радиосвязи в соте мобильной системы GSM-2G

Для структурных схем ППА (см. рисунок 1), характеризующих дуплексную радиосвязь в соте системы GSM-2G между БС и АС, справедливы следующие выражения с учетом формул для реальной чувствительности приемного тракта АС ($P_{с_вх_0_АС}$) и реальной чувствительности приемного тракта БС ($P_{с_вх_0_БС}$), полученных в [2]:

$$P_{с_вх_АС} = \frac{P_{БС} G_{п_БС} G_{пр_АС}}{\eta_{п_БС} L_{p_БА}} = P_{с_вх_0_АС} = \gamma_{вых_РТ_АС} P_{ш_0_АС} N_{внеш_АС} \eta_{пр_Ф_АС} N_{УС_АС}, \quad (2)$$

$$P_{с_вх_БС} = \frac{P_{АС} G_{п_АС} G_{пр_БС}}{\eta_{п_Ф_АС} L_{p_АБ}} =$$

$$= P_{с_вх_0_БС} = \gamma_{вых_РТ_БС} P_{ш_0_БС} N_{внеш_БС} \eta_{п_Ф} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}], \quad (3)$$

где $P_{с_вх_АС}$ — мощность сигнала на входе АС от БС; $P_{с_вх_БС}$ — мощность сигнала на входе БС от АС; $P_{БС}$ — мощность передатчика БС; $P_{АС}$ — мощность передатчика АС; $L_{p_БА}$, $L_{p_АБ}$ — затухания радиоволн в нисходящем и восходящем каналах соответственно; $P_{ш_0_АС} = k T_0 B_{ш_АС} = N_0 B_{ш_АС}$ — номинальная мощность теплового шума в шумовой полосе АС $B_{ш_АС} \approx B_{RF_АС}$; $B_{RF_АС}$ — полоса пропускания приемника АС для сигнала с радиочастотой (Radio Frequency); $N_0 = k T_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц — спектральная плотность мощности аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) в полосе 1 Гц; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; $T_0 = 290$ К (при 17 °С); $P_{ш_0_БС} = k T_0 B_{ш_БС} = N_0 B_{ш_БС}$ — номинальная мощность теплового шума в шумовой полосе приемника БС $B_{ш_БС} \approx B_{RF_БС}$; $B_{RF_БС}$ — полоса пропускания приемника БС для сигнала с радиочастотой.

Поделив выражение (2) на (3), получим:

$$\frac{P_{БС} G_{п_БС} G_{пр_АС} \eta_{п_Ф_АС}}{P_{АС} G_{п_АС} G_{пр_БС} \eta_{п_БС} L_{p_БА}} = \frac{\gamma_{вых_РТ_АС} B_{RF_АС} N_{внеш_АС} \eta_{пр_Ф_АС} N_{УС_АС}}{\gamma_{вых_РТ_БС} B_{RF_БС} N_{внеш_БС} \eta_{п_Ф} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}]} \quad (4)$$

Выражение (4) связывает (балансирует) параметры ППА и характеристики нисходящего и восходящего радиоканалов ($L_{p_АБ}$, $L_{p_БА}$, $N_{внеш_АС}$, $N_{внеш_БС}$) при дуплексной радиосвязи для структурных схем БС и АС, изображенных на рисунке 1, поэтому целесообразно называть его «уравнением сбалансированного дуплекса». Уравнение (4), в отличие от (1), устанавливает связь между основными параметрами ППА БС и АС без систематической ошибки, а также позволяет учесть возможные различия в характеристиках нисходящего и восходящего радиоканалов (различия между $L_{p_АБ}$ и $L_{p_БА}$, а также между $N_{внеш_АС}$ и $N_{внеш_БС}$). Следует также заметить, что уравнение (4) может быть решено относительно любого параметра ППА БС и АС.

Методика расчета бюджетов нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи GSM-2G с использованием уравнения сбалансированного дуплекса

Для минимизации вредного влияния высокочастотного излучения на организм человека мощность передатчика АС жестко ограничивается. Например, для системы GSM-2G-900 максимальная мощность передатчика носимой АС $P_{АС_макс} = 1$ Вт [4]. В связи с этим в работе [1] предложено максимальную дальность радиосвязи в соте, т. е. радиус круговой зоны обслуживания БС r (км), рассчитывать с использованием моделей Окамура — Хата [5] для «квазигладких местностей» различного типа («большой город», «малый город», «пригород», «сельская местность», «открытая местность») по формуле:

$$r = 10^{(L_{p_доп} - A)/B} \quad (5)$$

на основе допустимого ослабления мощности радиоволны в восходящем канале:

$$L_{p_доп} = \frac{P_{AC_макс} G_{п_AC} G_{пр_BC}}{\eta_{п_Ф_AC} P_{с_вх_0_BC}}, \quad (6)$$

где $P_{с_вх_0_BC}$ – реальная чувствительность приемника БС.

В частности, для «сельской местности» (характеризующейся наличием открытых участков длиной не менее 300 м, чередующихся с 1–2-этажными домами) по модели Окамура – Хата затухание радиоволны (дБ):

$$L_p = \{32,81 - 13,82 \lg(h_{BC}) + 46,05 \lg(f) - 4,78 [\lg(f)]^2 - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{MC}\} + \{44,9 - 6,55 \lg(h_{BC})\} \lg(r) = A + B \lg(r), \quad (7)$$

где h_{BC} , h_{AC} – высоты антенн БС и АС (м); f – несущая радиочастоты (МГц).

В предположении того, что $L_p = L_{p_доп}$, из (7) для (5) следует:

$$A = \{32,81 - 13,82 \lg(h_{BC}) + 46,05 \lg(f) - 4,78 [\lg(f)]^2 - [1,1 \lg(f) - 0,7] h_{AC}\}, \quad (8)$$

$$B = \{44,9 - 6,55 \lg(h_{BC})\}. \quad (9)$$

Нужно отметить, что мощность излучения БС также ограничивается, однако не так жестко, как АС, и может превосходить ее [6].

Если радиус соты определен на основе допустимого ослабления мощности радиоволны в восходящем канале с использованием выражений (5, 6, 8, 9), то для обеспечения сбалансированного дуплекса на границе соты достаточно рассчитать на основе уравнения (4) необходимую мощность передатчика БС (\hat{P}_{BC}) при определенных параметрах ППА БС и АС и характеристиках нисходящего и восходящего радиоканалов. Рассчитанное значение \hat{P}_{BC} определит сбалансированные бюджеты нисходящего и восходящего каналов.

Несущие частоты радиосвязи нисходящего и восходящего каналов в соте системы GSM-2G различны. При этом затухания радиоволн в нисходящем и восходящем каналах несколько отличаются. Поскольку относительное различие несущих частот незначительно $(f_{восх} - f_{нисх})/f_{восх} \approx 0,05$ [3], в силу принципа взаимности можно предположить, что $L_{p_БА} = L_{p_АБ}$. Считая также, что в нисходящем и восходящем каналах системы GSM-2G одинаковы качество радиоприема ($\gamma_{вых_PT_AC} = \gamma_{вых_PT_BC}$), полосы пропускания приемников АС и БС ($B_{RF_AC} = B_{RF_BC}$) и результирующие коэффициенты внешнего шума ($N_{внеш_AC} = N_{внеш_BC}$), из (4) получим выражение для расчета необходимой мощности передатчика БС:

$$\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс} \left\{ \frac{G_{п_AC} G_{пр_BC} \eta_{п_BC} \eta_{пр_AC} N_{УС_AC}}{G_{п_BC} G_{пр_AC} \eta_{п_AC} \eta_{Ф} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_BC} N_{УС_BC} - 1)/k_{МШУ}]} \right\}. \quad (10)$$

На основе выражения (10) можно утверждать, что:

- при $P_{BC} > \hat{P}_{BC}$ дальность радиосвязи нисходящего канала будет больше, чем дальность радиосвязи восходящего канала;
- при $P_{BC} < \hat{P}_{BC}$ дальность радиосвязи нисходящего канала будет меньше, чем возможная дальность радиосвязи восходящего канала.

Учитывая изложенное, предлагается следующая методика расчета сбалансированных бюджетов нисходящего и восходящего каналов, а также максимально возможного радиуса зоны обслуживания БС (радиуса соты) системы мобильной связи при известных параметрах приема-передающих трактов ($G_{п_BC}$, $G_{пр_BC}$, $G_{п_AC}$, $G_{пр_AC}$, $\eta_{п_Ф_BC}$, $\eta_{пр_Ф_BC}$, $\eta_{п_К_BC}$, $\eta_{пр_К_BC}$, $\eta_{п_Ф_AC}$, $\eta_{пр_Ф_AC}$, B_{RF} , $N_{внеш_BC}$, $N_{внеш_AC}$, $N_{УС_BC}$, $N_{УС_AC}$).

Шаг 1. По формулам (2) и (3) рассчитываются реальные чувствительности приемных трактов АС и БС: $P_{с_вх_0_AC}$, $P_{с_вх_0_BC}$.

Шаг 2. По формуле (6), исходя из ограниченной мощности АС $P_{AC_макс}$ и реальной чувствительности БС $P_{с_вх_0_BC}$, определяется допустимое ослабление мощности радиоволны в восходящем канале $L_{p_доп}$.

Шаг 3. По формуле (10) при ограниченной мощности АС ($P_{AC_макс}$) рассчитывается необходимая мощность передатчика БС (\hat{P}_{BC}) для сбалансированного дуплекса на границе соты.

Шаг 4. На основе значения необходимой мощности полезного радиосигнала на выходе РТ и значения чувствительности приемного тракта рассчитываются коэффициенты усиления УС АС и БС.

Шаг 5. С использованием рассчитанных данных строятся диаграммы сбалансированных бюджетов нисходящего и восходящего радиоканалов на границе соты.

Шаг 6. Рассчитывается максимально возможный радиус зоны обслуживания БС (радиус соты) по формуле (5), для которой коэффициенты A и B определяются моделью Окамура – Хата для «квазигладких местностей» различного типа («большой город», «малый город», «пригород», «сельская местность», «открытая местность»).

Ниже продемонстрировано применение разработанной методики для расчета сбалансированных бюджетов нисходящего и восходящего каналов в соте системы мобильной связи GSM-900.

Сбалансированные бюджеты нисходящего и восходящего каналов на границе соты при отсутствии антенного МШУ в приемном тракте БС системы GSM-2G-900

Если на БС антенный МШУ с ПФ не используется, то из (10) при $\eta_{ПФ} = 1$, $k_{МШУ} = 1$, $N_{МШУ} = 1$ для сбалансированного дуплекса на границе соты необходимая мощность передатчика БС рассчитывается следующим образом:

$$\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс} \left(\frac{G_{п_AC} G_{пр_BC} \eta_{п_BC} \eta_{пр_AC} N_{УС_AC}}{G_{п_BC} G_{пр_AC} \eta_{п_AC} \eta_{пр_BC} N_{УС_BC}} \right).$$

Если для упрощения расчетов предположить, что $G_{п_BC} = G_{пр_BC}$, $G_{п_AC} = G_{пр_AC}$, $\eta_{п_BC} = \eta_{пр_BC}$, а $\eta_{п_AC} = \eta_{пр_AC} = 1$ (что соответствует отсутствию фидера в малогабаритных переносных АС), то:

$$\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс} (N_{УС_AC} / N_{УС_BC}). \quad (11)$$

При принятых упрощениях из (11) следует, что в случае отсутствия на БС антенного МШУ необходимая мощность передатчика БС должна быть больше (или меньше) максимальной мощности передатчика АС в $(N_{УС_AC} / N_{УС_BC})$ раз.

Если в приемниках АС и БС используются УС с одинаковым коэффициентом шума ($N_{УС_AC} = N_{УС_BC}$), то $\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс}$.

На рисунке 2 представлены бюджеты нисходящего и восходящего каналов в соте для «сельской местности» при отсутствии в приемном тракте БС антенного МШУ с учетом следующих типовых значений параметров РТ соты системы GSM-2G-900:

$$G_{п_BC} = G_{пр_BC} = 4 = 6 \text{ дБ}; G_{п_AC} = G_{пр_AC} = 1 = 0 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_Ф_BC} = \eta_{пр_Ф_BC} = 1,58 = 2 \text{ дБ}; \eta_{п_К_BC} = \eta_{пр_К_BC} = 4 = 6 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_BC} = \eta_{пр_BC} = 1,58 \cdot 4 = 6,32 = 8 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_Ф_AC} = \eta_{пр_Ф_AC} = 1 = 0 \text{ дБ}; B_{ш_BC} = B_{ш_AC} \approx B_{RF} = 200 \text{ кГц};$$

$$N_{внеш_BC} = N_{внеш_AC} = 2 = 3 \text{ дБ (шум атмосферы Земли)};$$

$$N_{УС_BC} = N_{УС_AC} = 2 = 3 \text{ дБ};$$

$$\gamma_{вых_РТ_BC} = \gamma_{вых_РТ_AC} = (E_b/N_0)[2n/(1+\alpha)] = 10,3 \cdot [2 \cdot 2/(1+0,3)] \approx 31,7 \approx 15 \text{ дБ},$$

где E_b – энергия сигнала на 1 бит; $n = 2$ – число битов в символе GMSK-радиосигнала; $\alpha = 0,3$ – коэффициент спада АЧХ (Roll-off-Factor) каналов обработки БС–АС и АС–БС; $(E_b/N_0) = 10,2$ дБ $\approx 10,3$ при вероятности ошибочных битов $P_b = 10^{-3}$ [7];

$$P_{с_вх_0_АС} = \gamma_{вых_РТ_АС} P_{ш_0_АС} N_{внеш_АС} \eta_{пр_Ф_АС} N_{УС_АС} =$$

$$= 31,7 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 1,01 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} \approx -130 \text{ дБВт};$$

$$P_{вых_РТ} = U_{вых_РТ}^2 / R_H = (1 \text{ В})^2 / (50 \text{ Ом}) = 0,02 \text{ Вт} \approx -17 \text{ дБВт},$$

где $U_{вых_РТ}$ – выходное напряжение РТ; R_H – сопротивление нагрузки РТ;

$$k_{УС_АС} = P_{вых_РТ} - P_{с_вх_0_АС} = -17 \text{ дБВт} - (-130 \text{ дБВт}) = 113 \text{ дБ};$$

$$P_{с_вх_0_БС} = \gamma_{вых_РТ_БС} P_{ш_0_БС} N_{внеш_БС} \eta_{пр_БС} N_{УС_БС} =$$

$$= 31,7 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 6,32 \cdot 2 = 6,34 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} \approx -122 \text{ дБВт};$$

$$k_{УС_БС} = P_{вых_РТ} - P_{с_вх_0_БС} + \eta_{Ф_БС} + \eta_{К_БС} =$$

$$= -17 \text{ дБВт} - (-122 \text{ дБВт}) + 2 \text{ дБ} + 6 \text{ дБ} = 113 \text{ дБ};$$

$$L_{p_доп} = \frac{P_{АС_макс} G_{П_АС} G_{пр_БС}}{\eta_{П_Ф_АС} P_{с_вх_0_БС}} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 4}{1 \cdot 6,34 \cdot 10^{-13}} = 6,3 \cdot 10^{12} = 128 \text{ дБ};$$

$$\hat{P}_{БС} = P_{АС_макс} (N_{УС_АС} / N_{УС_БС}) = 1 \cdot (2/2) = 1 \text{ Вт} = 0 \text{ дБВт}. \quad (12)$$

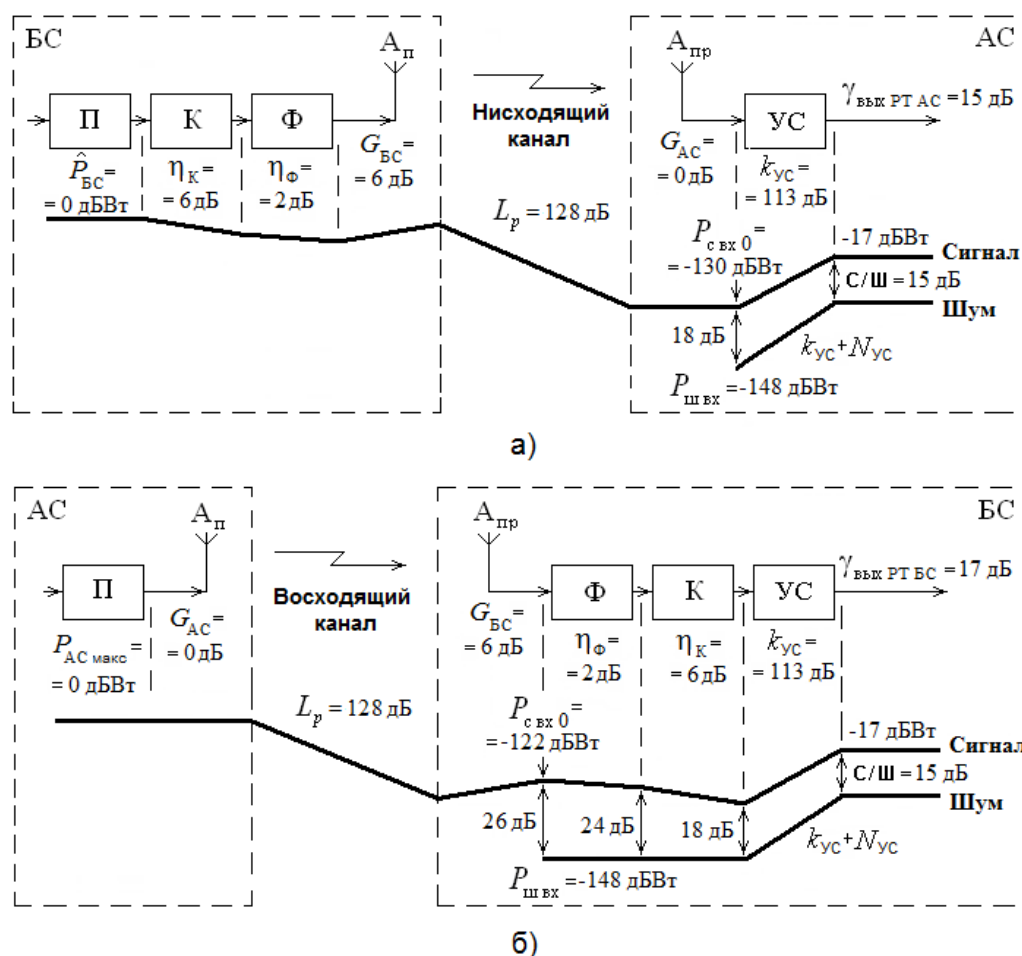


Рис. 2. Диаграммы сбалансированных бюджетов нисходящего (а) и восходящего (б) радиоканалов на границе соты системы GSM-2G-900 для «сельской местности» при отсутствии в приемном тракте БС антенного МШУ

Если $h_{BC} = 30$ м, $h_{AC} = 1,5$ м, $f = 900$ МГц, то с использованием выражений (8 и 9):

$$A = \{32,81 - 13,82 \lg(30) + 46,05 \lg(900) - 4,78 [\lg(900)]^2 - [1,1 \lg(900) - 0,7] \cdot 1,5\} = 102,9;$$

$$B = \{44,9 - 6,55 \lg(30)\} = 35,22.$$

На основе формулы (5) радиус соты в «сельской местности» без использования антенного МШУ в приемном тракте БС составит:

$$r = 10^{(L_{p_доп} - A)/B} = 10^{(128 - 102,9)/35,22} \approx 5,2 \text{ км}.$$

Сбалансированные бюджеты нисходящего и восходящего каналов на границе соты при использовании антенного МШУ в приемном тракте БС системы GSM-2G-900

При использовании на БС МШУ с ПФ на входе и в предположении того, что $G_{п_БС} = G_{пр_БС}$, $G_{п_МС} = G_{пр_МС}$, $\eta_{п_БС} = \eta_{пр_БС}$, $\eta_{пр_АС} = \eta_{п_АС} = 1$, из (10) следует:

$$\hat{P}_{BC} = P_{МС_макс} \left\{ \frac{\eta_{п_БС} N_{УС_АС}}{\eta_{ПФ} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}]} \right\}. \quad (13)$$

При принятых упрощениях выражение (13) показывает, что в случае использования на БС антенного МШУ требуемая мощность передатчика БС должна быть больше максимальной мощности передатчика АС приблизительно в $\left\{ \frac{\eta_{п_БС} N_{УС_АС}}{\eta_{ПФ} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}]} \right\}$ раз.

