

На правах рукописи



Степанов Никита Вячеславович

**МОДЕЛИ КАНАЛА СЛУЧАЙНОГО
МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ
СЦЕНАРИЕВ ПРИМЕНЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ
СЕТЕЙ С НИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

Специальность 2.2.15
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на кафедре инфокоммуникационных технологий и систем связи.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тюрликов Андрей Михайлович

Официальные оппоненты: **Парамонов Александр Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», кафедра сетей связи и передачи данных,
профессор кафедры

Степанов Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики», кафедра сетей связи и коммутации,
доцент кафедры

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Информационные телекоммуникационные технологии», 197342, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д.8

Защита состоится 24.12.2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А и на сайте www.guar.ru.

Автореферат разослан 10.11.2025.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.384.01,
канд. тех. наук, доцент

А.М. Сергеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. За последние десятилетия активно развиваются беспроводные сети, которые в англоязычной литературе получили название LPWAN (Low-power Wide-area Network). Эти сети имеют три отличительных признака:

1. Имеется некоторое число абонентских устройств, которые в заданной полосе частот передают данные по радиоканалу на базовую станцию. **Абонентские устройства могут находиться на достаточно большом расстоянии от базовой станции (порядка 5 км);**
2. **Абонентские устройства имеют низкое энергопотребление,** что обеспечивается невысокими скоростями передачи и достаточно простыми алгоритмами работы устройств;
3. За счёт увеличения полосы частот возможно **увеличение числа абонентских устройств (масштабируемость сети) без увеличения их энергопотребления и без ухудшения основных характеристик эффективности** функционирования сети таких, как средняя задержка и/или вероятность доставки.

В русскоязычной литературе нет устоявшегося термина для этих сетей. Прямой перевод с английского языка не в полной мере отражает основные особенности таких сетей. С учётом этого сети, которые обладают вышеизложенными признаками, будем называть **крупномасштабными сетями с низким энергопотреблением**. К крупномасштабным сетям с низким энергопотреблением можно отнести сети, построенные на основе следующих технологий: LoRa, NB-IoT, Sigfox, EC-GSM-IoT, Wi-Fi, LTE-M, NB-Fi и т.д. Эти технологии существенно отличаются друг от друга по ряду параметров (диапазон рабочих частот, дальность, энергопотребление, скорость, задержка), но при этом все они могут быть использованы для решения одних и тех же задач (мониторинг окружающей среды, сбор данных учёта жилищно-коммунального хозяйства, организация передачи данных в системе умного дома и тому подобное). Многообразие технологий и задач приводит к **проблеме выбора технологии** при решении конкретной задачи. Для решения данной проблемы можно использовать тот факт, что во всех этих технологиях для организации доступа к общему каналу связи используется метод случайного множественного доступа (СМД), но принципы использования этого метода отличаются для различных технологий. Поэтому актуальной является задача **разработки моделей, отражающих основные особенности** организации случайного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением, и **методов, позволяющих эффективно использовать особенности технологий** (например, наличие в сотовых сетях этапа случайного доступа и этапа передачи данных, учёт различий в организации случайного доступа технологий NB-IoT и LTE-M, специфика физического уровня технологии LoRa и др.) для различных сценариев (ограниченное и потенциально неограниченное число устройств, подвижные и неподвижные устройства и тому подобное).

Степень разработанности темы. Классические результаты в области случайного множественного доступа были получены отечественными учёными Б.С.Цыбаковым, В.А.Михайловым и зарубежными учёными R.A.Gallager, L.Kleinrock, J. Carpetanakis. Вопросы использования случайного множественного доступа в современных технологиях сотового радиодоступа рассматривались в работах отечественных учёных А.Е. Кучерявого, А.И.Парамонова, Е.А.Кучерявого, С.Д.Андреева и зарубежных S.R.Borkar, L.Dai, S.Wang, A.Mahmood. Вопросы случайного доступа в сетях, построенных по технологии LoRaWAN рассматривались в работах отечественных учёных А.И.Ляхова, Е.М.Хорова, А.М.Задорожного и зарубежных F. Van den Abeele, S.Pollin, P.Robyns. Следует отметить, что в большинстве исследований рассматривались специфические особенности технологий и не предлагалось моделей, которые могут быть использованы при исследовании различных сценариев. Только частично такие модели рассматривались в работах L.Dai.

Задача распределения ресурсов канала между этапом случайного доступа и этапом передачи данных в основном исследовалась зарубежными учёными D.Staehle, W. Chen. Задача уменьшения задержки путём распределения устройств между разными технологиями в одной сети исследовалась отечественными учёными К.Е.Самуйловым, А.Я.Омётовым, А.К.Самуйловым и зарубежным M.Lauridsen. Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют общепринятые модели, которые могут быть использованы для решения этих двух задач.

Вопросы анализа эффективности случайного доступа при перемещении групп устройств между зонами действия базовых станций сотовых сетей рассматривались отечественными учёными Э.С.Сопиным, Е.А.Марковой и зарубежными учёными V.Petrov, S.Kavuri, A.E.Samhat, J.C.Prévolet, у которых не рассматривается вопрос одновременного появления большой группы устройств в зоне действия базовой станции.

Влияние специфических особенностей физического уровня на работу систем, построенных по технологии LoRa, исследовалось в работах отечественного учёного Д.В.Банкова и зарубежных K.Mikhaylov, D.Molchanov, J.Hosek, E.Wang, M.Lauridsen, J.Hoebeke, I.Moerman. В этих исследованиях предлагаются модели, которые достаточно детально описывают специфику технологии LoRa, но при этом модели оказываются весьма сложными для использования при решении задач, связанных с получением вероятностно-временных характеристик сетей, построенных по этой технологии.

Следует отметить, что в большинстве исследований рассматривались только специфические особенности конкретной технологии и не предлагалось общих моделей, которые могут быть использованы при исследовании СМД для различных сценариев применения крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением.

