

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Тюрликов Андрей Михайлович

Санкт-Петербург — 2025

Оглавление

	Стр.
Введение	5
 1. Технологии передачи данных и анализ характеристик процесса передачи данных в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением	 13
1.1 Понятие о крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением	13
1.2 Сравнительный анализ технологий передачи данных в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением	16
1.3 Особенности использования канала случайного множественного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением .	34
1.4 Использование Марковских цепей для описания процесса функционирования канала случайного множественного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением	35
1.5 Метод вычисления переходных вероятностей Марковской цепи, учитывающий особенности функционирования канала случайного множественного доступа	38
1.6 Выводы по разделу	41
 2. Массовая межмашинная связь в технологии сотовых сетей для неподвижных объектов	 43
2.1 Вводные замечания по разделу	43
2.2 Модель, описывающая разделение частотно-временного ресурса между этапом случайного доступа и этапом передачи данных . .	43
2.3 Метод повышения скорости передачи за счёт распределения частотно-временного ресурса между этапами случайного доступа и передачи данных	51
2.4 Модель, описывающая сценарий использования технологий LTE-M и NB-IoT в рамках одной сети	58
2.5 Метод уменьшения задержки путём распределения устройств между технологиями LTE-M и NB-IoT	63
2.6 Выводы по разделу	69

3. Массовая межмашинная связь в технологии сотовых сетей для подвижной группы объектов	70
3.1 Вводные замечания по разделу	70
3.2 Сценарий с движущимися платформами	71
3.3 Модель, описывающая сценарий с движущимися платформами .	78
3.4 Анализ сценария с движущимися платформами	79
3.5 Особенности построения матриц Марковской цепи	90
3.6 Выводы по разделу	104
4. Массовая межмашинная связь, построенная по технологии LoRa	105
4.1 Вводные замечания	105
4.2 Обзор специфических особенностей физического уровня технологии LoRa	106
4.3 Экспериментальная оценка вероятности успешного приёма сообщений при частичном наложении сигналов от разных абонентских устройств	109
4.4 Задача максимизации средней вероятности доставки сообщений за счёт выбора параметров работы абонентских устройств	120
4.5 Минимаксная оптимизационная задача	128
4.6 Решение задачи оптимизации	130
4.7 Натурный эксперимент, подтверждающий корректность модели, используемой при формулировке минимаксной оптимизационной задачи	139
4.8 Выводы по разделу	146
Заключение	147
Список сокращений	148
Список литературы	152
Список рисунков	165
Список таблиц	168

Приложение А. Распределение объектов по ячейкам	
случайным образом	169
А.1 Доказательство по индукции для PGF	170
А.2 Доказательство утверждения об успешном выборе одним	
абонентом одной преамбулы	172
Приложение Б. Акт об использовании от ООО	
«ГАЗПРОМНЕФТЬ ИТО»	174
Приложение В. Акт об использовании от ООО «НПО ПКРВ» .	176
Приложение Г. Акт об использовании от АО	
«КОТЛИН-НОВАТОР»	178
Приложение Д. Акт об использовании от ФГАОУ ВО	
«Санкт-Петербургский государственный	
университет аэрокосмического приборостроения»	180
Приложение Е. Акт об использовании от АО «НИИ Масштаб» .	182
Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации	
программы для ЭВМ	183

Введение

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).

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. Capetanakis. 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.Prévotet, 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, автоматике 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, автоматике 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 раз-

работка 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, четырёх разделов, заключения и шести приложений. Полный объём диссертации составляет 183 страницы, включая 71 рисунок и 11 таблиц. Список литературы содержит 128 наименований.

1. Технологии передачи данных и анализ характеристик процесса передачи данных в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением

1.1 Понятие о крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением

На сегодняшний момент не существует устоявшегося термина крупномасштабные сети с низким энергопотреблением. В российском стандарте [1] термин «крупномасштабная» используется применительно к сети передачи данных следующим образом: «Интернет — набор взаимосвязанных сетей, использующих интернет-протокол, который позволяет им функционировать как единая крупномасштабная крупная виртуальная сеть». Российский стандарт ГОСТР 58210—2018 является прямым переводом международного стандарта ISO/IEC TR 29181-1:2012 [2]. В международном стандарте аналогичная фраза имеет вид: «Internet: A collection of interconnected networks using the Internet Protocol which allows them to function as a single, large virtual network». Таким образом термин «large» переведен как «крупномасштабная». Существует англоязычный термин LPWAN (Low-power Wide-area Network), который характеризует сети с большим числом абонентских устройств, имеющих низкое энергопотребление [3]. Однако, прямой перевод на русский язык этого термина не в полной мере отражает специфику данных сетей. По этой причине в диссертационной работе под крупномасштабными сетями с низким энергопотреблением будем подразумевать беспроводные сети передачи данных, обладающие следующими свойствами:

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 достигается невысокими скоростями передачи и достаточно простыми алгоритмами работы устройств;

3. За счет 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.

Крупномасштабные сети с низким энергопотреблением могут быть построены на основе следующих технологий: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT (Narrowband Internet of Things), EC-GSM-IoT, LTE-M (Long-Term Evolution Machine Type Communication), DASH7 и NB-Fi (Narrow Band Fidelity) как показано на рис. 1.1.

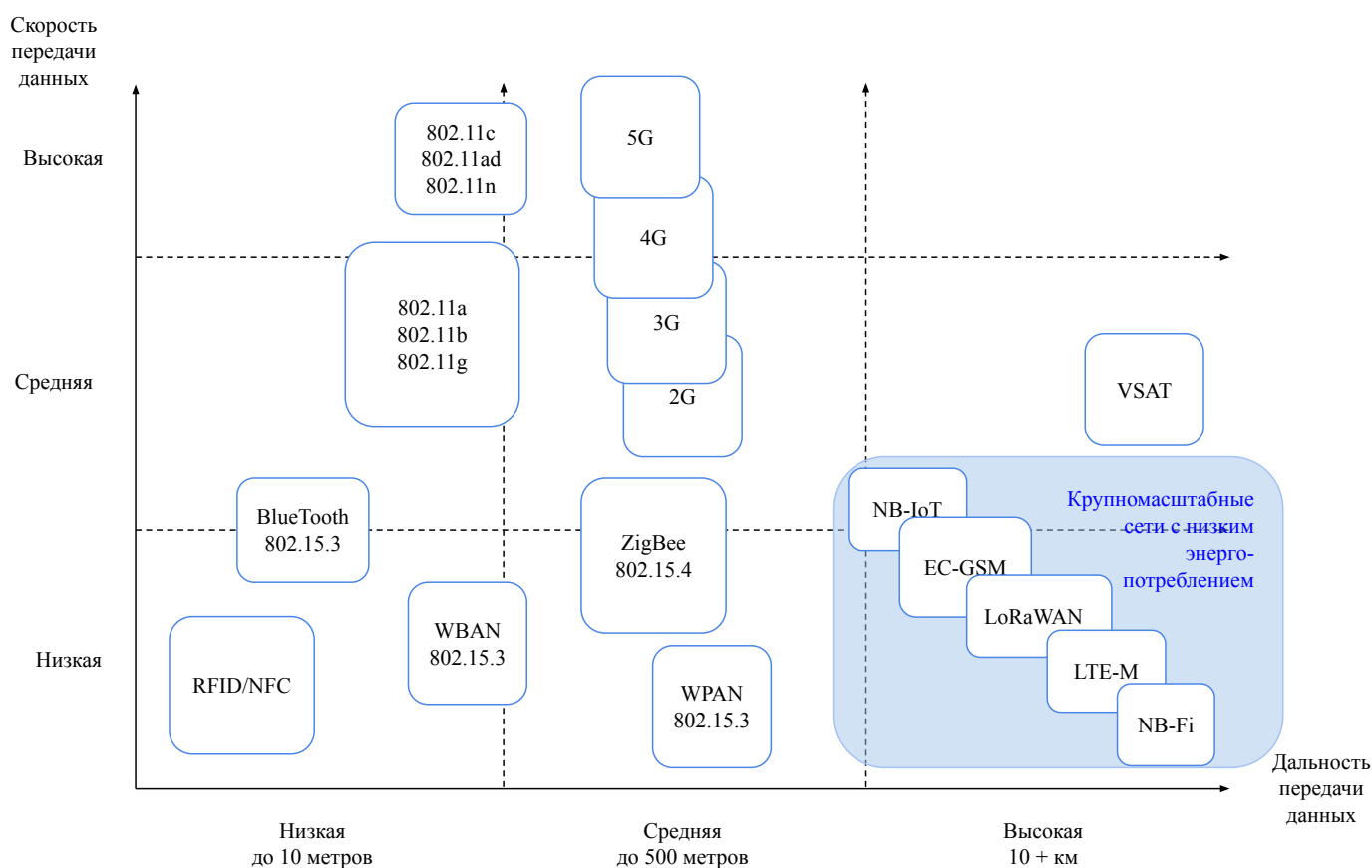


Рисунок 1.1. Зависимость технологий LPWAN от скорости и дальности

На рисунке 1.1 выделены области с максимальными и минимальными значениями дальности работы и скорости передачи по технологий LPWAN. Технические характеристики скорости передачи у устройств с наибольшей дальностью примерно похожи друг к другу. Более распространенным и поглощающим по скорости и дальности среди LoRa, NB-Fi, «СТРИЖ», Sigfox

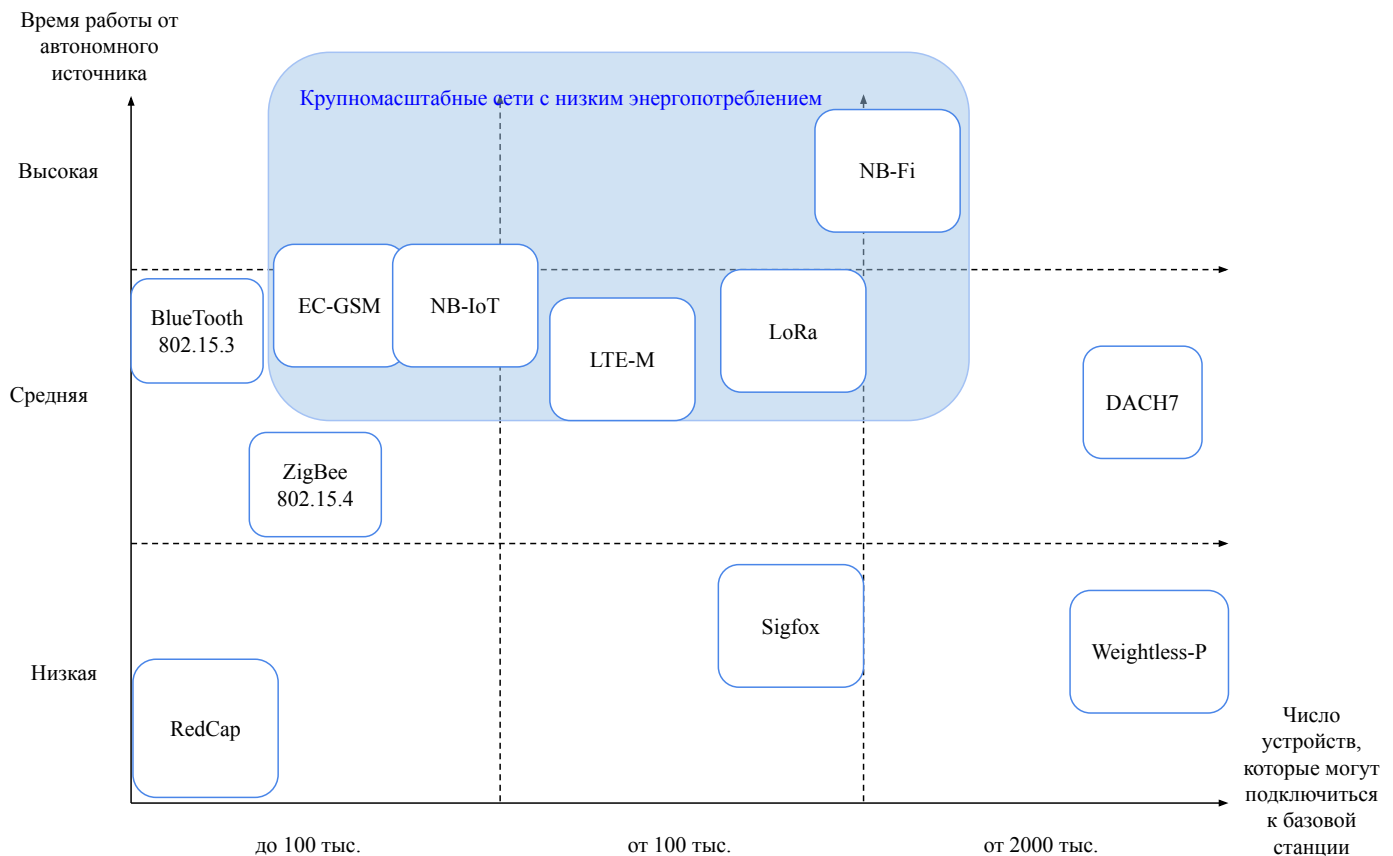


Рисунок 1.2. Зависимость технологий LPWAN от времени работы и числа устройств

можно считать LoRa. В диссертационной работе делается акцент на технологии: NB-IoT, LTE-M и LoRa, так как они на сегодняшний день наиболее широко используются в системах передачи данных IoT сетей [4],[5] .

Рассмотрены сценарии применения множественного доступа в технологиях с беспроводной передачей данных. В результате сравнительного анализа было выявлено, что для построения крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением используются два совершенно разных подхода. Первый подход базируется на технологиях сотовых сетей, а второй базируется на совокупности технологий беспроводной передачи данных в нелицензированном диапазоне частот и включает в себя множество технологий. Объединяет два этих подхода то, что для доступа к общему каналу связи используется случайный доступ.

1.2 Сравнительный анализ технологий передачи данных в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением

В данном подразделе рассматриваются технологии случайного множественного доступа в сотовых сетях и сетях IoT. На сегодняшний день разработано и доступно на рынке множество коммуникационных технологий для IoT, включая технологии малого и сверхмалого радиуса действия (ZigBee (от англ. zigzag bee), BLE (от англ. Bluetooth Low Energy), Wi-Fi (от англ. Wireless Fidelity) и RFID (от англ. Radio Frequency Identification)), а также технологии дальнего радиуса действия (LoRa, Sigfox, и Weightless). Большинство этих технологий функционируют в нелицензируемом спектре частот. По этой причине уровень помех в общем канале негативно сказывается на их производительность. Также особенностью IoT технологий (за исключением Wi-Fi) является необходимость развертывания отдельной инфраструктуры для обслуживания приложений IoT, что увеличивает конечную стоимость таких решений.

В конце первого раздела рассмотрим различные сценарии использования крупномасштабных сетей, при чём в рамках одного и того же сценария могут использоваться различные технологии для двух процессов появления абонентских устройств в системе. Таким образом для описания различных технологий и различных сценариев необходимо учитывать как организацию доступа к общему каналу, так и процесс появления сообщений.

Принципиальным отличием CIoT от рассмотренных выше технологий является то, что они представляют из себя дальнейшую эволюцию коммуникационных технологий для мобильных пользовательских терминалов. Во-первых, это позволяет сэкономить на инфраструктуре. В большинстве случаев операторы могут включить поддержку CIoT технологий на своих, уже развернутых, БС путем обновления программного обеспечения. Во-вторых, работа в лицензируемой полосе частот позволяет значительно ослабить деструктивное влияние помех от других систем, а также выйти из-под ограничений, накладываемых на рабочий цикл (duty cycle), во многих диапазонах нелицензируемых частот. Тем самым технологии CIoT потенциально могут обеспечить более высокие предельные значения производительности (к примеру - скорость передачи данных) и стабильность связи.

На сегодняшний день научно-техническая литература, описывающая технологии СIoT, может быть разделена на три большие группы:

1. Обзорные статьи, сравнивающие три технологии СIoT (также, в некоторых случаях, к сравнению подключаются и другие технологии сетей широкого покрытия с низким энергопотреблением (LPWAN, Low-Power Wide-area Network)). Примерами подобных работ могут служить статьи [6 -11]. Тем не менее, в данных статьях дается лишь очень краткое описание основных механизмов, не позволяющее понять работу технологий более точно;
2. Руководства и пособия по развертыванию сетей, а также книги и учебные пособия, содержащие, описание одной или нескольких технологий СIoT. К первым можно отнести работы [12] для NB-IoT и [13] для LTE-M, соответственно. Отметим, что нам неизвестны руководства по развёртыванию сетей EC-GSM-IoT. Также, определенная информация доступна в техническом документе по MIoT (Mobile IoT) [14] и в книге, посвящённой СIoT технологиям [15]. Недостатками руководств является их фрагментарное покрытие, фокусирующееся на отдельных моментах работы технологий. Книги же весьма детальны и объемны;
3. Обзорные статьи, посвященные отдельным СIoT технологиям или их аспектам. Примерами данных работ являются [16, 17, 18]. Отметим, что из трех СIoT технологий, авторы обращаются к NB-IoT наиболее часто. Данные статьи, обычно, не содержат полной информации о последовательности работы каждой из технологий, а также не акцентируют внимание на различиях и общих моментах разных технологий.