На рисунке 3 представлены бюджеты нисходящего и восходящего каналов в соте для «сельской местности» при использовании в приемном тракте БС антенного МШУ с ПФ на входе с учетом следующих типовых значений параметров РТ соты системы GSM-900:

$$G_{п_БС} = G_{пр_БС} = 4 = 6 \text{ дБ}; G_{п_АС} = G_{пр_АС} = 1 = 0 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_Ф_БС} = \eta_{пр_Ф_БС} = 1,58 = 2 \text{ дБ}; \eta_{п_К_БС} = \eta_{пр_К_БС} = 4 = 6 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_БС} = \eta_{пр_БС} = 1,58 \cdot 4 = 6,32 = 8 \text{ дБ};$$

$$\eta_{ПФ} = 1,26 = 1 \text{ дБ}; k_{МШУ} = 100 = 20 \text{ дБ}; N_{МШУ} = 1,26 = 1 \text{ дБ};$$

$$\eta_{п_Ф_АС} = \eta_{пр_Ф_АС} = 1 = 0 \text{ дБ}; B_{ш_БС} = B_{ш_АС} \approx B_{RF} = 200 \text{ кГц};$$

$$N_{внеш_БС} = N_{внеш_АС} = 2 = 3 \text{ дБ}; N_{УС_БС} = N_{УС_АС} = 2 = 3 \text{ дБ};$$

$$P_{АС_макс} = 1 \text{ Вт} = 0 \text{ дБВт};$$

$$P_{с_вх_0_АС} = \gamma_{вых_РТ_АС} P_{ш_0_АС} N_{внеш_АС} \eta_{пр_Ф_АС} N_{УС_АС} = 31,7 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 = 1 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} = -130 \text{ дБВт};$$

$$k_{УС_АС} = P_{вых_РТ} - P_{с_вх_0_АС} = -17 \text{ дБВт} - (-130 \text{ дБВт}) = 113 \text{ дБ};$$

$$P_{с_вх_0_БС} = \gamma_{вых_РТ_БС} P_{ш_0_БС} N_{внеш_БС} \eta_{ПФ} [N_{МШУ} + (\eta_{пр_БС} N_{УС_БС} - 1)/k_{МШУ}] = 31,7 \cdot 4 \cdot 10^{-21} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 1,26 \cdot \left[1,26 + \frac{(6,32 \cdot 2 - 1)}{100} \right] = 8,81 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} = -130,6 \text{ дБВт};$$

$$k_{УС_БС} = P_{вых_РТ} - P_{с_вх_0_АС} + \eta_{ПФ} + k_{МШУ} + \eta_{Ф_БС} + \eta_{К_БС} = -17 \text{ дБВт} - (-130,6 \text{ дБВт}) + 1 \text{ дБ} + 20 \text{ дБ} + 2 \text{ дБ} + 6 \text{ дБ} = 102,6 \text{ дБ};$$

$$L_{p_доп} = \frac{P_{AC_макс} G_{п_AC} G_{пр_BC}}{\eta_{п_Ф_AC} P_{с_вх_0_BC}} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 4}{1,881 \cdot 10^{-14}} = 4,54 \cdot 10^{13} = 136,6 \text{ дБ};$$

$$\hat{P}_{BC} = P_{AC_макс} \left\{ \frac{\eta_{п_BC} N_{уc_AC}}{\eta_{п_Ф} \left[N_{мшu} + \frac{(\eta_{пр_BC} N_{уc_BC} - 1)}{k_{мшu}} \right]} \right\} = 1 \cdot \left\{ \frac{6,32 \cdot 2}{1,26 \cdot \left[1,26 + \frac{(6,32 \cdot 2 - 1)}{100} \right]} \right\} = 7,29 \text{ Вт} = 8,6 \text{ дБВт}. \quad (14)$$

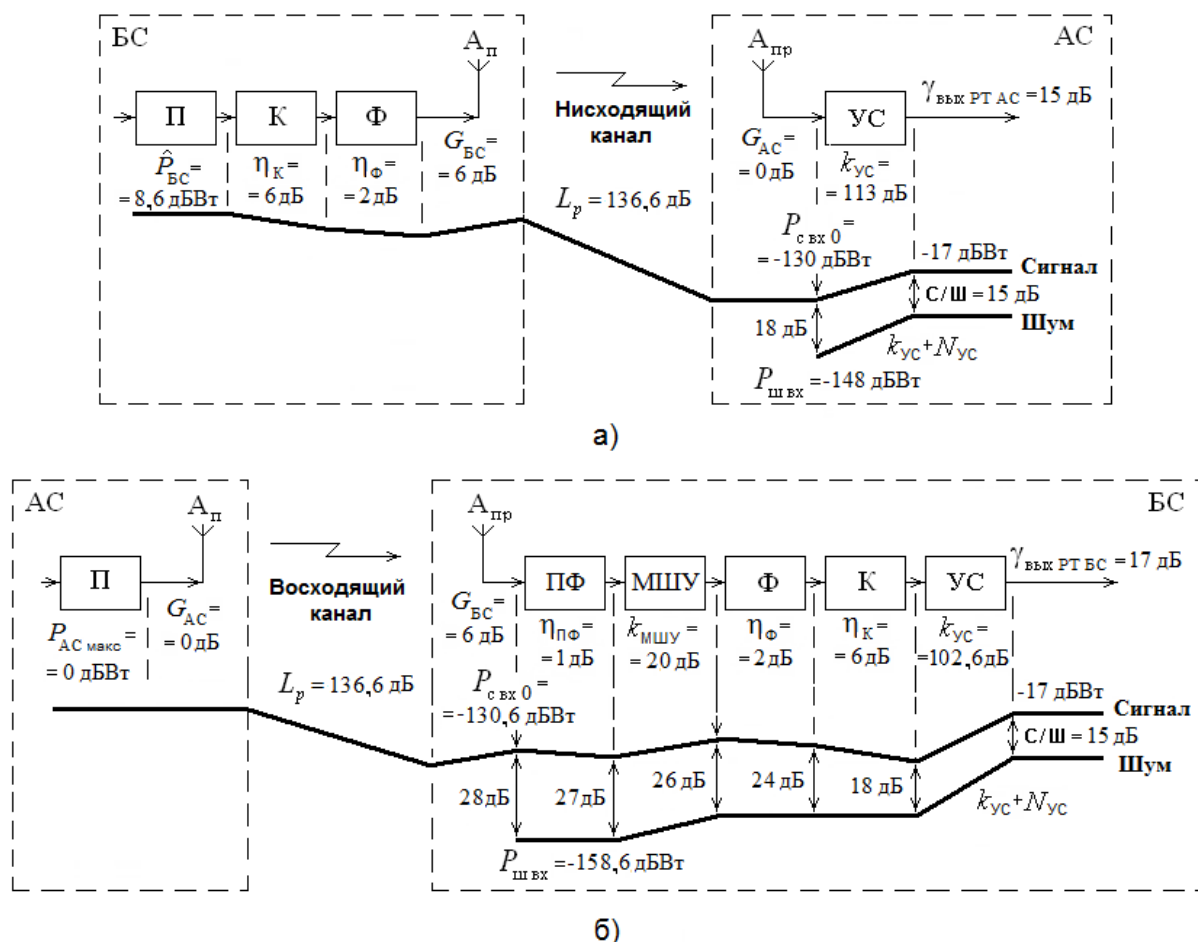


Рис. 3. Диаграммы сбалансированных бюджетов нисходящего (а) и восходящего (б) радиоканалов на границе соты системы GSM-2G-900 для «сельской местности» при наличии в приемном тракте БС антенного МШУ

В этом случае радиус соты БС в «сельской местности» составит:

$$r = 10^{(L_{p_доп} - A)/B} = 10^{(136,6 - 102,9)/35,22} \approx 9,05 \text{ км}.$$

Проведенные расчеты показали, что использование антенного МШУ на БС, обслуживающей «квазигладкую сельскую местность», увеличивает максимальную дальность с 5,2 км до 9,1 км и приводит к увеличению необходимой мощности передатчика БС с 0 до 8,6 дБВт (см. выражения (12, 14), рисунки 2а, 3а).

Выводы

Во-первых, дуплексная радиосвязь в соте системы мобильной связи GSM-2G описывается «уравнением сбалансированного дуплекса» (4), связывающим технические параметры ППА и характеристики нисходящего и восходящего радиоканалов.

Во-вторых, максимальную дальность сбалансированного дуплекса в соте из-за ограниченной мощности АС необходимо рассчитывать с использованием параметров восходящего канала, используя выражение (4) для расчета необходимой мощности передатчика БС.

В-третьих, использование уравнения (4) для расчета необходимой мощности передатчика БС, соответствующей максимальной дальности сбалансированного дуплекса в соте, позволяет реализовать сбалансированные бюджеты нисходящего и восходящего каналов.

В заключение целесообразно отметить, что полученное «уравнение сбалансированного дуплекса» при соответствующих предпосылках может быть использовано и для других поколений сотовой связи.

Литература

1. Мелихов С. В. Уравнение дуплексной радиосвязи сотовой системы // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 1 (35). С. 37–41. EDN: TVUDXN
2. Мелихов С. В. Оценка чувствительности радиоприемника с использованием коэффициентов внешних и внутренних шумов // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 3. С. 5. EDN: IHBCRE
3. Бабков В. Ю., Цикин И. А. Сотовые системы мобильной связи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 432 с.
4. Громаков Ю. А. Стандарты и системы подвижной связи. М.: Международный центр научной и технической информации, 1996. 240 с.
5. Милютин Е. Р., Василенко Г. О., Сиверс М. А., Волков А. Н., Певцов Н. В. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона / под ред. Е. Р. Милютина. СПб.: Триада, 2003. 159 с. EDN: QMNNJL
6. Мордачев В. И., Свистунов А. С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2013. № 7 (77). С. 44–50. EDN: YZBKOP
7. Мелихов С. В., Кологривов В. А. Взаимосвязь качественных характеристик для различных видов цифровой манипуляции // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2006. № 6 (14). С. 68–76. EDN: KUBZQH

Статья поступила 18 апреля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 06 мая 2025 г.
Принята к публикации 12 мая 2025 г.

Информация об авторе

Мелихов Сергей Всеволодович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.
E-mail: mrc@main.tusur.ru

Balanced Duplex Equation and Budgets of Downlink and Uplink Channels in a Cell of a Mobile Communication System Based on It

S. Melikhov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Tomsk, 634034, Russian Federation

The purpose: derivation of the balanced duplex equation and development of the calculation method of the downlink and uplink channel budgets in the cell of the GSM-2G mobile communication system. Research methods: circuit analysis of the duplex radio communication conditions for typical structures of the downlink and uplink channels of the cell. The novelty: according to the proposed method, the maximum radio communication range in a GSM-2G cell, due to the limited power of the subscriber station, is calculated based on the parameters of the uplink channel, and the required transmitter power of the base station is determined using the balanced duplex equation based on the parameters of the receiving and transmitting equipment of the base and subscriber stations, as well as the characteristics of the downlink and uplink radio channels. Result: a new balanced duplex equation was obtained and a method for calculating the downlink and uplink channel budgets of the GSM-2G cellular system was proposed. Practical / Theoretical significance: the results of the work can be useful for developers of receiving and transmitting equipment of various radio systems.

Key words: mobile communication, base station, subscriber station, downlink, uplink, balanced duplex, power, transmitter, radio wave attenuation, radio receiver, radio path, bandpass filter, low-noise amplifier, feeder, amplifier-selector, noise figure, real sensitivity of radio receiver

Information about Author

Melikhov Sergey – Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Radio Engineering Systems (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics). E-mail: mrc@main.tusur.ru

УДК 621.396
EDN: NUTNVF

Анализ применения технологий связи для удаленной идентификации беспилотных воздушных судов с использованием электронных идентификаторов на территории Российской Федерации

Антропов М. В. ✉, Усс В. С.

НПЦ-СПб ОКБ «ЛЭМЗ» ПАО «НПО «Алмаз»»,
Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация

Постановка задачи. В условиях стремительного роста применения беспилотных воздушных судов актуализируется проблема отсутствия стандартов для их дистанционного наблюдения, а недостаточная обеспеченность современными видами связи удаленных регионов страны затрудняет контроль за их применением. **Целью работы** является анализ современных технологий связи (АЗН-В, сотовой, спутниковой, маломощных радиочастотных технологий), которые могут обеспечить построение надежной единой системы дистанционной идентификации беспилотных воздушных судов. **Новизна:** проведенное исследование отличается наиболее полным анализом соответствующих аспектов рассматриваемых технологий связи. **Результат:** получена оценка применимости рассматриваемых технологий для удаленной идентификации как на настоящий момент, так и в обозримой перспективе. **Практическая значимость** состоит в возможности использования результатов работы для построения национальной системы контроля за беспилотными воздушными судами.

Ключевые слова: удаленная идентификация, беспилотные воздушные суда, электронный идентификатор, беспилотные авиационные системы, беспроводные технологии связи

Актуальность

В настоящее время беспилотные воздушные суда (БВС) используются в различных сферах экономики: в сельском хозяйстве, промышленности (в том числе в нефтегазовом секторе), строительстве, сфере развлечений, на транспорте и многих других. Согласно данным, приведенным в Паспорте «Беспилотные авиационные системы» (<https://legalacts.ru/doc/pasport-bespilotnye-aviatsionnye-sistemy-utv-minpromtorgom-rossii>), объем российского рынка БВС будет постоянно расти (рисунок 1).

В связи со стремительным ростом объема БВС остро встает вопрос о безопасном пребывании их в воздушном пространстве, так как увеличивается риск потенциальных аварий, в том числе столкновений с пилотируемыми воздушными судами (ВС). В свою очередь, развитие современных систем беспроводной связи может обеспечить дистанционную идентификацию в случае оснащения БВС специальными электронными идентификаторами, позволяющими получать исчерпывающую информацию о них, что в свою очередь позволит контролировать местоположение (и, соответственно, законность их нахождения в воздушном пространстве), предотвращать потенциальные аварии и даже безопасно интегрировать БВС в существующую инфраструктуру воздушного движения.

Библиографическая ссылка на статью:

Антропов М. В., Усс В. С. Анализ применения технологий связи для удаленной идентификации беспилотных воздушных судов с использованием электронных идентификаторов на территории Российской Федерации // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 2. С. 2. EDN: NUTNVF

Reference for citation:

Antropov M., Uss V. Analysis of the Application of Communication Technologies for Remote Identification of Unmanned Aerial Vehicles Using Electronic Identifiers in the Russian Federation // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 2. P. 2. EDN: NUTNVF

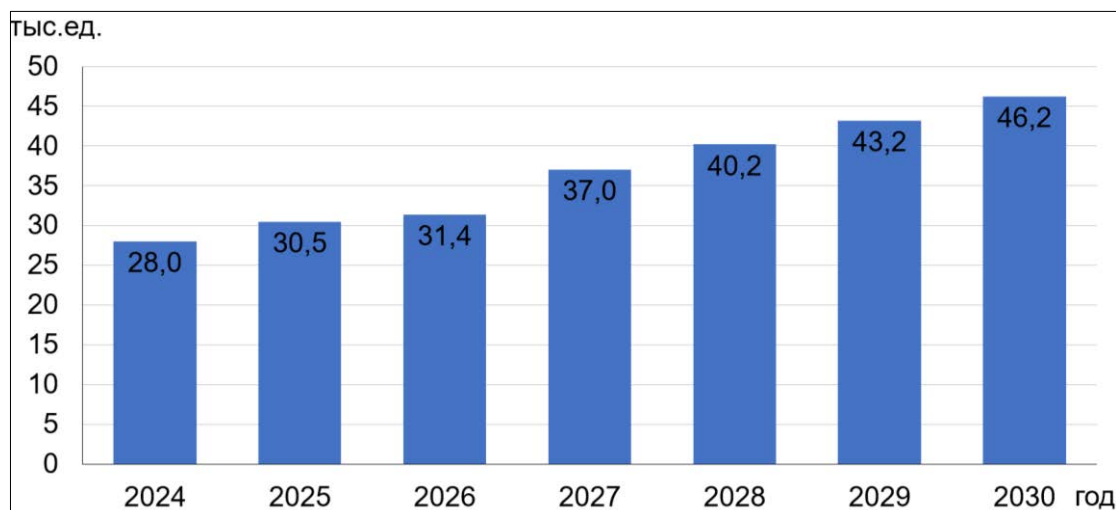


Рис. 1. Объем российского рынка БВС (в том числе самолеты, вертолеты, мультироторы) без учета образовательных БВС

Однако, несмотря на вступление в силу с 01.03.2025 г. Постановления¹ Правительства РФ № 1701 от 30.11.2024 г. об обязательном оснащении оборудованием удаленной идентификации БВС с максимальной взлетной массой от 0,25 до 30 кг для выполнения визуальных полетов, до сих пор не определена технология связи, на базе которой будет создаваться система идентификации БВС. Следовательно, задача сравнительного анализа существующих технологий связи и выбора оптимальной для создания единой системы удаленной идентификации БВС в РФ является актуальной.

Постановка задачи

Сейчас в открытых источниках практически отсутствует сравнительный анализ возможностей использования существующих беспроводных технологий связи для удаленной идентификации БВС. Это затрудняет выбор эффективных подходов к реализации систем удаленной идентификации БВС на территории РФ и приводит к необходимости рассмотреть каждую из технологий беспроводной связи:

- технологии автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В);
- технологии сотовой связи;
- технологии спутниковой связи;
- маломощные радиочастотные технологии.

На основании сравнения указанных технологий на предмет применимости в задачах удаленной идентификации БВС планируется выбрать оптимальную из них для создания единой системы в реалиях РФ. Для успешного решения поставленной задачи прежде всего необходимо определить процедуру идентификации БВС и уникальный идентификационный номер (УИН) БВС.

Процедура удаленной идентификации БВС

Под удаленной идентификацией в соответствии с упомянутым выше постановлением Правительства будем понимать формирование и передачу информации, содержащей в обязательном порядке опознавательный индекс (УИН), категорию данного ВС, высоту его полета и координаты местоположения. Кроме обязательной информации возможна передача дополнительных данных о БВС (рисунок 2).

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2024 г. № 1701 // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202412030025> (дата обращения 07.04.2025).

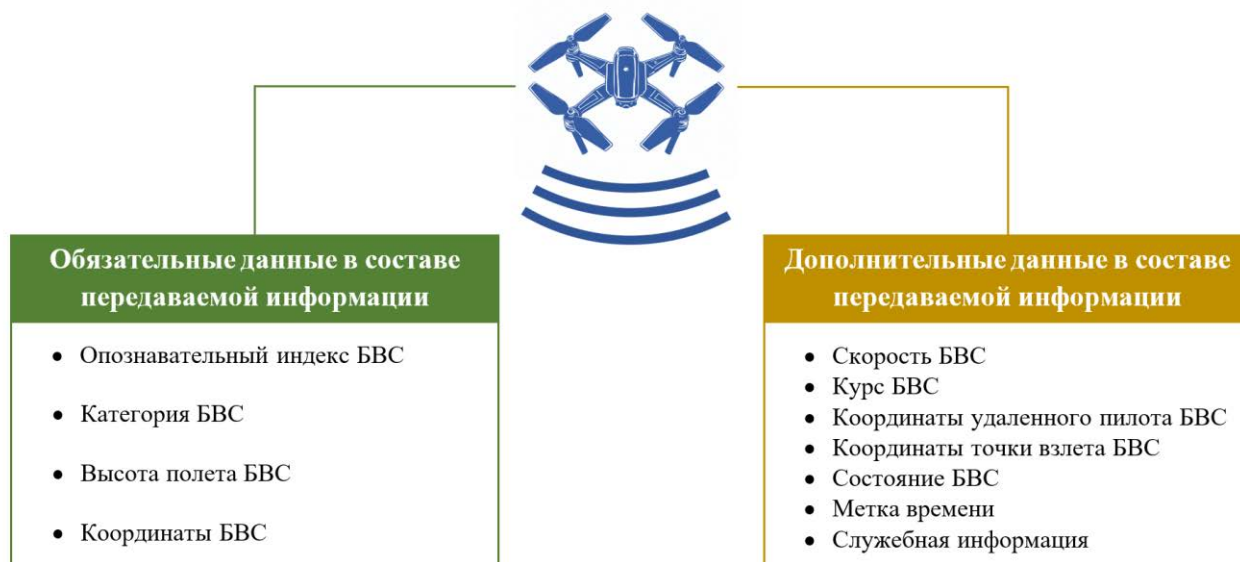


Рис. 2. Состав передаваемой информации при удаленной идентификации

Процесс идентификации должен быть полностью автоматизирован. Средства автоматизации этого процесса совместно с электронным идентификатором должны функционировать в составе системы, которая имеет доступ к базе данных о БВС. Процедура идентификации должна включать в себя следующие этапы [1]:

- учет БВС;
- оборудование БВС электронным идентификатором;
- сбор данных идентификации;
- обработку данных для передачи сообщения;
- передачу сообщения;
- получение сообщения;
- обработку сообщения;
- верификацию сообщения;
- распределение данных по потребителям;
- сопоставление полученного УИН с информацией базы данных о БВС.

Определение УИН БВС

Упомянутый выше учет БВС в настоящее время осуществляет Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация) с использованием системы регистрации БВС, включающей в себя базу данных о БВС, и информационного портала, являющегося функциональной подсистемой базы данных (Портал учета ВС). Порядок предоставления содержащейся в базе данных информации устанавливает Министерство транспорта РФ. Процедура учета БВС должна также включать в себя получение для него УИН, который будет передаваться с борта БВС в сообщениях электронного идентификатора. УИН должен однозначно связывать электронный идентификатор, оборудованное им БВС и оператора (владельца) этого БВС. Кроме того, вся эта информация (связанная с УИН) должна содержаться в базе данных о БВС.

УИН ICAO

В целях идентификации ВС Международной организацией гражданской авиации (ICAO, аббр. от *англ.* International Civil Aviation Organization) применяется процедура назначения индивидуального адреса ВС, состоящего из 24 бит, — одного из 16 777 214 адресов ВС, распределяемых ICAO государствам регистрации или полномочному органу регистрации общих знаков и присваиваемых в соответствии с Приложением 10 к Конвенции о международной гражданской авиации [2].

России предоставлен один из самых больших блоков (1 048 576 адресов), выделенных ICAO для одной страны [2]. На настоящий момент его хватит, чтобы обеспечить идентификацию как пилотируемых, так и беспилотных ВС. Помимо этого есть возможность дополнительно получить еще 16 777 214 адресов для присвоения БВС на территории России. Для этого в томе IV Приложения 10 к Конвенции о международной гражданской авиации [3] предусмотрено использование кода «1» управляющего поля CF расширенного сквиттера. Этот код зарезервирован для устройств-неприемоответчиков и позволяет применять другие методы адресации в поле 24-битного адреса, т. е. не ICAO-адреса. Таким образом, 24-битный адрес ВС может служить в качестве УИН для БВС.

УИН DOA

Также идентификацию БВС можно реализовать на основе архитектуры цифровых объектов (DOA, *аббр. от англ.* Digital Object Architecture), представляющей реальные объекты как множество именovaných цифровых объектов и инфраструктуры и позволяющей по уникальному имени цифрового объекта получить его данные. Технология DOA разработана Международным союзом электросвязи в 2014 г. для идентификации цифровых объектов и устройств интернета вещей¹.

В СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича разработана концепция Единой системы идентификации и прослеживаемости беспилотных авиационных систем (ЕСИП БАС) на основе DOA. DOA обеспечивает подлинно международное управление и независимость распределения ресурсов идентификации. Использование идентификации на базе DOA позволит учитывать все существующие уникальные идентификаторы (MAC, IMEI, ID, IPv4 / IPv6 и др.), обеспечив привязку устройств и приложений Интернета вещей без соотнесения с конкретным идентификатором².

Совместное использование УИН ICAO и DOA

Система контроля жизненного цикла БАС на основе DOA позволяет интегрировать 24-битный адрес ВС следующим образом. Для любого объекта, имеющего уникальный код ICAO, выделяется уникальный идентификатор, в метаданные которого заносятся все необходимые сведения, связанные с этим идентификатором, и ссылки на информационные системы, в которых хранится эта информация.

Таким образом, предлагаемый вариант ЕСИП БАС позволяет интегрировать в систему контроля жизненного цикла БАС идентификацию на основе кодов ICAO без изменений в системе управления воздушным движением традиционных ВС, а также масштабировать использование других систем идентификации, в которых применение открытых международных уникальных кодов идентификации ВС невозможно по техническим или иным причинам, связанным с обеспечением требований безопасности применения БАС, включая специальные применения.

Анализ технологии АЗН-В для удаленной идентификации БВС

Технология АЗН-В уже давно используется в пилотируемой авиации. На сегодняшний день существует три стандартизованных ICAO линии передачи данных (ЛПД) для АЗН-В:

- приемопередатчик универсального доступа (UAT, *аббр. от англ.* Universal Access Transceiver);
- расширенный сквиттер на частоте 1090 МГц (1090 ES, *аббр. от англ.* Extended Squitter);
- линия цифровой связи в диапазоне очень высоких частот (ОВЧ) режима 4 (VDL-4, *аббр. от англ.* Very High Frequency Digital Link Mode 4).

¹ В России хотят запретить полеты БПЛА без спецмодемов на борту // CNews. 12.04.2024. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2024-04-12_v_rossii_hotyat_zapretit (дата обращения 07.04.2025).

² СПбГУТ поделился экспертизой на Kazan Digital Week 2023 // СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. 27.09.2023. URL: <https://www.sut.ru/bonchnews/industry/27-09-2023-spbgut-podelilsya-ekspertizoy-na-Kazan-Digital-Week-2023> (дата обращения 07.04.2025); Ректор СПбГУТ представил систему идентификации БАС в Совете Федерации // СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. 26.02.2025. URL: <https://www.sut.ru/staff/bonchnews/science/26-02-2025-rektor-spbgut-predstavil-sistemu-identifikacii-bas-v-sovete-federacii> (дата обращения 07.04.2025).

Из этих ЛПД в авиации используются две — UAT и 1090 ES. Первая применяется исключительно в США для авиации общего назначения, вторая — во всем остальном мире, а также в США для коммерческой авиации. ЛПД VDL-4 не принята к эксплуатации ни одной страной мира. Сравнение ЛПД в системе АЗН-В¹ приведено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика ЛПД в системе АЗН-В

ЛПД АЗН-В	Стандартизованы ICAO	Сертифицированы в РФ	Количество стран-эксплуатантов	Символьная скорость, кбит/с
UAT	+	—	1 (США)	1000
1090 ES	+	+	более 80	1000 4000 (+ 8 PSK)
VDL-4	+	+	—	14,4 (1 канал) 57,6 (4 канала)

В России сертифицированы и могут применяться только две ЛПД — 1090 ES и VDL-4, — каждая из которых обладают рядом преимуществ и недостатков. Однако широкое применение получили системы АЗН-В 1090 ES, работающие на частоте 1090 МГц. Диапазон радиочастот 118–137 МГц, используемый аппаратурой VDL-4, в настоящее время применяется авиационной подвижной службой в качестве аварийных частот и частот для поиска и спасения, для наземной связи на аэродромах, связи «воздух — воздух», для ОБЧ-линий цифровой связи (все режимы VDL). На сегодняшний день в гражданской авиации среди всех ЛПД «борт — земля» самую большую пропускную способность и потенциал ее повышения в обозримой перспективе имеет 1090 ES. Также преимуществом 1090 ES является ее совместимость с гражданской авиацией, поскольку все большее количество ВС, как пилотируемых, так и беспилотных, оснащаются оборудованием стандарта АЗН-В 1090 ES².