Научная задача. Разработка моделей, отражающих основные особенности организации СМД в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением,

построенных с использованием современных беспроводных технологий и методов, позволяющих эффективно использовать особенности технологий с учётом специфики различных сценариев использования таких сетей.

Объектом исследования являются крупномасштабные сети с низким энергопотреблением, в которых для организации передачи по общему каналу используется случайный множественный доступ.

Предметом исследования являются модели и методы для анализа вероятностно-временных характеристик канала случайного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением.

Целью данной работы является разработка моделей, отражающих основные особенности организации случайного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением, и методов, позволяющих повысить эффективность за счёт учёта особенностей конкретной технологии.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести сравнение известных моделей и методов для анализа вероятностно-временных характеристик канала случайного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением с целью выявления общих особенностей таких моделей и методов;
2. Предложить модели, отражающие основные особенности функционирования канала случайного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением, и методы, позволяющие получать вероятностно-временные характеристики в зависимости от параметров модели;
3. Исследовать влияние перераспределения ресурсов между фазами случайного доступа и фазой передачи данных для увеличения скорости передачи в крупномасштабных сетях;
4. Исследовать возможность распределения устройств между различными технологиями в рамках одной сети с целью снижения средней задержки в системе;
5. Исследовать сценарий перемещения объекта, состоящего из группы устройств, между базовыми станциями, зоны действия которых не перекрываются. Изучить влияние среднего времени нахождения объекта вне зоны действия базовых станций на среднюю задержку передачи сообщений;
6. Предложить упрощённую модель, отражающую основные особенности технологии LoRa. Предложить подходы к повышению вероятности доставки сообщений в высокоплотных сетях LoRa.

Научная новизна.

1. Предложен метод, который позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты при исследовании зависимостей характеристик системы от параметров входного потока с использованием аппарата Марковских цепей, **отличающийся от ранее известных тем**, что вычисления производятся в два этапа. На первом этапе однократно производится

- вычисление, учитывающее особенности технологии, а на втором этапе выполняются вычисления, учитывающие характеристики входного потока.
2. Для технологий, в которых имеется этап случайного доступа и этап передачи данных, **впервые** сформулирована модель и предложен метод максимизации скорости передачи за счёт распределения частотно-временного ресурса между этапом случайного доступа и этапом передачи данных.
 3. Впервые сформулирована модель и предложен метод минимизации средней задержки за счёт распределения абонентских устройств для случая, когда в одной сети используются разные технологии.
 4. Введена модель, описывающая сценарий перемещения объекта, состоящего из группы устройств, и **отличающаяся от ранее известных моделей** тем, что зоны действия базовых станций не перекрываются.
 5. **Впервые** сформулирована и решена оптимизационная минимаксная задача для назначения параметров абонентским устройствам в высокоплотных сетях, построенных по технологии LoRaWAN.

Теоретическая значимость. Предложенные в диссертационной работе модели могут быть использованы при теоретическом анализе систем Интернета вещей с большим числом устройств и несколькими этапами передачи.

Практическая значимость. Методы вычисления и способы построения оценок для характеристик систем с большим числом абонентов для разных технологий и несколькими этапами передачи позволяют оценить эффективность и качество работы существующих систем Интернета вещей.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы были использованы в опытно-конструкторских работах ООО «НПО ПКРВ», ООО «Газпромнефть ИТО», АО «Котлин-Новатор» и АО «НИИ Масштаб», а также в рамках научно-исследовательских работ в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения (СПбГУАП): гос. задания от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSRF-2020-0004 «Научные основы построения архитектур и систем связи бортовых информационно-вычислительных комплексов нового поколения для авиационных, космических систем и беспилотных транспортных средств» и грантов Российского Научного Фонда № 18-19-00673 «Разработка методов случайного множественного доступа для массового межмашинного взаимодействия», № 22-19-00305 «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов».

Методология и методы исследования. Для получения результатов диссертационной работы использовались методы теории вероятностей и математической статистики, теории случайных процессов, общесистемный анализ, методы теории информации, методы теории произвольного множественного доступа, методы численного анализа и методы имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложенный метод двухэтапного вычисления переходных вероятностей Марковской цепи, описывающий функционирование системы со

случайным множественным доступом, позволяет уменьшить вычислительные затраты при исследовании зависимости характеристик системы от параметров входного потока.

2. Предложенные модели и методы для технологий, в которых имеются этап случайного доступа и этап передачи данных, позволяют повысить скорость передачи за счёт распределения частотно-временного ресурса между этапами в рамках одной технологии и уменьшить задержку путём распределения абонентских устройств для случая, когда в одной сети используются разные технологии.
3. Предложенная модель, описывает сценарий перемещения объекта, состоящего из группы абонентских устройств, между зонами действия базовых станций и позволяет определять среднюю задержку доставки сообщений на базовую станцию в зависимости от среднего времени пребывания вне зоны и в зоне действия базовых станций.
4. Использование решения предложенной минимаксной оптимизационной задачи позволяет определить значения параметров абонентских устройств, обеспечивающих одинаковые и достаточно высокие вероятности доставки сообщений от абонентских устройств, которые находятся в одинаковых радиоусловиях в высокоплотной сети, построенной по технологии LoRaWAN.