Таким образом, общими недостатками опубликованных на сегодняшний день работ, посвященных технологиям СIoT, являются: (i) недостаточная детальность - в большинстве случаев дается лишь краткое описание основных механизмов, не достаточное для понимания деталей их работы, а также общих и частных моментов, характерных для индивидуальных СIoT технологий, (ii) поверхностная и, зачастую, противоречивая информация о предельных и характерных значениях производительности технологий.

Важно отметить, что в известных источниках не рассматривалось сравнение всех трёх технологий СIoT, где выделяются основные характеристики каждой из технологий. Кроме того, наиболее удобно сравнивать последовательно каждую процедуру работы протоколов передачи данных.

В последовательности работы устройств СІоТ для лучшего понимания логики работы элементов сети, сначала разумно рассматривать обобщённую последовательность работы устройств сети. Затем акцентировать внимание и рассматривать отличия работы устройств в рамках каждой из трех технологий от обобщенной последовательности.

Подобно абонентским сотовым устройствам, последовательность работы в СІоТ можно разделить на следующие основные этапы:

Шаг 1. Обнаружение сети и синхронизация. Это обычно осуществляется сразу после включения устройства, либо после выхода устройства из длительного периода энергосбережения, и включает в себя сканирование одного или нескольких частотных диапазонов с целью обнаружения и идентификации активных сотовых сетей, а также ключевых параметров их конфигурации, т.н. системной информации. В зависимости от результатов сканирования и требований обслуживаемого приложения, СІоТ устройство может предпринять попытку установления соединения;

Шаг 2. Установление соединения. Может осуществляться с целью изначального подключения к сети, переключения между обслуживающими базовыми станциями, либо передачи/приема пользовательских данных. Установление соединения для СІоТ устройств обычно осуществляется через специальную процедуру произвольного (случайного) доступа;

Шаги 3/4. Поддержание соединения. После успешного установления соединения, сотовая сеть выделяет СІоТ устройству, по мере возможности и необходимости, частотно-временные ресурсы для передачи данных в восходящем (UL) и/или нисходящем (DL) канале. В обоих случаях передача осуществляется с контролем доставки сообщений;

Шаг 5. Закрытие соединения. После передачи данных, соединение может быть закрыто с переходом СІоТ устройства в режим ожидания или энергосбережения.

Данная последовательность, проиллюстрированная на рисунке 1.3, является базовой для всех трех СІоТ технологий. Тем не менее, особенности различных СІоТ технологий могут приводить к определенным отходам от схемы на рисунке 1.3. Например, шаг 5 «Закрытие соединения» не используется в ЕС-GSM-ІоТ. Такие блоки с опциональными сигналами, которые присутствуют не во всех технологиях СІоТ, на схеме отмечены штриховкой. Ниже, в соответствии с работой [19] рассматривается каждый из шагов более подробно.

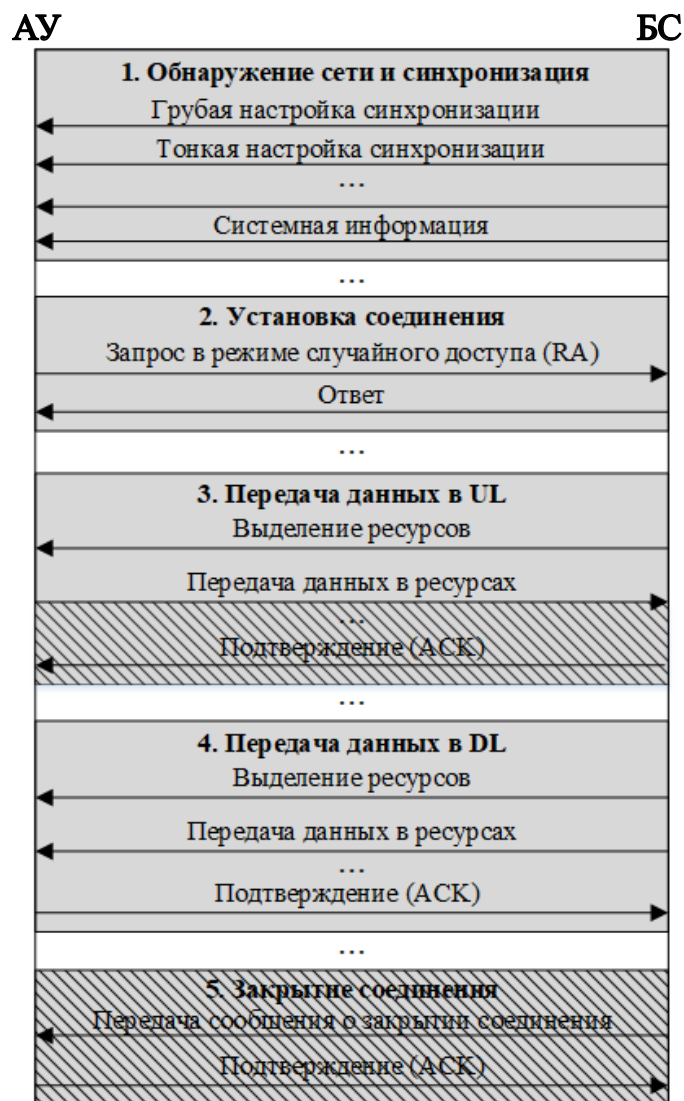


Рисунок 1.3. Обобщённый процесс от включения АУ до подключения к сети и передача сообщения БС (штриховкой обозначены опциональные сигналы или сигналы, присутствующие не во всех технологиях СІоТ)

Шаг 1. Обнаружение сети и синхронизация осуществляются в несколько этапов. Сначала устройство СІоТ определяет наличие сигналов сотовой сети в частотных диапазонах. Затем осуществляется более точная частотная и временная синхронизация с передаваемыми сетью синхросигналами, идентификация сети, а также прием периодически передаваемых блоков системной информации. Системная информация содержит ключевую информацию о конфигурации сотовой сети, включая возможность подключения к ней, и характеристики частотно-временных ресурсов, когда запрос на установление соединения может быть отправлен. Объем и содержимое системной информации, а также характеристики сигналов синхронизации отличаются для разных СІоТ технологий.

Также на этом этапе осуществляется оценка канала связи на основе измерения характеристик принимаемых синхронизационных сигналов.

Шаг 2. Установление соединения состоит из отправки устройством CIoT запроса на установление соединения в специально отведенных для этого частотно-временных ресурсах. В случае успешного приема, базовая станция подтверждает прием и выделяет устройству ресурсы для дальнейшей передачи данных. Отметим, что существует довольно значительное отличие в процедурах случайного доступа для технологий на основе GSM и LTE, которое будет более детально рассмотрено в следующих разделах.

Шаг 3. Передача данных в UL включает в себя: (i) выделение и передачу информации о частотно-временных ресурсах, выделенных для передачи данных в восходящем канале, в рамках контрольного канала и (ii) передачу устройством CIoT данных в UL. В зависимости от используемой CIoT технологии, подтверждение приема базовой станцией может осуществляться либо отдельным сообщением, либо перезапросом данных в случае, если они были не приняты или приняты неверно.

Шаг 4. Передача данных в DL состоит из трех основных этапов: (i) выделение и передача информации о частотно-временных ресурсах, выделенных для передачи данных в нисходящем канале, и для последующей передачи подтверждения в рамках контрольного канала, (ii) непосредственная передача данных базовой станцией в DL, и (iii) получение подтверждения от устройства CIoT. При отсутствии или негативном подтверждении приема со стороны устройства CIoT процедура может быть повторена.

Шаг 5. Закрытие соединения. В технологиях, базирующихся на LTE (NB-IoT и LTE-M), инициатором закрытия соединения всегда является БС. В технологии EC-GSM-IoT нет сигнала о закрытии соединения. АУ постоянно поддерживает связь с БС и получает информацию о том, какая БС ближе для передачи информации и переключения [15].

Рассматривается последовательность работы устройств, функционирующих на основе CIoT технологий, производных от LTE, т.е. NB-IoT и LTE-M. Затем подробно опишем последовательность работы технологии CIoT на основе GSM.

В NB-IoT обнаружение сети и синхронизацию выполняют сигналы грубой(первичной) и точной(вторичной) настройки синхронизации (NPSS и NSSS, соответственно), которые передаются каждой базовой станцией NB-IoT с ис-

пользованием строго определенных частотно-временных ресурсов с периодом повторения в 80 мс. Таким образом, для обнаружения сети и получения данных о ней, устройство NB-IoT, в первую очередь, осуществляет прием сигнала NPSS для осуществления первичной (грубой) частотно-временной синхронизации. После этого производится поиск и прием сигнала NSSS, который позволяет NB-IoT устройству получить информацию о структуре частотно-временного ресурса сети и определить идентификатор (PCID, Physical Cell Identity) БС.

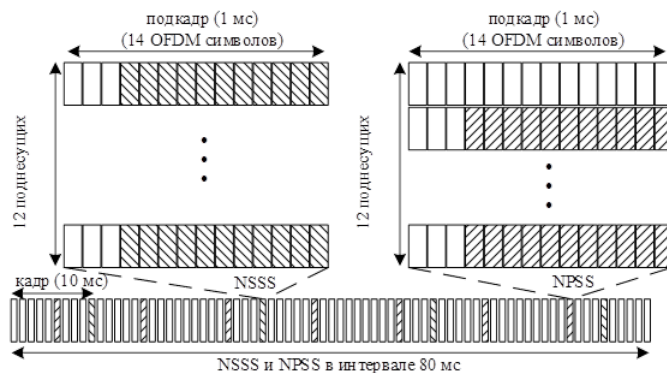


Рисунок 1.4. Мультиплексирование по времени физических каналов нисходящей линии связи на якорной несущей NB-IoT [15]

На следующем шаге устройство NB-IoT осуществляет прием т.н. главного информационного блока (MIB-NB, Master Information Block), передающегося с периодичностью 0,64 секунды. Передача MIB-NB осуществляется на логическом нисходящем канале NPBCH (от англ. NB-IoT Physical Broadcast Channel), под который отводятся ресурсы первого подкадра (длительностью 1 мс) из каждого кадра (длительностью 10 мс). Из MIB-NB устройство NB-IoT получает информацию о режиме развертывания сети, а также о частотно-временных ресурсах, отводящихся для передачи первого блока системной информации (SIB1-NB, System Information Block Narrowband).

SIB1-NB передается с периодом 2,56 секунды в рамках 8 блоков, под которые выделяется 4-ый подкадр каждого второго из 16 последовательных кадров. Начальный кадр SIB1-NB зависит от PCID базовой станции, а последующие определяются с помощью информации, содержащейся в MIB-NB. В SIB1-NB содержится информация, позволяющая устройству NB-IoT определить возможность подключения к данной базовой станции, а также определить частотно-временные ресурсы, в которых располагаются другие блоки системной информации. Отметим, что все блоки системной информации передаются в рамках логического нисходящего канала NPDSCH (Narrowband Physical Downlink

Shared Channel). Перед подключением к базовой станции, помимо SIB1-NB, устройство NB-IoT должно принять следующие блоки системной информации:

- SIB2-NB – содержит информацию о конфигурации радиоресурсов, включая ресурсы для случайного доступа;
- SIB3..5-NB – содержит информацию о ближайших сотах;
- SIB22-NB – содержит информацию о конфигурации радиоресурсов на неосновных частотах.

Еще одной важной задачей при начальной синхронизации является оценка канала до базовой станции. Для этого используются специальные сигналы NRS (от англ. Narrowband Reference Signal), под которые также отводятся специальные частотно-временные ресурсы. На основе оценки канала и принятой системной информации, устройство NB-IoT принимает решение о возможности подключения к данной БС, а также, в случае если БС поддерживает несколько уровней расширенного покрытия (CE, Coverage Enhancement level), в какой зоне находится данное устройство.

Установив синхронизацию и получив всю необходимую информацию в рамках предыдущего шага, АУ может начать процедуру установления соединения с базовой станцией. Определив в какой зоне расширенного покрытия оно находится, устройство устанавливает соответствующие частотно-временные ресурсы, а также число повторений и мощность передаваемого сигнала. После этого выполняется следующая процедура:

Шаг 1: передача msg-1 в UL. АУ выбирает и передает NPRACH (от англ. Narrowband Physical Random Access Channel) преамбулу (msg-1) в режиме повторения (в отличие от традиционных систем LTE). В сети NB-IoT под NPRACH может отводиться 12, 24, 36 или 48 несущих, каждой из которых соответствует одна преамбула. При установлении соединения, каждое NB-IoT устройство случайно выбирает и передает одну из преамбул. Каждая преамбула состоит из 4 групп символов (т.н. блок повторения, см. рис. 1.5), каждая из которых состоит из 5 символов и циклического префикса (66,67 мкс или 266,7 мкс для 10 или 40 км расстояния до БС, соответственно). Число повторений преамбулы и используемые частотно-временные ресурсы зависят от зоны расширенного покрытия, в которой находится данное устройство. Для оценки на БС процесса синхронизации (ТА, Timing Advance), при наличии неизвестного смещения остаточной частоты устройства используется детерминированный шаблон скачкообразной перестройки тона в пределах блока повторения.

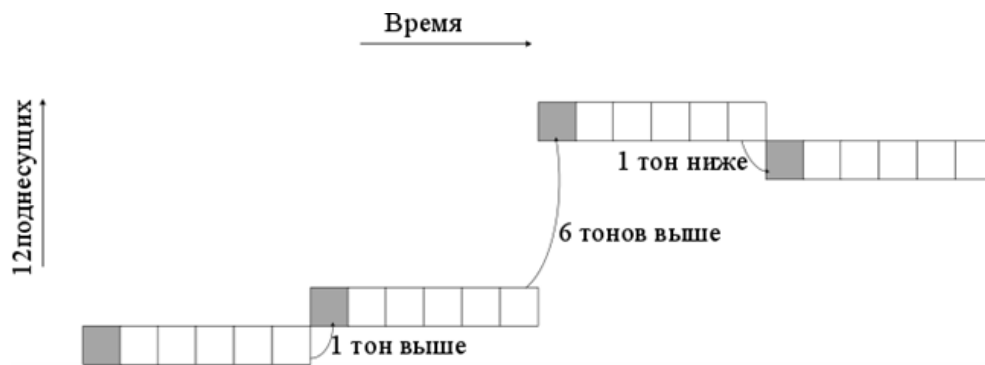


Рисунок 1.5. Один блок повторения преамбулы NPRACH и пример отношения тонов между четырьмя группами символов [15]

Шаг 2: Выделение ресурсов для ответа RA - RAR. После декодирования преамбул в канале случайного доступа (RACH, Random Access Channel), БС отправляет DCI (по англ. Downlink Control Information) пакет в рамках узкополосного физического канала управления нисходящей линии связи (NPDCCH, Narrowband Physical Downlink Control Channel). Данный пакет содержит информацию о частотно-временных ресурсах нисходящего (NPDSCH) канала, которые будут использованы для передачи RAR (от англ. Random Access Response).

Шаг 3: Прием msg-2 по DL. RAR (или msg-2), передаваемый БС для АУ, содержит информацию о принятых RA преамбулах, а также информацию о частотно-временных ресурсах восходящего канала (UL-SCH, Uplink Shared Channel), которые АУ должен использовать для передачи следующего (msg-3) сообщения.

Шаг 4: Передача msg-3 в UL. Для разрешения возможных коллизий, возникающих в случае, если несколько АУ выбрали одну и ту же преамбулу для msg-1, каждое АУ передает msg-3 (т.н. запрос соединения RRC, Radio Resource Control), содержащее, в том числе, случайный идентификатор.

Шаг 5: Выделение ресурсов для msg-4. Если БС успешно декодирует msg-3, она выделяет ресурсы для передачи своего ответа - msg-4, используя нисходящий контрольный канал.

Шаг 6: Получение msg-4 по DL. Msg-4 (т.н. возобновление соединения RRC) содержит идентификатор устройства, от которого БС успешно приняла msg-3, а также информацию о частотно-временных ресурсах восходящего или нисходящего канала, которые этому устройству выделяются. Отметим, что сообщения msg-3 и msg-4 передаются с контролем получения на основе схемы HARQ.

Для поддержания связи после установки соединения может осуществляться передача пользовательских данных. Далее рассмотрим последовательность функционирования устройств сети при передаче данных в восходящем и приеме данных в нисходящем каналах.

В обоих случаях, БС в логическом канале NPDCCH сначала передает пакет управления нисходящим каналом (DCI, Downlink Control Indicator), включающий информацию о частотно-временных ресурсах, отводимых для передачи данных, а также используемых модуляционно-кодовых схемах, число повторений, и т.д. NB-IoT определяет всего три формата DCI:

- N0 (23 бита) используется для планирования NPUSCH (от англ. Narrowband Physical Uplink Shared Channel) в UL;
- N1 (23 бита) используется для планирования NPDSCH в DL;
- N2 (15 бит) используется для пейджинга, т.е., установки соединения с АУ, находящимся в режиме ожидания.

Базовый блок ресурсов DCI называется узкополосным каналом управления отдельными элементами (NCCE, Narrowband Control Channel Element). Каждый подкадр NPDCCH может быть разделен на один или два элемента NCCE, каждый из которых занимает 6 последовательных поднесущих. NPDCCH формата 0 содержит один NCCE, в то время как NPDCCH формата 1 может занимать оба NCCE в одном и том же подкадре для большей надежности передачи. Повторения DCI могут осуществляться до 2048 раз и выбираются eNB на основе оценки канала.