При этом есть вопросы, требующие внимания при использовании ЛПД 1090 ES для удаленной идентификации БВС. Так, ICAO в своем обращении к государствам³ высказывает опасения по поводу перегруженности частоты 1090 МГц и нехватки 24-битных адресов ВС. Эти опасения касаются России в меньшей степени из-за низкой плотности ее воздушного движения и, как было сказано выше, достаточно большого блока 24-битных адресов, предоставленных ICAO. Тем не менее при использовании ЛПД 1090 ES для удаленной идентификации БВС, чтобы уменьшить помехи и нагрузку на наземные приемные станции (ПС), необходимо снизить уровень излучаемой мощности электронного идентификатора в соответствии с Добавлением М «Руководства ICAO по авиационному наблюдению»⁴.

Таким образом, в качестве технологии АЗН-В для целей удаленной идентификации целесообразно рассматривать 1090 ES. Примеры электронных идентификаторов — передатчики «Москит» от ПАО «НПО «Алмаз» и «ADS-Bee» от АО «Навигатор» — представлены на рисунке 3.

¹ Аэронавигационный комитет союза авиапроизводителей России о стандарте VDL // Информационный сайт АНО «ЦЕНТР «АЭРОНЕТ». 29.08.2019. URL: <https://nti-aeronet.ru/blog/2019/08/29/ajeronavigacionnyj-komitet-sojuza-aviaproizvoditelej-rossii-o-standarte-vdl-4> (дата обращения 07.04.2025); Официальная позиция компании «ЦПТС»: VDL-4 должна быть исключена для применения в гражданской авиации // AVIA.RU Network. 29.08.2019. URL: <https://www.aviaru.net/pr/54456> (дата обращения 07.04.2025); Automatic Dependent Surveillance — Broadcast (ADS-B) Implementation and Regulation Meeting for the NAM/CAR/SAM Regions. ADS-B/LEG. Final Summary of Discussions. ICAO. Mexico City, Mexico, 26–30 November 2018; Наблюдение дистанционно пилотируемых воздушных судов и вопросы кибербезопасности: рабочий документ ИКАО А39-WP/2961 // Ассамблея — 39-я сессия. Техническая комиссия. Пункт 33 повестки дня. Безопасность полетов и аэронавигационный мониторинг и анализ. 26.08.2016.

² Аэронавигационный комитет союза авиапроизводителей России о стандарте VDL...; Официальная позиция компании «ЦПТС»: VDL-4 должна быть исключена для применения в гражданской авиации...

³ Письмо Генерального секретаря ИКАО Фан Лю от 8 ноября 2019 г. О дополнении к Руководству по авиационному наблюдению (Doc 9924). Ref.: SP 44/2 — 19/77.

⁴ Doc 9924. Aeronautical Surveillance Manual. Third Edition. ICAO, 2020.



Рис. 3. Электронные идентификаторы для БВС на основе технологии АЗН-В 1090 ES: а) «Москит»; б) «ADS-Bee»

Анализ технологии сотовой связи для удаленной идентификации БВС

Для обеспечения удаленной идентификации БВС могут использоваться сети сотовой связи различных поколений (2G–5G), имеющие свои особенности. Скорости передачи данных любого из поколений сотовой связи достаточно для целей отправки идентификационной информации БВС. При этом сети 4G позволяют значительно повысить скорость трансляции данных. Это дает возможность отправки более сложной информации, включая видеопотоки и данные о состоянии БВС. Задержки при передаче данных также невелики, однако совокупная задержка в канале сотовой связи для сетей 2G значительна. В сетях сотовой связи, начиная с четвертого поколения, низкая задержка в канале и высокая пропускная способность позволяют производить мониторинг БВС в режиме реального времени.

Основные ограничения накладывает высота работы сотовой связи, так как антенны базовых станций (БС) оптимизированы для взаимодействия с наземными пользователями; оказывают влияние избыточные хендоверы (процедуры передачи активного соединения между сотами) и помехи в линиях связи. Так, исследования позволили заключить, что существующие сети LTE обеспечивают возможность обслуживания БВС, летающих на небольших высотах — до 120 м. В ходе тестов на существующей сети LTE наблюдались бесперебойные хендоверы между различными БС с нулевыми потерями управления. Также тесты показали, что несмотря на ориентацию антенн в сторону земли, на высотах до 120 м БВС может обслуживаться множеством БС на разных частотах, что обеспечивает в целом хороший радиоканал. Вместе с тем с увеличением высоты полета наблюдался рост интерференции, что негативно влияло на качество канала связи с БВС. В частности, наблюдался высокий уровень опорного сигнала, получаемого со множества «соседних» БС, кроме того, беспилотник «видел» намного больше БС, чем в ситуации «на уровне земли». Отсюда следуют рекомендации по оптимизации сетей LTE для их подготовки к массовому использованию БВС¹:

- уменьшение интерференции, связанной с большим числом «соседних» БС, которые эффективно излучают сигналы на высотах порядка 120 м;
- оптимизация хендоверов, которая будет учитывать, что они имеют иной характер, нежели хендоверы абонентских устройств на уровне земли;
- учет специфики БВС, вероятно, потребует от сети умения понимать, что данный приемопередатчик установлен на летающем объекте, а не является «наземным» устройством.

В таблице 2 приводится сравнение различных поколений сотовой связи при их использовании для удаленной идентификации БВС.

¹ Бойко А. Qualcomm провел тесты управления БЛА через сеть LTE вместе с Verizon Wireless // RoboTrends. 20.10.2016. URL: <https://robotrends.ru/pub/1642/bespilotniki-i-seti-sotovoy-svyazi> (дата обращения 07.04.2025).

Таблица 2. Сравнительная характеристика поколений сотовой связи при их использовании для удаленной идентификации БВС

Поколение сотовой связи	Возможность передачи идентификационной информации БВС	Возможность мониторинга БВС в реальном времени	Зависимость от импортных комплектующих
2G	+	средняя	средняя
3G	+	приемлемая	высокая
4G	+	высокая	низкая
5G	+	высокая	средняя

Преимуществами применения технологии сотовой связи для идентификации БВС являются:

1) возможность использования существующей инфраструктуры сотовой связи для идентификации БВС в двумерной модели покрытия сети, что, в свою очередь, позволяет:

– охватить сразу около 30 % территории страны¹ (в том числе обеспечить идентификацию БВС в ряде удаленных мест);

– снизить затраты на первоначальное развертывание (двумерной модели покрытия сети);

2) высокая скорость передачи данных: с увеличением поколения (от 2G до 5G) скорость передачи данных значительно возрастает, что позволяет передавать все большие объемы информации в реальном времени;

3) низкая задержка в передаче данных: с увеличением поколения (от 2G до 5G) задержка уменьшается, что критично для БВС, имеющих большие скорости;

4) большая емкость сети: с увеличением поколения (от 2G до 5G) емкость сотовой сети увеличивается, т. е. сеть может одновременно обслуживать все большее количество подключенных устройств, что важно для массового использования БВС;

5) возможность определения местоположения БВС без использования данных глобальной навигационной спутниковой системы (через БС, уровень мощности сигнала, методом сопоставления образов (сигнатур)) [4].

К недостаткам использования технологии сотовой связи для идентификации БВС относятся:

1) ограниченная высота передачи данных: сотовые сети оптимизированы для работы с объектами на земле, а не в воздухе, поэтому обеспечение устойчивой связи при использовании существующей инфраструктуры возможно на высотах не более 150–200 м²; на высотах более 200–300 м гарантированная связь отсутствует³;

2) зависимость от покрытия сети: возможность идентификации БВС зависит от инфраструктуры (наличия сотовых вышек и их состояния). В удаленных населенных пунктах, горах и т. д. могут возникнуть проблемы с возможностью идентификации БВС⁴, а на более чем 70 % территории страны сотовая связь отсутствует⁵;

¹ Бойко А. Беспилотники и телеком // RoboTrends. URL: <https://robotrends.ru/robopedia/bespilotniki-v-telekome.-primery-primeneniya> (дата обращения 07.04.2025).

² Кодачигов В., Львова. А. Наивысший пилотаж: дроны в России хотят подключить к сотовым сетям // Известия. 04.04.2023. URL: <https://iz.ru/1492721/valerii-kodachigov-anastasiia-lvova/naivysshii-pilotazh-drony-v-rossii-khotiat-podkluchit-k-sotovym-setiam> (дата обращения 07.04.2025).

³ Покажись красавица: Установку транспондеров на беспилотники планируют сделать обязательной // АЭРОНЕКСТ. 21.04.2023. URL: https://aeronext.aero/press_room/news/2023_04_21_pokazhis_krasavitsa_ustanovku_transponderov_na_bespilotniki_planiruyut_sdelat_obyazatelnoy (дата обращения 07.04.2025).

⁴ В нацпроект по беспилотникам добавляют «цифровое бесшовное небо» // CNews. 07.06.2024. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2024-06-07_v_natsproekt_po_bespilotnikam (дата обращения 07.04.2025).

⁵ АО «ГЛОНАСС» представит в июле спутниковый канал связи для дронов // ТАСС. 06.06.2024. URL: <https://tass.ru/ekonomika/21018845> (дата обращения 07.04.2025).

3) ограничение по скорости перемещения БВС: для гарантированной идентификации максимальная скорость перемещения БВС без влияния на сигнал составляет: в сетях 3G — 120 км/ч; в сетях 4G — 350 км/ч; в сетях 5G — 500 км/ч¹ [5];

4) высокая стоимость: создание специализированной инфраструктуры (переход от существующей двумерной модели покрытия сети к трехмерной) требует существенных вложений; также использование сотовой связи может быть дорогостоящим в условиях международных полетов или в удаленных регионах

В качестве примера электронных идентификаторов на основе сотовой связи на рисунке 4 представлены транспондеры «AST-402» и «БПСИ 2», разработанные ООО НИЦ «АЭРОСКРИПТ» и СПбГУТ соответственно.



Рис. 4. Электронные идентификаторы для БВС на основе сотовой связи: а) «AST-402»; б) «БПСИ 2»

Анализ технологий спутниковой связи для удаленной идентификации БВС

На сегодняшний день удаленную идентификацию БВС в России возможно реализовать на двух системах спутниковой связи: «Гонец» и Iridium.

«Гонец» («Гонец-Д1М») — это российская многофункциональная система персональной спутниковой связи (МСПСС), основным назначением которой является передача данных и предоставление услуг подвижной спутниковой связи абонентам в глобальном масштабе с использованием группировки космических аппаратов связи на низких орбитах. Оператором отечественной МСПСС «Гонец», созданной по заказу Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», является АО «Спутниковая система «Гонец»².

Iridium («Иридиум») — единственная в мире глобальная система подвижной спутниковой связи, обеспечивающая покрытие 100 % Земной поверхности, от полюса до полюса, без провалов и зазоров³.

Обе системы имеют малогабаритный спутниковый модем для установки на БВС. Скорость передачи информации в канале «вверх» (канал «Земля» → «Космос») обоих модемов достаточна для передачи данных удаленной идентификации. Сравнение систем спутниковой связи представлено в таблице 3.

¹ Шалагинов А. Ликбез 11-5. Поколения сотовой связи (5G) // Telecom & IT. 13.01.2020. URL: <https://shalaginov.com/2020/01/13/6831/> (дата обращения 07.04.2025); 5G: революция в мире связи — высокая скорость, низкая задержка и новые возможности для вас // Фирма К ТЕЛЕКОМ. 03.05.2024. URL: <https://bistok.k-telecom.org/articles/5g-revolucziya-v-mire-svyazi-vysokaya-skorost-nizkaya-zaderzhka-i-novye-vozmozhnosti-dlya-vas> (дата обращения 07.04.2025).

² МСПСС «Гонец-Д1М» // АО «Спутниковая система «Гонец». URL: <https://gonets.ru/rus/uslugi/sistema-gonets> (дата обращения 07.04.2025).

³ О спутниковой сети Iridium // Иридиум Коммьюникешенс. URL: <https://iridium-russia.com/network> (дата обращения 07.04.2025).

Таблица 3. Сравнительная характеристика систем спутниковой связи

Спутниковая система связи	Орбита (тип / высота, км)	Количество действующих спутников	Скорость передачи данных*, кбит/с	Наличие компактного спутникового модема (без учета АФУ**)
Гонец	низкая околоземная / 1500	18	9,6 (Гонец-Д1М)	+
Iridium	низкая околоземная / 780	66 (не считая резервных)	2,4 (Iridium 9603)	+

* Максимальная скорость в канале «вверх».

** АФУ – антенно-фидерное устройство.

Из-за отсутствия данных в открытых источниках остается неясным, позволит ли пропускная способность спутникового канала обеспечить идентификацию большого количества БВС. К явным недостаткам спутниковой связи относится большая задержка в канале связи, что не может обеспечить непрерывную идентификацию всех БВС на территории РФ. Отметим, что сейчас идет разработка и внедрение других низкоорбитальных систем связи, которые в дальнейшем смогут обеспечить удаленную идентификацию:

- «Марафон-IoT» – глобальная низкоорбитальная многоспутниковая система передачи данных, входящая в федеральную программу «Сфера»; всего в группировку должны войти 264 космических аппарата, которые будут размещаться в 12 орбитальных плоскостях на высоте около 750 км¹;

- низкоорбитальная спутниковая группировка связи, разрабатываемая «БЮРО 1440»: на орбиту выведены три космических аппарата связи «Рассвет-1, разгонным блоком «Фрегат» была сформирована отдельная солнечно-синхронная орбита высотой 558,4 км²;

- орбитальная группировка для Интернета вещей, насчитывающая 157 малых и сверхмалых космических аппаратов, планируется к развертыванию ООО «Спутникс»³;

- Telum LEO – проект спутникового Интернета вещей, инициированный компанией «Зонд-Холдинг»; заявка на систему Telum LEO 1, в которую включены 152 космических аппарата (на одном из трех высотных эшелонов: 385, 585 или 1500 км над земной поверхностью), подана в Бюро радиосвязи Международного союза электросвязи 20 июня 2022 г.⁴

В качестве примера электронных идентификаторов на основе спутниковой связи на рисунке 5 представлены транспондеры «ГОНЕЦ-МОДУЛЬ» и «Азимут IRIDIUM+CTRL/PWR OEM», разработанные АО «Спутниковая система «Гонец» и ООО «ДЕЦИМА» соответственно.

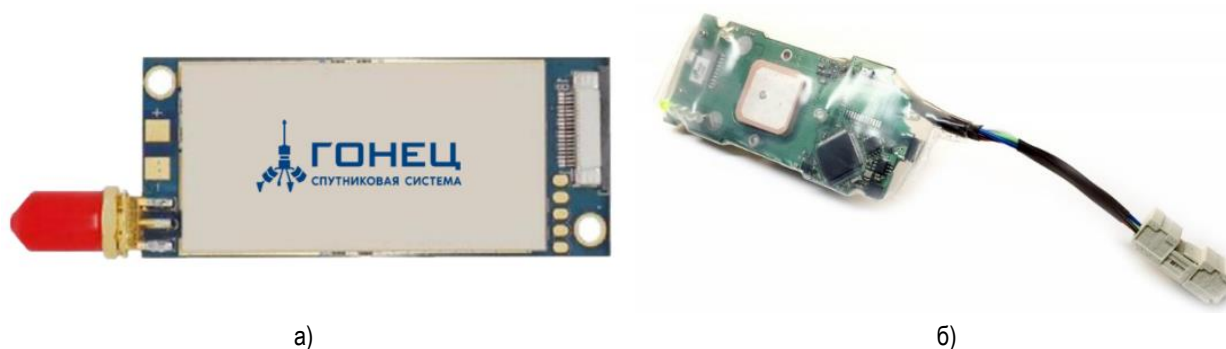


Рис. 5. Электронные идентификаторы для БВС на основе спутниковой связи: а) «ГОНЕЦ-МОДУЛЬ»; б) «Азимут IRIDIUM+CTRL/PWR OEM»

¹ Королев П. Полумарафон: «Роскосмос» нашел деньги на половину группировки «Марафон IoT» // ComNews. 08.09.2023. URL: <https://www.comnews.ru/content/228713/2023-09-08/2023-w36/1007/polumarafon-roskosmos-nashel-dengi-polovinu-gruppirovki-marafon-iot> (дата обращения 07.04.2025).

² БЮРО 1440 // ИКС Холдинг. URL: <https://x-holding.ru/projects/buro-1440> (дата обращения 07.04.2025).

³ ООО «Спутникс». URL: <https://sputnix.ru/ru> (дата обращения: 07.04.2025).

⁴ Шпунт Я. Новый стандарт спутникового интернета вещей хочет подружиться с группировкой «Марафон IoT» // ComNews. 17.06.2024. URL: <https://www.comnews.ru/content/233753/2024-06-17/2024-w25/1007/novyy-standart-sputnikovogo-interneta-veschey-khochet-podruzhitsya-gruppirovkoy-marafon-iot> (дата обращения 07.04.2025).

Анализ маломощных радиочастотных технологий для удаленной идентификации БВС

Маломощные радиочастотные технологии позволяют решать задачи идентификации и отслеживания БВС, обеспечивая необходимую энергоэффективность и компактность. Для наглядности характеристики основных маломощных радиочастотных технологий представлены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнительная характеристика маломощных радиочастотных технологий

Технология	Радиус действия*, км	Скорость передачи данных*, Мбит/с	Уровень помехо-защищенности	Готовность к применению на БВС
Bluetooth	до 1	до 2 (BLE) до 50 (EDR)	высокий	высокая
Wi-Fi	до 2	до 600 (802.11n) до 10000 (802.11ax)	умеренный	высокая
FLARM	до 10	до 0,01	умеренный	низкая
Sigfox	до 50	до 0,0001	высокий	низкая
LoRa	до 50	до 0,05	средний	средняя
NB-IoT	до 22	до 0,25	высокий	высокая
RFID	до 0,3	до 0,64 (Gen2v2)	средний	средняя

* Теоретически достижимые значения.

Как видно из таблицы 4, скорость передачи данных Sigfox недостаточна для трансляции данных идентификации БВС. Кроме того, технологии Sigfox и FLARM на настоящий момент не представлены в России. Остальные маломощные радиочастотные технологии — Bluetooth, Wi-Fi, LoRa и RFID — при своих достоинствах и недостатках могут быть использованы для идентификации БВС на территории России. При этом надо отметить, что технологии LoRa и RFID попадают в диапазон частот 862–890 МГц, который в соответствии с «Таблицей распределения полос радиочастот между радиослужбами РФ»¹ отнесен к подвижной радиосвязи (за исключением воздушной подвижной) и отведен для использования в целях воздушной радионавигации. Применение электронных идентификаторов на основе технологий LoRa и RFID, размещенных на БВС, в отличие от размещенных на наземных подвижных средствах (автомобилях, ж/д транспорте, велосипедах и др.), требует предварительного обсуждения в экспертном сообществе и проведения экспериментальных исследований².

В качестве примера электронных идентификаторов на основе маломощных технологий связи на рисунке 6 представлены транспондеры «APNEGA-RID» и «Ответчик GoodWAN», разработанные ООО «Беспилотные системы» и ООО «РадиоТех» соответственно.

¹ Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Российской Федерации. Постановление Правительства Российской Федерации от 18.09.2019 № 1203-47 (с изменениями, в том числе от 30.01.2024 № 75-5) // Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201909250014> (дата обращения 07.04.2025).

² ГосНИИАС: Радиометки на беспилотниках технически бесполезны и даже опасны! // АЭРОНЕКСТ. 29.08.2017. URL: https://aeronext.aero/press_room/news/2017_08_28_gosnij_as_radiometki_na_bespilotnikakh_tekhnicheski_bespolezny (дата обращения 07.04.2025).



Рис. 6. Электронные идентификаторы для БВС на основе маломощных технологий связи:
а) «APNEGA-RID»; б) «Ответчик GoodWAN»

Анализ применимости рассмотренных технологий связи для удаленной идентификации БВС

Важно отметить, что ни одна из рассмотренных технологий связи изначально не создавалась для идентификации БВС, однако на основании вышеприведенного анализа для этих целей могут быть использованы следующие технологии:

- АЗН-В: 1090 ES;
- сотовая связь: 2G–5G;
- спутниковая связь: «Гонец», Iridium;
- маломощные технологии: Bluetooth, Wi-Fi, LoRa, NB-IoT, RFID.

Сравнение рассмотренных технологий связи [6] для целей удаленной идентификации приведено в таблице 5.

К преимуществам технологии АЗН-В 1090 ES можно отнести передачу достаточного объема полезной информации для целей идентификации БВС, неограниченность идентификации по высоте и скорости полета БВС, наличие готовой инфраструктуры (приемники АЗН-В / станции МПЧН) и совместимость с гражданской авиацией, а соответственно, видимость для пилотируемых ВС и органов управления воздушным движением. Минусом технологии АЗН-В 1090 ES является ее недостаточная защищенность, особенно по линии связи «борт БВС» → «борт ПВС».

Достоинства технологий сотовой связи состоят в большой скорости и низкой задержке в передаче данных. Наличие готовой инфраструктуры в виде действующих 2G–5G сетей. Также сети 4G / 5G могут использоваться для отслеживания БВС не только по приему сообщений о местоположении (по данным бортовых навигационных систем), но и по определению места электронного идентификатора 4G / 5G (совпадающего с местонахождением БВС) средствами оператора мобильной связи (LBS, *аббр. от англ.* Location Based Service). Первый способ более точный, однако второй не зависит от наличия сигналов GPS и работы навигационной системы БВС. К недостаткам сотовых технологий в силу технических особенностей относится ограниченная высота полета БВС для удаленной идентификации. Передача данных в сотовых сетях для гарантированной идентификации БВС ограничивается высотой в 200–300 м. Именно поэтому сотовые сети позиционируются для низких городских полетов¹. Также использование технологий сотовой связи для идентификации БВС накладывает ограничение на скорость его перемещения. Так, для гарантированной идентификации максимальная скорость перемещения БВС без влияния на сигнал составляет: в сетях 3G — 120 км/ч; в сетях 4G — 350 км/ч; в сетях 5G — 500 км/ч.

Преимущества технологий спутниковой связи заключаются в их возможности охвата всей территории страны и, как и в случае АЗН-В 1090 ES, неограниченности идентификации БВС по высоте полета. Большая задержка в канале спутниковой связи — основной минус технологий спутниковой связи на данный момент — не позволяет реализовать идентификацию БВС в реальном времени. Также неизвестна пропускная способность спутникового канала для обеспечения идентификации всех БВС на территории РФ.

¹ Гонка технологий для интеграции дронов в воздушное пространство началась по всему миру // Совзонд. 25.09.2019. URL: <https://sovzond.ru/press-center/news/bpla/6331> (дата обращения 07.04.2025).