Достоверность полученных результатов доказывается данными моделирования и аналитическими расчётами. Результаты подкрепляются исследованиями других авторов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах в период с 2017 по 2023 гг.: научных сессиях ГУАП (2017-2021 гг.); конференции «The 10th International Congress on UltraModern Telecommunications and Control Systems (ICUMT2018)»; конференции «11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems(ICUMT2019)»; конференции «2018 International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (New2An2018)»; конференции «2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF2018)»; конференции «2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (ICUMT2019)»; в 2019г. XXVIII международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации»; конференции «XVI International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY2019)»; конференции «2020 International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (New2An2020)»; конференции «2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF2020)»; конференции «2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF2021)»; конференции «2021 Proceedings of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems (mmNETs-2021)»; конференции «2022

IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2022)»; конференции «2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF2022)»; в 2022г. XXVIII международная научно-техническая конференция «Оптимизация стохастического и обычного трафика в сети NB-IoT»; конференции «2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF2023)»; конференции «Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications: 26th International Conference (DCCN2023)»; конференции «2023 XVIII International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY2023)» и XXXII международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам 1, 2, 7 и 8 паспорта научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». Положение 1 соответствует пункту 1 «Разработка и совершенствование методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций». Положение 2 соответствует пункту 2 «Исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций». Положение 3 соответствует пункту 7 «Исследование проблем построения, планирования и проектирования сетей пятого и последующих поколений как основы создания эффективной цифровой экономики и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей». Положение 4 соответствует пункту 8 «Исследование проблем построения, планирования и проектирования высокоплотных и сверх плотных сетей для обеспечения реализации приложений Интернета вещей и разработка систем и устройств телекоммуникаций для этих сетей».

Личный вклад. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 17 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 2 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 9 — в сборниках докладов международных конференций, индексируемых Web of Science и Scopus, 1 — в тезисах докладов, индексируемых РИНЦ. По теме исследования получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 183 страниц текста с 71 рисунками и 11 таблицами. Список литературы содержит 128 наименований.

Содержание работы

Во **введении** приводится обоснование актуальности проводимых исследований в рамках предложенной темы диссертационной работы, раскрывается степень

разработанности темы, формулируются цели и задачи работы, излагаются научная новизна, практическая и теоретическая значимость.

В начале **первого раздела** проведён сравнительный анализ технологий передачи данных и характеристик процесса передачи данных в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением.

В результате сравнительного анализа сделаны выводы, что в сотовых сетях для организации передачи по общему каналу связи используется подход, который в англоязычной литературе получил названия Grant-Based или Connection-Based. В диссертационной работе такой подход называется двухэтапным способом передачи данных. Основная идея состоит в том, что передача осуществляется в два этапа. На первом этапе в режиме случайного доступа передаётся запрос на выделение ресурса для передачи данных. На втором этапе в выделенном ресурсе передаются данные. В диссертационной работе первый этап называется этапом случайного доступа, второй – этапом передачи данных.

В сетях с низким энергопотреблением используется подход, который в англоязычной литературе получил названия Grant-Free или Connection-Free. В диссертационной работе такой способ называется одноэтапным способом передачи данных. Основная идея состоит в том, что случайный доступ и передача данных осуществляются одновременно в один этап.

Объединяет все выше рассматриваемые подходы к организации передачи данных то, что решение о моменте передачи абоненты принимают случайным образом, то есть используется метод случайного доступа к общему каналу. Далее в первом разделе предлагаются модели, описывающие как одноэтапную, так и двухэтапную передачу данных.

Во четвёртом подразделе рассматривается модель, где предполагается наличие M абонентских устройств (АУ). Если рассматривается одноэтапная передача, то рассматривается наличие l каналов. Если рассматривается двухэтапная передача, то рассматривается наличие l преамбул. Время работы системы разбито на интервалы времени, которые называются окнами. Каждое АУ может находиться в двух состояниях: активном (имеется готовое для передачи сообщение) и пассивном.

В активном состоянии АУ в режиме случайного доступа пытается передать сообщение на базовую станцию. После успешной передачи АУ переходит в пассивное состояние. В пассивном состоянии в каждом окне с вероятностью q АУ становится активным и с вероятностью $1-q$ остается пассивным. Данная модель полностью описывается набором параметров: M – число АУ, q – вероятность перехода АУ в активное состояние и l – число преамбул/каналов.

Работа модели описывается случайным процессом $\{N_{act}^t, t=0, 1 \dots \infty\}$, где N_{act}^t – число активных абонентов в начале окна с номером t . Значение N_{act}^{t+1} в окне $t+1$ зависит от значения N_{act}^t и вычисляется следующим образом:

$$N_{act}^{t+1} = N_{act}^t - T(N_{act}^t) + V^t(N_{act}^t), \quad (1)$$

где $T(N_{act}^t)$ – число успешных передач при N_{act}^t активных АУ, $V^t(N_{act}^t)$ – число АУ, которые стали активными в окне с номером t .

Из выражения (1) следует, что последовательность случайных величин N_{act}^t является цепью Маркова.

Введём следующее обозначение для переходных вероятностей этой Марковской цепи $p(i|j) = Pr\{N_{act}^{t+1}=j|N_{act}^t=i\}$, где i и j меняются от 0 до M . Переходные вероятности можно рассчитать следующим образом:

$$p(j|i) = \sum_{m=\max(0, i-j)}^{\min(M-j, l)} pbin(m-(i-j), M-i, q)(1-q)^{M-m-j} Pr\{T=m|i\}, \quad (2)$$

где $Pr\{T=m|i\} = Pr\{T(N_{act}^t)=m|N_{act}^t=i\}$;

$$pbin(X, N, P) = \begin{cases} C_N^X P^X (1-P)^{N-X}, & \text{если } X \in \{0, 1, \dots, N\} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

В диссертационной работе показывается, как при вычислении значения вероятности $Pr\{T=m|i\}$ используется решение задачи распределения шаров по урнам и нахождения числа урн, в которых содержится ровно один шар. Обозначим через $P(l, k, m)$ вероятность события, что при случайном выборе l преамбул/каналов k устройствами, m преамбул/каналов были выбраны только единственным АУ. Вероятность этого события равняется вероятности события, что при случайном размещении k шаров по l урнам, ровно m урн будут содержать по одному шару. При $m > k$ вероятность такого события равна 0, а при $m \leq k$, эта вероятность определяется как:

$$P(l, k, m) = \frac{(-1)^m l! k!}{l^k m!} \sum_{f=m}^{\min(l, k)} \frac{(-1)^f (l-f)^{k-f}}{(f-m)!(l-f)!(k-f)!}. \quad (3)$$