На рисунке 1.6 приведена последовательность и временные соотношения при передаче данных в нисходящем и восходящем каналах в рамках технологии NB-IoT. При передаче данных (например, число повторений) в нисходящем канале, БС выделяет необходимые ресурсы канала NPDSCH в зависимости от объема передаваемых данных и оценки качества канала связи. При этом, начало передачи в NPDSCH отстаёт не менее чем на 4 мс от окончания передачи пакета DCI. Не менее чем через 12 мс после окончания передачи данных в NPDSCH, АУ выделяется ресурс канала NPUSCH для передачи подтверждения приема NPDSCH. Отметим, что сигналы NPDSCH используют частотную сетку с шагом поднесущих 15 кГц и 4ФМн в качестве модуляционно-кодовой схемы. При передаче данных в восходящем канале, как показано на рисунке 1.6, ресурсы канала NPUSCH выделяются не ранее, чем через 8 мс после окончания пакета DCI. На передачу данных в рамках NPUSCH БС выделяет от одного до семи

ресурсных блоков (RU, Resource Block), которые могут повторяться до 128 раз. Конфигурация модуляционно-кодовых схем в рамках выделяемых ресурсных блоков также может отличаться в зависимости от возможностей АУ (к примеру, поддержки им одновременной передачи на нескольких частотах - multitone) и конфигурации сети. Отметим, что в отличие от нисходящих каналов, для восходящих может использоваться как разнос поднесущих на 15 кГц, так и на 3.75 кГц. Также важно отметить, что как число повторений, так и используемая модуляционно-кодовая схема для передачи в рамках NPUSCH определяются БС. Различные варианты конфигурации одного выделяемого блока, а также его длительность схемы модуляции 2ФМн (двоичная фазовая манипуляция) или 4ФМн (квадратурная фазовая манипуляция), приведены в таблице 1.1. Подтверждение приема данных БС осуществляется в рамках канала NPDCCH.

После завершения приема/передачи данных терминал NB-IoT продолжает прием сигналов канала NPDCCH.

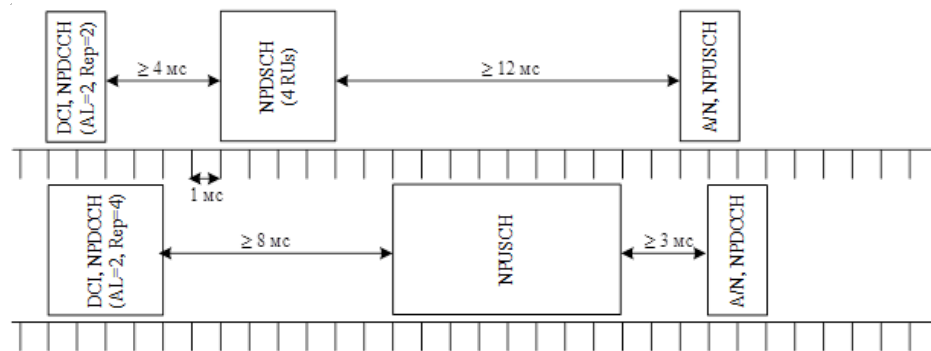


Рисунок 1.6. Последовательность и временные соотношения при передаче данных в нисходящем и восходящем каналах NB-IoT [20]

Закрытие соединения в NB-IoT всегда осуществляется по инициативе сети. В частности, соединение будет закрыто, если в течении определенного времени не было обмена данными между терминалом и БС. Для закрытия соединения БС передает в рамках нисходящего канала NPDSCH команду закрытия соединения (RRCConnectionRelease), прием которой терминал подтверждает с использованием уже рассмотренных выше процедур.

Другая технология IoT из семейства LTE называется LTE-M [21]. Прежде чем познакомиться с особенностями взаимодействия АУ с БС в LTE-M следует обратить внимание, что LTE-M ближе к LTE, чем NB-IoT. К примеру, в рамках LTE-M используются те же 72 поднесущие как и в канале LTE.

Таблица 1.1. — Конфигурация и длительность одного ресурсного блока (RU) для восходящего канала в рамках NB-IoT

NPUSCH формат	Расстояние между поднесу- щими	Количество поднесущих	Количество слотов	Продолжи- тельность	Схемы модуляции
формат 1	3,75 КГц	1	16	32 мс	2ФМн, 4ФМн
	15 КГц	1	16	8 мс	2ФМн, 4ФМн
		3	8	4 мс	4ФМн
		6	4	2 мс	4ФМн
		12	2	1 мс	4ФМн
формат 2	3,75 КГц	1	4	8 мс	2ФМн
	15 КГц	1	4	2 мс	2ФМн

Основными сигналами синхронизации в LTE-M являются первичный сигнал синхронизации (PSS, Primary Synchronization Signal) и вторичный сигнал синхронизации (SSS, Secondary Synchronization Signal) LTE. Они предназначены для обнаружения несущей частоты соты, синхронизации кадра, длины циклического префикса (CP, Cyclic Prefix), дуплексного режима и идентификатора соты БС (PCID, Physical Cell Identity). PSS и SSS передаются периодически [16].

$$N_{ID}^{CELL} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}, \quad (1.1)$$

где N_{ID}^{CELL} – идентификационная группа соты физического уровня (от 0 до 167), а $N_{ID}^{(2)}$ – идентичность внутри группы (от 0 до 2). Первичный сигнал синхронизации (PSS) связан с идентификатором соты в группе ($N_{ID}^{(2)}$). Вторичный сигнал синхронизации (SSS) связан с идентификационной группой соты ($N_{ID}^{(1)}$) и идентификационной информацией соты внутри группы ($N_{ID}^{(2)}$).

Чтобы получить $N_{ID}^{(1)}$, необходимо успешно демодулировать PSS. Затем SSS можно демодулировать и объединить со значением $N_{ID}^{(2)}$, чтобы получить $N_{ID}^{(1)}$. Как только значения $N_{ID}^{(1)}$ и $N_{ID}^{(2)}$ будут сформированы, можно будет определить идентификатор соты (N_{ID}^{CELL}).

Отметим, что технология LTE поддерживает 504 PCID, которые определяются как

$$PCID = 3PCID^1 + PCID^2, \quad (1.2)$$

где $PCID^1$ служит идентификатором группы, а $PCID^2$ – идентификатором соты внутри группы. Коэффициент 3, в данном случае, выбран не случайно – сота LTE обычно содержит 3 сектора, что позволяет использовать $PCID^1$ в качестве идентификатора одной базовой станции. Сигнал первичной синхронизации PSS, который кодируется с использованием последовательности Задова-Чу и передается каждые 5 мс – в подкадрах 0 и 5, как показано на рис. 1.7, зависит от $PCID^2$. Сигнал вторичной синхронизации включает в себя информацию о $PCID^1$ и $PCID^2$, кодируется с использованием последовательности максимальной длины и передается также с периодом 5 мс.

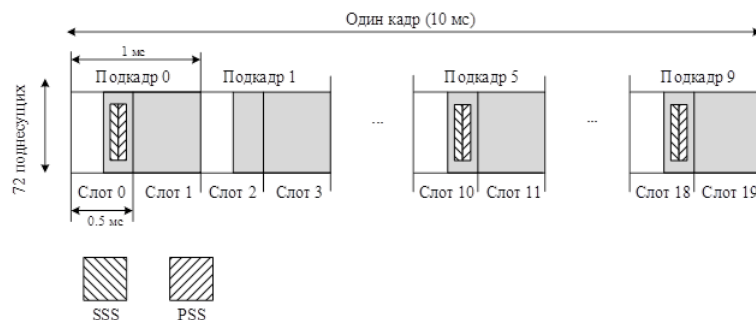


Рисунок 1.7. Сигналы синхронизации LTE-M FDD [20]

После декодирования PSS и SSS, терминал LTE-M осуществляет прием MIB, который передается в физическом широковещательном канале (PBCH, Physical Broadcast Channel) в каждом 9 подкадре для FDD (от англ. Frequency-division duplexing) и в 5 для TDD (от англ. Time Division Duplex). Также как и в LTE, PBCH всегда передается в виде четырех символов OFDM (от англ. Orthogonal frequency-division multiplexing) в подкадре № 0 в каждом кадре (и № 9 либо № 5, если разрешены повторы для FDD либо TDD, соответственно). Прием MIB позволяет терминалу установить синхронизацию с сетью и получить информацию, необходимую для приема SIB1, а также дальнейших SIB. После получения SIB1 АУ считается полностью синхронизированным с БС.

После выполнения всех операций выполняется процедура случайного доступа. Основная информация о процедуре RACH сообщается АУ через SIB2. Таким образом, первым шагом случайного доступа в LTE-M является передача SIB2, информация которой служит для конфигурации каждого окна случайного доступа. Это может быть информация о ресурсах RACH, таких как время,

частота, идентификатор преамбулы и т.д. Ответом АУ на полученную информацию SIB2 является сообщение с результатами конфигурации АУ о режимах работы уровня СЕ с учётом затухания сигнала SIB2 от БС.

Далее процедура RACH примерно соответствует NB-IoT за исключением некоторых различий, которые описаны ниже. Во-первых, это максимальное количество преамбул msg-1, которое составляет 64, в отличие от 48 преамбул в NB-IoT. Во-вторых, большинство физических каналов используют стандартную для LTE полосу, поэтому названия каналов без приставки «NB», т.е. «Narrowband» [22][23].

Отметим, что в отличие от NB-IoT, на этапе случайного доступа к каналу устройство LTE-M может использовать не только 4ФМн, но и такие кодово-модуляционные схемы, как ООК (от англ. On-Off Keying), 2ФМн, 4ФМн. Они устанавливаются в связи с учётом типов управляющей информации восходящей линии связи (UCI, Uplink Control Information):

- UL запрос планирования (SR, Scheduling Request),
- DL HARQ отклики принятия или неприятия (ACK, acknowledge или NACK, negative acknowledge),
- DL Информация о состоянии канала (CSI, Channel State Information)

После установки соединения начинается этап передачи данных. Она осуществляется как в восходящей, так и в нисходящей линиях связи. Однако, для организации этих передач сначала БС устанавливает дополнительные DCI.

Основные правила распределения ресурсов передачи данных содержатся в DCI канала управления нисходящей линии связи (MPDCCH, Physical Downlink Control Channel) и позволяют передавать данные с низкими требованиями во время промежутка между подкадрами, либо во время переключения устройства с приёмника на передатчик, и наоборот. Информация, которая передаётся в пакете, соответствует NB-IoT: выделенные ресурсы каналов передачи данных, кодово-модуляционные схемы, число повторений и т.д. В отличие от NB-IoT присутствует дополнительно формат DCI для установки мощности АУ. Остальные форматы аналогичны форматам DCI NB-IoT.

Устройство LTE-M должно контролировать MPDCCH для следующих типов информации:

- команда управления мощностью UL (DCI Формат 3 / 3A), только в LTE-M,

- информация о планировании UL (формат DCI 6-0A / 6-0B в режиме CE A / B), аналог N0 в NB-IoT,
- информация о планировании DL (формат DCI 6-1A / 6-1B в режиме CE A / B), аналог N1 в NB-IoT,
- индикатор пейджинга или обновления SI (формат DCI 6-2), аналог N2 в NB-IoT.

Такие формы DCI используются для динамического планирования в DL. Для более подробного описания планирования следует обратиться к работе [15] и таблице 1.2 со схемами модуляции и кодирования.

После получения команд управления по каналу MPDCCH, выполняется передача данных. Основными каналами передачи данных в LTE-M, как и в NB-IoT, являются PDSCH (от англ. Physical Downlink Shared Channel) и PUSCH (от англ. Physical Uplink Shared Channel), только с более широкой полосой каналов. Рассмотрим подробнее особенности этих каналов.

В физическом общем канале нисходящей линии связи (PDSCH) передаются данные для одного устройства, либо для широковещательной передаче информации, такой как системная информация, пейджинговые сообщения и другие служебные данные.

Физический общий канал восходящей линии связи (PUSCH) напоминает ту же структуру передачи данных, что и в PDSCH, за исключением незначительных особенностей. В частности, при динамическом планировании используется блок физических ресурсов (PRB, Physical Resource Block) в 3–4 раза меньше. Это обусловлено максимальной мощностью передачи АУ, для которой нецелесообразно использование широкополосный канала.

Для сравнения с NB-IoT, данные каналы похожи на NPDSCH и NPUSCH из рис. 1.6. Однако, есть ещё отличия в канале многоадресного трафика (SC-MTCH, multicast traffic channels). Устройства LTE-M могут работать в режиме расширенного покрытия (CE) по 128 каналам многоадресного трафика (64 канала - NB-IoT). Каждый SC-MTCH (от англ. Single Cell Multicast Transport Channel) LTE-M АУ может быть настроен для поддержки до 1 Мбит/с на 1,4 МГц или 4 Мбит/с на 5 МГц, со скачкообразной перестройкой частоты или без нее. Таким образом, LTE-M может использовать канал многоадресного трафика постоянно (NB-IoT только опционально).

Алгоритм закрытия соединения в LTE-M аналогичен алгоритму NB-IoT. Единственное отличие заключается в том, что БС в сети LTE-M передаёт в рам-

Таблица 1.2. — Схемы модуляции и кодирования PDSCH в LTE-M [15]

MCS №	Схема модуля- ции	TBS №	CE модель A № PRB						CE модель B № PRB	
			1	2	3	4	5	6	4	6
0	4ФМН	0	16	32	56	88	120	152	88	152
1	4ФМН	1	24	56	88	144	176	208	144	208
2	4ФМН	2	32	72	144	176	208	256	176	256
3	4ФМН	3	40	104	176	208	256	328	208	328
4	4ФМН	4	56	120	208	256	328	408	256	408
5	4ФМН	5	72	144	224	328	424	504	328	504
6	4ФМН	6	328	176	256	392	504	600	392	600
7	4ФМН	7	104	224	328	472	584	712	472	712
8	4ФМН	8	120	256	392	536	680	808	536	808
9	4ФМН	9	136	296	456	616	776	936	616	936
10	16КАМ	9	144	328	504	680	872	1032	Не используется	
11	16КАМ	10	144	328	504	680	872	1032		
12	16КАМ	11	176	376	584	776	1000	1192		
13	16КАМ	12	208	440	680	904	1128	1352		
14	16КАМ	13	224	488	744	1000	1256	1544		
15	16КАМ	14	256	552	840	1128	1416	1736		

ках нисходящего канала PDSCH, который работает в полосе LTE-M, в отличие от NB-IoT для NPDSCH.

В данном подразделе рассмотрим только технологию EC-GSM-IoT. Объясним отличие EC-GSM-IoT от технологий на основе LTE. Далее подробно рассмотрим взаимодействие АУ и БС.

Процедура синхронизации выполняется по сигналам от БС. Перед описанием особенностей коммуникации в технологии EC-GSM-IoT следует отметить, что существуют значительные отличия от технологий на основе LTE в назначениях каналов передачи данных между АУ и БС. Это связано с тем, что родоначальником технологии EC-GSM-IoT является GSM. Подобно другим технологиям СIoT процедура синхронизации терминала EC-GSM-IoT осуществляется в два этапа. На начальном этапе для грубой синхронизации по частоте и времени используется канал коррекции частоты (FCCH, Frequency Correction Channel). Отметим, что это единственный физический канал, заимствованный

EC-GSM-IoT из GSM. Канал использует структуру кадров множественного доступа с разделением каналов по времени (TDMA, Time Division Multiple Access), который содержит 8 временных интервалов (TS, Time Slot). Для ссылки на конкретный момент времени, который превышает длительность кадра TDMA, кадры TDMA сгруппированы в иерархическую структуру кадра, включая мультiframe, суперкадры и гиперкадры. Временная привязка в общей структуре кадра находится в пределах точности гиперкадра и составляет примерно 3,5 часа. Таким образом, FCCH в DL отображается в 0, 10, 20, 30 и 40 TDMA кадрах. Объединение 50 кадров TDMA (234,4 мс) в терминологии GSM называется мультикадром 51, который передаётся во временном слоте TS0 (нумерация временных интервалов с 0 до 7). Сам кадр TDMA имеет длительность около 4,615 мс.

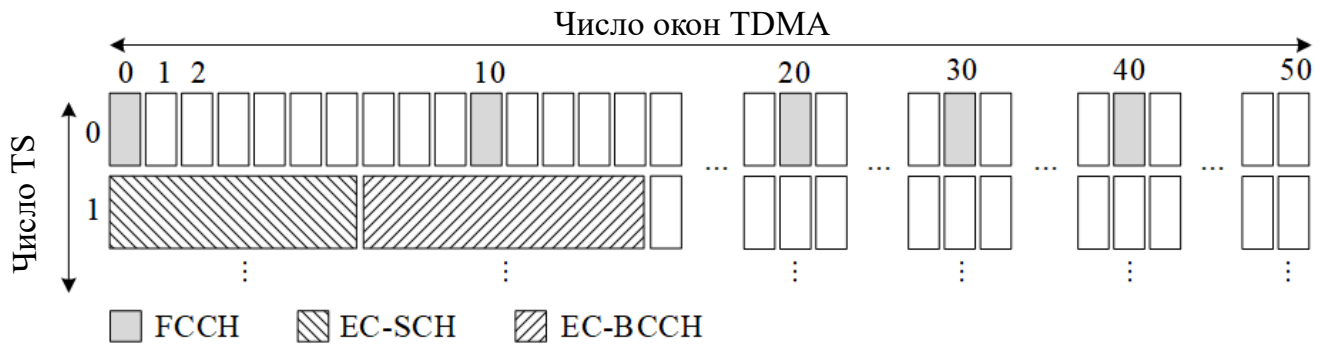


Рисунок 1.8. Размещение каналов синхронизации и передача системной информации EC-GSM-IoT [13]

Для более точной синхронизации используется канал синхронизации с расширенным покрытием (EC-SCH, Extended Coverage Synchronization Channel). EC-SCH по DL помогает АУ получить информацию о структуре кадра с точностью до четверти гиперкадра, который имеет размер 3 ч 28 мин 53 с 760 мс. Это 2048 суперкадров, которые, в свою очередь, состоят из 26 мультикадров 51 (6,12 с) (см. рис. 3.2 [15]). На данном этапе устройству достаточно по двум битам EC-SCH определить, в какой четверти гиперкадра содержится служебная информация. Он, также как FCCH, расположен в мультикаде 51, занимая TS1. Аналогом данного канала в LTE-M и NB-IoT является MIB.