Таблица 5. Сравнительная характеристика существующих технологий связи для удаленной идентификации БВС (теоретически достижимые значения)

Параметры сравнения	Технологии удаленной идентификации БВС							
	АЗН-В: 1090 ES	Сотовая связь: 2G–5G	Спутнико- вая связь: «Гонец» / Iridium	Bluetooth	Wi-Fi	LPWAN: LoRa	LPWAN: NB-IoT	RFID
Максимальная высота идентификации, м	Весь диапазон, доступный БВС	300	Весь диапазон, доступный БВС	1000	2000	Весь диапазон, доступный БВС	300	300
Скорость БВС без влияния на сигнал*, км/ч	Весь диапазон, доступный БВС	3G: 120	Весь диапазон, доступный БВС	45**	80**	110**	Неиз- вестно	250
		4G: 350						
		5G: 500						
Количество*** абонентов на одну ПС / БС / спутник	300	3G: 300	Не- известно	Несколько сотен	128	5000	1500	Несколько сотен
		4G: 2000						
		5G: 1 млн						
Частота обновления ≥ 1 Гц	+	+	—	+	+	+	+	Статичная инфор- мация
Наличие компактного БУ**** для БВС, с учетом АФУ	+	+	—	+	+	+	+	+
Видимость для ПВС***** и УВД*****	+	—	—	—	—	—	—	—
Передача данных о местонахожде- нии СУ*****	—	+	+	+	+	+	+	—

* Качество сигнала при этом достаточное для передачи данных идентификации.

** Максимально допустимые значения неизвестны, приведены известные из литературы данные.

*** В радиусе до 1 кв. км.

**** БУ – бортовое устройство.

***** ПВС – пилотируемое воздушное судно.

***** УВД – управление воздушным движением.

***** СУ – станция управления.

Достоинством маломощных радиочастотных технологий, как следует из их названия, является высокий уровень энергоэффективности и возможность сокращения затрат при развертывании системы идентификации БВС на их основе.

К преимуществам маломощных технологий Bluetooth / Wi-Fi относятся их распространенность и, следовательно, дешевизна внедрения решений на их основе, а также большая скорость передачи данных и стандартизация для удаленной идентификации БВС. К недостаткам Bluetooth / Wi-Fi можно отнести массовость различных технологических решений на их основе и, соответственно, большую вероятность помех в используемом ими диапазоне частот.

Маломощная технология LoRa способна передавать данные идентификации БВС на большие расстояния, а суммарные расходы на новое развертывание сети LoRaWAN на порядок меньше затрат, необходимых для строительства, например, сети NB-IoT с нуля¹. Слабые стороны технологии LoRa – ограниченная скорость перемещения БВС (с передатчиком LoRa на борту) для гарантированной идентификации (без потери пакетов данных) [7, 8] и использование нелицензируемого диапазона радиочастот: с учетом данного обстоятельства строящиеся сети будут функционировать в условиях помех, создаваемых прочими пользователями диапазона, включая коммерческие и частные сети IoT, построенные по технологиям LoRa². Также, как было сказано выше, LoRa попадает в диапазон частот, отведенный для использования в целях воздушной радионавигации, и требует экспериментального подтверждения безопасности полетов.

К достоинствам маломощной технологии NB-IoT можно отнести большую скорость передачи данных и высокие уровни помехозащищенности и проникающей способности сигнала связи. Кроме того, NB-IoT работает в лицензируемых диапазонах сотовой связи, поэтому обеспечивает повышенную надежность и безопасность передачи данных. К недостаткам NB-IoT можно отнести более высокие затраты на развертывание и эксплуатацию по сравнению с другими маломощными технологиями.

Выводы

В результате анализа различных технологий связи определены соответствующие целям удаленной идентификации БВС: АЗН-В (1090 ES), сотовая связь (2G–5G), спутниковая связь («Гонец», Iridium), маломощные технологии (Bluetooth, Wi-Fi, LoRa, NB-IoT, RFID).

Наиболее подходящей технологией для единой системы удаленной идентификации БВС на настоящий момент является АЗН-В 1090 ES в силу минимальных ограничений для реализации (см. таблицу 5) и успешного апробирования совместно с пилотируемой авиацией³. На основе АЗН-В 1090 ES можно уже сейчас построить всеобъемлющую систему идентификации БВС для всех классов воздушного пространства. Наиболее перспективными (в ближайшем будущем) для идентификации БВС являются технологии на основе сотовой и спутниковой связи. Сотовая связь уже сейчас предлагает расширенные возможности для реализации на ее основе системы идентификации БВС, а также множество различных сценариев для использования БВС в будущем. Однако существенным ограничением сотовой связи, позиционирующейся для низких городских полетов, является высота ее использования (не превышающая 300 м).

Спутниковая связь также имеет большой потенциал для применения на территории такой большой страны, как Россия. Однако на настоящий момент она может использоваться только на относительно больших БВС, так как не имеет компактных БУ, с учетом АФУ, подходящих для оснащения малых БВС. Кроме этого, для построения системы идентификации БВС в реальном времени необходимо увеличивать пропускную способность канала спутниковой связи и темп обновления информации.

Для дальнейшего анализа следует определить требования к безопасности внедряемой технологии связи. Необходима разработка адекватных математических моделей и методик анализа на их основе, которые позволят оценивать эффективность внедряемой системы идентификации БВС с учетом используемой технологии связи, развитости инфраструктуры, рельефа местности, операционной нагрузки на систему, затрат и пр., что позволит повысить качество построения единого идентификационного поля РФ.

Кроме того, полезно рассмотреть применение электронных идентификаторов на основе комбинированных технологий связи, что могло бы компенсировать ограничения каждой из технологий, подходящей для целей удаленной идентификации БВС.

¹ Бутусов А. LoRaWAN против NB-IoT: сравнение стандартов // [iot.ru](https://iot.ru/promyshlennost/lorawan-protiv-nb-iot-sravnenie-standartov). 04.09.2017. URL: <https://iot.ru/promyshlennost/lorawan-protiv-nb-iot-sravnenie-standartov> (дата обращения 07.04.2025); LoRaWAN против NB-IoT: Как они сравниваются и различаются // MOKOSmart. 19.03.2024. URL: <https://www.mokosmart.com/ru/lorawan-vs-nb-iot-how-do-they-compare-and-differ/> (дата обращения 07.04.2025); LoRa vs NB-IoT: сравнение технологий связи // Jooby. 03.09.2024. URL: <https://jooby.eu/ru/blog/lora-vs-nb-iot-sravnenie-tehnologii-svyazi> (дата обращения 07.04.2025).

² Строительство сетей LoRa в РФ // iTechinfo. URL: <https://itechinfo.ru/content/строительство-сетей-lora-в-рф> (дата обращения 07.04.2025).

³ Система мониторинга использования воздушного пространства над мегаполисом // ПАО «НПО «Алмаз» ТООП «ЛЭМЗ». URL: <https://lemz.ru/смиивп> (дата обращения 07.04.2025).

Литература

1. Нестеров С. Ю., Чистов В. В., Усс В. С., Антропов М. В. и др. Проведение научных и экспериментальных исследований возможности применения для низколетящих беспилотных воздушных судов специальных идентификаторов, в том числе на базе физических и программных электронных модулей абонента, с целью дополнительного контроля и ограничения применения низколетящих беспилотных воздушных судов: отчет о составной части НИР. Книга 1. Шифр: «Идентификатор БВС-Алмаз». М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2024. 311 с.
2. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Aeronautical Telecommunications. Vol. III. Communication Systems. ICAO, Second Edition, 2007.
3. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Aeronautical Telecommunications. Vol. IV. Surveillance and Collision Avoidance Systems. ICAO, Fifth Edition, 2014.
4. Нестеров С. Ю., Федосеев И. В., Антропов М. В., Мещеряков В. Д. Проведение научных и экспериментальных исследований возможности применения для низколетящих беспилотных воздушных судов специальных идентификаторов, в том числе на базе физических и программных электронных модулей абонента, с целью дополнительного контроля и ограничения применения низколетящих беспилотных воздушных судов: отчет о составной части НИР. Приложение А. Идентификация БВС с применением технологии GSM. Шифр: «Идентификатор БВС-Алмаз». М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2024. 104 с.
5. Диязитдинов Р. Р. Системы связи с подвижными объектами: конспект лекций. Самара: ПГУТИ, 2013. 204 с.
6. UAS Identification and Tracking ARC Recommendation. Final Report – Advisory and Rulemaking Committees. Federal Aviation Administration (FAA), 2017.
7. Yousuf A. M., Rochester E. M., Ousat B., Ghaderi M. Throughput, Coverage and Scalability of LoRa LPWAN for Internet of Things // Proceedings of IEEE/ACM 26 International Symposium on Quality of Service (IWQoS, 04–06 June 2018, Banff, AB, Canada). 2018. DOI: 10.1109/IWQoS.2018.8624157
8. Di Renzone G., Parrino S., Peruzzi G., Pozzebon A. LoRaWAN in Motion: Preliminary Tests for Real Time Low Power Data Gathering from Vehicles // IEEE International Workshop on Metrology for Automotive (MetroAutomotive, 01–02 July 2021, Bologna, Italy). 2021. DOI: 10.1109/MetroAutomotive50197.2021.9502882

Статья поступила 18 апреля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 06 мая 2025 г.
Принята к публикации 23 мая 2025 г.

Информация об авторах

Антропов Максим Викторович — ведущий инженер НПЦ-СПб ОКБ «ЛЭМЗ» ПАО «НПО «Алмаз»». E-mail: m.antropov@gskb.ru

Усс Владимир Станиславович — кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер НПЦ-СПб ОКБ «ЛЭМЗ» ПАО «НПО «Алмаз»». E-mail: npc-spb@gskb.ru

Analysis of the Application of Communication Technologies for Remote Identification of Unmanned Aerial Vehicles Using Electronic Identifiers in the Russian Federation

M. Antropov ✉, V. Uss

R&D Center – St. Petersburg, LEMZ Division, PJSC “ALMAZ R&P Corp.”,
Saint Petersburg, 198095, Russian Federation

Task statement. *In the context of the rapid growth of the use of unmanned aerial vehicles, the problem of the lack of standards for their remote monitoring is becoming more urgent, and the insufficient provision of remote regions of the country with modern types of communication complicates the control over their use. **The purpose** of the work is to analyze modern communication technologies (ADS-B, cellular network, satellite communication, low-power radio frequency technologies), which can ensure the construction of a reliable unified system of remote identification of unmanned aerial vehicles. **Novelty.** The conducted study is distinguished by the most complete analysis of the relevant aspects of the communication technologies under consideration. **Result:** an assessment of the applicability of the technologies under consideration for remote identification was obtained both at the present time and in the foreseeable future. **Practical relevance.** The results of the work can be used to build a national system for monitoring unmanned aerial vehicles.*

Key words: *remote identification, unmanned aerial vehicles, electronic identifier, unmanned aircraft systems, wireless communication technologies*

Information about Authors

Antropov Maksim – Leading Engineer of the R&D Center – St. Petersburg, LEMZ Division, PJSC “ALMAZ R&P Corp.”. E-mail: m.antropov@gskb.ru

Uss Vladimir – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Leading Engineer of the R&D Center – St. Petersburg, LEMZ Division, PJSC “ALMAZ R&P Corp.”. E-mail: npc-spb@gskb.ru

УДК 336.76
EDN: ZQZCGU

Математический анализ финансовых пузырей через фрактальную размерность

Плотников П. В. ✉, Назаров Д. В., Чуева А. А., Ким З. В.

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

Постановка задачи. Финансовые пузыри и кризисы представляют собой сложные явления, связанные с отклонением цен активов от их фундаментальной стоимости, что требует разработки новых подходов к их анализу. **Цель работы** — исследование финансовых пузырей через методы фрактального анализа, включая расчет фрактальной размерности, для выявления аномалий и прогнозирования рыночных крахов. **Используемые методы** включают RS-анализ (метод Хёрста) для оценки персистентности временных рядов, метод Бокса-Счета для определения фрактальной размерности и мультифрактальный анализ для изучения локальных особенностей рыночной динамики. **Новизна** исследования заключается в комплексном применении фрактального анализа для раннего обнаружения финансовых пузырей, а также в сравнении эффективности различных методов. **Результаты** показывают, что увеличение фрактальной размерности коррелирует с периодами формирования пузырей, а ее резкие изменения могут служить индикаторами кризисов, что подтверждается примерами кризиса доткомов (2000 г.) и финансового кризиса (2008 г.). **Практическая значимость** работы заключается в возможности использования предложенного подхода для создания систем раннего предупреждения кризисов, алгоритмической торговли и риск-менеджмента.

Ключевые слова: финансовые пузыри, фрактальная размерность, RS-анализ, метод Бокса-Счета, мультифрактальный анализ, прогнозирование кризисов

Актуальность

Финансовый пузырь [1] — это ситуация, когда цена актива значительно превышает его фундаментальную стоимость. Это происходит из-за спекулятивного поведения инвесторов, которые покупают актив в ожидании дальнейшего роста цен, что приводит к «раздуванию» пузыря. Особую опасность представляют сложные производные инструменты, которые могут многократно усиливать спекулятивную активность на сырьевых и товарных рынках [2]. Когда пузырь лопается, цена актива резко падает, что может вызвать кризис на рынке [3]. Кризисы часто сочетают банковские, долговые и валютные компоненты, а их триггером становятся как внутренние дисбалансы (неоптимальная монетарная политика, бюджетные дефициты), так и внешние внезапные кризисы (изменение потоков капитала) [4].

Исследование финансовых пузырей с использованием методов фрактального анализа приобретает особую значимость в условиях современных экономических вызовов, включающих высокую волатильность рынков, появление новых финансовых инструментов (таких, как криптовалюты) и участвовавшие кризисные явления. Традиционные экономические модели часто оказываются неэффективными для прогнозирования экстремальных рыночных ситуаций, поскольку не учитывают нелинейную природу финансовых временных рядов. При этом, как отмечается в исследованиях по экономической безопасности,

Библиографическая ссылка на статью:

Плотников П. В., Назаров Д. В., Чуева А. А., Ким З. В. Математический анализ финансовых пузырей через фрактальную размерность // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 2. С. 3. EDN: ZQZCGU

Reference for citation:

Plotnikov P., Nazarov D., Chueva A., Kim Z. Mathematical Analysis of Financial Bubbles through Fractal Dimensionality // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 2. P. 3. EDN: ZQZCGU

глобальные внезапные кризисы существенно снижают устойчивость социально-экономических систем, усиливая риски формирования спекулятивных пузырей [5]. Особую актуальность данное исследование приобретает в свете последних финансовых кризисов, демонстрирующих необходимость разработки более точных инструментов мониторинга и прогнозирования рыночных пузырей. Разработанные в работе методы могут быть использованы регуляторами финансовых рынков, инвестиционными компаниями и индивидуальными трейдерами для:

- раннего обнаружения признаков формирования финансовых пузырей;
- оценки устойчивости различных сегментов финансового рынка;
- разработки более эффективных стратегий риск-менеджмента.

Кроме того, предлагаемый подход особенно востребован для анализа новых классов активов, таких как криптовалюты, рынок которых характеризуется исключительно высокой степенью нелинейности и непредсказуемости. Таким образом, настоящее исследование вносит значимый вклад в развитие современных методов анализа финансовых рынков и отвечает насущным потребностям финансовой аналитики.

Постановка задачи

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Принятые обозначения

Обозначение	Содержание
$X(t)$	Исходный временной ряд, например, цены акций или криптовалют за определенный период времени
T	Общее количество точек (дней, часов и т. д.) во всем временном ряду
n	Длина одного подпериода при делении временного ряда на части для анализа методом Хёрста
m	Количество подпериодов, на которые разбивается временной ряд для анализа
$R(n)$	Размах значений временного ряда в одном подпериоде – разница между максимальным и минимальным значениями
$S(n)$	Среднее отклонение цен внутри подпериода – показатель волатильности
R/S	Нормированный размах – отношение размаха к стандартному отклонению, используется для оценки устойчивости динамики ряда
H	Коэффициент Хёрста – мера долгосрочной зависимости временного ряда, указывает на наличие трендов или случайности
D	Фрактальная размерность (ФР) – количественная характеристика сложности и изрезанности графика временного ряда
ϵ	Размер коробки, используемой при покрытии графика временного ряда в методе Бокса-счета
$N(\epsilon)$	Количество коробок определенного размера, необходимое для полного покрытия графика временного ряда
q	Порядок момента, используемый при построении мультифрактального анализа для учета разных масштабов изменчивости
$Z(q, \epsilon)$	Обобщенные моменты – величины, характеризующие локальные особенности временного ряда на разных масштабах
$\tau(q)$	Скейлинговая функция – показывает, как обобщенные моменты зависят от масштаба в мультифрактальном анализе
$f(\alpha)$	Мультифрактальный спектр – характеристика распределения локальных особенностей временного ряда
α	Показатель Гельдера – описывает гладкость или регулярность временного ряда в конкретной точке
$\Delta\alpha$	Ширина мультифрактального спектра – показатель неоднородности структуры временного ряда

В условиях усложнения финансовых рынков и их подверженности кризисным явлениям возникает необходимость разработки новых, более эффективных методов выявления и анализа финансовых пузырей. Несмотря на существование различных подходов к оценке рыночной динамики, большинство традиционных методов обладает существенными ограничениями.

Ограниченность классических моделей: линейные модели (например, ARIMA (аббр. от англ. Autoregressive Integrated Moving Average – авторегрессионная интегрированная скользящая средняя), GARCH (аббр. от англ. Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity – обобщенная авторегрессионная условная гетероскедастичность)) не учитывают нелинейные зависимости и сложные паттерны поведения цен; фундаментальный анализ часто запаздывает с идентификацией пузырей из-за трудностей в оперативной оценке «справедливой стоимости» активов.

Проблемы применения существующих подходов к анализу пузырей: статистические тесты на наличие пузырей (например, SADF (аббр. от англ. Supremum Augmented Dickey – Fuller – супремальный расширенный тест Дики – Фуллера), GSADF (аббр. от англ. Generalized Supremum Augmented Dickey – Fuller – обобщенный супремальный расширенный тест Дики – Фуллера)) демонстрируют низкую точность на коротких временных горизонтах; показатели волатильности не всегда адекватно отражают процессы формирования рыночных аномалий.

Недостаточная изученность фрактальных свойств: требуется систематическое исследование взаимосвязи между динамикой фрактальных характеристик и фазами формирования пузырей; отсутствует единая методика выбора оптимальных параметров фрактального анализа для разных классов активов. В связи с этим основная задача исследования заключается в разработке комплексного подхода к выявлению финансовых пузырей на основе анализа ФР, который должен:

- обеспечивать раннее обнаружение признаков формирования пузырей;
- позволять оценивать степень «перегретости» рынка;
- быть применимым к различным типам финансовых активов (акции, валюты, криптовалюты);
- обладать прогностической способностью относительно моментов «схлопывания» пузырей.

Для решения этой задачи необходимо:

- провести сравнительный анализ методов расчета ФР;
- разработать критерии идентификации пузырей на основе динамики фрактальных характеристик;
- верифицировать предложенный подход на данных других известных финансовых пузырей;
- оценить прогностическую способность метода по сравнению с традиционными подходами.

Решение данной задачи позволит создать более надежный инструмент для мониторинга финансовых рынков и своевременного предупреждения о кризисных явлениях.

Фрактальная размерность и ее роль в анализе финансовых данных

ФР – это количественная мера, которая позволяет оценить сложность и самоподобие временных рядов. В контексте финансовых данных, таких как курсы акций или валют, она помогает выявить скрытые закономерности и аномалии, такие как пузыри или крахи. К преимуществам ФР можно отнести:

– выявление скрытых структур: ФР позволяет обнаружить сложные и нелинейные закономерности в данных;

– раннее предупреждение: изменения ФР могут сигнализировать о надвигающихся кризисах;

– универсальность: ФР применима к различным типам финансовых данных (акции, валюты, криптовалюты и т. д.).

Рассмотрим основные методы расчета ФР.

Метод Хёрста (RS-анализ масштабированного размаха) был разработан британским гидрологом Гарольдом Эдвином Хёрстом для анализа долгосрочной зависимости во временных рядах и широко используется в финансовой математике для изучения устойчивости и персистентности рынков [6, 7]. Применение метода включает следующие шаги:

Шаг 1. Разделение временного ряда $X(t)$ длины T на m непересекающихся подпериодов длины n , где $n = \frac{T}{m}$.

Шаг 2. Расчет накопленного отклонения от среднего значения для каждого подпериода k :

$$Y(t, k) = \sum_{i=1}^t (X(i, k) - \underline{X}_k),$$

где $k = 1, 2, \dots, m$; \underline{X}_k – среднее значение временного ряда в подпериоде k .

Шаг 3. Расчет размаха (Range, $R(n)$) для каждого подпериода k :

$$R(n) = (Y, (t, k)) - (Y(t, k)).$$

Шаг 4. Расчет стандартного отклонения $S(n)$ для каждого подпериода k :

$$S(n) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X(i, k) - \underline{X}_k)^2}.$$

Шаг 5. Нормировка размаха $(\frac{R(n)}{S(n)})$, который рассчитывается для каждого подпериода k .

Шаг 6. Оценка коэффициента Хёрста H (оценивается как наклон в логарифмической шкале):

$$\log \log \left(\frac{R(n)}{S(n)} \right) = H * \log \log (n) + C,$$

где C — константа.

ФР D связана с коэффициентом Хёрста следующим образом:

$$D = 2 - H,$$

из чего можно сделать следующие выводы:

если $H > 0,5$, ряд обладает долгосрочной зависимостью (персистентностью);

если $H < 0,5$, ряд антиперсистентен (имеется тенденция к изменению направления);

если $H = 0,5$, ряд является случайным (например, броуновское движение).

Метод Хёрста позволяет выявить долгосрочные зависимости в финансовых временных рядах, что удобно для прогнозирования трендов и выявления аномалий, таких как пузыри [8].

Метод Бокса-счета (Box-counting) — один из самых популярных методов расчета ФР, основанный на покрытии объекта (в данном случае временного ряда) «коробками» разного размера и подсчете количества «коробок», необходимых для покрытия. Применение метода включает следующие шаги:

Шаг 1. Покрытие временного ряда: временной ряд покрывается сеткой из квадратных «коробок» размера ϵ .

Шаг 2. Подсчет числа коробок: подсчитывается количество коробок $N(\epsilon)$, которые содержат хотя бы одну точку временного ряда.

Шаг 3. Изменение размера коробок: процедура повторяется для различных размеров коробок ϵ .

Шаг 4. Оценка ФР как наклона в логарифмической шкале:

$$D = \frac{\log(N(\epsilon))}{\log(\frac{1}{\epsilon})},$$

следовательно, чем сложнее и «изрезаннее» временной ряд, тем больше значение D .

Метод Бокса-счета позволяет оценить сложность временного ряда, что удобно для выявления периодов повышенной волатильности или нестабильности на финансовых рынках [9].

Мультифрактальный анализ является обобщением фрактального анализа и позволяет учитывать локальные изменения в структуре временного ряда. В отличие от простой ФР мультифрактальный анализ рассматривает спектр размерностей, что делает его более гибким инструментом для анализа сложных данных. Применение метода включает следующие шаги:

Шаг 1. Разделение временного ряда на небольшие интервалы.

Шаг 2. Расчет локальных мер: для каждого интервала вычисляется локальная мера μ_i (например, волатильность или амплитуда изменений).

Шаг 3. Построение мультифрактального спектра: на основе метода моментов строится мультифрактальный спектр $f(\alpha)$, который описывает распределение размерностей, для чего вычисляются обобщенные моменты $Z(q, \epsilon)$:

$$Z(q, \epsilon) = \sum_i \mu_i^q,$$

где q — порядок момента.

Далее определяется скейлинговая функция $\tau(q)$:

$$Z(q, \epsilon) \sim \epsilon^{\tau(q)}.$$

Мультифрактальный спектр $f(\alpha)$ связан с $\tau(q)$ через преобразование Лежандра:

$$\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq}, f(\alpha) = q * \alpha - \tau(q),$$

откуда следует, что, во-первых, ширина спектра $\Delta\alpha$ характеризует степень мультифрактальности, и во-вторых, чем шире спектр, тем более сложной и неоднородной является структура временного ряда.