Обозначим через $\mu(i, l)$ вероятность того, что активное АУ передаёт в текущем окне при условии, что i АУ активно и используется l преамбул/каналов. Для оптимальной стратегии передачи эта вероятность задаётся следующим образом:

$$\mu(i, l) = \begin{cases} 0, & \text{если } i=0 \\ \min(\frac{l}{i}, 1), & \text{иначе} \end{cases}. \quad (4)$$

Значение $Pr\{T=m|i\}$ может быть вычислено следующим образом:

$$Pr\{T=m|i\} = \sum_{k=m}^i C_i^k \mu(i, l)^k (1-\mu(i, l))^{i-k} P(l, k, m). \quad (5)$$

Описанную выше модель будем называть *моделью с бернуллиевским входным потоком*. Применительно к этой модели рассматривается следующий предельный переход $M \rightarrow \infty$, $q \rightarrow 0$, при этом $Mq = const = \lambda$. Выражение (1) принимает следующий вид:

$$N_{act}^{t+1} = N_{act}^t - T(N_{act}^t) + V^t. \quad (6)$$

Случайная величина V^t распределена по закону Пуассона с параметром λ . Данную модель будем называть *моделью с пуассоновским входным потоком*. Модель полностью описывается набором двух параметров: λ – интенсивность входного потока и l – число преамбул/каналов. Как и для *модели с бернуллиевским входным потоком*, рассматриваемой выше, случайный процесс

$(N_{act}^t, t=0,1,...)$ описывается цепью Маркова, но не с конечным, а со счётным числом состояний. Вероятность переходов задаётся по следующей формуле:

$$p(j|i) = \sum_{m=\max(0,i-j)}^l \frac{\lambda^{m-(i-j)}}{(m-(i-j))!} e^{-\lambda} Pr\{T=m|i\}. \quad (7)$$

В диссертационной работе показывается как на основе переходных вероятностей Марковской цепи можно вычислить стационарное распределение и затем вычислить среднюю задержку.

Следует отметить, что для модели с пуассоновским входным потоком стационарное распределение может быть найдено только в том случае, если Марковская цепь эргодична. В диссертационной работе на основе критерия Фостера показывается, что при $\lambda < le^{-1}$ цепь эргодична, следовательно стационарное распределение существует и можно найти его числовое значение с любой заданной точностью.

В пятом подразделе первого раздела рассматривается вычисление переходных вероятностей Марковской цепи. Отмечается, что рассматриваемые ранее модели являются обобщением модели из работы Клейнрока для случая нескольких каналов. Наличие нескольких каналов увеличивает вычислительные затраты, которые возрастают с увеличением числа каналов. Это делает трудоёмкой задачу исследования зависимостей характеристик системы от таких параметров, как M и q для *модели с бернуллиевским входным потоком* и от параметра λ для *модели с пуассоновским входным потоком*.

В диссертационной работе предложен метод двухэтапного вычисления переходных вероятностей Марковской цепи, который позволяет уменьшить вычислительные затраты. На первом этапе задаётся максимально возможное число активных АУ в системе, которое далее обозначается как M_{max} . Для всех значений m от 0 до l , где l – число преамбул/каналов, и i от 0 до M_{max} однократно вычисляются и сохраняются значения $Pr\{T=m|i\}$ по формулам (3) и (5) в матрице размерности $(l+1) \times (M_{max}+1)$. На втором этапе сохранённые значения из этой матрицы используются при исследовании зависимости характеристик системы от параметров входного потока. Для бернуллиевской модели параметром входного потока является q и вычисление выполняется по формуле (2). Для Пуассоновской модели параметром входного потока выступает значение λ и вычисление выполняется по формуле (7).

Второй раздел диссертации посвящён моделям и методам для технологий, в которых имеются этап случайного доступа и этап передачи данных. Сначала рассматривается задача повышения скорости передачи за счёт распределения частотно-временного ресурса между этапами в рамках одной технологии. Затем рассматривается задача уменьшения задержки путём распределения устройств для случая, когда в одной сети используются разные технологии.

При решении первой задачи отмечается, что в зависимости от перераспределения ресурса общего канала между этими двумя этапами, узким местом может выступать как этап случайного доступа, так и этап передачи данных. Предлагается модель, отражающая основные особенности систем, в которых имеются эти два

этапа. В диссертационной работе показывается как за счёт перехода от непрерывного к дискретному по времени каналу, задача распределения частотно-временных ресурсов между этапом случайного доступа и этапом передачи данных сводится к задаче распределения числа отсчётов в дискретном канале между этими этапами.

Упрощённая модель функционирования сотовой сети, рассматриваемая в этом разделе, предполагает бесконечную последовательность кадров. Модель системы задаётся следующими параметрами: m – число отсчётов для этапа случайного доступа, n – число отсчётов в кадре, w – число слотов под передачу данных, Λ – интенсивность входного потока сообщ./кадр, k – число бит в сообщении, γ – отношение сигнал/шум.

Зафиксированы алгоритмы формирования и приёма преамбул. Определено число преамбул l , которое зависит как от алгоритма формирования преамбул, так и от m , т.е. задана функция $l(m)$. Зафиксирована схема модуляции и кодирования для передачи данных и алгоритм приёма данных. Рассматривается передача по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом. Процесс появления АУ в системе описывается Пуассоновским потоком с интенсивностью Λ [сообщ./кадр]. У каждого АУ имеется одно единственное сообщение и в каждом кадре выделяется w слотов для передачи данных. БС сообщает – в каких слотах должны передавать АУ, которые на этапе случайного доступа выбрали соответствующую преамбулу. Если несколько АУ выбрали одну и ту же преамбулу, то передача данных будет всегда unsuccessful. Если преамбула выбрана только одним АУ, то данные могут быть успешно декодированы с некоторой вероятностью. После успешной передачи сообщения АУ покидает систему. В качестве показателя производительности системы рассматривается верхняя грань по интенсивности входного потока, для которой средняя задержка D в системе конечна:

$$\Lambda_{cr} \triangleq \sup\{\Lambda : E[D] < \infty\}. \quad (8)$$

Отмечается, что задача максимизации скорости передачи эквивалентна задаче максимизации Λ_{cr} . Работа системы описывается следующим образом: на этапе случайного доступа описывается моделью с Пуассоновским входным потоком, введённой в первом разделе диссертационной работы; на этапе передачи данных, в соответствии с каждой успешно продетектированной преамбулой, формируется очередь для предоставления ресурсов на передачу. В диссертационной работе для определения предельного значения Λ_{cr} система описывается в виде последовательного соединения двух систем (см. рис. 1 и рис. 2). Первая система описывается моделью СМД с пуассоновским входным потоком и l преамбулами, рассмотренный в первом разделе диссертационной работы. Вторая система описывается системой массового обслуживания (СМО) $(G|D|w)$.