После точной синхронизации АУ принимает системную информацию по каналу управления расширенного покрытия (EC-BCCH, Extended Coverage Broadcast Control Channel). Отличительной особенностью этой информации в

EC-GSM-IoT является то, что она информирует АУ не только о характеристиках данной соты, но и о других сотах в системе, позволяя АУ самостоятельно переключаться между БС. В совокупности, системная информация передаётся циклически каждые восемь мультикадров.

Подробная временная диаграмма сигналов этапа синхронизации представлена на рис. 1.8.

После процедуры синхронизации АУ и БС наступает этап установления соединения с помощью процедуры случайного доступа. На данном этапе все нижеописанные каналы для установления соединения размещаются в 52 мультифрейме (240 мс), в отличие от 51 мультифрейма (235.4 мс) из предыдущего подраздела. Это объясняется тем, что традиционно устройству GSM назначались ресурсы на канале пакетного трафика (мультикадр 52). Процедура синхронизации обеспечивала дрейф двух мультикадров, поэтому в EC-GSM-IoT применяются два типа мультифреймов, чтобы 26 51-ых мультифреймов и 25.5 52-ых мультифреймов формировали одинаковые по длительности суперкадры.

Перед установкой соединения между устройством и сетью устройству необходимо инициировать произвольный доступ к каналу (RACH). При установке соединения с БС АУ посылает пакет запроса на выделение канала передачи данных в RACH. БС назначает абоненту определённый временной слот системы множественного доступа с разделением каналов по 8 частотным каналам (FDMA, Frequency Division Multiple Access) и отвечает в канале уведомлений о предоставлении доступа (AGCH, Access Grant Channel), после чего АУ может получать и отправлять сообщение. В случае, если RACH-запрос не попал в временной слот (TS, Time Slot), АУ через псевдослучайный промежуток времени посылает его снова [24]. Полезная нагрузка запроса доступа, обычно, содержит основание для подключения АУ к БС и случайную ссылку, чтобы избежать конфликта с другими устройствами, которые тоже пытаются подключиться.

В отличие от стандартной процедуры RACH из GSM, EC-GSM-IoT также может использовать канал случайного доступа с расширенным охватом (EC-RACH, Extended Coverage Random Access Procedure). Отличием данного процесса от RACH является использование до двух временных слотов (TS) TDMA. Для такой конструкции есть свои причины. Отображение двух TS расширяет покрытие на большее расстояние, чем отображение одного TS. Причина в том, что устройству необходимо поддерживать согласованность передачи по

двум TS в кадре TDMA, и, следовательно, выигрыш от обработки на базовой станции увеличивается.

Для случая отображения одного TS используется один тип класса расширения (CC, Coverage Classes) CC1, а для двух TS уже существует три класса расширения – CC2, CC3 и CC4. Таким образом, чтобы обеспечить расширенное покрытие и, при этом, обеспечить относительно эффективную работу сети EC-GSM-IoT, применяют четыре класса покрытия. С увеличением класса растёт дальность связи.

Для поддержания соединения при осуществлении передачи данных необходимо использовать канал трафика пакетных данных (EC-PDTCH, Extended Coverage Packet Data Traffic Channel), который предназначен для передачи основных данных как от БС до АУ, так и по UL до БС. Блок данных канала трафика состоит из четырёх пакетов, которые передаются в одном TS в четырех последовательных кадрах TDMA. Сам блок данных называется радио блоком и передается через основной интервал времени передачи (BTI, Basic Transmission Time Interval), равный 20 мс. Логический канал EC-PDTCH отображается в одном или нескольких физических каналах, называемых физическим каналом данных (PDCH, Physical Data Channel). Как и в случае с общим каналом управления (EC-CCCH, Extended Coverage for GSM-based Internet of Things), для обеспечения энергоэффективной работы EC-PDTCH также включает в себя указание DL на CC в каждом блоке. Параллельно с каналом передачи данных EC-PDTCH работает канал управления настройками канала трафика. Он связан с каналом управления пакетной передачей с расширенным покрытием (EC-PACCH, Extended Coverage Packet Associated Control channel) и содержит управляющую информацию: уровень выходной мощности, назначение ресурсов канала для повторной передачи и битовая карта ACK / NACK (подтверждён / не подтверждён) для процесса HARQ в UL.

В технологии EC-GSM-IoT нет специального сигнала закрытия соединения. АУ поддерживает постоянную связь с ближайшими базовыми станциями с момента попадания в зону работы этих станций.

Далее подробно рассматриваются три технологии CIoT: NB-IoT, LTE-M и EC-GSM-IoT. На сегодняшний день в русскоязычной литературе проведено мало исследований, в которых подробно описываются все три технологии вместе. Поэтому проведён анализ существующей литературы по технологиям CIoT. Дана оценка популярности каждой из них в научных источниках. Рассмотрены и

проанализированы все этапы - от включения АУ до подключения к сети и передачи сообщения БС. На каждом этапе подробно описаны особенности каждой из трех технологий, выделены и проанализированы общие моменты последовательности работы устройств. Данное описание будет полезно широкому кругу читателей, которые хотят получить как общее представление о принципах работы, так и о возможностях технологий СIoT. Эта информация может быть использована для дальнейших исследований в области СIoT.

1.3 Особенности использования канала случайного множественного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением

По результатам сравнительного анализа можно сделать выводы, что для сотовых сетей используется подход, который в англоязычной литературе получил названия Grant-Based или Connection-Based [25]. В диссертационной работе такой способ называем двухэтапным способом передачи данных (передача осуществляется в два этапа). На первом этапе в режиме случайного доступа передаётся запрос на выделение ресурса для передачи данных. А на втором этапе – в выделенном ресурсе передаются данные. Первый этап называем этапом случайного доступа, а второй – этапом передачи данных.

В сетях с низким энергопотреблением используется подход, который в англоязычной литературе получил названия Grant-Free или Connection-Free [25]. В диссертационной работе такой способ называем одноэтапным способом передачи данных. Основная идея состоит в том, что случайный доступ и передача данных осуществляются одновременно в один этап.

Объединяет все выше рассмотренные подходы к организации передачи данных то, что решение о моменте передачи АУ принимают случайным образом, то есть используется метод случайного доступа к общему каналу. Рассматриваются модели, описывающие как одноэтапную, так и двухэтапную передачу данных.

При этом, как для двухэтапного, так и для одноэтапного метода возможно два сценария использования. Первый сценарий – с конечным числом АУ. Число этих АУ не меняется на всём протяжении работы системы. При этом, у АУ

могут появиться сообщения, которые передаются на БС. Во втором сценарии число АУ в процессе работы меняются и это число АУ ничем не ограничено. Потенциально бесконечным числом АУ могут появляться в системе и, после передачи сообщения, покидать систему. Далее, первый сценарий будем называть системой с конечным числом АУ, а второй сценарий – с потенциально неограниченным числом АУ.

1.4 Использование Марковских цепей для описания процесса функционирования канала случайного множественного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением

Рассмотрим модель, где предполагается наличие M абонентских устройств (АУ) [26], наличие l каналов как для одноэтапной, так и для двух-этапной передачи. Время работы системы разбито на интервалы времени, которые называются окнами. Каждое АУ может находиться в двух состояниях: активном (имеется готовое для передачи сообщение) «А» и пассивном «П» (см. рис. 1.9). В активном состоянии АУ в режиме случайного доступа пытается передать сообщение на БС. 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, как проиллюстрировано на рис. 1.9 [27]. Данная модель полностью описывается набором параметров: M – число АУ, q – вероятность перехода АУ в активное состояние и l – число преамбул/каналов.

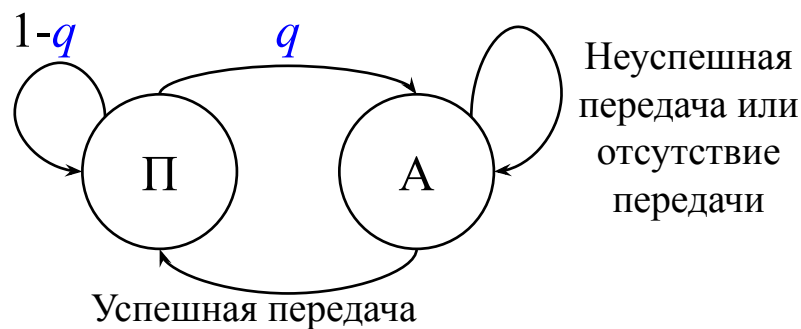


Рисунок 1.9. Состояние АУ

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:

$$N_{act}^{t+1} = N_{act}^t - T(N_{act}^t) + V^t(N_{act}^t), \quad (1.3)$$

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 (1.3) 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:

$$p(j|i) = \sum_{m=\max(0, i-j)}^{\min(M-j, l)} pbin(m - (i - j), M - i, q) (1 - q)^{M-m-j} Pr\{T = m|i\}, \quad (1.4)$$

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

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

При вычислении значения вероятности $Pr\{T = m|i\}$ используется решение задачи распределения шаров по урнам и нахождения числа урн, в которой содержится ровно один шар. Обозначим через $P(l, k, m)$ вероятность события, что при случайном выборе l преамбул/каналов k АУ, 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 будет содержать по одному шару. При $m > k$ вероятность такого события равна 0, а при $m \leq k$ следуя [28], эта вероятность определяется как:

$$P(l, k, m) = \frac{(-1)^m l! k!}{l^k m!} \sum_{f=m}^{\min(l, k)} \frac{(-1)^f (l - f)^{k-f}}{(f - m)! (l - f)! (k - f)!}. \quad (1.5)$$

Обозначим через $\mu(i, l)$ вероятность того, что активное АУ передает в текущем окне при условии, что i АУ активно и используется l преамбул/каналов.

Для оптимальной стратегии передачи эта вероятность задается следующим образом:

$$\mu(i, l) = \begin{cases} 0, & \text{если } i = 0 \\ \min\left(\frac{l}{i}, 1\right), & \text{иначе} \end{cases}. \quad (1.6)$$

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

$$Pr\{T = m|i\} = \sum_{k=m}^i C_i^k \mu(i, l)^k (1 - \mu(i, l))^{i-k} P(l, k, m). \quad (1.7)$$

Описанную выше модель будем называть *моделью с бернуллиевским входным потоком*. Применительно к этой модели рассмотрим следующий предельный переход: $M \rightarrow \infty$, $q \rightarrow 0$, при этом $Mq = \text{const} = \lambda$. Выражение (1.3) принимает следующий вид:

$$N_{act}^{t+1} = N_{act}^t - T(N_{act}^t) + V^t. \quad (1.8)$$

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*, рассмотренной выше, случайный процесс $(N_{act}^t, t = 0, 1, \dots)$ описывается цепью Маркова, но не с конечным, а со счётным числом состояний. Вероятность переходов задается по следующей формуле:

$$p(j|i) = \sum_{m=\max(0, i-j)}^l \frac{\lambda^{m-(i-j)}}{(m - (i - j))!} e^{-\lambda} Pr\{T = m|i\}. \quad (1.9)$$

На основе переходных вероятностей Марковской цепи можно вычислить стационарное распределение и затем вычислить среднюю задержку.

Рассмотрим работу системы в установившемся режиме. Для этого введём в рассмотрение следующие случайные величины:

N – число активных АУ,

D – число окон от момента перехода АУ в активное состояние до момента, когда датчик переходит в пассивное состояние.

Следует отметить, что для модели с пуассоновским входным потоком стационарное распределение может быть найдено только в том случае, если

Марковская цепь эргодична. Для проверки условий эргодичности может быть применен критерий Фостера (см., например, теорему 1 из [29]). На основе критерия Фостера показывается, что при $\lambda < le^{-1}$ цепь эргодична, следовательно стационарное распределение существует и может быть найдено его числовое значение с любой заданной точностью.

1.5 Метод вычисления переходных вероятностей Марковской цепи, учитывающий особенности функционирования канала случайного множественного доступа

Случай, рассмотренный в подразделе 1.4, является обобщением модели из работы Клейнрока для использования нескольких каналов. В этом случае возникает необходимость в вычислении функций (1.5)–(1.7), что повышает вычислительные затраты. 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.

Для упрощения задачи исследования зависимостей характеристик, рассмотрим исходный вариант трёхшаговой процедуры вычисления средней задержки для модели с бернуллиевским входным потоком.

Для каждого значения параметра q следует проделать следующие шаги:

Шаг 1. Вычислить $(M+1)^2$ значений переходных вероятностей. Для каждой переходной вероятности $p(i|j)$ выполнить:

Шаг 1.1. Вычислить $Pr\{T = m|i\}$ по формулам (1.5) и (1.7) (Сложность $O(f(l, m, i) = i(i + l + k + \min(l, k)))$);

Шаг 1.2. Используя значения $Pr\{T = m|i\}$ и параметр q , вычислить $p(i|j)$ по формуле (1.4). (Сложность $O(f(M, j, l, m, i) = \min(M - j, l)(m - i + j + M - i + f(l, m, i)))$).

Шаг 2. Вычислить стационарное распределение (Сложность $O((M+1)^3)$).

Шаг 3. Вычислить среднюю задержку (Сложность $O(M+1)$).

Общая сложность $n \cdot [(M+1)^2 \cdot (\text{Шаг 1.1} + \text{Шаг 1.2}) + \text{Шаг 2} + \text{Шаг 3}]$.

Для ускорения трёхшаговой процедуры вычисления средней задержки, построение матрицы выполняется заранее и некоторого числа АУ строки матрицы не меняются.

Для каждого значения параметра q следует проделать следующие шаги:

Шаг 0. Расчёт таблицы (Объём памяти $(M + 1) \cdot (l + 1)$, Сложность $O(f(l, m, i) = i(i + l + k + \min(l, k)))$);

Шаг 1. Вычислить $(M + 1)^2$ значений переходных вероятностей. Для каждой переходной вероятности $p(i|j)$ выполнить:

Шаг 1.1. Используя значения $Pr\{T = m|i\}$ из таблицы (Шаг 0) и параметр q , вычислить $p(i|j)$ по формуле (1.4). (Сложность $O(f(M, j, l, m, i) = \min(M - j, l)(m - i + j + M - i))$);

Шаг 2. Вычислить стационарное распределение (Сложность $O((M + 1)^3)$);

Шаг 3. Вычислить среднюю задержку (Сложность $O(M + 1)$).

Общая сложность $n[(M + 1)^2(\text{Шаг 1.1} + \text{Шаг 1.2}) + \text{Шаг 2} + \text{Шаг 3}]$.

Отношение будет зависеть от n , M , l . Для бесконечного числа пользователей ускорение зависит от интенсивности. Чем больше интенсивность, тем больше вычислений необходимо произвести. Ограничение размера матрицы зависит от точности, с которой будем вычислять вероятность.

В работе [26] предложен метод двухэтапного вычисления переходных вероятностей Марковской цепи, описывающий функционирование системы со случайным множественным доступом, который позволяет уменьшить вычислительные затраты при исследовании зависимости характеристик системы от параметров входного потока. На первом этапе задается максимальное возможное число активных АУ в системе, которое далее обозначается, как M_{max} , с учётом которого в дальнейшем будут рассчитаны характеристики системы. 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 (1.5) и (1.7) 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 (1.4). Для пуассоновской модели параметром входного потока выступает значение λ и вычисление выполняется по формуле (1.9). Найдется такое i_{max} , что при любых $i \geq i_{max}$ значение $Pr\{T = m|i\}$ перестает зависеть от i и вычисляется по формуле 1.10:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \left(Pr \{T = m | i \geq i_{max}\} - C_l^m e^{-m} (1 - e^{-1})^{l-m} \right) \rightarrow 0. \quad (1.10)$$

При вычислении используется следующая аппроксимация:

$$Pr \{T = m | i \geq i_{max}\} = C_l^m e^{-m} (1 - e^{-1})^{l-m}, \quad (1.11)$$

где i_{max} – это максимальное значение числа активных АУ, начиная с которого для вычисления вероятности используется формула аппроксимации. Вероятность успехов m при общем числе АУ i рассчитана с помощью аппроксимации $Pr \{T = m | i\}$ по формуле (1.11), представлена на рис. 1.10.