Мультифрактальный анализ позволяет выявить сложные структуры в финансовых данных, такие как локальные всплески волатильности или скрытые закономерности, которые могут быть связаны с формированием пузырей или крахов [10].

Таблица 2. Сравнительная характеристика методов расчета ФР

Метод	Преимущества	Недостатки
Метод Хёрста	Простота реализации, интерпретации долгосрочной зависимости	Чувствительность к выбору длины под-периодов
Метод Бокса-счета	Универсальность, применимость к различным типам данных	Требует больших вычислительных ресурсов для длинных рядов
Мультифрактальный анализ	Учет локальных изменений, высокая точность для сложных данных	Сложность реализации и интерпретации результатов

Рассмотрим применение трех методов расчета ФР для анализа временных рядов на примере временного ряда цен на акции.

Метод Хёрста. Пусть у нас есть временной ряд цен на акции длиной $T = 1000$ дней. Разбиваем его на $m = 10$ подпериодов по $n = 100$ дней каждый. Для каждого подпериода вычисляем накопленное отклонение, размах и стандартное отклонение. Затем строим график зависимости $\log(R/S)$ от $\log(n)$ и находим наклон, который будет коэффициентом Хёрста H .

Метод Бокса-счета. Для того же временного ряда мы покрываем его сеткой с размерами коробок $\epsilon = 10, 20, 50, 100$. Для каждого ϵ подсчитываем количество коробок $N(\epsilon)$, содержащих точки ряда. Затем строим график зависимости $\log(N(\epsilon))$ от $\log(1/\epsilon)$ и находим наклон, который будет ФР D .

Мультифрактальный анализ. Для временного ряда мы вычисляем локальные меры μ_i (например, волатильность на интервалах длиной 10 дней). Затем для различных значений q (например,

$q = -2, -1, 0, 1, 2$) вычисляем обобщенные моменты $Z(q, \epsilon)$ и строим скейлинговую функцию $\tau(q)$. Наконец, используя преобразование Лежандра, получаем мультифрактальный спектр $f(\alpha)$.

ФР является эффективным инструментом для анализа финансовых рынков, особенно в контексте выявления аномалий, таких как финансовые пузыри, крахи и периоды повышенной нестабильности. В отличие от традиционных методов анализа, которые часто основываются на линейных моделях и предположениях о нормальном распределении данных, ФР позволяет учитывать нелинейные и сложные структуры, характерные для финансовых временных рядов. Рассмотрим подробнее, как она может быть применена для выявления аномалий на финансовых рынках.

Применение фрактальной размерности для анализа финансовых пузырей

ФР позволяет количественно оценить сложность и хаотичность временных рядов, что особенно удобно для анализа периодов нестабильности. Рассмотрим подробнее, как ФР может быть использована для анализа финансовых пузырей.

Выявление финансовых пузырей. В периоды формирования пузыря временной ряд цен становится более сложным и «изрезанным» из-за увеличения волатильности и нерегулярности ценовых движений. ФР позволяет количественно оценить эту сложность. Например, резкий рост ФР временного ряда может указывать на начало формирования пузыря.

В нормальных условиях рынок демонстрирует определенную степень упорядоченности, но в периоды пузырей его структура меняется, становясь более хаотичной, что отражается в увеличении ФР. Например, перед кризисом доткомов (1998–2000 гг.) временные ряды цен акций технологических компаний стали заметно сложнее и нерегулярнее. Анализ ФР мог бы выявить этот период как аномалию, предупреждая о возможном крахе.

Прогнозирование крахов. Крах рынка — это резкое и значительное падение цен на активы, часто сопровождающееся паникой среди инвесторов и массовой продажей активов. Крахи могут быть вызваны лопнувшими пузырями, экономическими кризисами или внешними внезапными кризисами.

Перед рыночным крахом часто наблюдается рост ФР, что отражает усиление хаотичности и нестабильности. В такие периоды ценовые временные ряды становятся более сложными и нерегулярными из-за повышенной волатильности и непредсказуемости рыночных движений. Например, перед финансовым кризисом 2008 г. фрактальный анализ мог бы выявить увеличение нерегулярности в ценах на недвижимость и акции, указывая на нарастающую нестабильность.

ФР может служить ранним индикатором кризиса. Если ее значение превышает определенный порог, это сигнализирует о высокой вероятности краха. Так, перед кризисом 2008 г. анализ ФР ипотечных облигаций и фондовых индексов мог бы заранее выявить рост хаотичности, предупреждая инвесторов о надвигающихся рисках. Этот подход позволяет не только фиксировать изменения в рыночной структуре, но и оценивать степень ее неустойчивости, что делает фрактальный анализ полезным инструментом в прогнозировании финансовых потрясений.

Сравнение различных рынков. Разные финансовые рынки (например, фондовые, валютные, товарные) имеют различную степень сложности и устойчивости. Сравнение ФР рынков позволяет оценить, какие из них более подвержены рискам пузырей и крахов. Для валютных рынков фрактальный анализ эффективно выявляет точки потери устойчивости, что особенно актуально для развивающихся экономик с высокой волатильностью [11].

ФР служит важным показателем для оценки сложности и устойчивости финансовых рынков. Рынки с высокой ФР, такие как криптовалютный, отличаются повышенной волатильностью и нестабильностью, что отражается в их сложной и нерегулярной динамике. Напротив, рынки с низкой ФР, например, государственных облигаций, демонстрируют более устойчивое и предсказуемое поведение [12].

Сравнение ФР различных рынков позволяет выявлять наиболее уязвимые сегменты. Если в одном секторе она существенно выше, это может сигнализировать о накоплении рисков. Например, значительное увеличение ФР на рынке акций технологических компаний по сравнению с рынком коммунальных услуг может указывать на формирование переоцененности и потенциального пузыря в технологическом секторе. Сравнение ФР рынка криптовалют (например, Bitcoin) и рынка золота показывает, что криптовалюты

имеют более высокую ФР, что свидетельствует об их большей нестабильности и подверженности пузырям. Таким образом, фрактальный анализ помогает не только оценивать текущее состояние рынков, но и выявлять скрытые угрозы для финансовой стабильности.

Кроме того, ФР может применяться для:

- анализа волатильности рынка: в периоды высокой волатильности временные ряды становятся более сложными, что отражается в увеличении ФР;

- оценки эффективности рынка: согласно гипотезе эффективного рынка, цены на активы должны отражать всю доступную информацию, однако если ФР временного ряда высока, это может указывать на неэффективность рынка, так как сложность ряда свидетельствует о наличии скрытых закономерностей;

- прогнозирования трендов: например, если ФР временного ряда снижается, это может указывать на стабилизацию рынка и формирование устойчивого тренда.

Приведем примеры практического использования ФР.

Пример 1. Кризис доткомов 2000 г. В конце 1990-х гг. наблюдался резкий рост цен на акции дотком-компаний, что привело к формированию финансового пузыря. Пик кризиса пришелся на 2000 г., когда пузырь лопнул, и цены обрушились на 70–80 %. Падение продолжалось до 2002 г., затронув не только технологический сектор, но и всю мировую экономику. В результате временные ряды цен акций технологических компаний стали более сложными и нерегулярными. ФР резко увеличилась, что могло служить предупреждающим сигналом о надвигающемся крахе.

Пример 2. Финансовый кризис 2008 г. Был вызван лопнувшим пузырем на рынке недвижимости и ипотечных облигаций. Перед кризисом временные ряды цен на недвижимость и индексы акций стали более хаотичными. ФР увеличилась, что могло быть использовано для прогнозирования кризиса.

Пример 3. Рынок криптовалют (Bitcoin) 2017–2018 гг. В 2017 г. цена Bitcoin резко выросла, достигнув исторического максимума почти 20 000 долларов США в декабре 2017 г., после чего произошел обвал. К декабрю 2018 г. цена упала до 3 000 долларов США, потеряв около 85 % своей стоимости.

Преимущества и ограничения использования фрактальной размерности

ФР является ценным инструментом для анализа финансовых рынков благодаря своей способности выявлять аномалии на ранних стадиях. Это особенно важно при обнаружении формирующихся пузырей или кризисов, так как рост ФР часто сигнализирует о нарастающей нестабильности. Еще одним ключевым преимуществом ФР является ее универсальность — метод применим к различным типам финансовых данных, включая цены акций, валютные курсы и криптовалюты. Кроме того, ФР учитывает сложные и нелинейные структуры в данных, что делает ее особенно полезной для анализа высоковолатильных рынков, где традиционные методы могут оказаться менее эффективными.

Однако применение ФР имеет ряд ограничений, главным из которых является ее чувствительность к выбору параметров, таких как длина подпериодов в методе Хёрста, что может влиять на надежность результатов. Кроме того, ФР не всегда дает исчерпывающую интерпретацию рыночных процессов, поэтому ее рекомендуется использовать в сочетании с другими методами, такими как фундаментальный анализ, технические индикаторы или алгоритмы машинного обучения. Комплексный подход позволяет минимизировать риски ошибочных выводов и повысить точность прогнозирования рыночной динамики.

Таким образом, несмотря на некоторые ограничения, ФР остается действенным инструментом для анализа финансовых рынков, особенно при выявлении скрытых закономерностей и предупреждении о потенциальных кризисах.

Выводы

Использование ФР для анализа финансовых пузырей представляет собой эффективный инструмент, который позволяет выявлять аномалии на рынках и прогнозировать кризисы. Разработка нового индикатора на основе ФР может стать важным шагом в создании более устойчивых и надежных моделей для анализа финансовых рынков. Полученные результаты подтверждают потенциал фрактального подхода в выявлении скрытых закономерностей рыночной динамики, однако для повышения точности и адаптивности метода требуются дополнительные исследования.

Литература

1. Шихалиева Д. С., Беляева С. В. Траектория экономических кризисов в России в период становления и развития рыночной экономики: оценка, эволюция, управление // Вестник Университета. 2021. № 12. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-12-144-150. EDN: ULTXW
2. Плотников А. В., Харламов А. В. Направления нейтрализации негативного влияния неэкономических шоков на реальный сектор экономики России // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2023. № 1 (139). EDN: QOPSKE
3. Чиркова Е. В. Теории финансовых пузырей // Корпоративные финансы. 2010. Т. 4. № 3 (15). С. 63–72. EDN: NBNQXD
4. Кошелев В. Л., Кошелев И. В. Иррациональные трейдеры на финансовых рынках // Актуальные вопросы экономического развития регионов: Материалы Международной научно-практической конференции (Пятигорск, 8 июня 2013 г.). Пятигорск: ООО «Рекламно-информационное агентство на КМВ», 2013. С. 398–405. EDN: TRPANP
5. Peters E. E. Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics. New York: John Wiley & Sons, 1994.
6. Зиненко А. В. R/S анализ на фондовом рынке // Бизнес-информатика. 2012. № 3 (21). С. 24–30. EDN: PEOSKN
7. Grech D., Mazur Z. Can One Make any Crash Prediction in Finance Using the Local Hurst Exponent Idea? // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2004. Vol. 336. Iss. 1–2. PP. 133–145. DOI: 10.1016/j.physa.2004.01.018
8. Kantelhardt J. W., Zschiegner S. A., Koscielny-Bunde E., Havlin S., Bunde A., et al. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Nonstationary Time Series // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2002. Vol. 316. Iss. 1–4. PP. 87–114. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)01383-3. EDN: MCPRUN
9. Jiang Z. Q., Xie W. J., Zhou W. X., Sornette D. Multifractal Analysis of Financial Markets: A Review // Reports on Progress in Physics. 2019. Vol. 82. Iss. 12. P. 125901. DOI: 10.1088/1361-6633/ab42fb. EDN: DARTOR
10. Мансуров А. К. Прогнозирование валютных кризисов с помощью методов фрактального анализа // Проблемы прогнозирования. 2008. № 1 (106). С. 145–158. EDN: ICITYD
11. Wang J. N., Liu H. C., Hsu Y. T. Time-of-Day Periodicities of Trading Volume and Volatility in Bitcoin Exchange: Does the Stock Market Matter? // Finance Research Letters. 2020. Vol. 34. P. 101243. DOI: 10.1016/j.frl.2019.07.016. EDN: TJDFFX

Статья поступила 23 апреля 2025 г.
Одобрена после рецензирования 20 мая 2025 г.
Принята к публикации 29 мая 2025 г.

Информация об авторах

Плотников Павел Владимирович — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Email: plotnikov.pv@sut.ru

Назаров Дмитрий Вячеславович — студент группы ИКПИ-24 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Чуева Анастасия Александровна — студент группы ИКПИ-24 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Ким Злата Валерьевна — студент группы ИКПИ-24 Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Mathematical Analysis of Financial Bubbles through Fractal Dimensionality

P. Plotnikov ✉, D. Nazarov, A. Chueva, Z. Kim

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

Purpose. Financial bubbles and crises are complex phenomena related to the deviation of asset prices from their fundamental value, which requires the development of new approaches to their analysis. The aim of the paper is to investigate financial bubbles through fractal analysis techniques, including fractal dimension calculation, to identify anomalies and predict market crashes. **Methods.** The methods used include RS analysis (Hurst method) to assess the persistence of time series, Box-count method to determine the fractal dimension and multifractal analysis to study the local features of market dynamics. **Novelty.** The novelty of the study lies in the comprehensive application of fractal analysis for early detection of financial bubbles, as well as in comparing the effectiveness of different methods. **Results.** The results show that the increase in fractal dimension correlates with the periods of bubble formation, and its sharp changes can serve as indicators of crises, which is confirmed by the examples of the dot-com crisis (2000) and the financial crisis (2008). **Practical relevance.** The significance of the work lies in the possibility of using the proposed approach to create systems of early warning of crises, algorithmic trading and risk management.

Key words: financial bubbles, fractal dimension, RS-analysis, Box score method, multifractal analysis, crisis forecasting

Information about Authors

Plotnikov Pavel – Ph. D. of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: plotnikov.pv@sut.ru

Nazarov Dmitry – a Third-Year Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Chueva Anastasia – a Third-Year Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications)

Kim Zlata – a Third-Year Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications)

УДК 004.4
EDN: KEVXVN

Актуальные проблемы социальной адаптации людей с нарушенным слухом и их решение посредством информационных технологий

Волошинов Д. В. ✉, Зюриков М. А.

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

Постановка задачи. Рассмотрены проблемы социальной адаптации людей с нарушенным слухом, которые сталкиваются с трудностями в коммуникации, образовании и трудоустройстве. Проведен анализ данных опроса среди молодых пользователей кохлеарными имплантами и слуховыми аппаратами, а также анализ литературных источников. Выделены ключевые группы проблем, с которыми сталкиваются люди с нарушением слуха, и предложен способ их преодоления с помощью информационных технологий. **Целью работы** является подтверждение актуальности разработки инновационных решений, включая технологии интеллектуальной системы, для преодоления выявленных барьеров и улучшения социальной адаптации людей с нарушенным слухом. **Используемые методы:** социологический опрос в формате анкетирования 46 респондентов с нарушением слуха; анализ научных публикаций по теме исследования; обзор и выявление недостатков существующих платформ и сервис-агрегаторов для людей с нарушением слуха. **Результат:** исследование подтвердило, что основные группы проблем (коммуникация, образование, трудоустройство) взаимосвязаны и формируют замкнутый цикл, негативно влияющий на качество жизни. Опрос выявил высокую потребность в инновационных решениях. Анализ существующих сервисов показал их несоответствие потребностям людей с нарушенным слухом. **Практическая значимость:** полученные результаты служат обоснованием необходимости разработки рекомендательной системы с использованием интеллектуальной системы, которая учитывает индивидуальные потребности пользователей, предоставляя персонализированные предложения по мероприятиям, образовательным программам и вакансиям, что позволит улучшить социальную адаптацию, повысить доступность образования и трудоустройства, а также качество жизни людей с нарушенным слухом.

Ключевые слова: социальная адаптация, коммуникация, нарушения слуха, инклюзивность, интеллектуальная система

Введение

Люди с нарушением слуха сталкиваются со множеством преград в социальной сфере, начиная с ограниченных возможностей для взаимодействия в повседневной жизни и заканчивая проблемами на пути к профессиональной самореализации.

На основании анкетирования 170 респондентов с инвалидностью, проведенного АНО «Центр развития инновационных технологий «ИТ-Планета»», был составлен структурированный перечень ключевых проблем, актуальных для лиц с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ), в том числе с нарушением слуха [1]. Исходя из этого, проблемы, с которыми сталкиваются люди с нарушением слуха, можно разбить на пять основных групп:

Библиографическая ссылка на статью:

Волошинов Д. В., Зюриков М. А. Актуальные проблемы социальной адаптации людей с нарушенным слухом и их решение посредством информационных технологий // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 2. С. 4. EDN: KEVXVN

Reference for citation:

Voloshinov D., Zurikov M. Current Problems of Social Adaptation of People with Hearing Impairments and their Solution through Information Technology // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 2. P. 4. EDN: KEVXVN

1) *коммуникативные барьеры* (ограниченное восприятие устной речи приводит к сужению круга общения, языковой депривации; недостаточный запас слов затрудняет развитие коммуникативных навыков);

2) *образовательные ограничения* (отсутствие коммуникативных навыков общения с преподавателями и ограниченный запас слов вызывают сложности в усвоении материала);

3) *сложности с трудоустройством* (отсутствие необходимого образования и / или коммуникативных навыков приводит к тому, что работодатели опасаются нанимать людей с нарушением слуха);

4) *безопасность* (высокий риск не услышать сигналы опасности на дороге, отсутствует возможность телефонной связи с экстренными службами);

5) *бытовая доступность* (недостаточная слышимость бытовых устройств — дверного звонка, чайника, микроволновки, градусника, телефона снижает общий уровень жизненного комфорта).

Первые три группы проблем связаны с социальной адаптацией. Это обусловлено тем, что люди с нарушением слуха сталкиваются с рядом специфических трудностей — в первую очередь, с барьерами в устном общении, сужением социального круга, с ограниченным словарным запасом и затрудненным доступом к информации. Недостаток коммуникативных навыков и сложности в усвоении материала, вызванные трудностями аудиального восприятия и бедностью словарного запаса, препятствуют получению качественного образования и, как следствие, затрудняют трудоустройство по квалифицированным специальностям. Таким образом, формируется замкнутый цикл: коммуникативные сложности ведут к дефициту образования, дефицит образования — к сложностям при трудоустройстве на высокооплачиваемые должности, а это, в свою очередь, приводит к снижению уровня дохода и социальной изоляции. Этот цикл оказывает негативное влияние на качество жизни.

Л. С. Лебедева выделяет восемь основных факторов, влияющих на качество жизни [2].

Фактор 1. Материальные условия жизни (доход, богатство и потребление).

Фактор 2. Уровень образования и наличие различных навыков.

Фактор 3. Персональная деятельность, работа.

Фактор 4. Социальные связи и отношения.

Фактор 5. Здоровье.

Фактор 6. Политический голос и гражданские права.

Фактор 7. Экономическая и физическая безопасность.

Фактор 8. Окружающая среда.

Таким образом, вышеупомянутый замкнутый цикл негативно сказывается на первых пяти из восьми факторов, влияющих на качество жизни.

Для подтверждения значимости выделенных проблем был проведен анализ научных публикаций в журналах из перечня ВАК в базах данных библиотек eLibrary и «КиберЛенинка» путем запросов по двум ключевым фразам в тексте: 1) «нарушение слуха» и 2) одно из тематических направлений. Полученный результат наглядно представлен на рисунке 1. Диаграмма подтверждает, что выделенные группы проблем по ключевым фразам являются существенными, в том числе и группы, связанные с социальной адаптацией.

Опрос-исследование

Ситуация с нарушением слуха касается значительного числа людей в России: в стране живет около 13 млн таких людей, из которых 300 тыс. проживают в Санкт-Петербурге и 500 тыс. — в Москве. Аудитория людей с нарушением слуха чрезвычайно разнообразна как по возрасту, так и по потребностям: детям и подросткам важно иметь доступ к адаптированным образовательным программам, а взрослым — к возможностям трудоустройства и социальной интеграции [3–5].

Особенно актуальны проблемы общения, образования и трудоустройства для молодежи, поэтому мы провели исследования именно для этой возрастной категории. Для лучшего понимания актуальных проблем был проведен опрос среди 46 респондентов в возрасте от 18 до 35 лет, проживающих в Санкт-Петербурге и использующих кохлеарные импланты или слуховые аппараты.

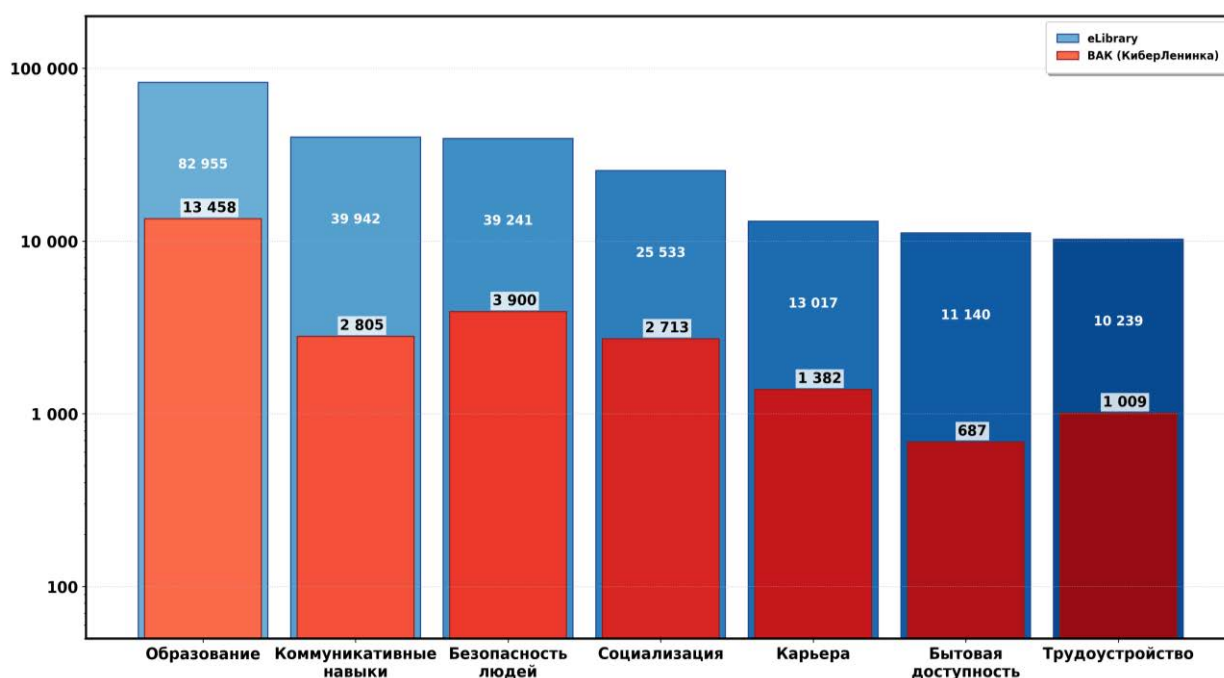


Рис. 1. Распределение количества научных публикаций по тематическим направлениям исследований проблем людей с нарушением слуха: по оси Y – количество публикаций; по оси X – тематические направления (вторая ключевая фраза)

Опрос охватывал такие группы проблем их жизни, как коммуникация, образование и трудоустройство, что позволило выявить наиболее значимые препятствия, с которыми они сталкиваются.

Социальные взаимодействия (коммуникация):

- 73,9 % респондентов предпочитают текстовые формы общения, избегая личных встреч, что обусловлено сложностью восприятия речи в условиях личного общения;

- 78,3 % указали, что окружающие часто не знают, как правильно взаимодействовать с людьми с нарушением слуха;

- 65,2 % испытывают затруднения при прослушивании экскурсоводов в культурных местах из-за акустических особенностей помещений.