В диссертационной работе описывается способ вычисления функций $f_S(x, m, \gamma, l(m))$ и $f_{out}(x, m, \gamma, l(m)k, n, w)$ (см. рис. 1 и рис. 2) и предлагается алгоритм, который позволяет вычислить значение Λ_{cr} с использованием данных функций. Основная идея этого алгоритма состоит в том, что в зависимости от параметров «узким местом» в системе является либо СМД (см. рис. 1), либо СМО $(G|D|w)$ (см. рис. 2). Рассматривается демонстрационный пример использования

данного алгоритма. А также показано, как за счёт процедуры раннего детектирования коллизий на этапе случайного доступа и оптимального перераспределения ресурсов между этапами обеспечить максимальную производительность системы.

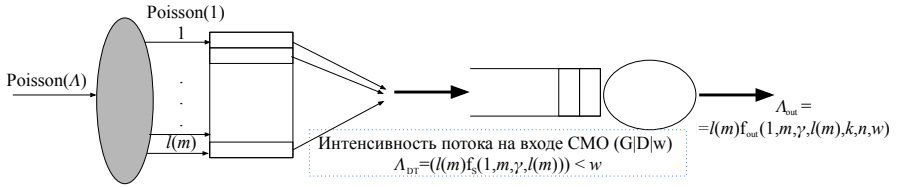


Рис. 1. Определение значения Λ_{cr} при перегрузки СМД

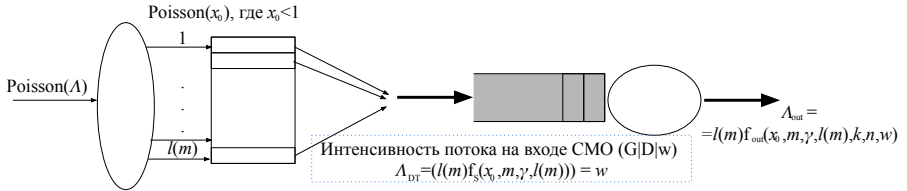


Рис. 2. Определение значения Λ_{cr} при перегрузки СМО $(G|D|w)$

В четвёртом подразделе второго раздела рассматривается сценарий, в котором участвуют АУ, имеющие два интерфейса: NB-IoT и LTE-M. Наличие нескольких радио-интерфейсов в одном АУ позволяет работать в рамках технологии, которая в англоязычных работах получила название Multi-RAT (multiple radio access technology), а в русскоязычной литературе устоявшегося названия нет. Все устройства находятся в зоне действия двух БС. Первая базовая станция (БС₁) работает в соответствии с технологией NB-IoT, а вторая (БС₂) – в соответствии с технологией LTE-M. АУ может быть ассоциировано с любой из этих БС, но только с одной. В диссертационной работе формулируется модель, в рамках которой решается оптимизационная задача распределения АУ между станциями таким образом, чтобы средняя задержка была минимальна.

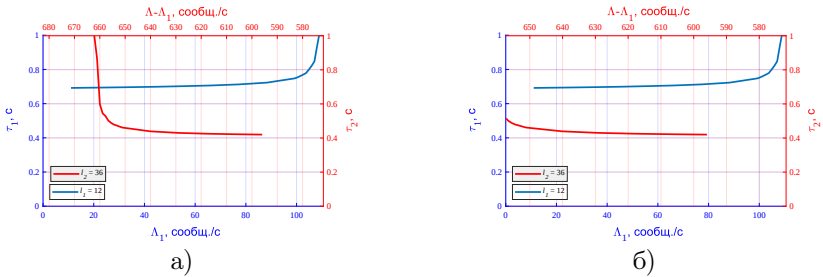


Рис. 3. Задержка передачи сообщения для двух технологий при $\Lambda = 682$ (а), при $\Lambda = 657$ (б)

В диссертационной работе рассматривается пример выбора оптимального распределения потоков между двумя технологиями NB-IoT и LTE-M (число преамбул $l_1 = 12$ для NB-IoT, $l_2 = 36$ для LTE-M), для двух случаев значения Λ ,

которая является суммарной интенсивностью появления АУ в системе. В первом случае $\Lambda = 682$ абонентов/с, а во втором $\Lambda = 657$ абонентов/с. Зависимости средних задержек для первой технологии $\tau_1(\Lambda_1)$ и второй технологии $\tau_2(\Lambda - \Lambda_1)$, для рассматриваемых значений входного потока, приведены на рис. 3. В результате получено, что в первом случае оптимальное значение интенсивности потока для технологии NB-IoT $\Lambda_1 = 22$ абонентов/с, а для технологии LTE-M $\Lambda - \Lambda_1 = 661$ абонентов/с. Во втором случае технология NB-IoT не используется ($\Lambda_1 = 0$), а весь входной поток обслуживается технологией LTE-M $\Lambda - \Lambda_1 = 657$ абонентов/с.

Таким образом, использование решения оптимизационной задачи, рассматриваемой во второй части данного раздела, позволяет распределить АУ между станциями таким образом, чтобы средняя задержка была минимальна.