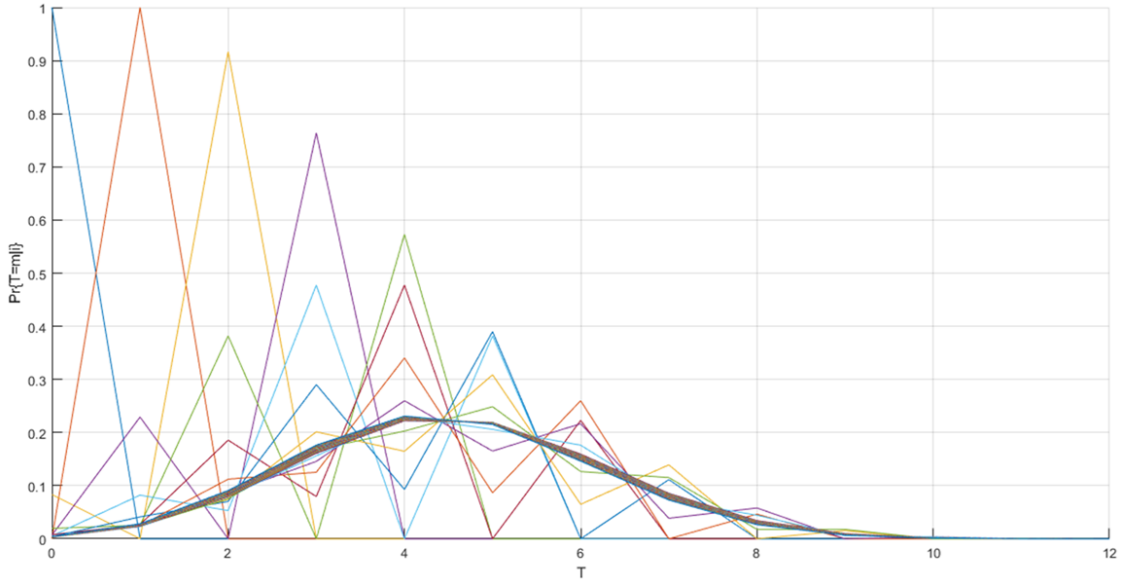


Рисунок 1.10. Зависимость $Pr \{T = m | i\}$ от T

Для каждого значения l определено i_{max} такое, что использование аппроксимации даёт близкое значение к вероятности успехов для m АУ близкими при заданной точности с расчётом по формуле (1.5) или 1.7.

Учет этого фактора позволяет снизить затраты памяти на хранение значений $Pr \{T = m | i\}$.

Обоснование использования формулы (1.11) при больших значениях i вместо формул (1.5) и (1.7) состоит в следующем. Пусть число активных АУ стремится к бесконечности. В этом случае вероятность события, когда конкретная преамбула будет выбрана только одним активным АУ, стремится к e^{-1} . Эти события для каждой из l преамбул/каналов происходят независимо. Соответственно, случайная величина T будет распределена по биномиальному закону с параметрами e^{-1} и l .

1.6 Выводы по разделу

В разделе введено понятие крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением и приведён список современных технологий, на основе которых могут быть построены такие сети. В качестве объекта исследований выбраны технологии NB-IoT, LTE-M и LoRa.

Проведён сравнительный анализ выбранных технологий. Выявлено, что общей особенностью является использование случайного множественного доступа к общему каналу связи.

Описаны сценарии с фиксированным числом АУ и с потенциально неограниченным числом АУ.

Для сценария с фиксированным числом АУ введена модель с бернуллиевским входным потоком, а для сценария с потенциально неограниченным числом АУ введена модель с пуассоновским входным потоком.

Для введённых моделей предложен метод вычисления переходных вероятностей Марковской цепи, описывающий функционирование системы со случайным множественным доступом, отличающийся от ранее известных тем, что вычисление производится в два этапа. На первом этапе производится вычисление, не учитывающее параметры входного потока, а на втором этапе — выполняются вычисления с учётом данного параметра.

Таблица 1.3. — Организация моделей построения сетей по разделам.

Процесс появления сообщений	Организация передачи данных	Одноэтапная передача	Двухэтапная передача
	бернуллиевский поток	Разделы 1 и 4	Разделы 1 и 3
	пуассоновский поток	Разделы 1 и 2	Разделы 2 и 3

Показано, что данный метод может быть использован как для модели с бернуллиевским входным потоком, так и для модели с пуассоновским входным потоком. Предложенный метод позволяет сократить вычислительные затраты во много раз (от 24 до 60) в зависимости от числа используемых преамбул.

Использование моделей, введённых в первом разделе с учётом особенностей сценария использования и организации случайного доступа к общему каналу связи в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением, рассмотрим в последующих разделах диссертационной работы. Взаимосвязь моделей представлена в таблице 1.3. Строки таблицы соответствуют сценариям с конечным и с потенциально неограниченным числом АУ. А столбцы таблицы соответствуют способу организации случайного доступа к общему каналу связи в один или два этапа. На пересечении строк и столбцов таблицы указаны номера разделов, в которых рассмотрим модели появлений сообщений при определённой организации передачи данных.

2. Массовая межмашинная связь в технологии сотовых сетей для неподвижных объектов

2.1 Вводные замечания по разделу

Данный раздел посвящён моделям и методам для технологий, в которых имеется этап случайного доступа и этап передачи данных [30]. Они позволяют повысить скорость передачи за счёт распределения частотно-временного ресурса между этапами в рамках одной технологии, уменьшить задержку путём распределения АУ для случая, когда в одной сети используются разные технологии [31][32]. Рассматриваются две взаимосвязанные задачи. В начале решим задачу перераспределения частотно-временного ресурса между этапом случайного доступа и этапом передачи данных. Затем рассмотрим случай, когда в рамках одной сети БС совмещаются две системы, в которых на этапе случайного доступа используется разное число преамбул. Для этого случая решим задачу распределения АУ между этими двумя системами.

При решении первой задачи отметим, 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. Предложим модель, которая отражает основные особенности систем, в которых имеются эти два этапа.

2.2 Модель, описывающая разделение частотно-временного ресурса между этапом случайного доступа и этапом передачи данных

В работе [30] рассматривается модель перехода от непрерывного к дискретному по времени каналу, решается задача распределения частотно-временных ресурсов между этапом случайного доступа и этапом передачи данных, которая сводится к задаче распределения числа отсчётов в дискретном канале между этими этапами. На основе принципа насыщения, предлагается про-

стой метод, определяющий оптимальное распределение ресурсов между двумя этапами, максимизирующий эффективность использования ресурсов канала системы. Кроме того, такая модель дискретного канала позволяет рассматривать решения оптимизационной задачи повышения скорости считывания меток в технологии RFID [33][34], где также используется двухэтапный способ передачи данных. Она не является крупномасштабной сетью с низким энергопотреблением. Однако, способ доступа к общему каналу в этих системах тоже основан на случайном доступе.

В данном разделе представлены:

- формализация и решение модели с этапами случайного доступа и передачи данных в сетях будущих поколений 6G mMTC RAT (от англ. Massive Machine-Type Communications Radio Access Technology)[35] в формате системы массового обслуживания с потерями на обоих этапах;
- использование принципа насыщения для определения оптимального распределения ресурсов на этапы случайного доступа и передачи данных, максимизируя эффективность использования ресурсов канала системы;
- результаты работы [30] показывают, что для широкого диапазона интенсивностей поступления сообщений, максимальное значение предельной выходной интенсивности системы гарантирует, что средняя задержка составляет 5-10% от оптимальной задержки.

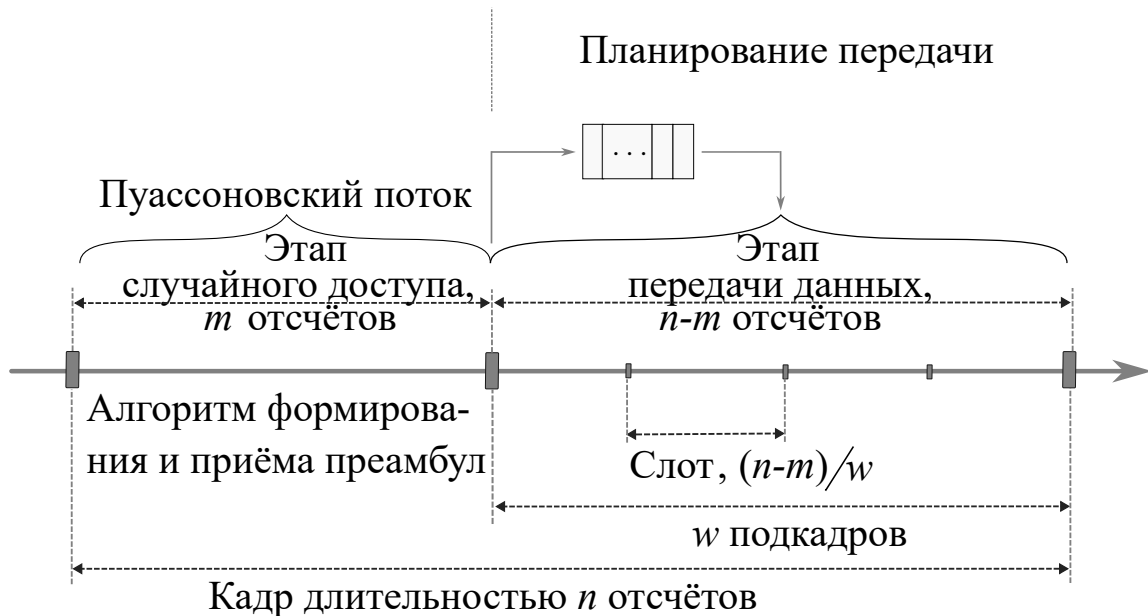


Рисунок 2.1. Описание системы

Рассмотрим восходящий канал в системе mMTC RAT, показанной на рис. 2.1. Предполагается организация канала множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access) с длительностью кадра T и шириной полосы B . Предполагается, что B_1T_1 и $(B - B_1)(T - T_1)$ – ресурсы, выделяемые для этапа случайного доступа и передачи данных. Частотно-временные ресурсы могут быть представлены n отсчётами, где n вычисляется по теореме Найквиста, $n = T/(1/2B) = 2TB$. Из n отсчётов $n_1 = T_1/(1/2B_1) = 2T_1B_1$ отсчётов распределяются для этапа случайного доступа, а оставшиеся $n_2 = n - n_1$ отсчётов назначаются для этапа передачи данных.

Для доставки пакета каждый АУ должен успешно завершить оба этапа, как описано ниже. На этапе случайного доступа каждая АУ случайным образом выбирает и передает преамбулу. Если передача успешна, то БС резервирует ресурсы для передачи пакетов и планирует его в одном из слотов этапа передачи данных [36].

Аналогично работам [37] и [38] рассмотрим канал с дискретным временем и аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), определяемым как $Y = \sum_{i=1}^{K_t} X_i + \Phi$, где Y представляет собой X_i , принимаемые и передаваемые пакеты, K_t – это число АУ, передающих в слоте t , $\Phi \sim \mathcal{N}(0,1)$. Следуя [29], максимальный предел энергии для каждого пакета равен nP , где P – полученная энергия на выборку, n – количество выборок в кадре.

Рассмотрим неограниченное число АУ поступающие с интенсивностью Λ пакетов/кадра. Не применяем никаких ограничений на выбор преамбул, используемых на этапе случайного доступа. Предполагаем, что существует алгоритм генерации преамбулы A , формирующий преамбулы по формуле $l = f_A(n_1)$, где n_1 – это количество выборок отведённых на этап случайного доступа, т. е. $n_1 \rightarrow l = f_A(n_1)$. Намеренно не концентрируем наше внимание на каком-либо конкретном алгоритме, чтобы разработанную в статье модель можно было использовать для любого алгоритма. Также предполагаем, что если в начале кадра t на этапе случайного доступа имеется N_t АУ, каждый из этих АУ принимает решение передать с вероятностью $\min(l/N_t, 1)$, выбрав один из l доступных преамбул случайным образом и равномерно. Исследования в [40][41] предлагают способ аппроксимации значения N_t .

Каждый пакет содержит k битов данных. С помощью схемы модуляции и кодирования (MCS) на основе k бит формируется пакет, содержащий n_2/w

отсчётов. Используем понятие слотов, где слот определяется как интервал времени, необходимый для передачи n_2/w отсчётов. Предполагается, что АУ имеют синхронизацию с БС на уровне слотов. Поскольку предполагается, что пакеты имеют малый размер, Шеннон не обеспечивает надежной аппроксимации ошибочного приема пакета на этапе передачи данных. Для моделирования используется недавнее расширение теоремы кодирования Шеннона для пакетов конечного размера [42].

$$p_e(n_2/w, k, P) = Q \left(\frac{\frac{1}{2} \log_2(1 + P) + \frac{1}{2} \log_2 \frac{n_2}{w} - k}{\sqrt{\frac{n_2}{w} \frac{P}{2} \frac{P+2}{(P+1)^2} \log_2 e}} \right), \quad (2.1)$$

где $Q(\cdot)$ является дополнительной функцией ошибок.

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.

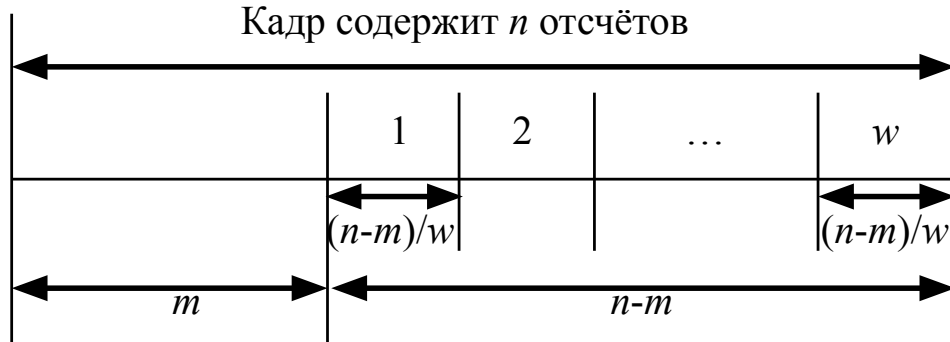


Рисунок 2.2. Временная диаграмма модели системы

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. Рассмотрим передачу по каналу с АБГШ. Всё время разбито на кадры, как показано на рис. 2.2. Процесс появления абонентов в системе описывается пуассоновским потоком с интенсивностью Λ [сообщ./кадр]. У каждого АУ имеется одно единственное сообщение. После успешной передачи сообщения АУ покидает систему. Случайная величина D , равная интервалу времени от момента появления АУ в системе до его выхода, называется средней задержкой. В качестве показателя производительности системы рассмотрим верхнюю грань по

интенсивности входного потока, для которой средняя задержка в системе конечна:

$$\Lambda_{cr} \triangleq \sup \{ \Lambda : E[D] < \infty \}. \quad (2.2)$$

Отметим, что задача максимизации скорости передачи эквивалентна задаче максимизации Λ_{cr} .

Работа системы описывается следующим образом: когда пакет готов к передаче выполняется синхронизация АУ с БС. На этапе случайного доступа работа описывается моделью с пуассоновским входным потоком, введенной в первом разделе диссертационной работы. На этапе передачи данных, в соответствии с каждой успешно протектированной преамбулой, формируется очередь для предоставления ресурсов на передачу. В каждом кадре выделяется W слотов для передачи данных. БС сообщает – в каких слотах должны передавать абоненты, которые на этапе случайного доступа выбрали соответствующую преамбулу. Если несколько абонентов выбрали одну и ту же преамбулу, то передача данных всегда будет неуспешна. Если преамбула выбрана только одним абонентом, то данные могут быть успешно декодированы с некоторой вероятностью. Случайным образом выбирается преамбула каждым АУ и инициируется передача. Как только преамбулы получены на БС, по обратному каналу управления сообщаются преамбулы, которые были успешно получены. Каждую успешно полученную преамбулу, БС ставит в очередь АУ на этап передачи данных. Для тех АУ, у которых преамбулы успешно получены, выделяются ресурсы БС на этап передачи данных. Остальные АУ повторяют процедуру случайного доступа в следующем кадре.

В каждом кадре БС выделяет определенное количество ресурсов для передачи. Эти ресурсы предоставляются АУ, которые успешно прошли этап случайного доступа. Планирование выполняется в порядке очереди (FCFS, First Come, First Served).

Проиллюстрируем работу системы на примере. Состояние системы показано на рис. 2.3. В примере количество преамбул $l = 5$, в кадре $w = 4$ слота для передачи данных. Число АУ на этапе случайного доступа и этапе передачи данных $N_t = 6$ и $M_t = 6$, а время их прихода записываются в списки N_t^{list} и M_t^{list} . Очередь содержит $W_t = 5$ АУ, при этом запланированные АУ находятся в W_t^{list} . Как показано на рис. 2.3, только два АУ успешно покидают этап передачи данных, а количество неудачно переданных сообщений АУ $Z_t = 1$. Z_t^{list} содержит моменты прибытия этих АУ.