Образование:

- 34,8 % респондентов отметили, что преподаватели редко учитывают их особые потребности и зачастую игнорируют их просьбы;

- 87 % предпочитают использовать субтитры при просмотре учебных материалов, что помогает лучше усваивать информацию.

Трудоустройство:

- 82,6 % респондентов сталкиваются с трудностями в поиске подходящей работы и продвижении по карьерной лестнице;

- 73,9 % отметили непонимание со стороны работодателей, которые не всегда учитывают их потребности;

- 69,6 % избегают телефонных интервью из-за неуверенности в успешности прохождения собеседований по телефону.

Часть результатов опроса, касающаяся вопросов адаптации людей с нарушением слуха, представлена в наглядном виде на рисунке 2.

Полученные данные показали, что значительная часть респондентов испытывает потребность в инновационных решениях, которые могли бы упростить социальные взаимодействия, улучшить доступ к образовательным ресурсам и адаптировать рабочие условия под их потребности. Результаты подчеркивают необходимость применения комплексного подхода для поддержки людей с нарушением слуха на всех уровнях социальной интеграции.



Рис. 2. Результаты опроса людей с нарушением слуха на предмет коммуникативных барьеров, образования и трудоустройства

Актуальность исследования подтверждается не только результатами проведенного опроса, но и данными научных источников, в которых рассматриваются различные аспекты социальной адаптации данной аудитории. Например, в исследовании А. М. Ойдоповой и Д. В. Медведевой установлено, что «инвалидам по слуху требуется социальная адаптация и социализация в современном обществе, приобрести которые они могут в процессе получения образования» [3]. Авторы аргументируют это тем, что у данной категории лиц наблюдается низкий уровень дохода, трудности в самореализации, а также барьеры, связанные с отсутствием навыков владения жестовым языком у людей с нормальным слухом.

Ю. Ф. Шамсутдинова в своей работе акцентирует внимание на коммуникативных барьерах, отмечая, что «причиной непонимания или отказа от общения обычно являются коммуникативные барьеры, а именно лингвистический барьер (полный — различие используемых языков или неполный — к примеру, различия в синтаксисе / грамматике для слышащего, наличие в сообщении незнакомых слов для неслышащего) или психологический / психолингвистический барьер (неготовность или нежелание общаться с собеседником)» [6]. Исследователь также подчеркивает, что «участники общения могут повлиять на успешность коммуникации двумя способами: 1) освоить язык собеседника (преодоление лингвистического барьера); 2) «подстроиться», т. е. использовать способ общения, удобный для обоих (преодоление психологических и / или лингвопсихологических барьеров)». Это говорит о необходимости найти способ, который позволит преодолеть коммуникативный барьер так, чтобы люди с нарушением слуха могли полноценно социализироваться, как и люди с нормой слуха. Это подтверждает и Н. В. Большаков, который в своем исследовании указывает, что «проблемами, с которыми глухие учащиеся сталкиваются непосредственно в процессе обучения в колледже, становится нехватка переводчиков жестового языка (или даже их отсутствие), необходимость специальных условий и отсутствие соответствующих ресурсов учебного заведения, а также низкий уровень подготовки педагогов» [7]. Также он подчеркивает, что «проблемным информантам видится и то, что вопрос трудоустройства должен решаться индивидуально: отсутствуют механизмы институционализированной поддержки трудоустройства глухих через колледж или другие организации, что отмечают как сами учащиеся, так и эксперты» [7].

В статье М. П. Сутириной на основе сравнительного анализа подтверждено, что «потребность в общении у студентов с нарушенным слухом немного выше, чем у студентов с нормой слуха», при этом «речевая активность у студентов с нарушенным слухом ниже, чем у студентов с нормой слуха» [5]. Также автор делает вывод о необходимости разработки технических решений, направленных на развитие коммуникативных способностей, повышение речевой активности и расширение социальных связей.

В статье S. Ozarkar, R. Chetwani, S. Devare, S. Haryani и N. Giri [8] фиксируется, что людям с нарушением слуха трудно общаться с другими пассажирами во время поездок, поскольку единственный способ общения для них — жестовый язык. При этом наблюдается нехватка сертифицированных перевод-

чиков жестового языка (например, в Индии их всего около 250). Следовательно, по мнению авторов исследования, необходим ясный канал коммуникации между глухими и слышащими, чтобы глухие могли путешествовать самостоятельно без опасений, что подчеркивают важность разработки специализированных платформ, которые учитывают особенности людей с нарушением слуха.

В статье M. Alnfai и S. Sampali [9] отмечается, что улучшение доступа к коммуникации для людей с нарушением слуха потенциально способствует повышению уровня образования и трудовой активности, а также в целом увеличивает их независимость и уверенность в выполнении повседневных задач. Авторы подчеркивают важность учета специфики целевой аудитории — способностей, присущих людям с нарушением слуха, таких как зрительное и сенсорное восприятие, — и разрабатывать приложения, опираясь на эти способности и игнорируя навыки, доступные слышащим.

Р. Ю. Ибрагимова в своем исследовании указывает, что «для глухих и слабослышащих характерно желание понравиться и заслужить уважение в ходе общения с нормально слышащими сверстниками, а с другой стороны, им мешает идти на контакт опасение быть отвергнутыми, наличие комплексов по поводу своего дефекта» [10]. Также отмечено, что «инвалид по слуху значительно больше зависит от эмоциональных и воспитательных отношений среды при поступлении в школу, в вуз и в процессе интеграции в общество, чем слышащий человек». Следовательно, если люди с нарушением слуха больше переживают за учебный процесс, где тоже требуются навыки социализации, чтобы интегрироваться в общество учебного заведения, то необходимо разработать решение, которое поможет им сделать это так же легко, как и слышащим.

В диссертации М. Н. Реут на основе эмпирических данных установлено, что «социализация неслышащей молодежи отличается от социализации слышащей молодежи, но существующие особенности не такие, какие приписываются обществом» [11]. Автор также подчеркивает, что «запаздывание социализации у неслышащей молодежи можно уменьшить, если организовать работу образовательных учреждений (школа — колледж — вуз), исходя из признания равных возможностей слышащей и неслышащей молодежи в освоении учебных программ».

Что касается трудоустройства, то в диссертации Н. О. Ярошевич выявлено, что «изучение процесса социально-трудовой адаптации юношей и девушек с нарушениями слуха позволило выявить у них такую специфическую особенность, характерную для большинства испытуемых, как низкий уровень социально-психологической компетентности в вопросах трудоустройства. Это обуславливало ряд трудностей в период поиска работы и влияло на качество подготовки учащихся с нарушением слуха к самостоятельной трудовой деятельности» [12]. Автор также отмечает, что «определена необходимость формирования теоретических знаний, повышение уровня правовой и организационной подготовки у лиц с нарушениями слуха».

В статье [4] на основе социологического исследования подтверждено, что «ситуацию с трудоустройством заметным образом осложняет недостаточный уровень образования и профессиональных компетенций среди слабослышащих, поскольку ограничения, связанные с глухотой, не всем позволяют получить высшее или средне-профессиональное образование и претендовать на хорошую должность». Авторы работы также отмечают, что «люди с нарушением слуха готовы трудиться, реализовывать себя, но низкая заработная плата, доступность низкоквалифицируемых рабочих мест, случаи дискриминации слабослышащих, а также отмена льгот в случае трудоустройства снижают количество успешных практик трудоустройства».

Таким образом, проблемы образования, социализации и трудоустройства взаимосвязаны между собой, что подчеркивает важность развития социального интеллекта и коммуникативных способностей у студентов с нарушением слуха. Авторы освещают проблемы трудоустройства, а также акцентируют необходимость доступного образования.

Уточним содержание и первопричины проблем, образующих замкнутый цикл.

Социальное взаимодействие затруднено вследствие наличия коммуникативного барьера, психологических сложностей и недостаточной инклюзивности социальной среды. Высокая потребность в общении у людей с нарушенным слухом сопровождается сниженной речевой активностью, что требует разработки специализированных технических решений для улучшения коммуникативных процессов.

Образование остается малодоступным для значительной части данной категории лиц из-за отсутствия переводчиков жестового языка, недостаточного уровня подготовки педагогического состава и

нехватки ресурсов для создания специальных условий обучения. Устранение данных барьеров является необходимым условием для обеспечения равных возможностей в образовательной среде.

Трудоустройство сопряжено с рядом трудностей, включая низкий уровень образования, недостаток профессиональных компетенций, дискриминацию и отсутствие системной поддержки. Несмотря на готовность людей с нарушенным слухом к трудовой деятельности, ограниченный доступ к высококвалифицируемым рабочим местам и низкий уровень заработной платы снижают их мотивацию к трудоустройству.

Стоит отметить, что люди с нарушенным слухом сталкиваются со сложностями в получении информации и социальных связях. Следовательно, у них возникает необходимость воспользоваться инновационно-техническими решениями. Однако на данный момент текущие сервисы не решают вопрос преодоления коммуникативных барьеров, поскольку существующие приложения и веб-сервисы имеют множество ограничений [13], что требует поиска другого подхода. Это может быть сервис-агрегатор или платформа, где размещается информации о местах проведения мероприятий, курсов или о вакансиях.

Для того чтобы оценить возможности сервис-агрегаторов, было решено изучить семь существующих платформ и выявить их недостатки. Перечень недостатков каждой платформы представлен в таблице 1.

Таблица 1. Анализ недостатков платформ для лиц с нарушением слуха

Наименование платформы	Недостатки
Kudago.com (сайт для поиска мероприятий)	Отсутствует информация о доступности среды для людей с нарушением слуха; Отсутствует информация о льготах для людей с нарушением слуха
Afisha.yandex.ru (сайт для поиска мероприятий и покупки билетов)	Отсутствует адаптация под потребности слабослышащих; Редко указываются сведения о доступности среды для людей с нарушением слуха; Отсутствует информации о льготах для людей с нарушением слуха.
Choosecourse.ru (сайт для поиска курсов и программ)	Отсутствует информация о наличии субтитров в видеокурсах; Отсутствует информация о текстовых альтернативах (учебники, методические материалы, пособия); Отсутствие информации о сурдоперевода
Инклюзивное образование.рф (сайт для поиска вузов для людей с ОВЗ)	Отсутствует информации про адаптированные форматы обучения; Раздел «Доступная среда» содержит информацию только о физическом доступе в вузы; Отсутствуют отзывы от других лиц с ОВЗ, в том числе с нарушением слуха
HH.ru (сайт для поиска вакансий)	Отсутствует фокус на потребностях людей с нарушением слуха; Проблема с коммуникацией при откликах (Представители компании связываются с соискателями по телефону, несмотря на то что в резюме соискатели просят связаться по почте или в мессенджерах); Не все работодатели готовы принимать людей с нарушением слуха
Rabota-i.com (сайт для поиска вакансий для людей с ОВЗ)	Нет акцента на доступность для людей с нарушением слуха: вакансии адресованы людям с тяжелой формой инвалидности с повышенной нетрудоспособностью, но мало предложений, учитывающих интерес глухих и слабослышащих
Gestuno (приложение для людей с нарушением слуха)	Отсутствуют рекомендаций, учитывающих степень нарушение слуха и способ общения; Не учитываются интересы людей с нарушением слухом; Проект приложения приостановлен и не поддерживается обновлением; Большая часть функций не работает.

Таким образом, несмотря на большое количество платформ, люди с нарушением слуха сталкиваются с рядом специфических проблем, которые эти сервисы не способны эффективно решать, поскольку ни один из них не учитывает их потребности в полной мере. Отсутствие фокуса на доступность, устаревшая информация, недостаток персонализации, отсутствие гарантии комфортного трудоустройства и отсутствие рекомендаций — все это делает их недостаточно пригодными для людей с нарушенным слухом.

Социальные сети и мессенджеры, такие как «ВКонтакте», Telegram и др. не позволяют эффективно находить комфортные мероприятия, курсы или вакансии, поскольку ряд их недостатков мешает даже слышащим людям найти необходимое: наличие отвлекающих факторов и неактуальных постов, а также ограниченные возможности фильтрации.

Следует обратить внимание на приложение *Gestuno*, которое является единственным программным обеспечением, ориентированным на людей с нарушением слуха. Однако функциональные решения платформы не предусматривают персонализацию с учетом ключевых характеристик целевой аудитории, таких как предпочтительный способ коммуникации, уровень владения жестовым языком, наличие остаточного слуха при использовании слуховых аппаратов или кохлеарных имплантов, а также потребность в услугах сурдопереводчика. В настоящее время проект приостановлен, и значительная часть его функциональности недоступна, что демонстрирует, как отсутствие комплексного учета индивидуальных потребностей и интересов пользователей с нарушением слуха существенно снижает практическую значимость и эффективность подобных цифровых решений.

Для эффективной интеграции и профессиональной адаптации людей с нарушением слуха требуется внедрение новых подходов и технологий. Важным компонентом комплексного подхода к социальной адаптации людей с нарушением слуха может стать использование интеллектуальной системы. Ее применение открывает перспективы для создания адаптивных и персонализированных систем, способных учитывать уникальные потребности каждого пользователя. Такие системы могли бы анализировать предпочтения и сложности, с которыми сталкивается человек в общении, обучении и трудоустройстве, и на основе полученных данных предлагать оптимальные варианты мероприятий, курсов, вакансий и других ресурсов [13].

К примеру, интеллектуальная система может оценивать данные о пользователе — такие, как предпочтительные способы коммуникации (текст или видео с субтитрами), уровень слуховой способности и опыт использования слуховых устройств. Интеллектуальная система может рекомендовать учебные материалы с субтитрами, вакансии в компаниях, готовых адаптировать условия труда, а также мероприятия с учетом акустической доступности. Такой адаптивный подход будет способствовать не только эффективной социальной интеграции, но и улучшению качества жизни, развитию уверенности и поддержке уникальных потребностей людей с нарушением слуха на разных этапах их жизни.

Предлагается реализовать один из методов построения инклюзивной рекомендательной системы, ориентированной на пользователей с нарушением слуха. Метод представляет собой совмещение классических сервис-агрегаторов с контентной фильтрацией с использованием TF-IDF-оценки (Term Frequency—Inverse Document Frequency, *пер. на русс.* Частота термина—Обратная частота документа), формируемой на основании индивидуального профиля интересов и особенностей пользователя. Этот способ представляется эффективным для того, чтобы реализовать комфортную инклюзивную систему, способную учитывать данные пользователя и предлагать решения, которые помогут им комфортно развиваться и социализироваться в обществе, например, доступные курсы, вакансии или мероприятия.

После регистрации пользователь проходит анкетирование, на основании которого формируются данные, необходимые для формирования персонализированного набора ключевых слов. Пользователь также может вручную изменить или дополнить интересующие его категории и предпочтения через интерфейс настроек. Ключевые слова автоматически соотносятся с категориями доступного контента, включая мероприятия, образовательные курсы и вакансии. Персонализированный набор ключевых слов пользователя формируется на основе анкеты и включает в себя интересующие тематики, предпочитаемый тип коммуникации (например, жестовый язык, устная речь, текст), наличие слухового аппарата или кохлеарного импланта, языки общения (например, русский, английский, испанский), необходимость в сопровождении (сурдопереводчик, субтитры) и др. Эти параметры автоматически преобразуются в ключевые слова, которые участвуют в контентной фильтрации и влияют на формирование персонализированных рекомендаций.

Каждая единица контента описана набором признаков: заголовок, описание, поддерживаемые языки и связанные ключевые слова. Эти признаки объединяются в текстовую строку и преобразуются в векторное представление с помощью алгоритма TF-IDF [14]. TF-IDF отражает относительную важность каждого слова: чем чаще оно встречается в конкретном контенте (TF) и чем реже встречается в остальных (IDF), тем выше его вес в итоговом векторе. Для пользователя на основе его набора ключевых слов также формируется TF-IDF-вектор, а далее вычисляется косинусное сходство между этим вектором и векторами всех объектов. Полученные значения отражают релевантность объекта интересам пользователя. Объекты с наибольшим уровнем сходства получают более высокий рейтинг и отображаются в верхней части списка рекомендаций.

Таким образом, система реализует *адаптивный механизм ранжирования*, который учитывает как индивидуальные особенности пользователя, так и содержательные характеристики контента. Подход ориентирован на улучшение персонализации и повышение доступности цифровой среды для лиц с нарушением слуха.

В качестве примера применения метода было разработано приложение, которое при регистрации собирает информацию о пользователях путем анкетирования, а затем ранжирует список объектов, исходя из косинусного сходства TF-IDF-векторов пользователя и объектов. Пользователи могут просматривать объекты, изменять интересы и город, выбирать карточку (объект) и получать детальную информацию о нем с возможностью записи или добавления в «Избранное». Дополнительные настройки, связанные с индивидуальными особенностями пользователя, доступны на странице профиля, где можно указать языки, наличие слуховых устройств и другую информацию. Интерфейс главной страницы разрабатываемого приложения представлен на рисунке 3.

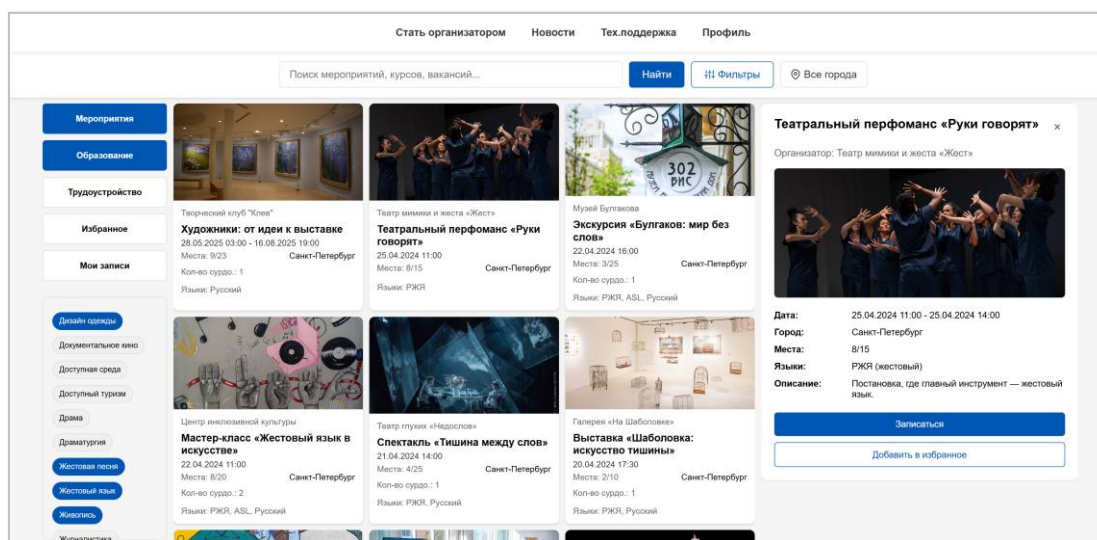


Рис. 3. Интерфейс главной страницы приложения

Выводы

Таким образом, разработка инклюзивной платформы рекомендательной системы для сервис-агрегатора, который будет учитывать особенности и потребности данной аудитории, является необходимостью для повышения комфортности и доступности мероприятий, курсов и трудоустройства для людей с нарушением слуха [8, 13, 15]. Стоит отметить, что интеллектуальные системы могут быть усовершенствованы до более продвинутого уровня с применением технологий искусственного интеллекта, языковых моделей или методов машинного обучения, что позволяет учитывать дополнительные факторы, влияющие на результат ранжирования [9].

Литература

1. Обзор основных проблем людей с ограниченными возможностями здоровья и возможных путей их решения с помощью инноваций. Автономная некоммерческая организация «Центр развития инновационных технологий «ИТ–Планета». URL: <https://docs.google.com/document/d/1b3dK4b1dHOOSVCRMYwKQLOSdJzTxdI/edit> (дата обращения: 27.05.2025)
2. Лебедева Л. С. «Качество жизни»: ключевые подходы и структура понятия // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. 2018. № 4 (146). С. 68–80. DOI: 10.14515/monitoring.2018.4.04. EDN: XZPHML
3. Ойдопова А. М., Медведева Д. В. Получение социального образования как один из важных жизненных этапов у людей с нарушением слуха // Технологии социальной работы с разными группами населения: материалы

VII Всероссийской научно-практической конференции (Чита, 05–06 декабря 2019 г.). Чита: Забайкальский государственный университет, 2019. С. 88–91. EDN: JDOGTS

4. Ахмедова А. Р., Кода Е. А., Дылкина Т. В., Фоменко А. П. Социальные практики трудоустройства людей с нарушением слуха (по материалам социологического исследования в г. Барнауле) // Социодинамика. 2022. № 10. С. 31–45. DOI: 10.25136/2409-7144.2022.10.39118. EDN: BWNXOS

5. Сутырина М. П. Социальный интеллект и коммуникативные способности у студентов с нарушениями слуха // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 1 (20). С. 240–244. EDN: LDFYVF

6. Шамсутдинова Ю. Ф. Коммуникация с участием слышащих и глухих / слабослышащих людей: потенциал социальных медиа // Вестник Московского университета. Серия 10: Журналистика. 2020. № 5. С. 54–76. DOI: 10.30547/vestnik.journ.5.2020.5476. EDN: ZKDDEU

7. Большаков Н. В. «У слышащих больше возможностей для жизни»: проблемы среднего профессионального образования глухих и слабослышащих // Журнал исследований социальной политики. 2019. Т. 17. № 4. С. 571–584. DOI: 10.17323/727-0634-2019-17-4-571-584. EDN: JUIDAX

8. Ozarkar S., Chetwani R., Devare S., Haryani S., Giri N. AI for Accessibility: Virtual Assistant for Hearing Impaired // Proceedings of the 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT, Kharagpur, India, 01–03 July 2020). 2020. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICCCNT49239.2020.9225392

9. Alnfai M., Sampali S. Social and Communication Apps for the Deaf and Hearing Impaired // Proceedings of the International Conference on Computer and Applications (ICCA, Doha, Qatar, 06–07 September 2017). 2017. DOI: 10.1109/COMAPP.2017.8079756

10. Ибрагимова Р. Ю. Социальные проблемы лиц с нарушениями слуха // Психология и педагогика: методика и проблемы практического применения. 2010. № 11–1. С. 121–126. EDN: RUQAGF

11. Реут М. Н. Особенности социализации неслышащей молодежи: специальность: дисс. ... канд. социол. наук. М., 2000. 154 с. EDN: QDEZXD

12. Ярошевич Н. О. Социально-трудовая адаптация лиц с нарушениями слуха: дисс. ... канд. пед. наук. М., 2002. 143 с. EDN: NMCDHR

13. Зюриков М. А., Шиян А. А. Анализ веб-сервисов и мобильных приложений для улучшения качества жизни людей с нарушенным слухом // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023, Санкт-Петербург, 05–07 декабря 2023 г.): всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. Сборник лучших докладов. СПб.: СПбГУТ, 2024. Т. 2. С. 413–416. EDN: LCMQDT

14. Извлечение признаков из текстовых данных с использованием TF-IDF // Хабр. 22.08.2023. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/755772/> (дата обращения: 27.05.2025)

15. Hatami M., Chegini M. Enhancing Digital Content Accessibility for the Hearing Impaired through AI-Driven Visual Representations // Proceedings of the 10th International Conference on Artificial Intelligence and Robotics (QICAR, Qazvin, Iran, 29 February 2024). 2024. DOI: 10.1109/QICAR61538.2024.10496621

Статья поступила 31 марта 2025 г.

Одобрена после рецензирования 22 апреля 2025 г.

Принята к публикации 30 мая 2025 г.