В **третьем разделе** рассматривается сценарий с движущейся платформой с множеством АУ (ПМАУ). ПМАУ представляет собой большой сложный объект такой, как судно или поезд с установленными на борту АУ NB-IoT, движущийся через определённую область, где расположены БС с технологией NB-IoT. Часть территории покрыта технологией NB-IoT. Сообщение у отдельного АУ может появиться в любой момент времени, а доставлено на БС может быть только тогда, когда ПМАУ будет находится в зоне действия БС.

В рамках рассматриваемого сценария предполагается, что время нахождения ПМАУ вне зоны действия БС (состояние *OFF*) и в зоне действия БС (состояние *ON*) – это случайные величины, распределённые по экспоненциальному закону со средними значениями T_{OFF} и T_{ON} , соответственно. Аналогично терминологии, введённой в первом разделе, состояние АУ, когда у него есть готовое для передачи сообщение называется активным, а состояние, когда нет – пассивным. В активном состоянии АУ находится с момента появления сообщения до момента его доставки на БС. После передачи сообщения на БС АУ переходит в пассивное состояние. Независимо от того, в какой зоне находится ПМАУ, она всегда случайное время находится в пассивном состоянии. Предполагается, что время пребывания в пассивном состоянии – это случайная величина, распределённая по экспоненциальному закону со средним значением $T_{inactive}$. Следует отметить, что для использования моделей, введённых в первом разделе диссертационной работы, для исследования данного сценария необходимо перейти от непрерывного времени к дискретному. В качестве дискрета времени выступает длительность окна ($t_{окна}$). В этом случае экспоненциальное распределение переходит в геометрическое распределение с соответствующими параметрами. Соответствие данных сценария и параметров модели, введённой в данном разделе, представлено в таблице 1.

Таким образом, модель полностью описывается набором параметров: M – число АУ, q – вероятность перехода АУ в активное состояние, l – число преамбул, $t_{окна}$ – длительность окна и q_{ON} – вероятность перехода из состояния *ON* в состояние *OFF*, q_{OFF} – вероятность перехода из состояния *OFF* в состояние *ON*. В диссертационной работе рассматривается двухмерный случайный процесс (N^t, S^t) , где N_{act}^t – число активных абонентов в окне с номером t ($N_{act}^t \in \{0, 1, \dots, M\}$), а S^t

Таблица 1. — Взаимосвязь между данными сценария и параметрами модели.

Данные сценария	Параметры модели
Среднее время пребывания в зоне действия БС T_{ON}	$q_{ON} = 1 - t_{окна}[c]/T_{ON}[c]$
Среднее время пребывания вне зоны действия БС T_{OFF}	$q_{OFF} = 1 - t_{окна}[c]/T_{OFF}[c]$
Среднее время пребывания АУ в пассивном состоянии $T_{inactive}$	$q = t_{окна}[c]/T_{inactive}[c]$

принимает значение 0 или 1, если в окне t ПМАУ находится вне зоны и в зоне действия БС, соответственно. Значение компоненты N_{act}^{t+1} в окне $t+1$ зависит как от значения N_{act}^t , так и от значения S^t в окне t и формируется следующим образом:

$$N_{act}^{t+1} = N_{act}^t - T(N_{act}^t, S^t) + V^t(N_{act}^t), \quad (9)$$

где $T(N_{act}^t, S^t)$ – число успешных передач, когда система находится в состоянии S^t и система имеет N_{act}^t активных АУ, $V^t(N_{act}^t)$ – число АУ, которые стали активными в окне t при условии, что N_{act}^t – это число активных АУ в начале окна t .

С учётом вышеизложенного, случайный процесс $\{S^t, N_{act}^t, t=0, 1, \dots\}$ описывается двухмерной цепью Маркова. Введём следующее обозначение для переходных вероятностей этой Марковской цепи $p(j, B|i, A) = Pr\{N_{act}^{t+1}=j, S^{t+1}=B | N_{act}^t=i, S^t=A\}$, где A и B принимают значение из множества $\{0, 1\}$. Используя (9), переходные вероятности можно рассчитать по следующим формулам:

$$\begin{cases} p(j, 0|i, 1) = q_{ON} \sum_{m=\max(0, i+j)}^{M-j} pbin(m-(i-j), M-i, 1) Pr\{T=m|i\}, \\ p(j, 0|i, 0) = (1-q_{OFF}) pbin(i-j, M-i, q), \\ p(j, 1|i, 1) = (1-q_{ON}) \sum_{m=\min(0, i+j)}^{M-j} pbin(m-(i-j), M-i, 1) Pr\{T=m|i\}, \\ p(j, 1|i, 0) = q_{OFF} pbin(i-j, M-i, q). \end{cases} \quad (10)$$

Для вычисления средней задержки выполняется следующая трёхшаговая процедура:

Шаг 1. На основе двухмерной Марковской цепи рассчитывается стационарное распределение на парах случайных величин (S^t, N^t) ;

Шаг 2. Из стационарного распределения на парах находится стационарное распределение для случайной величины N^t ;

Шаг 3. На основе стационарного распределения для случайной величины N^t вычисляется средняя задержка.

В качестве примера данной модели рассматривается следующий сценарий, где платформа, на которой расположено 5000 АУ, перемещается по некоторой территории. Среднее время нахождения объекта в зоне действия БС занимает 20 секунд ($T_{ON} = 20$ с). На рис. 4 представлена зависимость средней задержки от среднего времени пребывания объекта вне зоны действия БС (T_{OFF}) для следующих трёх случаев: в первом случае среднее время нахождения АУ в пассивном состоянии $T_{inactive} = 1$ с, во втором – 1 мин, а в третьем – 10 мин. В случае,

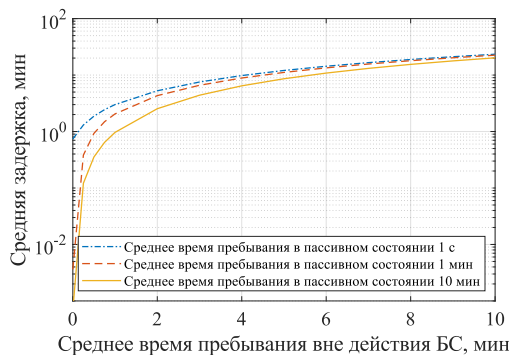


Рис. 4. Зависимость средней задержки от среднего времени пребывания вне зоны действия БС (T_{OFF} при фиксированном значении АУ в пассивном состоянии $T_{inactive}$)

когда $T_{OFF}=0$, платформа всегда находится в зоне действия БС, а модель соответствует модели с бернуллиевским потоком, представленной в первом разделе.