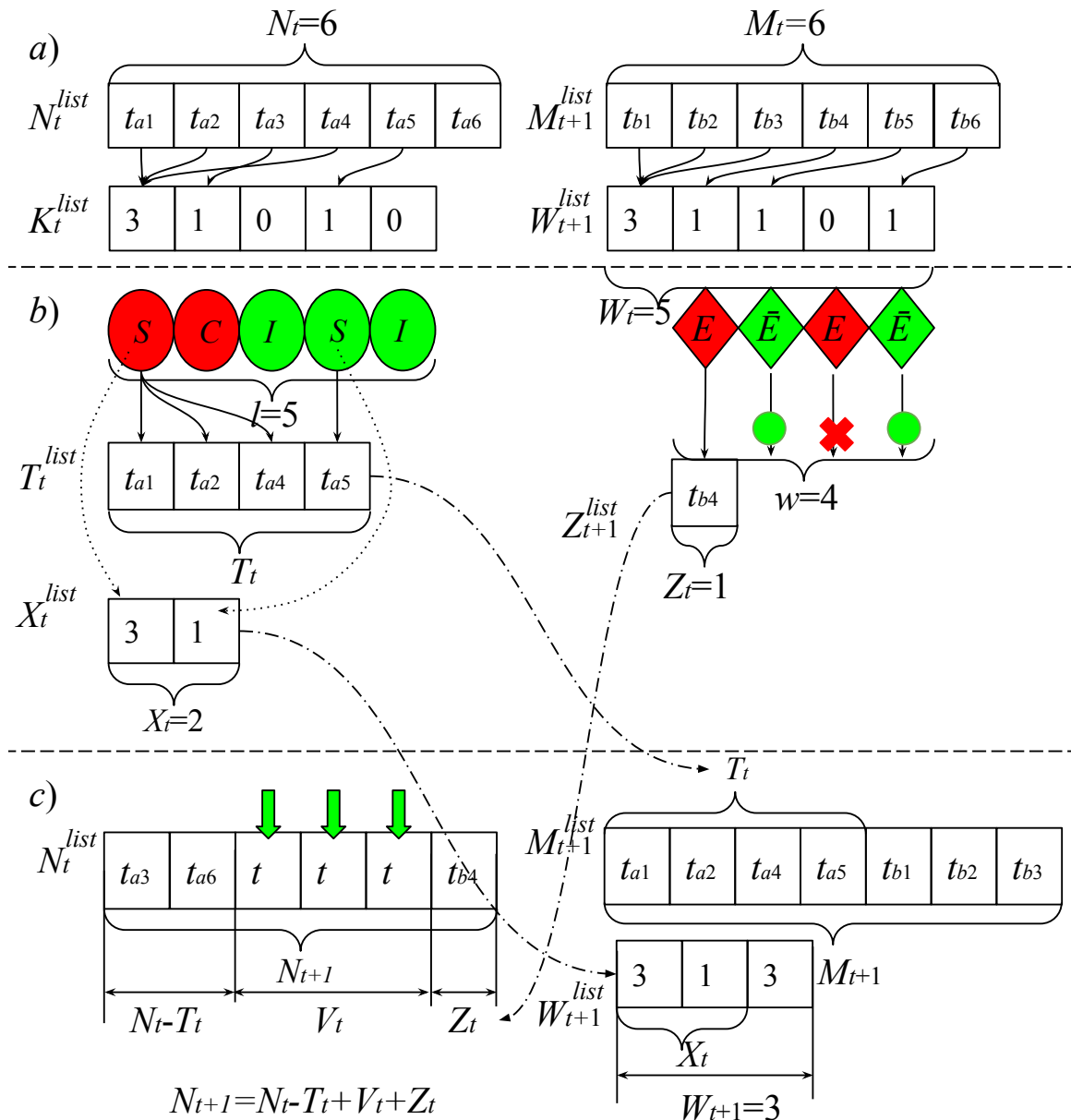


Рисунок 2.3. Пример, иллюстрирующий рассмотренную модель

Рассмотренные события для одной преамбулы проиллюстрированы на рис. 2.4. На этапе случайного доступа каждая преамбула не может быть выбрана ни одним АУ, только одним АУ и более чем одним АУ. Обозначим эти события как П, У и К, соответственно. При передаче преамбулы БС принимает следующие решения: (а) {У-У}: только одно АУ выбирает преамбулу, и БС принимает правильное решение, (б) {К-У}: более одного АУ выбирают преамбулу, что приводит к коллизии, но БС решает, что есть только одно АУ, посылающее эту преамбулу, (с) {П-У}: БС принимает ложное решение о правильном приеме преамбулы при её фактическом отсутствии. Во всех этих случаях АУ уведомляются об успешной попытке случайного доступа. Бывают также события, когда АУ уведомляется о неудачной попытке уже в конце этапа случайного доступа:

(d) {У-К}: выбор преамбулы одиночным АУ ошибочно интерпретируется как коллизия, (e) {К-К}: выбор преамбулы несколькими АУ корректно интерпретируется как коллизия. Вероятности всех этих событий могут быть рассчитаны на основе генерации преамбулы и алгоритма приема.

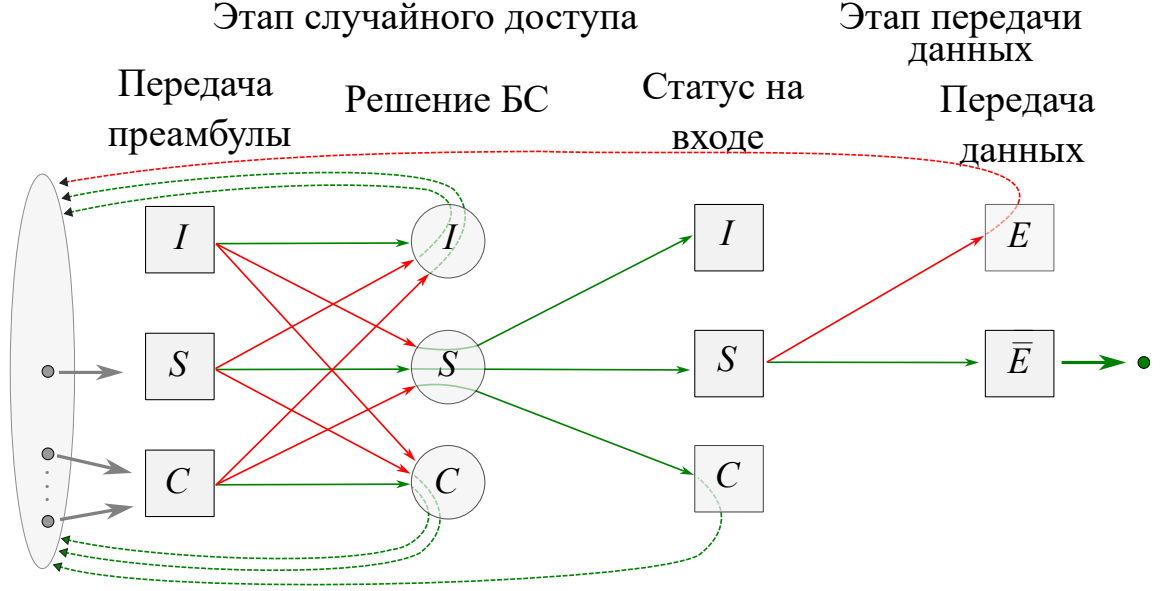


Рисунок 2.4. Иллюстрация возможных системных событий

Ложные события (b) и (c), а также правильное событие (a) приводят к резервированию ресурсов на этапе передачи данных. На этом этапе передача пакета считается успешной, если на этапе случайного доступа произошло событие {У-У}, а на этапе передачи данных пакет также принят корректно $\bar{E}$, т.е. $\{У-У\} \cap \bar{E}$. Дополнительное событие $\{У-У\} \cap E$ приводит к некорректному приему пакета.

Пусть D – случайная величина, представляющая собой задержку с момента появления пакетов в АУ до момента их доставки на БС. Обозначим максимальную пропускную способность системы как [38].

$$\Lambda_c = \sup_{\Lambda} \{\Lambda : E[D] < \infty\}, \quad (2.3)$$

где Λ_c – это интенсивность прибытия пакетов, при которой система работает стабильно. Задачей является определение максимальной пропускной способности системы.

$$\max_{n_1} \Lambda_c(n_1), \quad (2.4)$$

где n_1 – количество выборок для этапа случайного доступа.

В работе последовательно рассмотрены следующие случаи:

1) система идеальна, т. е. отсутствуют коллизии и ошибочно принятые пакеты на этапах случайного доступа и передачи данных. В этом случае число активных АУ на этих этапах можно описать двухмерной цепью Маркова $\{N_t, M_t\}$, подчиняющейся следующим изменениям состояния

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t - T_t + V_t \\ M_{t+1} = M_t - \min(M_t, w) + T_t \end{cases}, \quad (2.5)$$

где T_t — число АУ, перешедших в этап передачи данных, V_t — число АУ, поступивших на этап случайного доступа.

Когда пакет может быть ошибочно принят на этапе передачи данных, система в (2.5) принимает следующий вид

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t - T_t + V_t + Z_t \\ M_{t+1} = M_t - \min(M_t, w) + T_t \end{cases}, \quad (2.6)$$

где $Z_t \sim \text{Bin}(p_e(n_1, k, P), \min(M_t, w))$ — биномиально распределенное число пакетов, ошибочно полученных на этапе передачи данных, $p_e(n_1, k, P)$ представлено в (2.1). По-прежнему достаточно отслеживать две переменные — N_t и M_t , чтобы зафиксировать эволюцию процесса.

2) В общем случае, когда одновременно могут происходить коллизии и ошибки, имеем

$$\begin{cases} N_{t+1} = N_t - T_t + V_t + Z_t \\ W_{t+1} = W_t - \min(W_t, w) + X_t \end{cases}, \quad (2.7)$$

где W_t — это число слотов, зарезервированных для АУ на этапе передачи данных; X_t — число преамбул, для которых БС приняла решение успеха на этапе случайного доступа.

Принципиальное различие между моделями в (2.7) и моделями в (2.6) и (2.5) заключается в том, что ложные решения на этапе случайного доступа вынуждают отслеживать АУ, запланированные к передаче на этапе передачи данных, которые собраны в W_t^{list} . Таким образом, работа системы из рис. 2.3 описывается многомерной цепью Маркова $\{N_t, W_t, W_t^{list}\}$, где N_t — число активных АУ на этапе случайного доступа, W_t — длина очереди на этапе передачи данных, W_t^{list} — вектор длины W_t , описывающий элементы этой очереди. В работе [30] показывается, что задача определения Λ_{cr} сводится к задаче определения условия эргодичности данной Марковской цепи. Хотя прямой анализ

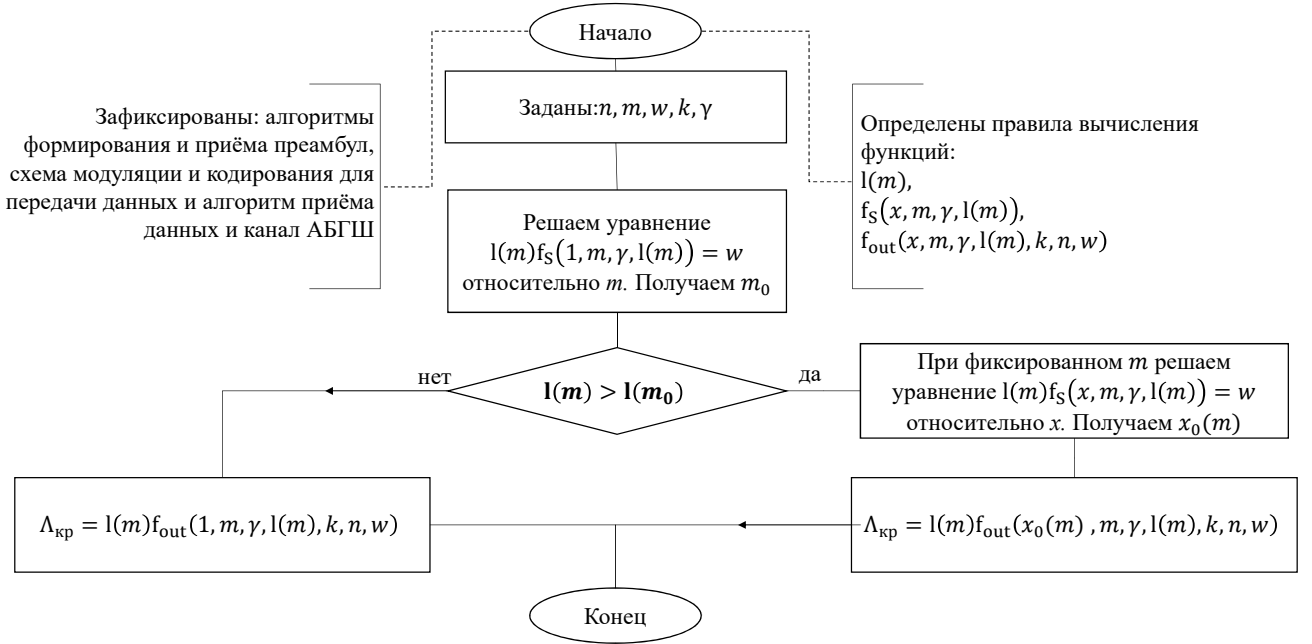


Рисунок 2.5. Блок-схема алгоритма вычисления значения Λ_{cr}

этой Марковской цепи невозможен даже численно, ниже предложен простой численный алгоритм решения для (2.4).

2.3 Метод повышения скорости передачи за счёт распределения частотно-временного ресурса между этапами случайного доступа и передачи данных

В работе [30] предложен алгоритм, который позволяет вычислить значение Λ_{cr} как функцию от всех параметров модели $\Lambda_{cr} = f(n, m, l(m), w, k, \gamma)$. Блок-схема этого алгоритма приведена на рис. 2.5 [43]. Рассмотрен 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.

Параметры демонстрационного примера выбраны на основе работы [39]. Кадр содержит $n = 30000$ отсчётов, число бит в сообщении $k = 100$.

В рамках примера на этапе случайного доступа рассмотрим один алгоритм формирования преамбул и два алгоритма приёма преамбул: без детектирования и с детектированием коллизий. Алгоритм формирования преамбул позволяет

сформировать m преамбул, где m число отсчётов, выделенных на этап случайного доступа. Таким образом, в данном демонстрационном примере $l(m) = m$.

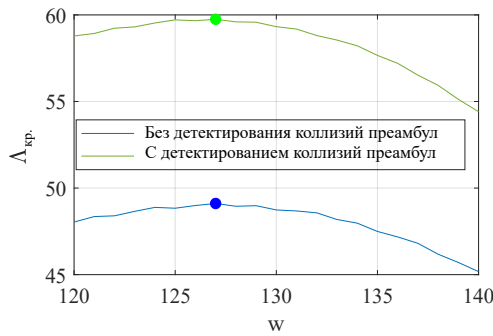
Для использования алгоритма из работы [30] необходимо определить ряд функций (см. рис. 2.5), которые зависят от алгоритмов формирования преамбул, приёма преамбул, схемы модуляции и кодирования для передачи данных и алгоритма приёма данных.

В рассмотренном демонстрационном примере функции имеют следующий вид:

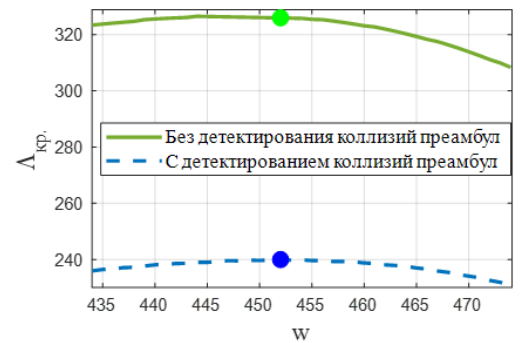
$$f_s(1, m, \gamma, l(m)) = e^{-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} \int_{\frac{\sqrt{\gamma}}{2}}^a e^{-\frac{(z-i\sqrt{\gamma})^2}{2}} dz \quad (2.8)$$

$$f_{out}(1, m, \gamma, l(m), k, w) = \left(1 - P_{err}\left(k, \frac{n-m}{w}, \gamma\right)\right) e^{-1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\sqrt{\gamma}}{2}}^a e^{-\frac{(z-i\sqrt{\gamma})^2}{2}} dz \quad (2.9)$$

где $P_{err}(k, n_s, \gamma)$ – вероятность ошибки декодирования при заданных параметрах отношения сигнал-шум γ , числе отсчётов в сигнале n_s и числе информационных бит k . В выражениях (2.8) и (2.9) верхний предел интегрирования a зависит от используемого алгоритма приёма преамбул. Для алгоритма приёма без детектирования коллизий $a = \infty$, а для алгоритма с детектированием коллизий $a = 2\sqrt{\gamma}$.



а)



б)

Рисунок 2.6. Зависимость Λ_{cr} от числа слотов на передачу при $\gamma = 1$ (а), при $\gamma = 10$ (б)

С использованием выражений (2.8) и (2.9) реализован алгоритм из работы [30] (см. рис. 2.5) и решена оптимизационная задача по распределению

ресурсов между этапами случайного доступа и передачи данных. Вид зависимости вычисления $\max_m f_{out}(n, m, \gamma, l(m), k, w)$ от w при фиксированных значениях $n = 30000$, $k = 100$ для $\gamma = 1$ и $\gamma = 10$ приведены на рис. 2.6 (а) и 2.6 (б), соответственно.

Перераспределяя ресурсы между этапами при фиксированных параметрах l и w можно максимизировать Λ_{cr} . Дополнительно увеличить Λ_{cr} можно за счёт использования процедуры раннего детектирования коллизий на этапе случайного доступа. Данный выигрыш увеличивается с ростом отношения сигнал-шум.