Информация об авторах

Волошинов Денис Вячеславович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей информатики и компьютерного дизайна Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Email: voloshinov.dv@sut.ru

Зюриков Михаил Артурович — студент 2-го курса магистратуры (группа ИСТ-331м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Current Problems of Social Adaptation of People with Hearing Impairments and their Solution through Information Technology

D. Voloshinov ✉, M. Zurikov

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

Problem statement: The problems of social adaptation of people with hearing loss who face difficulties in communication, education and employment are considered. The analysis of survey data among young users of cochlear implants and hearing aids, as well as the analysis of literary sources, is carried out. The key groups of problems faced by people with hearing impairment are highlighted, and a way to overcome them using information technology is proposed. **The aim of the work** is to confirm the relevance of developing innovative solutions, including artificial intelligence technologies, to overcome the identified barriers and improve the social adaptation of people with hearing loss. **Methods:** a sociological survey in the format of a questionnaire of 46 respondents with hearing impairment. Analysis of scientific publications. Review and identify the shortcomings of existing platforms and service aggregators for people with hearing impairment. **Result:** The study confirmed that the main groups of problems (communication, education, employment) are interconnected and form a vicious cycle that negatively affects the quality of life. The survey revealed a high need for innovative solutions. An analysis of existing services has shown that they do not meet the needs of people with hearing loss. **Practical relevance:** the results obtained justify the need to develop a recommendation system using artificial intelligence that takes into account the individual needs of users, providing personalized recommendations on events, educational programs and vacancies, which will improve social adaptation, increase access to education and employment, as well as the quality of life of people with hearing loss.

Key words: social adaptation, communication, hearing impairment, inclusion, intelligent system

Information about Authors

Voloshinov Denis – Holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Science and Design (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: voloshinov.dv@sut.ru

Zurikov Michael – a 2nd-Year Master's Student (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications)

УДК 621.39
EDN: BBAFJR

Метод балансировки задержки и потерь данных в гетерогенных сетях высокой плотности Интернета вещей

Хоанг Ф. Н. ✉, Парамонов А. И.

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

Постановка задачи. Рост числа устройств в гетерогенных сетях Интернета вещей создает дополнительную нагрузку на ограниченные радиоресурсы, что усложняет обеспечение стабильности и качества передачи данных. Гетерогенные подканалы связи имеют различные характеристики, требующие эффективных механизмов балансировки нагрузки. Разработка методов, позволяющих минимизировать задержку передачи данных и снизить вероятность потерь пакетов, особенно актуальна для высокоплотных сетей Интернета вещей, где управление ресурсами становится критически важным. **Цель работы** — повышение эффективности передачи данных в гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности. **Используемые методы.** В работе применены методы оптимизации, алгоритм стаи серых волков, теория массового обслуживания, вероятностный анализ. **Новизна.** Предложенный в статье метод учитывает индивидуальные характеристики подканалов и обеспечивает динамическое распределение нагрузки. Это позволяет адаптировать решение под разные типы гетерогенных сетей, снижая задержку и потери данных. **Результат.** Разработаны математическая модель, описывающая передачу данных через несколько подканалов связи, и целевая функция, объединяющая среднюю задержку передачи данных и вероятность потерь пакетов. Выведены аналитические выражения для ключевых характеристик сети, таких как вероятность потерь, средняя задержка. **Практическая значимость.** Разработанная модель и метод могут быть использованы при проектировании устройств и гетерогенных сетей Интернета вещей высокой плотности в целях повышения их эффективности.

Ключевые слова: Интернет вещей, канал связи, задержка канала, гетерогенные каналы, надежность сети, массовое обслуживание, алгоритм стаи серых волков

Введение

Развитие Интернета вещей (ИВ) является ключевым направлением современных инфокоммуникационных технологий. Согласно прогнозам ведущих аналитических агентств, количество подключенных беспроводных устройств в ближайшие годы будет стремительно расти [1, 2] и способствовать формированию высокоплотных сетей, где узлы находятся в близком взаимном расположении. Высокая плотность узлов в сети создает дополнительные проблемы, включая интерференцию сигналов, уменьшение отношения сигнал / шум [3–5].

Вместе с тем плотные сети ИВ создают новые возможности для адаптивной организации сети. Например, плотность узлов позволяет применять более гибкие подходы к выбору логической структуры и распределению сетевых ресурсов. Однако рост плотности сетей также обостряет потребность в эффективных методах управления ресурсами, которые обеспечивают баланс между ключевыми

Библиографическая ссылка на статью:

Хоанг Ф. Н., Парамонов А. И. Метод балансировки задержки и потерь данных в гетерогенных сетях высокой плотности Интернета вещей // Вестник СПбГУТ. 2025. Т. 3. № 2. С. 5. EDN: BBAFJR

Reference for citation:

Hoang Ph. N., Paramonov A. A Method for Balancing Latency and Data Loss in High-Density Heterogeneous Internet of Things Networks // Herald of SPbSUT. 2025. Vol. 3. Iss. 2. P. 5. EDN: BBAFJR

метриками, такими как задержка передачи данных, энергопотребление и надежность доставки данных [6–9]. На рисунке 1 представлен прогноз роста количества устройств ИВ до 2030 г.

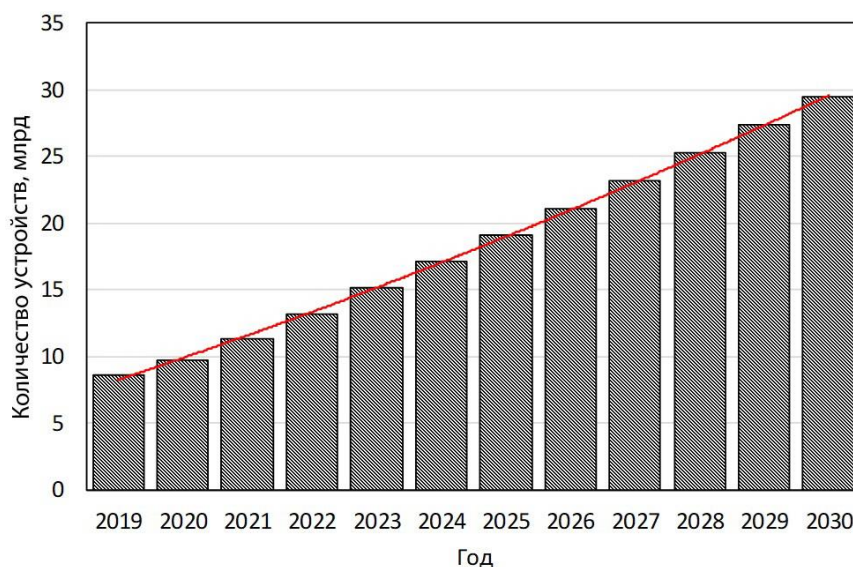


Рис. 1. Прогнозируемый рост количества устройств ИВ

Гетерогенные сети ИВ, использующие подканалы с различными физическими характеристиками (радиочастотные, акустические, оптические), требуют более сложных методов распределения нагрузки [10, 11], учитывающих изменяющиеся условия работы каждого канала, взаимные помехи и требования к качеству обслуживания.

Цель работы – разработка моделей и методов оптимизации передачи данных в гетерогенных многоканальных сетях ИВ. В рамках исследования были решены следующие задачи:

- 1) разработана математическая модель передачи данных через многоканальные гетерогенные сети ИВ;
- 2) определена целевая функция, объединяющая метрики задержки и потерь пакетов;
- 3) применены теория очередей, теория вероятностей и современные алгоритмы оптимизации для минимизации задержек и потерь данных;
- 4) оценена эффективность предложенного метода с помощью имитационного моделирования и сравнительного анализа.

Настоящее исследование направлено на разработку методов адаптивного управления ресурсами для повышения эффективности гетерогенных сетей ИВ в условиях высокой плотности устройств и ограниченных ресурсов.

Модель сети и постановка задачи

Современные сети ИВ зачастую представляют собой гетерогенные системы высокой плотности, в которых для передачи данных могут одновременно использоваться различные физические среды, такие как радио-, акустические и оптические. В рамках разработанной модели рассматривается логический канал связи между двумя узлами, который состоит из нескольких параллельных подканалов. Каждый подканал соответствует одной из доступных технологий и характеризуется уникальным набором параметров (пропускная способность, задержка, вероятность потерь), что и является сутью его гетерогенности. Для фундаментального анализа задачи балансировки трафика и оптимизации ключевых показателей качества обслуживания необходимо абстрагироваться от сложной топологии всей сети с миллиардами устройств. Поэтому в данной работе рассматривается базовая, но критически важная конфигурация: единственный узел-источник, который распределяет свой трафик узлу-получателю через эти гетерогенные подканалы, как показано на рисунке 2. Такая модель позволяет сосредоточиться на разработке метода адаптивного распределения нагрузки, что является основной целью настоящего исследования.

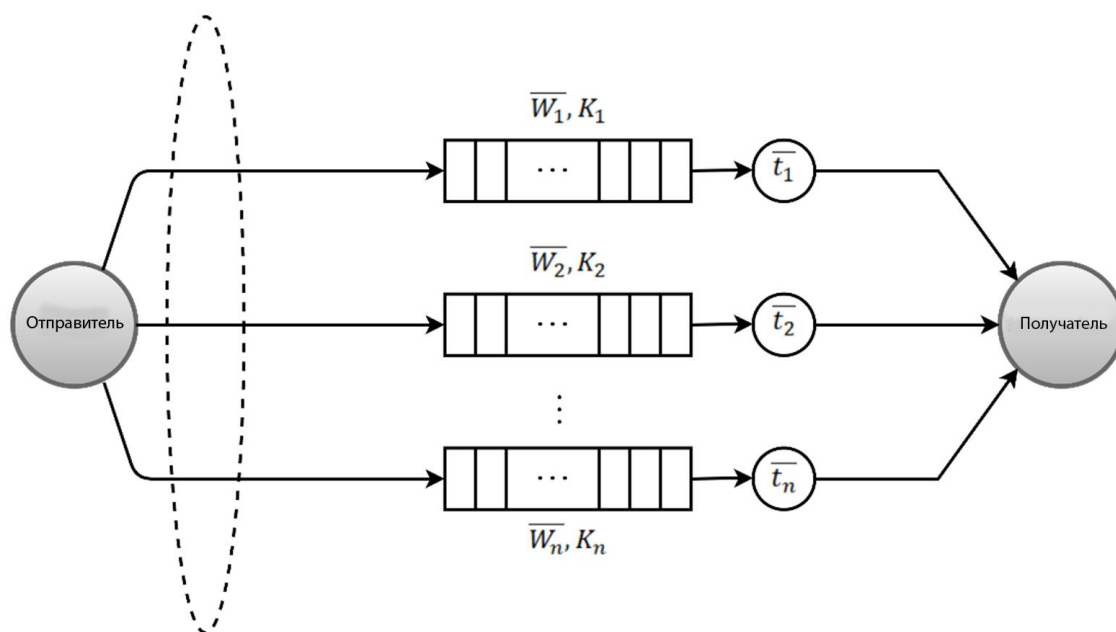


Рис. 2. Модель гетерогенной многоканальной сети ИВ

Для управления распределением нагрузки между подканалами вводится вектор долей трафика $F = [f_1, f_2, \dots, f_N]$, где f_n определяет долю нагрузки, направляемой на подканал n , с ограничением:

$$\sum_{n=1}^N f_n = 1, 0 \leq f_n \leq 1,$$

где N – количество подканалов, используемых в системе.

Таким образом, общая интенсивность потока λ_Σ распределяется между подканалами по правилу $\lambda_n = f_n \cdot \lambda_\Sigma$.

Каждый подканал моделируется как независимая система массового обслуживания общего типа $G/G/1/K$ с ограниченной длиной очереди, где время поступления и обработки пакетов подчиняется общим распределениям. Максимальная вместимость буфера K включает как пакеты в очереди, так и обрабатываемый пакет. Узел-получатель принимает только успешно доставленные пакеты, не выполняя дополнительной обработки.

В условиях высокой нагрузки отдельные подканалы могут приближаться к состоянию перегрузки, что приводит к увеличению вероятности потери пакетов и задержек. Для предотвращения таких ситуаций применяется адаптивная стратегия балансировки, которая перераспределяет часть трафика на менее загруженные подканалы, обеспечивая стабильность работы системы.

Вероятность потери пакетов в системе определяется как вероятность того, что пакет не будет успешно доставлен, учитывая производительность всех подканалов. Поскольку подканалы функционируют независимо, вероятность потери пакетов выражается следующим образом:

$$P_L = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - p_n), \quad (1)$$

где p_n – вероятность потери пакета на подканале n . Формула (1) показывает, что общая потеря пакетов зависит от производительности каждого подканала.

Для учета реальных условий работы каждого подканала вводится коэффициент влияния среды γ_n , отражающий влияние таких факторов окружающей среды, как уровень помех, вероятность ошибок передачи и приоритет трафика. Эффективная пропускная способность подканала n определяется как:

$$\mu_n^{eff} = \gamma_n \mu_n, \gamma_n \in [0, 1],$$

где μ_n – номинальная пропускная способность.

Интенсивность входящего потока для n -го подканала обозначается как λ_n , а коэффициент нагрузки каждого подканала определяется как:

$$\rho_n = \frac{\lambda_n}{\mu_n^{eff}} = \frac{f_n \lambda_{\Sigma}}{\mu_n^{eff}}.$$

Система считается устойчивой, если выполняется условие $\rho_n < 1$, т. е. средняя скорость обслуживания превышает среднюю интенсивность поступающих пакетов.

Вероятность потери пакетов на подканале n из-за конечного буфера рассчитывается по приближенной формуле [12]:

$$p_n \approx \frac{1-\rho_n}{1-\rho_n^{(K_n R_n+1)}} \rho_n^{(K_n R_n)},$$

где K_n — размер буфера; величина R_n характеризует суммарную вариативность потока трафика и времени обслуживания пакета данных.

$$R_n = \frac{2}{C_{a,n}^2 + C_{b,n}^2},$$

где $C_{a,n}$ — коэффициент вариации интервалов времени между моментами поступления пакетов трафика; $C_{b,n}$ — коэффициент вариации времени обслуживания (передачи) пакета данных.

Согласно теореме Пальма — Хинчина, при суперпозиции большого числа независимых источников передачи данных, каждый из которых генерирует поток с малой интенсивностью, суммарный процесс поступления в пределе сходится к пуассоновскому потоку. В предложенной модели каждый подканал действует независимо и обеспечивает параллельную передачу данных к общему пункту назначения. Следовательно, входящий на каждый подканал поток можно приближенно рассматривать как простейший процесс. Это позволяет применять классические аналитические методы теории массового обслуживания для пуассоновских потоков при оценке производительности сети без уточнения конкретного закона распределения времени обслуживания и без использования более сложных стохастических моделей.

Пусть для модели простейшего потока $R_n = 1$ вероятность потери пакетов каждого подканала определяется как:

$$p_n \approx \frac{1-\rho_n}{1-\rho_n^{K_n+1}} \rho_n^{K_n}.$$

С помощью выражения (1) вероятность потери пакетов в системе P_L определяется как:

$$P_L = 1 - \prod_{n=1}^N \left(1 - \frac{1-\rho_n}{1-\rho_n^{K_n+1}} \rho_n^{K_n} \right). \quad (2)$$

Для модели простейшего потока, средняя задержка (включая время ожидания и обслуживания) рассчитывается по теореме Литтла следующим образом [13]:

$$\overline{W}_n = \frac{L_n}{\lambda_n(1-p_n)} = \frac{1}{\lambda_n} \left(\frac{\rho_n}{1-\rho_n} \frac{1-\rho_n^{K_n+1}}{1-\rho_n^{K_n}} - \frac{(K_n+1)\rho_n^{K_n+1}}{1-\rho_n^{K_n}} \right),$$

где L_n — среднее число заявок в системе, представляющее собой математическое ожидание количества заявок в стационарном режиме, включая как заявки, находящиеся на обслуживании, так и ожидающие начала обслуживания в очереди:

$$L_n = \frac{\rho_n [1 - (K_n + 1)\rho_n^{K_n} + K_n \rho_n^{K_n+1}]}{(1 - \rho_n)(1 - \rho_n^{K_n+1})}.$$

Поскольку передача данных осуществляется через несколько подканалов, общее среднее время задержки определяется как взвешенная сумма времени задержки на каждом подканале. При этом вес каждого подканала пропорционален доле пакетов, передаваемых через него. Такой подход позволяет учитывать неоднородность нагрузки и влияние каждого подканала на суммарное время задержки всей системы:

$$\overline{W}_{sys} = \sum_{n=1}^N \frac{\lambda_n}{\lambda_{\Sigma}} \overline{W}_n = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\rho_n}{1 - \rho_n} \frac{1 - \rho_n^{K_n+1}}{1 - \rho_n^{K_n}} - \frac{(K_n + 1)\rho_n^{K_n+1}}{1 - \rho_n^{K_n}} \right). \quad (3)$$

Для оценки качества связи каждого подканала ключевыми параметрами являются вероятность потерь пакетов и время доставки данных. Высокая вероятность ошибок передачи снижает эффективность передачи информации, поскольку требует повторных попыток доставки, что дополнительно увеличивает нагрузку на сеть. Одновременно значительные задержки негативно влияют на пропускную способность системы, ухудшая качество сервиса для конечных пользователей.

В задачах оптимизации качества связи стремятся минимизировать как вероятность потерь, так и задержки, поскольку их снижение способствует повышению надежности и стабильности передачи данных. Однако из-за ограниченных ресурсов, внешних помех и динамически изменяющихся условий полностью устранить потери и задержки невозможно.

Для достижения оптимального баланса между этими двумя параметрами предлагается использовать целевую функцию, которая задает компромисс между минимизацией потерь данных и уменьшением времени задержки. Таким образом, взаимосвязь между задержками и потерями пакетов учитывается с помощью весовых коэффициентов, отражающих относительную важность каждого показателя:

$$O = \omega_L P_L + \omega_T \overline{W}_{sys}, \quad (4)$$

где коэффициенты ω_L и ω_T представляют собой условные единицы стоимости, которые позволяют балансировать приоритет между минимизацией задержки и потерями пакетов в системе.

Запишем выражение (4) в виде целевой функции с учетом (2) и (3):

$$\begin{aligned} \min_{\{f_n, n=1 \dots N\}} O = & \omega_L \left[1 - \prod_{n=1}^N \left(1 - \frac{1 - \rho_n}{1 - \rho_n^{K_n+1}} \rho_n^{K_n} \right) \right] + \\ & + \omega_T \left[\frac{1}{\lambda_{\Sigma}} \sum_{n=1}^N \left(\frac{\rho_n}{1 - \rho_n} \frac{1 - \rho_n^{K_n+1}}{1 - \rho_n^{K_n}} - \frac{(K_n + 1)\rho_n^{K_n+1}}{1 - \rho_n^{K_n}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

$$C1: \sum_{n=1}^N f_n = 1, 0 \leq f_n \leq 1;$$

$$C2: \rho_n = \frac{\lambda_n}{\mu_n^{eff}} < 1;$$

$$C3: \lambda_n = f_n \lambda_{\Sigma}.$$

Ограничение C1 обеспечивает корректное распределение нагрузки между подканалами по вероятностному принципу; ограничение C2 гарантирует устойчивость системы, исключая перегрузку отдельных подканалов; ограничение C3 отражает логическую зависимость между общей нагрузкой и ее пропорциональным распределением по подканалам.

Применение алгоритма стаи серых волков для решения задачи

Для решения задачи оптимизации распределения трафика между подканалами в гетерогенной сети Интернета вещей была выбрана группа метаэвристических алгоритмов, таких как алгоритм роя частиц (PSO, аббр. от англ. Particle Swarm Optimization), генетический алгоритм (GA, аббр. от англ. Genetic Algorithm) и алгоритм стаи серых волков (GWO, аббр. от англ. Grey Wolf Optimizer). Выбор метаэвристических методов обусловлен высокой сложностью задачи, связанной с нелинейной целевой функцией и необходимостью поиска оптимального вектора (местоположения) распределения трафика в многомерном пространстве с учетом строгих ограничений. Метаэвристические алгоритмы обладают способностью эффективно исследовать пространство решений, избегая локальных минимумов, что делает их подходящими для задач балансировки нагрузки, где требуется нахождение глобального оптимума. Ниже приведен анализ различных метаэвристических алгоритмов (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ метаэвристических алгоритмов

Критерий	Алгоритм		
	PSO	GA	GWO
Принцип работы	Коллективное поведение частиц, обновляющих позиции по P_{best} / G_{best} .	Эволюционные операции: отбор, скрещивание, мутация	Социальная иерархия в стае волков (α , β , δ), обновление позиций по лидерам
Скорость схождения	Высокая, но зависит от параметров инерции и начальной популяции	Средняя, требует больше итераций	Высокая, обеспечивает быстрый выход к глобальному минимуму
Глобальный поиск	Возможен локальный минимум	Эффективно избегает локальных минимумов	Отличный баланс между глобальным и локальным поиском
Параметры настройки	Небольшое количество, чувствительны к настройке	Много параметров, сложность в калибровке	Минимум параметров, простота настройки
Сложность реализации	Простая реализация	Средняя сложность	Простая, аналогична PSO
Качество решения	Хорошее при правильной настройке	Зависит от параметров и операторов	Стабильно высокое, превосходит PSO и GA
Работа с нелинейными задачами	Подходит, но возможны попадания в локальный экстремум	Хорошо адаптирован, но медленный	Эффективен в сложных нелинейных задачах с ограничениями

В результате численных экспериментов сравнивалась эффективность алгоритма GWO и метаэвристических методов PSO и GA. Моделирование показало, что GWO превосходит PSO и GA по скорости схождения и точности достижения глобального минимума целевой функции. Это обусловлено эффективным балансом между глобальным поиском и локальным уточнением, а также адаптацией к нелинейной топологии функции. GWO выбран как оптимальный метод для задачи распределения трафика благодаря высокой производительности, подтвержденной результатами.

Алгоритм GWO – эффективный метаэвристический метод для глобальной оптимизации, моделирующий социальную иерархию и охоту волков [14]. В данной работе он применяется для решения задачи с нелинейной целевой функцией и строгими ограничениями. Алгоритм имитирует движение волков, где решения обновляются по позициям лидеров (α , β , δ). В данной задаче позиции волков представляют собой векторы распределения трафика между подканалами $F = [f_1, f_2, \dots, f_N]$. На каждой итерации положения обновляются с целью минимизации целевой функции, а итоговое решение представляет оптимальное распределение нагрузки, обеспечивающее минимальные потери данных и задержку при соблюдении заданных ограничений. Процесс обновления позиции стаи волков в алгоритме GWO представлен на рисунке 3.