В **четвёртом разделе** рассматривается использование моделей, введённых в первом разделе, для анализа характеристик сетей, построенных на технологии LoRaWAN. В начале раздела представлен систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LoRa. Описывается принцип формирования физического сигнала в технологии LoRa и обосновывается, что этот принцип оказывает влияние на все другие решения, которые используются на физическом уровне LoRa. Отмечено, что в настоящее время в русскоязычной литературе отсутствует устоявшийся термин для обозначения элементарного сигнала модуляции LoRa. Предложено использовать для обозначения этого сигнала термин **Линейно–Возрастающий Частотно–Модулированный символ (ЛВЧМ-символ)** вместо англоязычного термина «Chirp». Широко использованный в англоязычной литературе термин SF (Spreading Factor) не следует переводить на русский язык как коэффициент расширения спектра, т.к. ЛВЧМ-символы с разными значениями SF занимают одинаковую полосу частот, но имеют разную длительность. Трактовать термин SF следует как параметр, характеризующий вид ЛВЧМ-символа и равный числу бит, которое можно передать в одном ЛВЧМ-символе. В диссертационной работе описывается как значение SF и мощность сигнала влияют на то, успешно или нет будет осуществлён приём сигналов от разных абонентов. В конце работы делается вывод, что если уровни сигналов от разных абонентов отличаются не более чем на 6 дБ, то сигналы с разными значениями SF не оказывают влияния друг на друга. Далее рассматривается протокол верхнего уровня Интернета вещей LoRaWAN с использованием энергоэффективных устройств класса А. Функционирование такого протокола можно описать моделью системы многоканального одноэтапного случайного множественного доступа, которая рассматривались в пером разделе диссертационной работы.

Рассматривается сценарий, когда сеть развёртывается на небольшой территории с большим числом АУ, которым можно назначить коэффициент расширения спектра с параметром 7 (SF_7) согласно протоколу LoRaWAN.

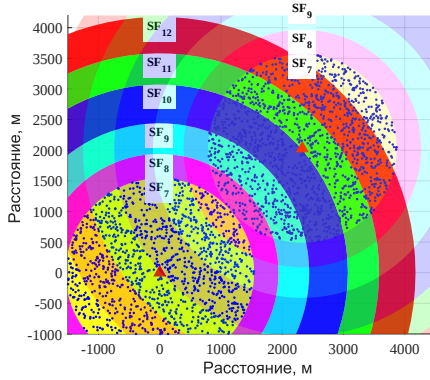


Рис. 5. Сценарий высокоплотных сетей технологии LoRa

Для такого высокоплотного развёртывания предлагается упрощённая модель, отражающая основные особенности технологии LoRa (см. рис. 5). Зависимость вероятности доставки от числа АУ представлена на рис. 6 (см. вероятность доставки без оптимизации). В диссертационной работе формулируется и решается задача максимизации средней вероятности доставки (11) за счёт того, что некоторым АУ назначаются SF отличные от SF_7 .

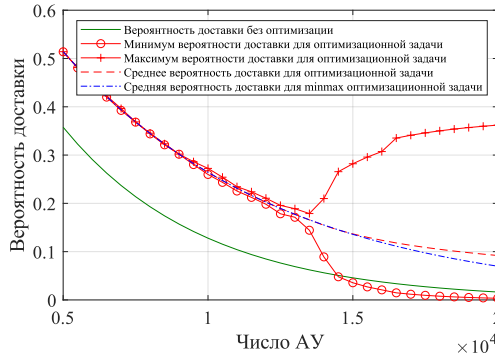


Рис. 6. Зависимость вероятности доставки сообщений от числа АУ

Вероятность доставки может существенно отличаться. Из зависимостей, представленных на рис. 6 следует, что эти различия начинаются с 13,5 тыс. АУ, а с 15 тыс. для некоторых устройств вероятность доставки оказывается даже меньше, чем для исходного случая, когда всем устройствам назначен SF_7 .

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{n_7, n_8, n_9, n_{10}, n_{11}, n_{12}} \sum_{i=7}^{12} \frac{n_i e^{-\lambda n_i t_i}}{N} \\ \text{При условии, что} \\ \sum_{i=7}^{12} n_i = N \\ n_i \geq 0, i=7, \dots, 12 \end{array} \right. , \quad (11)$$

где N – общее число АУ в сети, t_i – время передачи сообщений на SF_i , λ – интенсивность потока сообщений от АУ, n_i – число АУ, использующих SF_i .

В диссертационной работе отмечается, что если имеется относительно небольшое число устройств, то в результате решения этой оптимизационной задачи для групп устройств с разными SF обеспечивается одинаковая вероятность доставки.