Предположим, что на этапе случайного доступа в начале кадра t имеется N_t АУ. Каждый из этих АУ принимает решение о передаче с вероятностью $\min(l/N_t, 1)$, используя случайно и равномерно выбранную преамбулу. При больших значениях N_t число АУ, выбравших ту или иную преамбулу, является случайной величиной, имеющей распределение Пуассона со средним значением $\min(l/N_t, 1)$ [44].

Число АУ, переходящих на этап передачи данных в результате выбора определенной преамбулы, определяется выражением:

$$f_S(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{x^i}{i!} e^{-x} Pr\{S|i\}, \quad (2.10)$$

где $x = \min(l/N_t, 1)$, $Pr\{S|i\}$ — вероятность того, что БС принимает решение, что преамбулу выбирает ровно одно АУ при условии, что его выбрали i АУ.

Заметим, что среднее число АУ, переходящих на этап передачи данных, равно $f_S(x)l$. Однако запланировано, что некоторые из этих АУ будут занимать один и тот же набор ресурсов передачи. Среднее число АУ, запланированных только для передачи, равно $lxe^{-x}Pr\{S|1\}$. Тогда в результате передачи данных среднее число АУ, вышедших из системы, определяется выражением:

$$f_{out}(x, n_1) = xe^{-x}Pr\{S|1\}(1 - p_e((n - n_1)/w, k, P)), \quad (2.11)$$

где $p_e((n - n_1)/w, k, P)$ определяется в (2.1).

Перейдём теперь к определению пропускной способности системы Λ_c . Для этой цели необходимо решить следующее выражение для n_0 :

$$f_A(n_0)f_S(1) = w. \quad (2.12)$$

Возможны следующие случаи:

1) $n_0 > l$.

Анализируя (2.12), показано, что для $f_A(n_0) > l$ и $f_A(n_0) < l$ узким местом являются этапы случайного доступа и передачи данных, соответственно. В первом случае в среднем $E[N_t] \geq l$, т. е. число АУ, готовых к передаче на этапе случайного доступа, больше, чем количество доступных преамбул. Таким образом, один или несколько АУ выбирают в среднем одну преамбулу. Тогда среднее число успешно обслуженных АУ равно $lf_{out}(1, n_1)$, и система стабильна до тех пор, пока частота поступления не превысит это значение. Таким образом, для этого режима имеем

$$\Lambda_c = lf_{out}(1, n_1). \quad (2.13)$$

2) $n_0 < l$.

При $f_A(n_0) < l$ узкое место находится на этапе передачи данных, а $E[N_t] < l$, то есть в среднем менее одного АУ выбирает заданную преамбулу. В этом случае, если x_0 является решением

$$lf_S(x) = w, \quad (2.14)$$

то в среднем имеется $lf_S(x_0)$ запланированных передач в этапе передачи данных. Таким образом, пропускная способность системы определяется выражением

$$\Lambda_c = lf_{out}(x_0, n_1), \quad (2.15)$$

и, как и в случае узкого места этапа случайного доступа, система устойчива до тех пор, пока интенсивность прихода сообщений не превышает это значение.

Алгоритм 1 [30] иллюстрирует вычислительную процедуру. Сложность алгоритма полностью определяется сложностью решения уравнения (2.12). Для ее решения можно использовать любой численный метод, например, метод Ньютона. Отметим, что результаты (2.13) и (2.15) справедливы, когда рассматриваемая Цепь Маркова в (2.7) эргодична. Если $n_1 \leq n_0$, цепь Маркова эргодична для всех $\Lambda < lf_{out}(1, n_1)$, приводящих к (2.13). Если $n_1 > n_0$, цепь эргодична для всех $\Lambda < lf_{out}(x_0, n_1)$, что приводит к (2.15).

Показаны численные результаты. Используется алгоритм генерации преамбулы A , где $f_A(n_1) = n_1$, $l = n_1$. Предполагая единичный шум и мощность принимаемого сигнала, а также обнаружение на основе пороговых значений,

Таблица 2.1. — Параметры по умолчанию для числовой оценки

Параметр	Величина
Мощность принимаемого сигнала, P	1 единица
Отсчёты этапа случайного доступа, n_1	100-300
Отсчёты этапа передачи данных, n_2	400-700
Общее количество отсчётов, n	700
Количество слотов на этапе DT, w	30

для этапа случайного доступа получаем:

$$\begin{cases} Pr\{I|i\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{P/2} e^{-\frac{(t-iP)^2}{2}} dt, i = 1, 2, \dots, \\ Pr\{S|i\} = \frac{1}{2\pi} \int_{P/2}^{3P/2} e^{-\frac{(t-iP)^2}{2}} dt, i = 1, 2, \dots, \\ Pr\{C|i\} = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{3P/2} e^{-\frac{(t-iP)^2}{2}} dt, i = 1, 2, \dots \end{cases}$$

Считается, что всегда есть правильное решение, когда ни одно АУ не выбирает преамбулу, т. е. $Pr\{I|0\} = 1$.

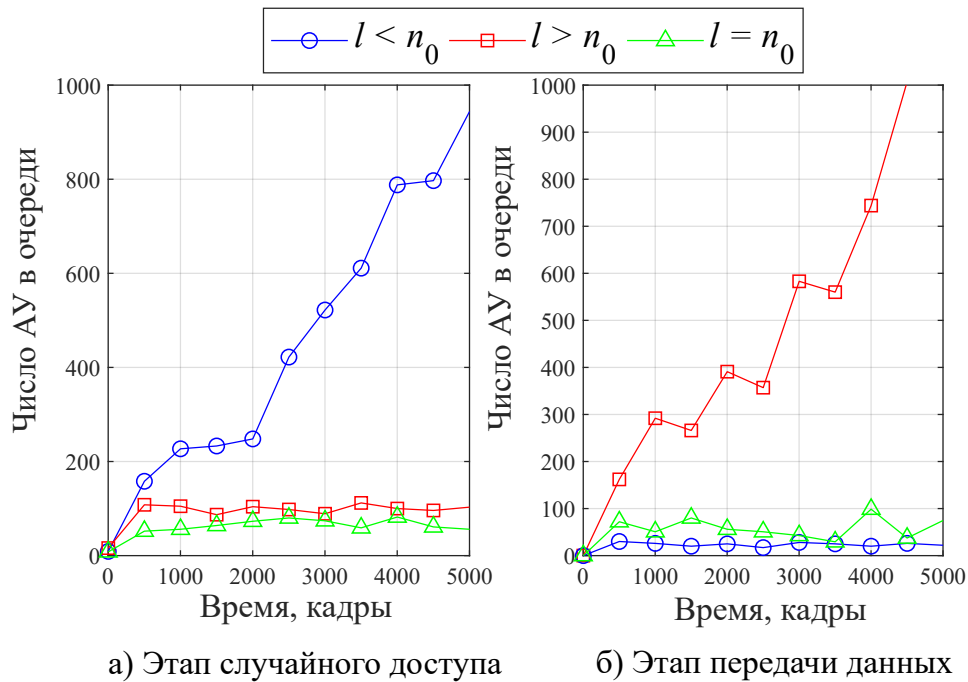


Рисунок 2.7. Число АУ в очереди на первом и втором этапах

Для моделирования системы использовалась среда MatLab. Среда моделирования воспроизводит модель системы, описанный в разделе 2.4, логика которой представлена на рис.2.3.

Начинаем с оценки оптимального соотношения ресурсов между этапами случайного доступа и передачи данных, максимизируя пропускную способность системы Λ_c . С этой целью на рис. 2.8 показана зависимость Λ_c от n_1/n , получено численно по алгоритму и с помощью компьютерного моделирования, где P установлено равным единице. Существует значение n_1/n , максимизирующее Λ_c . Для выбранного значения длины кадра эта оптимальная точка соответствует $n_1/n \approx 0.25$ и может быть найдена для любого выбранного набора преамбул l , числа слотов w и при общем числе отсчётов в кадре n . Сравнение с моделированием, показанным красными кружками на рис. 2.8, подтверждает разработанную модель. Также показываем «обычный» случай, когда (i) имеются ошибки на этапе передачи данных и (ii) раннее обнаружение преамбулы не используется [45]. Также известно, что при принятых ограничительных предположениях работы системы, не только максимальная пропускная способность системы увеличивается, но и оптимальное разделение ресурсов между этапами случайного доступа и передачи данных смещаются влево. Этап случайного доступа при этом требует меньшего количества ресурсов.

Рассмотрены три режима $l < n_0$, $l > n_0$ и $l = n_0$, где n_0 – оптимальное количество ресурсов, выделенных на этапе случайного доступа, такое, что передаваемая транспортная нагрузка $\Lambda_c(n_0)$ максимальна. С этой целью, на рис. 2.7 показано число АУ в очереди в виде получения функции времени (номера кадра) на этих этапах с использованием компьютерного моделирования для $\Lambda = 10$ пакетов/с. Данные результаты получены для значений n_1/n соответствующие трём точкам на оси x (см. рис. 2.8): 0,13, 0,25 и 0,4. При $n_1/n = 0.25$ получена максимальная предельная интенсивность системы, а для $n_1/n = 0.13$ и $n_1/n = 0.4$ получено значение $\Lambda_c r = 10$ пакетов/кадр. Напомним, что плоское поведение кривых указывает на стабильный режим, в то время как «всегда растущее» поведение подразумевает, что число АУ в очереди растёт бесконечно. Для первого случая $l < n_0$, а число АУ, отложенных на этапе случайного доступа, растёт неограниченно. Этот этап является «узким местом» системы. Этап передачи данных может обрабатывать проходящие АУ через этап случайного доступа. И наоборот, при $l > n_0$ число АУ на этапе передачи данных растёт бесконечно, а на этапе случайного доступа обрабатывает поступающие

запросы. Для оптимального распределения ресурсов между этими этапами, рассчитанного по алгоритму 1 [30], $l = n_0$, число АУ в очереди на обоих этапах остается ограниченным.

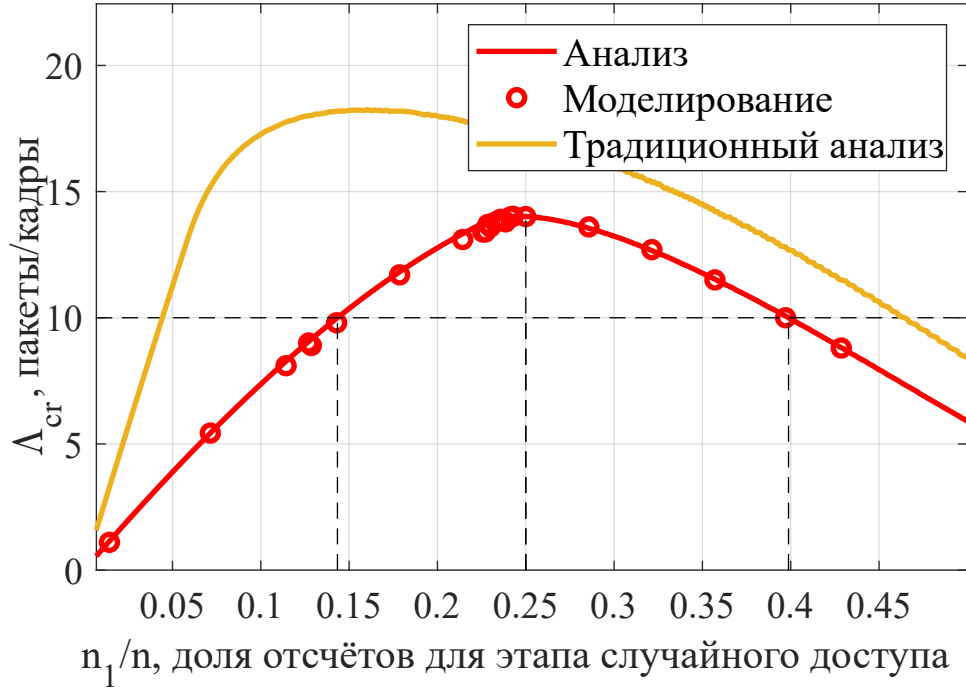


Рисунок 2.8. Выходная интенсивность λ_{out} , как функция n_1/n

Результат расчёта средней задержки АУ для двух значений интенсивностей поступления 5 и 10 пакетов/кадр на рис. 2.9. Средняя задержка посчитана с использованием закона Литтла [46], как функция количества выборок, выделенных для этапа случайного доступа n_1 . Отметим, что при этих нагрузках и соответствующем выборе n_1/n , существует устойчивый режим работы системы. При выбранных интенсивностях поступления пакетов в систему, оценены отличные друг от друга оптимальные значениям n_1/n ($n_1/n = 0,12$ и $n_1/n = 0,23$, соответственно). Если сетевому оператору точно не известно значение интенсивности появления сообщений (поскольку оно на практике варьируется), то разумным решением в таком случай является выбор оптимума n_1/n , который максимизирует пропускную способность системы, $\Lambda_c \approx 14$ пакетов/кадр (см. рис. 2.8). В этом случае возникшая задержка не будет существенно превышать оптимальное значение. Это подтверждается рис. 2.9, где для интенсивности прихода 5 пакетов/кадр, оптимальное значение n_1/n составляет 0,12, а соответ-

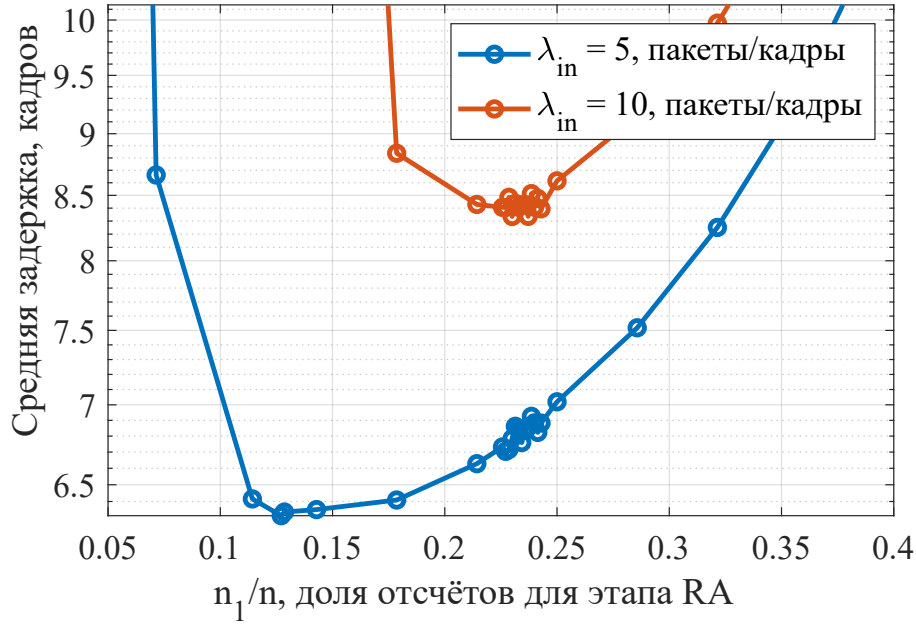


Рисунок 2.9. Средняя задержка, как функция от n_1

ствующая средняя задержка составляет 6,3 кадра, а при $n_1/n \approx 0,25$ задержка составляет около 6,7 кадров, что всего на 6% выше. Эти результаты означают, что предложенная оптимизация может быть выполнена только один раз на этапе проектирования системы.

2.4 Модель, описывающая сценарий использования технологий LTE-M и NB-IoT в рамках одной сети

Рассмотрим 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 АУ находятся в зоне действия двух БС. Первая базовая станция БС₁ работает в соответствии с технологией NB-IoT (число преамбул $\lambda_1 = 12$), а вторая БС₂ — в соответствии с технологией LTE-M (число преамбул $\lambda_2 = 36$). АУ может быть ассоциировано с любой из этих БС, но только с одной. В работе [31] рассматривается модель, в которой решается

оптимизационная задача распределения АУ между станциями таким образом, чтобы средняя задержка была минимальна [47][48].

Известно, что при пачечном поступлении заявок процедура случайного доступа является основным фактором, влияющим на качество обслуживания абонентов [32],[49].

Ниже, на рис. 2.10, приведена последовательность сигнальных сообщений процедуры первоначального доступа в сеть для технологии LTE-M. Принципиальным подходом, позволяющим увеличить зону обслуживания соты современных сотовых технологий связи является увеличение количества повторных попыток доступа. В соответствии с этим, сначала основной целью является достижение синхронизации восходящей линии связи и получение разрешения на подключение. Для этого АУ передает базовый конфигурационный блок SIB2 (System Information Block Type 2), который определяет мощность сигналов, несущую частоту, конфигурации физического канала управления восходящей линии связи (PUCCH, Physical Uplink Control Channel) и общего канала (PUSCH, Physical Uplink Shared Channel). Далее, за счёт случайной процедуры доступа, может происходить два события: конфликт доступа и бесконфликтная передача. Для первого типа характерно появление в канале одинаковых преамбул от разных АУ в одно и то же время из-за чего на дальнейших этапах выполняется процедура разрешения конфликтов. Бесконфликтная передача используется только в случае, когда АУ было в подключённом режиме. После подтверждения преамбулы в сообщении (Msg2) базовая станция (БС) назначает ресурсы для АУ в PUSCH. АУ отправляет «сообщение запроса RRC-соединения» на БС (Msg3). БС отвечает сообщением разрешения конфликтов на АУ (Msg4).