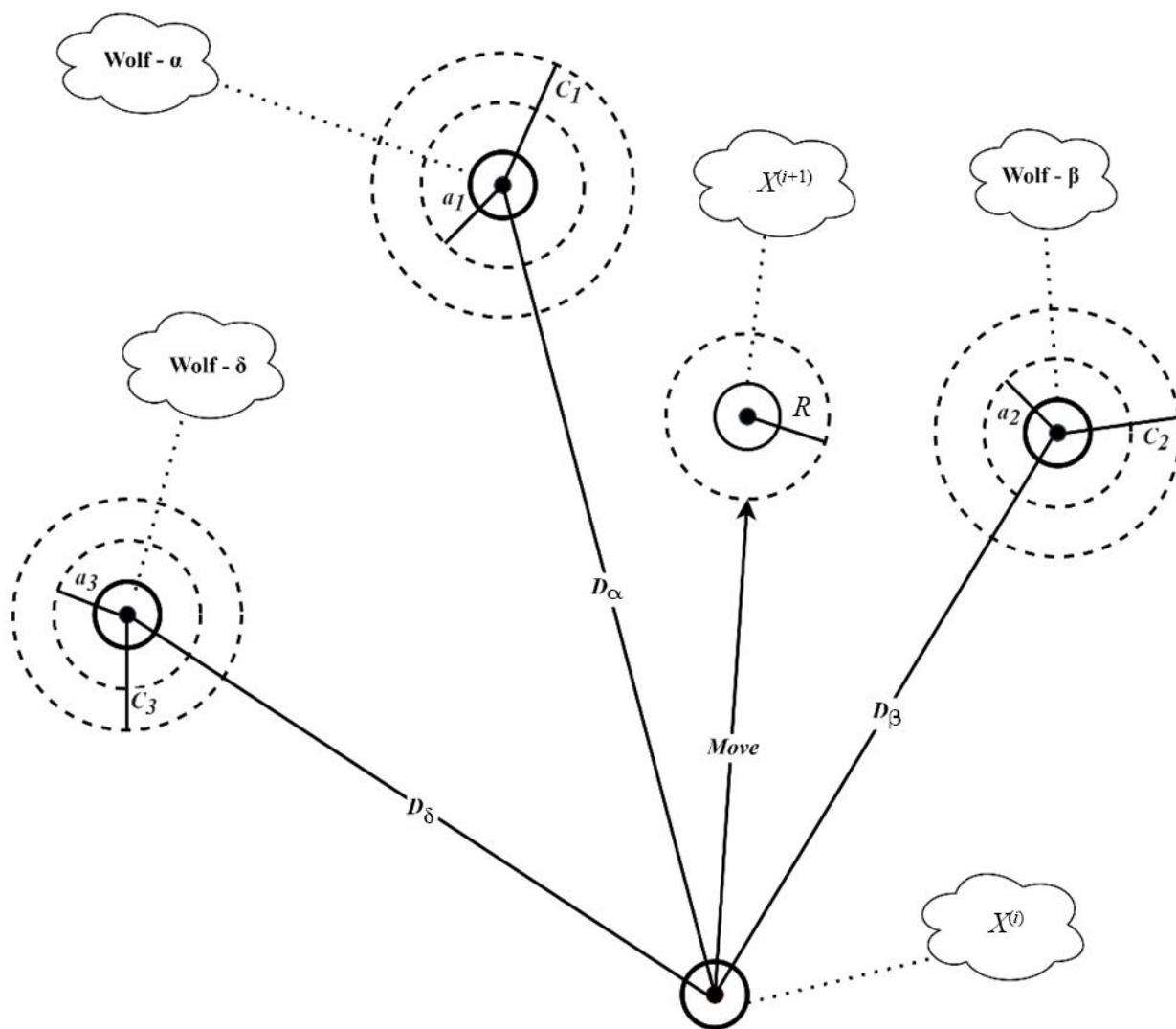


Рис. 3. Процесс обновления позиции во время охоты в GWO

Для каждой позиции волка $X^{(i)}$ на итерации i расстояния до лидеров α , β , δ вычисляются как:

$$D_\alpha = |C_1 X_\alpha - X^{(i)}|, D_\beta = |C_2 X_\beta - X^{(i)}|, D_\delta = |C_3 X_\delta - X^{(i)}|. \quad (6)$$

Позиции X_1 , X_2 , X_3 , определяющие направление движения волка, обновляются по формулам:

$$X_1 = -A_1(D_\alpha), X_2 = X_\beta - A_2(D_\beta), X_3 = X_\delta - A_3(D_\delta). \quad (7)$$

Новая позиция волка $X^{(i+1)}$ вычисляется как среднее арифметическое от трех позиций, полученных на основе лидеров:

$$X^{(i+1)} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}, \quad (8)$$

где альфа-волк (X_α) – лучшее решение в популяции; бета-волк (X_β) – второе лучшее решение в популяции; дельта-волк (X_δ) – третье лучшее решение в популяции; омега-волки (X_ω) – остальные волки в популяции; $X^{(i)}$ – позиция решения на соответствующей итерации i ; D_α , D_β и D_δ – вспомогательные векторы для расчета соответственно значений X_1 , X_2 , X_3 .

На каждой итерации алгоритма обновляются коэффициенты A и C согласно следующим выражениям:

$$A = 2ar_1 - a,$$

$$C = 2r_2,$$

$$a = 2 - \frac{2i}{I},$$

где r_1 и r_2 – равномерно распределенные случайные числа от 0 до 1; i – текущая итерация, I – общее число итераций. Параметр a линейно уменьшается от 2 до 0 в процессе работы алгоритма.

Эффективность алгоритма GWO существенно зависит от правильного выбора его параметров.

Алгоритм. Минимизация стоимостной функции на основе GWO

```

1: Начало
2: Инициализация популяции GWO, каждая позиция волка  $X = [f_1, f_2, \dots, f_N]$ 
3: с условием  $\sum_{n=1}^N f_n = 1$  и  $f_n \geq 0$ .
4: Инициализация GWO-параметров:  $a$ ,  $A$ ,  $C$  и  $I$ ; количество волков в популяции  $J$ .
5: Расчет значения целевой функции  $O(X)$  для всех волков.
6: Определение трех лидеров  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$  и  $X_\delta$  по значениям целевой функции.
7:  $O(X_\alpha) < O(X_\beta) < O(X_\delta)$ .
8: / *комментарий:
9:  $X_\alpha$  – лучший волк;
10:  $X_\beta$  – второй лучший волк;
11:  $X_\delta$  – третий лучший волк;
12:  $X_\omega$  – остальные волки.
13: */
14: while  $i \leq I$  do:
15: Обновить параметры  $a$ ,  $A$  и  $C$ .
16: for  $j = 1, j \leq J, j++$  do:
17: Вычислить расстояния до лидеров согласно с формулой (6).
18: Обновление позиции по каждому лидеру согласно с формулой (7).
19: Обновление позиции согласно с формулой (8).
20: Расчет значения целевой функции (5) для всех волков.
21: end for
22: Обновление лидеров  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$  и  $X_\delta$ .
23:  $i++$ 
24: end while
25: Вернуть значение  $X_\alpha$ , лучшее значение  $O(X_\alpha)$ .
26: Конец

```

Оценка эффективности моделирования

В этом разделе приводятся условия и результаты моделирования алгоритмов GWO и PSO при решении задачи оптимизации распределения трафика в гетерогенной сети ИВ. Все эксперименты выполнялись в среде MATLAB, ниже приведены их ключевые параметры (таблица 2).

Таблица 2. Параметры моделирования

Параметр	Значение	Описание
ω_L	0,6	Весовой коэффициент (см. формулу (4))
ω_T	0,4	Весовой коэффициент (см. формулу (4))
N	3	Количество подканалов (размерность пространства поиска)
Максимальное количество итераций	500	Количество итераций до остановки алгоритма

Ниже приводится сжатое научное описание PSO с двумя ключевыми формулами обновления.

Каждая частица j в PSO представлена в D -мерном пространстве поиска тремя векторами: текущей позиции $x_j = (x_{j1}, \dots, x_{jD})$, наилучшей личной позиции $p_j = (p_{j1}, \dots, p_{jD})$ и скорости движения $v_j = (v_{j1}, \dots, v_{jD})$.

При инициализации все частицы инициализируются равномерно в пределах допустимого пространства, их скорости задаются случайным образом. На каждом итерационном шаге алгоритм обновляет скорость и положение каждой частицы по формулам:

$$v_{j,d} \leftarrow \zeta v_{j,d} + c_1 \eta_1 (p_{j,d}^{best} - x_{j,d}) + c_2 \eta_2 (g_d^{best} - x_{j,d}),$$

$$x_{j,d} \leftarrow x_{j,d} + v_{j,d},$$

где ζ – вес инерции; c_1, c_2 – коэффициенты притяжения (обычно $c_{1,2} = 2$); η_1, η_2 – независимые равномерные случайные числа в $[0,1]$; p^{best} – локально лучшая позиция среди всех частиц; g^{best} – глобально лучшая позиция среди всех частиц.

Проведенное численное моделирование оптимизации двух алгоритмов – GWO и PSO – при изменяющемся размере популяции от 5 до 120 (с 20 независимыми запусками для каждого размера) позволяет сделать следующие выводы о качестве решений и характеристиках схождения.

На рисунке 4 представлены диаграммы размаха (boxplot, букв. «ящик с усами») значений целевой функции при разном количестве волков или частиц для алгоритмов GWO и PSO.

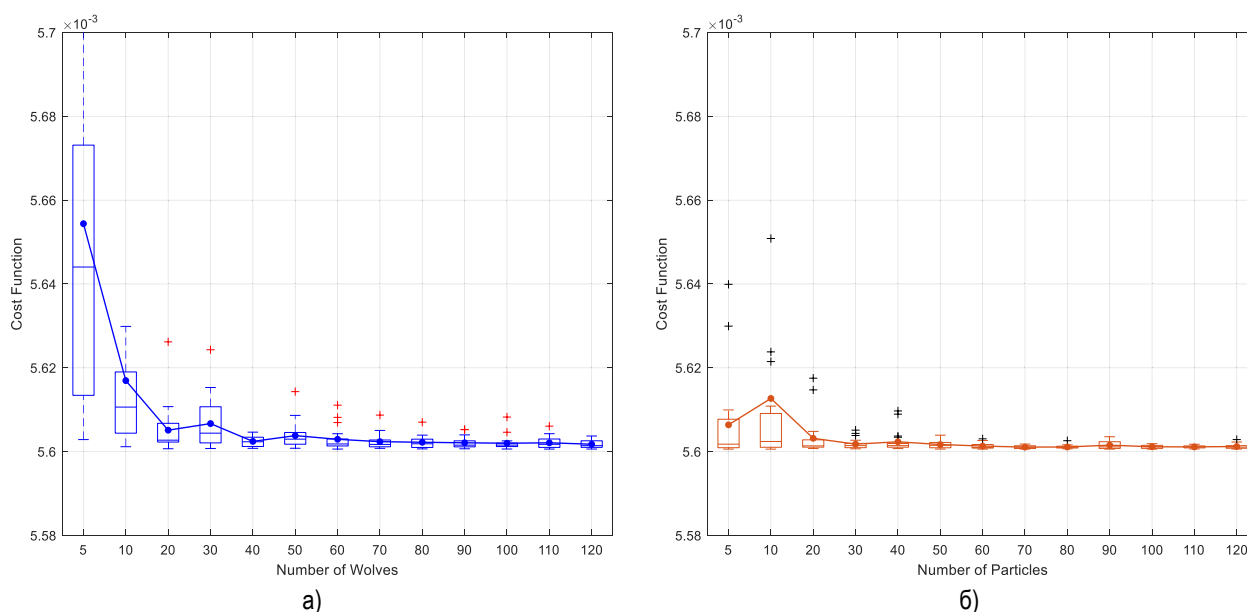


Рис. 4. Значения целевой функции при разном количестве волков / частиц: а) GWO; б) PSO

Результаты экспериментов показывают, что при увеличении размера популяции с 5 до примерно 50 особей медианное значение целевой функции последовательно уменьшается, что свидетельствует об улучшении качества получаемых решений. При числе особей в диапазоне 50–80 значение целевой функции выходит на плато, и последующее увеличение размера популяции не приводит к существенным улучшениям. Оба алгоритма сходятся к практически идентичному значению целевой функции ($\approx 0,005601$) с отклонениями, не выходящими за пределы статистической погрешности. Таким образом, для рассматриваемой задачи оптимального соотношения между качеством решения и вычислительными затратами рекомендуется выбирать размер популяции в пределах $[50; 80]$ особей.

На рисунке 5 приведены результаты сравнительного анализа времени сходимости алгоритмов GWO и PSO по итогам десяти независимых прогонов при одинаковом размере популяции, равном 80 агентам. Экспериментальные данные продемонстрировали, что алгоритм GWO в среднем достигает заданного уровня качества решения на 74 % быстрее, чем PSO, что свидетельствует о его повышенной вычислительной эффективности.

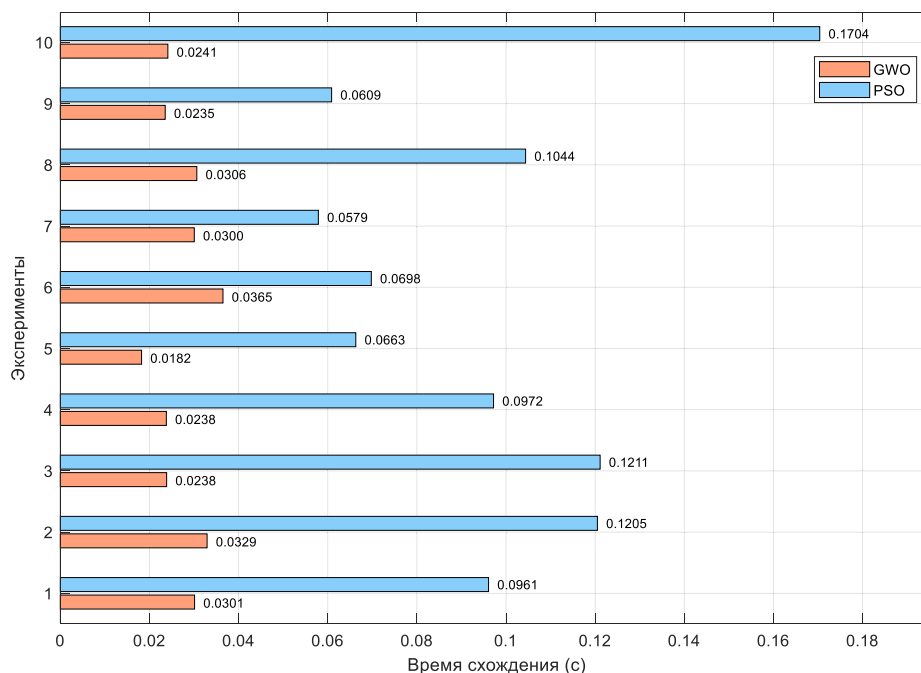


Рис. 5. Сравнение времени схождения двух методов GWO и PSO

На рисунке 6 представлена объемная графическая модель процесса сходимости алгоритма GWO при численности популяции в 100 особей для задачи оптимизации трафика в гетерогенной сети ИВ. Трехмерная траектория показывает эволюцию положения поисковых агентов: альфа-волк обозначен красным маркером, бета-волк — желтым, дельта-волк — оранжевым, а все остальные особи отображены синими точками.

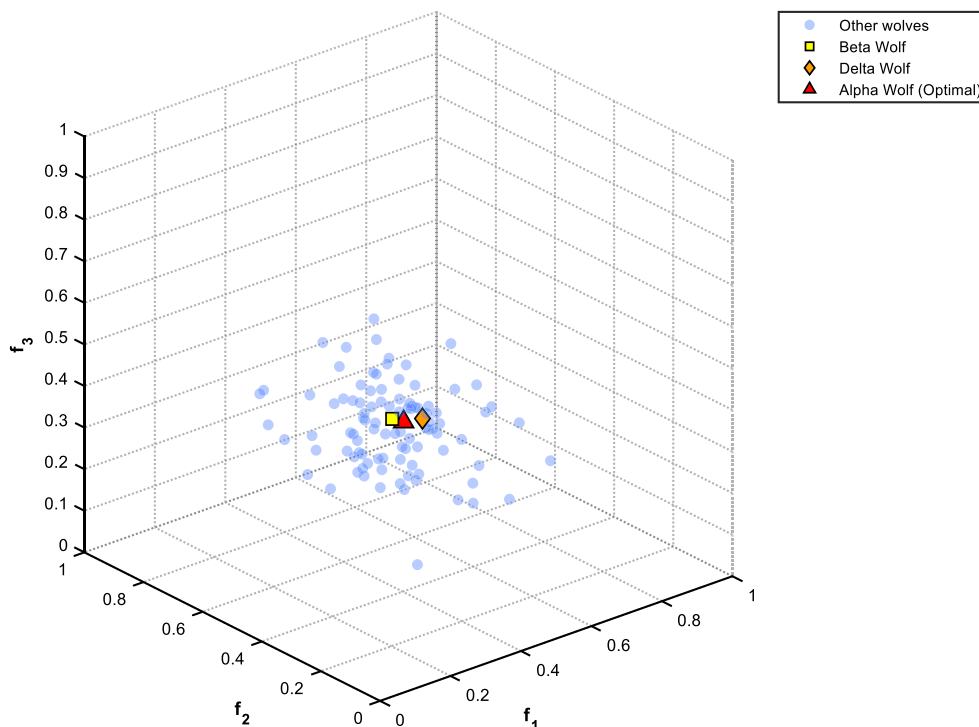


Рис. 6. Распределение позиций волков в трехмерном пространстве для GWO

Важно отметить, что данный вывод актуален в контексте конкретной исследуемой задачи: как показано в теоретической части, метаэвристические методы обладают уникальными особенностями, обусловленными их биологической метафорой. Поэтому в других постановках задачи, отличных по своей структуре и критериям оптимизации, PSO может проявить более высокую эффективность.

Выводы

В настоящем исследовании предложена математическая модель оценки качества передачи данных в гетерогенных многоканальных сетях ИВ, учитывающая компромисс между задержкой и потерями пакетов. Ключевые результаты работы сводятся к следующему.

Во-первых, разработана математическая функция качества, позволяющая проводить взвешенную оптимизацию коэффициента потерь пакетов и среднего времени задержки системы с учетом заданных приоритетов каждого показателя.

Во-вторых, для решения задачи оптимизации использован алгоритм GWO. Полученные данные демонстрируют, что он эффективно преодолевает сложную нелинейную ландшафтную структуру целевой функции, обеспечивая надежный поиск глобального минимума и минимизируя риск замедления в локальных минимумах в локальных экстремумах.

В-третьих, экспериментальные результаты показали, что среднее время сходимости GWO превышает аналогичный показатель PSO на 74 % в пользу быстрого действия первого, что подчеркивает его вычислительную эффективность.

В-четвертых, проведенное моделирование подтверждает применимость разработанной методики для повышения производительности и надежности реальных гетерогенных сетей ИВ, демонстрируя стабильность решений и адаптивность к изменению параметров системы.

Литература

1. Al-Sarawi S., Anbar M., Abdullah R., Al Hawariet A. B. Internet of Things Market Analysis Forecasts, 2020–2030 // Proceedings of Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4, 27–28 July 2020, London, UK). IEEE, 2020. PP. 449–453. DOI: 10.1109/WorldS450073.2020.9210375
2. Vlasenko M., Khlaponin Yu. The Internet of Things (IoT) in World Practice: Review and Analysis // Pidvodni Tehnologii. 2024. Iss. 13. PP. 21–27. DOI: 10.32347/uwt.2023.13.1202. EDN: OYEIHQ
3. Noaman M., Khan M. S., Abrar M. F., Ali S., Alvi A., et al. Challenges in integration of Heterogeneous Internet of Things // Scientific Programming. 2022. P. 8626882. DOI: 10.1155/2022/8626882. EDN: KXZSPZ
4. Paramonov A., Koucheryavy A., Tonkikh E., Tatarnikova T. M. High Density Internet of Things Network Analysis // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: Proceedings of the 20th International Conference NEW2AN 2020, and 13th Conference ruSMART 2020 (St. Petersburg, Russia, 26–28 August 2020). Part I. (Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol. 12525). PP. 307–316. DOI: 10.1007/978-3-030-65726-0_27. EDN: FGGLAB
5. Парамонов А. И., Бушеленков С. Н. Модель сети доступа Интернета вещей на основе решетчатой структуры // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 37–46. DOI: 10.31854/2307-1303-2021-9-1-37-46. EDN: VJDKGX
6. Бушеленков С. Н., Парамонов А. И. Метод выбора маршрутов в беспроводной сети Интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2021. № 12. С. 14–20. DOI: 10.34832/ELSV.2021.25.12.001. EDN: YJVLGZ
7. Ateya A. A., Bushelenkov S., Muthanna A., Paramonov A., Koucheryavy A., et al. Multipath Routing Scheme for Optimum Data Transmission in Dense Internet of Things // Mathematics. 2023. Vol. 11. Iss. 19. P. 4168. DOI: 10.3390/math11194168. EDN: ZQDDWQ
8. Парамонов А. И., Бушеленков С. Н. Анализ методов повышения эффективности сетей IoT // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 2. С. 36–52. DOI: 10.31854/2307-1303-2022-10-2-36-52. EDN: JNZPDL
9. Бушеленков С. Н., Парамонов А. И. Анализ и формирование структуры сети Интернета вещей на основе моделей решеток // Электросвязь. 2021. № 7. С. 23–28. DOI: 10.34832/ELSV.2021.20.7.002. EDN: JIBLHT
10. Qiu T., Chen N., Li K., Atiquzzaman M., Zhao W. How Can Heterogeneous Internet of Things Build Our Future: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20. Iss. 3. PP. 2011–2027. DOI: 10.1109/COMST.2018.2803740. EDN: YFGIPJ

11. Кучерявый А. Е., Окунева Д. В., Парамонов А. И., Хоанг Н. Ф. Методы распределения трафика в гетерогенной сети Интернета вещей высокой плотности // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 2. С. 67–74. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-2-67-74. EDN: RTNVEU
12. Зелигер Н. Б., Чугреев О. С., Яновский Г. Г. Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений. М.: Радио и связь, 1984. 173 с.
13. Little J. D. C. OR FORUM – Little's Law as Viewed on Its 50th Anniversary // Operations Research. 2011. Vol. 59. Iss. 3. PP. 536–549. DOI: 10.1287/opre.1110.0940
14. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer // Advances in Engineering Software. 2014. Vol. 69. PP. 46–61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007

Статья поступила 17 июня 2025 г.
Одобрена после рецензирования 26 июня 2025 г.
Принята к публикации 3 июля 2025 г.

Информация об авторах

Хоанг Фьюк Ньян — аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: khoang.fn@sut.ru

Парамонов Александр Иванович — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: paramonov@sut.ru

A Method for Balancing Latency and Data Loss in High-Density Heterogeneous Internet of Things Networks

Ph. N. Hoang ✉, A. Paramonov

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

Problem statement. The growing number of devices in heterogeneous Internet of Things networks creates an additional load on limited radio resources, which complicates ensuring stability and quality of data transmission. Heterogeneous communication subchannels have different characteristics that require effective load balancing mechanisms. The development of methods to minimize data transmission delay and reduce the likelihood of packet loss is especially relevant for high-density Internet of Things networks, where resource management becomes critical. **The aim of the work** is to improve the efficiency of data transmission in a high-density heterogeneous Internet of Things network. **Methods used.** The work uses optimization methods, the gray wolf pack algorithm, queuing theory and probabilistic analysis. **Novelty.** The method proposed in the article takes into account the individual characteristics of subchannels and provides dynamic load distribution. This allows adapting the solution to different types of heterogeneous networks, reducing delay and data loss. **Result.** A mathematical model describing data transmission through several communication subchannels and an objective function combining the average data transmission delay and the probability of packet loss have been developed. Analytical expressions for key network characteristics, such as the probability of loss and average delay, have been derived. **Practical significance.** The developed model and method can be used in the design of devices and networks of high-density heterogeneous Internet of Things networks in order to improve their efficiency.

Key words: Internet of Things, communication channel, channel delay, heterogeneous channels, network reliability, Queuing theory, Grey Wolf Optimizer algorithm

Information about Authors

Hoang Phuoc Nhan – Postgraduate Student at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications).
E-mail: khoang.fn@sut.ru

Paramonov Alexandr – Holder of an Advanced Doctorate in Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: paramonov@sut.ru

ДАТА ВЫХОДА В СВЕТ 15.07.2025

Ответственный редактор **Татарникова И.М.**

Выпускающий редактор **Берзина Е.В.**

Выпускающий редактор **Яшугин Д.Н.**

Дизайн: **Коровин В.М.**

Изображение на обложке с сайта <http://www.freepik.com>