При большом числе устройств, что характерно для высокоплотных сетей, решение оптимизационной задачи (11) может привести к тому, что для АУ с разными SF вероятность доставки может существенно отличаться. Для преодоления этого недостатка в работе формулируется и решается минимаксная оптимизационная задача (12). В результате решения этой оптимизационной задачи вероятность доставки для всех АУ будет одинаковым и только при числе АУ больше 16 тыс. может незначительно проигрывать по средней вероятности доставки оптимизационной задачи (11).

$$\begin{cases} \max_{n_7, n_8, n_9, n_{10}, n_{11}, n_{12}} \min \left(\frac{n_7 e^{-\lambda n_7 t_7}}{N}, \frac{n_8 e^{-\lambda n_8 t_8}}{N}, \dots, \frac{n_{12} e^{-\lambda n_{12} t_{12}}}{N} \right) \\ \text{При условии, что} \\ \sum_{i=7}^{12} n_i = N \\ n_i \geq 0, i = 7, \dots, 12 \end{cases} . \quad (12)$$

В конце четвёртого раздела описывается натурный эксперимент, подтверждающий адекватность использования упрощённой модели для описания работы высокоплотной сети, построенной по технологии LoRa.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Предложен метод двухэтапного вычисления переходных вероятностей марковской цепи, описывающий функционирование системы со случайным множественным доступом, позволяющий уменьшить вычислительные затраты в десятки раз (от 24 до 60) при исследовании зависимости характеристик системы от параметров входного потока;
2. Для технологий, в которых имеются этапы случайного доступа и этап передачи данных, предложены модели и методы, которые позволяют повысить скорость передачи до 40% за счёт распределения частотно-временного ресурса между этапами;
3. Предложена модель, описывающая сценарий одновременного использования технологий LTE-M и NB-IoT в рамках одной сети, и метод, позволяющий уменьшить задержку для типового сценария на 30% путём распределения устройств между этими технологиями;
4. Введена модель, описывающая сценарий перемещения объекта, состоящего из группы устройств, между зонами действий БС. В рамках этой модели показано, что для типового сценария можно снизить задержку до 41% за счёт увеличения интервалов между передачей данных от каждого из устройств группы;

5. Предложена упрощённая модель, отражающая основные особенности функционирования высокоплотной сети, построенной по технологии LoRa. Сформулирована и решена минимаксная оптимизационная задача, обеспечивающая увеличение вероятности доставки не менее чем на 30%.

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК

1. *Степанов Н.В.* Метод анализа вероятностных характеристик обслуживания пачечного трафика в системах NB-IoT / Степанов Н.В., Тюрликов, А. М., Бегишев В. О. // *Электросвязь*. — 2022. — С. 8–15.
2. *Степанов Н.В.* Обзор технологий CIoT: особенности и последовательность работы устройств / Степанов Н.В. // *Успехи современной радиоэлектроники*. — 2022. — С. 90–99.
3. *Степанов Н.В.* Оптимальные ассоциации устройств в сетях межмашинного взаимодействия стандартов NB-IoT и LTE-M / Степанов Н.В., Тюрликов, А. М., Бегишев В. О. // *Системы и средства информатики*. — 2022. — С. 63–70.
4. *Степанов Н.В.* Систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LoRa / Степанов Н.В. // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. — 2023. — С. 11–26.

Программа для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025667212 Российская Федерация. Программная реализация сокращённого вычисления в два этапа при исследовании процедуры случайного множественного доступа с использованием аппарата Марковских цепей: № 2025666403: заявл. 03.07.2025; опубл. 03.07.2025 / Н.В. Степанов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Статьи, опубликованные в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus

1. *Stepanov N.* Balancing the Data Transmission and Random Access Phases in 6G mMTC Radio Technologies / N. Stepanov, A. Turlikov, V. Begishev // *IEEE Communications Letters*. — 2023. — Pp. 3419–3423.
2. *Stepanov N.* Wireless power transfer from unmanned aerial vehicle to low-power wide area network nodes: Performance and business prospects for LoRaWAN / A. Tiurlikova, N. Stepanov, K. Mikhaylov // *International Journal of Distributed Sensor Networks*. — 2019. — Pp. 1–14.

Статьи в сборниках докладов международных конференций, индексируемых Web of Science и Scopus

1. *Stepanov N.* Enhanced Algorithm for Dynamic Changing of Frame Size in Radio Frequency Identification Systems / N. Yankovskii, A. Kolesnikova, K. Afanasev, N. Stepanov // *XVIII Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*. — 2022. — Pp. 1–4.
2. *Stepanov N.* A lower bound on the average identification time in a passive RFID system / N. Stepanov, N. Matveev, O. Galina, A. Turlikov // *International*

- Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. — 2018. — Pp. 524–534.
3. *Stepanov N.* Modeling the NB-IoT transmission process with intermittent network availability / N. Stepanov, D. Moltchanov, A. Turlikov // International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. — 2020. — Pp. 241–254.
 4. *Stepanov N.* Method of assigning spreading factor to improve the scalability of the LoRaWAN wide area network / A. Tiurlikova, N. Stepanov, K. Mikhaylov // 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. — 2018. — Pp. 1–4.
 5. *Stepanov N.* Using a small number of devices to experimentally estimate the packet delivery ratio on a LoRaWAN network with a large number of end devices / M. Ilderyakov, N. Stepanov // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. — 2019. — Pp. 1–4.
 6. *Stepanov N.* Experimental Research to Determine the Conditions for Successful Reception of Messages in the LoRaWAN / S. Kuzmichev, N. Stepanov // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. — 2019. — Pp. 1–4.
 7. *Stepanov N.* Data delivery efficient spreading factor allocation in dense LoRaWAN deployments / O. Gusev, A. Turlikov, S. Kuzmichev, N. Stepanov // XVI International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems. — 2019. — Pp. 199–204.
 8. *Stepanov N.* Research LoRaWAN collide signals with used SDR / S. Efimov, N. Stepanov, A. Turlikov // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. — 2021. — Pp. 92–98.
 9. *Stepanov N.* Optimizing NB-IoT communication patterns for permanently connected mMTC devices / M. Stusek, N. Stepanov, D. Moltchanov, P. Masek, R. Mozny, A. Turlikov, J. Hosek // IEEE Wireless Communications and Networking Conference. — 2022. — Pp. 1413–1418.

Научные статьи в сборниках конференций, индексируемых РИНЦ

1. *Степанов Н.В.* Производительность системы MMTC с ранним детектированием коллизий преамбул / А. М. Тюрликов, Н. В. Степанов // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Материалы XXVII Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 03–07 июня 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 179–183.

Печатается в авторской редакции

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная

Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Редакционно-издательский центр ГУАП

190000, Санкт-Петербург, Б. Морская улица, д.67, лит. А