По аналогии с LTE-M, на рис. 2.11 представлена временная диаграмма случайного доступа NB-IoT. Сначала АУ определяет несущую NB-IoT путём измерения мощности принятых сигналов синхронизации в направлении нисходящей линии связи и выполняет временную и частотную синхронизацию вместе с декодированием идентификатора БС (Cell ID). Затем декодируется NPBSCH, который содержит главный информационный блок (MIB, Main Information Block). После синхронизации АУ конфигурирует ресурсы NPRACH и выполняет передачу преамбул по восходящей линии связи в соответствии с настройками сети, чтобы число повторений и мощность передачи были достаточными. NB-IoT указывает, что минимальное число ортогональных преамбул (поднесущих)



Рисунок 2.10. Последовательность обмена сигнальными сообщениями между БС и АУ при выполнении процедуры случайного доступа LTE-M

должно составлять 12 из 48 доступных (Таблица 2.2). Фаза передачи данных инициируется в канале NPDCCH (NB-IoT Physical Downlink Control Channel), который используется для передачи управляющей информации нисходящей линии связи. Повторения этого сигнала могут варьироваться от 1 до 2048 раз (Таблица 2.2).

В таблице 2.2 приведены основные характеристики рассмотренных технологий сотовых сетей.

Для описания системы введём ряд допущений. Имеется множество абонентов U и две БС: БС₁ (NB-IoT) и БС₂ (LTE-M). Каждый абонент из множества U может иметь доступ к любой из этих базовых станций, но только к одной. Требуется разделить множество абонентов U на два подмножества U_1 и U_2 , таким образом, чтобы средняя задержка доступа была минимальной. В работе [31] используется двухэтапный способ передачи данных, описанный в разделе 2.2. Предполагается, что до начала режима случайного доступа затрачивается вре-

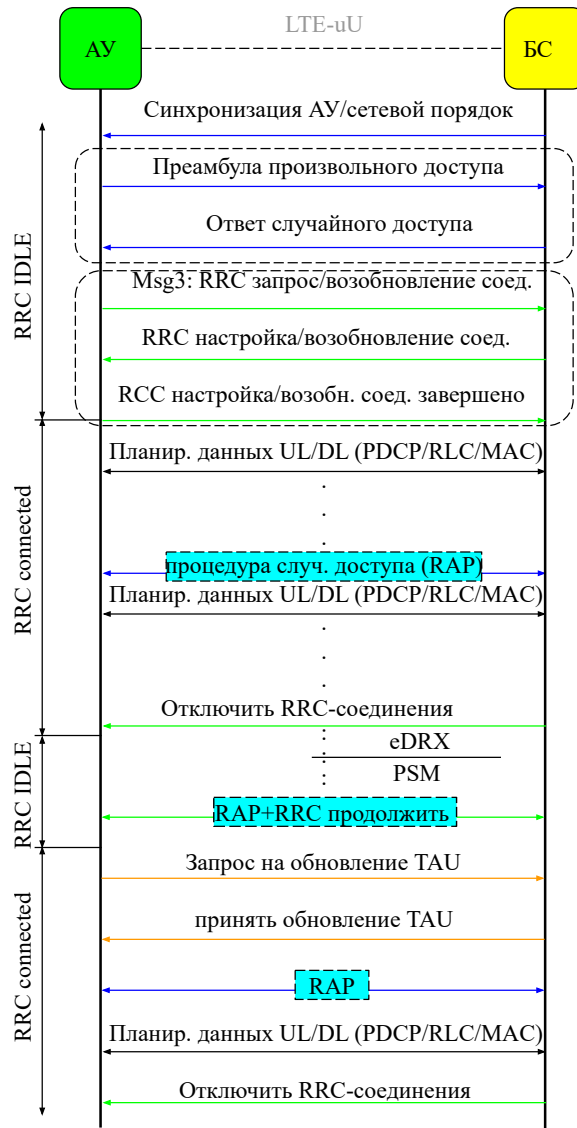


Рисунок 2.11. Последовательность обмена сигнальными сообщениями между БС и АУ при выполнении процедуры случайного доступа NB-IoT

мя на синхронизацию $t_{1, \text{синх}}$ и $t_{2, \text{синх}}$ для БС₁ и БС₂, соответственно. В режиме случайного доступа используются l_1 и l_2 преамбул, а длительность слотов в этом режиме $t_{1, \text{слот}}$ и $t_{2, \text{слот}}$. После успешного завершения режима случайного доступа происходит передача данных в течении времени $t_{1, \text{дан}}$ и $t_{2, \text{дан}}$, при этом ошибок передачи не происходит. Процесс появления абонентов в системе описывается пуассоновским потоком с интенсивностью Λ [абонентов/с.]. После появления в системе, АУ с вероятностью p_1 выбирает для подключения БС₁ и с дополнительной вероятностью $p_2 = 1 - p_1$ выбирает для подключения БС₂. После подключения к базовой станции АУ передаёт одно единственное сообщение и покидает систему. Таким образом, можно считать, что на БС₁ поступает пуассоновски поток с интенсивностью $\Lambda_1 = \Lambda p_1$, а на БС₂ поток, где $\Lambda_2 = \Lambda - \Lambda_1$.

Таблица 2.2. — Сравнение основных параметров NB-IoT и LTE-M

Технология	NB-IoT (Cat NB 1)	LTE-M (Cat M1)
Частота	700 – 2100 МГц	700–2600 МГц
Ширина полосы	200 кГц	1,4 кГц
Затухание	164 дБ	157,7 дБ
Макс. EIRP	23 дБм	23 дБм
Макс. полезный размер пакета	1600 байт	1600 байт
Скорость UL	0,3–62,5 кбит/с	HD: 375, 590 кбит/с
Скорость DL	0,5–27,2 кбит/с	HD: 300, 800 кбит/с FD: 0,8, 1 Мбит/с
Мультикастинг	Да	Да
Повторения PDSCH/PUSCH	1–2048/1–128	1–32, 4–2048
Повторения PRACH	1–128	1–128
PRACH BW	3.75 кГц ($\times 12$) 1.25 кГц ($\times 36$)	1,05 МГц
(N)PRACH, TTI, мстинг	5.6, 6.4, 19.2	1, 2, 3

Рассмотрим модели, описывающие процесс взаимодействия абонента с БС и процесс возникновения сообщений у АУ. Взаимодействия АУ с БС будем описывать моделью многоканальной системы случайного множественного доступа типа АЛОНА (см. например, [50]).

Данная модель для двух технологий использует канал общего доступа, в котором этап случайного доступа и этап передачи не зависят друг от друга. Они могут мешать друг другу в силу того, что используют один и тот же частотно-временной ресурс. Но в данном случае канал разделён на два этапа так, что после того как происходит подключение АУ, достаточно сделать однократную передачу данных для успешного завершения процесса обслуживания АУ.

Рассмотрим данную модель с помощью следующей системы допущений:

Допущение 1. Базовые станции БС₁ и БС₂ обслуживают l_1 и l_2 параллельных каналов случайного множественного доступа. Время передачи по каналу разделено на окна. Все окна имеют одинаковую длительность, равную t_1 и t_2 для БС₁ и БС₂, соответственно. Окна пронумерованы целыми неотрицательными числами. Далее, для краткости изложения, слот с номером t будем называть слотом t . Моменты разделения окон во всех каналах одинаковы и известны

всем абонентам. Абонент может начинать передачу сообщения только в начале очередного окна:

Допущение 2. В каждом окне может произойти одно из трёх событий:

1. в окне передаёт один абонент: событие $У$ – успех;
2. в окне не передаёт ни один абонент: событие $П$ – пусто;
3. в окне передают два или более абонентов: событие $К$ – конфликт.

Допущение 3. Базовая станция, наблюдая выход канала, к концу окна узнает о событии в окне и передаёт информацию о событии всем абонентам, которые ассоциированы с данной станцией. Абоненты, у которых есть сообщение, используют эту информацию, и в следующем окне принимают решение передавать или нет сообщение в соответствии с вероятностью: $P_t = \min\left(1, \frac{l}{N_t}\right)$, где N_t – число активных АУ к началу окна t .

Заметим, что такой алгоритм работы АУ является оптимальным с точки зрения минимизации средней задержки. На практике он не может быть реализован, так как число активных АУ неизвестно. Для любого алгоритма, который может быть реализован средняя задержка будет выше [51].

Допущение 4. Предполагается, что зоны покрытия базовых станций таковы, что потери данных, вызванные низким уровнем принимаемого сигнала пренебрежимо малы.

Допущение 5. В модели со случайной активностью АУ имеется потенциально неограниченное число АУ. Процесс возникновения сообщений задаётся пуассоновским потоком интенсивности Λ . При этом можно считать, что в соответствии с этим процессом в системе появляется абонент, который содержит единственное сообщение. АУ пытается передать сообщение на БС, с которой он ассоциирован. После успешной передачи сообщения абонент покидает систему.

2.5 Метод уменьшения задержки путём распределения устройств между технологиями LTE-M и NB-IoT

Требуется распределить общий поток на два отдельных потока для двух технологий с интенсивностями Λ_1 и Λ_2 на БС₁ и БС₂, соответственно, таким образом, чтобы минимизировать максимальное значение средней задержки при передаче сообщения в системе.

Для начала рассмотрим как в рамках одной технологии рассчитать значение средней задержки с использованием модели из первого раздела. Процесс случайного доступа для получения ресурса на передачу данных опишем с помощью рассматриваемого этапа случайного доступа для разных технологий с разными значениями числа преамбул l_1 и l_2 , соответственно. Используется модель из первого раздела с пуассоновским потоком. Модель описывается Марковской цепью. Для неё можно найти стационарное распределение и вычислить среднюю задержку в окнах $d(\lambda)$ при заданной интенсивности входного потока $\lambda < \lambda_{cr}$. Методика расчёта задержки в модели основывается на вычислении стационарных вероятностей в системе $(\bar{\pi})$. Основным параметром состояния является число активных АУ в момент времени $(t - N_t)$ [32]. В частности, число активных АУ в системе образует Марковскую цепь $\{N_t, t > 0\}$ [32]. Стационарные вероятности позволяют получить искомые характеристики обслуживания, как показано ниже.

Для расчёта стационарных вероятностей будем использовать переходную матрицу одномерной Марковской цепи. Если цепь эргодична, то можно с любой заданной точностью вычислить стационарное распределение, используя матрицу размерности $n \times n$, где n параметр, влияющий на точность полученных значений стационарных вероятностей. Переходные вероятности в такой матрице зависят от значения параметра λ . Далее такую матрицу будем обозначать как $P(\lambda)$. Структура матрицы и методика вычисления элементов матрицы описаны в [26].

Обозначим через D случайную величину, равную числу окон от момента появления сообщений до момента, когда сообщение будет передано. Рассмотрим алгоритм вычисления зависимости $E[D]$ от λ с использованием стационарных вероятностей:

Шаг 1. Фиксируем некоторое значение $\lambda < le^{-1}$. На основе матрицы $P(\lambda)$ стандартным образом получаем стационарное распределение $P(\lambda) \rightarrow \bar{\pi} = (\pi^0, \pi^1, \dots, \pi^{n-1})$;

Шаг 2. На основе этого стационарного распределения вычисляем математическое ожидание числа активных АУ $E[N] = \sum_{i=0}^{n-1} i\pi^i$;

Шаг 3. Вычисляем значение $E[D]$ при выбранном значении λ .

$$d(\lambda) = \frac{E[N]}{\lambda} \quad (2.16)$$

Обозначим через $\tau_1(\Lambda_1)$ и $\tau_2(\Lambda - \Lambda_1)$ средние задержки в единицах времени от момента появления АУ в системе до момента окончания передачи данных для БС₁ и БС₂, соответственно. В первом разделе было показано, как рассчитать среднюю задержку в окнах для этапа случайного доступа как функцию $d(\lambda, l)$, где λ – интенсивность появления абонентов в расчёте на одно окно, l – число преамбул. С учётом этого:

$$\begin{aligned}\tau_1(\Lambda_1) &= d(\Lambda_1 t_{1, \text{слот}}, l_1) t_{1, \text{слот}} + t_{1, \text{синх.}} + t_{1, \text{дан.}}, \\ \tau_2(\Lambda_2) &= d(\Lambda_2 t_{2, \text{слот}}, l_2) t_{2, \text{слот}} + t_{2, \text{синх.}} + t_{2, \text{дан.}}.\end{aligned}\quad (2.17)$$

Далее, зная интервалы времени: на синхронизацию $t_{\text{синх.}}$, длительности слота $t_{\text{слот}}$ и передачи данных $t_{\text{дан.}}$, можно рассчитать среднюю задержку от момента появления сообщений до момента доставки сообщения на БС в единицах времени, которая вычисляется следующим образом $\tau(\Lambda) = d(\Lambda t_{\text{слот}}) t_{\text{слот}} + t_{\text{синх.}} + t_{\text{дан.}}$, где $d(\Lambda t_{\text{слот}}) t_{\text{слот}}$ – задержка на этапе случайного доступа.

Фактически описывается идентификатор в момент синхронизации. Получили подтверждение о регистрации. Далее идут процедуры выделения ресурсов и передача данных, и затем отключение. Процедура случайного доступа выполняется всегда до конца. Каждый раз после передачи данных синхронизация прерывается.

Для выбора оптимального распределения интенсивности потоков Λ_1 и Λ_2 для первой и второй технологии, сначала доопределяется то, что $\tau(0) = 0$. Учитывая тот факт, что если для некоторой технологии $\Lambda_i = 0$ ($i = \{1, 2\}$), то данная технология не участвует в передаче данных. С учётом этого, для выбора оптимального распределения интенсивности потоков требуется решить следующую оптимизационную задачу:

$$\begin{cases} \max(\tau_1(\Lambda_1), \tau_2(\Lambda - \Lambda_1)) \rightarrow \min \\ \Lambda_1 t_{1, \text{слот}} < l_1 e^{-1} \\ (\Lambda - \Lambda_1) t_{2, \text{слот}} < l_2 e^{-1} \end{cases} \quad (2.18)$$

Следует отметить, что функция $\tau(\Lambda_i)$ является монотонно возрастающей. Таким образом, с ростом Λ_1 значения $\tau_1(\Lambda_1)$ монотонно возрастают, а значения $\tau_2(\Lambda - \Lambda_1)$ монотонно убывают. Это значит, что если существует решение уравнения $\tau_1(\Lambda_1) = \tau_2(\Lambda - \Lambda_1)$, то оно будет единственным. Если такого решения нет, то значения одной из функций оказываются ниже значений другой на всём интервале $0 \leq \Lambda_1 \leq \Lambda$, то есть функции не пересекаются. Таким образом, если

существует решение уравнений $\tau_1(\Lambda_1) = \tau_2(\Lambda - \Lambda_1)$ относительно Λ_1 , то данное значение Λ_1 является решением оптимизационной задачи. Иначе решение оптимизационной задачи определяется следующим образом: Если $\tau_1(\Lambda) < \tau_2(\Lambda)$, то $\Lambda_1 = \Lambda$, а $\Lambda_2 = 0$ (вторая технология не участвует в передаче данных). Иначе $\Lambda_1 = 0$, $\Lambda_2 = \Lambda$ (первая технология не участвует в передаче данных). При решении оптимизационной задачи учитывается то, что $\tau_1(\Lambda_1)$ и $\tau_2(\Lambda_2)$ монотонно возрастающие функции. Покажем, что если существует Λ_1 , такое, что выполняется равенство $\tau_1(\Lambda_1) = \tau_2(\Lambda - \Lambda_1)$, то такое Λ_1 единственное, и такое значение Λ_1 является решением оптимизационной задачи. Таким образом, для решения этой оптимизационной задачи, требуется проделать следующие действия:

Шаг 1. Реализовать алгоритм вычисления зависимости $\tau_1(\lambda)$;

Шаг 2. Реализовать алгоритм вычисления зависимости $\tau_2(\lambda)$;

Шаг 3. Численным путем относительно переменной Λ_1 решается уравнение: $\tau_1(\Lambda_1) = \tau_2(\Lambda - \Lambda_1)$. Если уравнение имеет решение, то корень этого уравнения является решением оптимизационной задачи. Если решения уравнения нет, то решение оптимизационной задачи имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \Lambda_1 = \Lambda, \Lambda_2 = 0, \text{ если } \tau_1(\Lambda) < \tau_2(\Lambda) \\ \Lambda = 0, \Lambda_2 = \Lambda, \text{ иначе} \end{cases}. \quad (2.19)$$

Для расчёта точки пересечения приведём равенство задержек передачи сообщений двух технологий:

$$t_{1, \text{ синх}} + d_1(\Lambda_1 t_{1, \text{ слот}}) t_{1, \text{ слот}} + t_{1, \text{ дан}} = t_{2, \text{ синх}} + d_2((\Lambda - \Lambda_1) t_{2, \text{ слот}}) t_{2, \text{ слот}} + t_{2, \text{ дан}}. \quad (2.20)$$

Задача расчёта точки пересечения (3.26) выполняется при следующих ограничениях:

$$\Lambda_1 + \Lambda_2 = \Lambda, \quad (2.21)$$

$$\Lambda_1 t_{1, \text{ окна}} < l_1 e^{-1}, \quad (2.22)$$

$$\Lambda_2 t_{2, \text{ окна}} < l_2 e^{-1}. \quad (2.23)$$

Затем следует выполнить проверку, что выполняются ограничения (2.22) и (2.23). Если они не выполняются, то следует отдать все преамбулы либо одной, либо другой технологии.

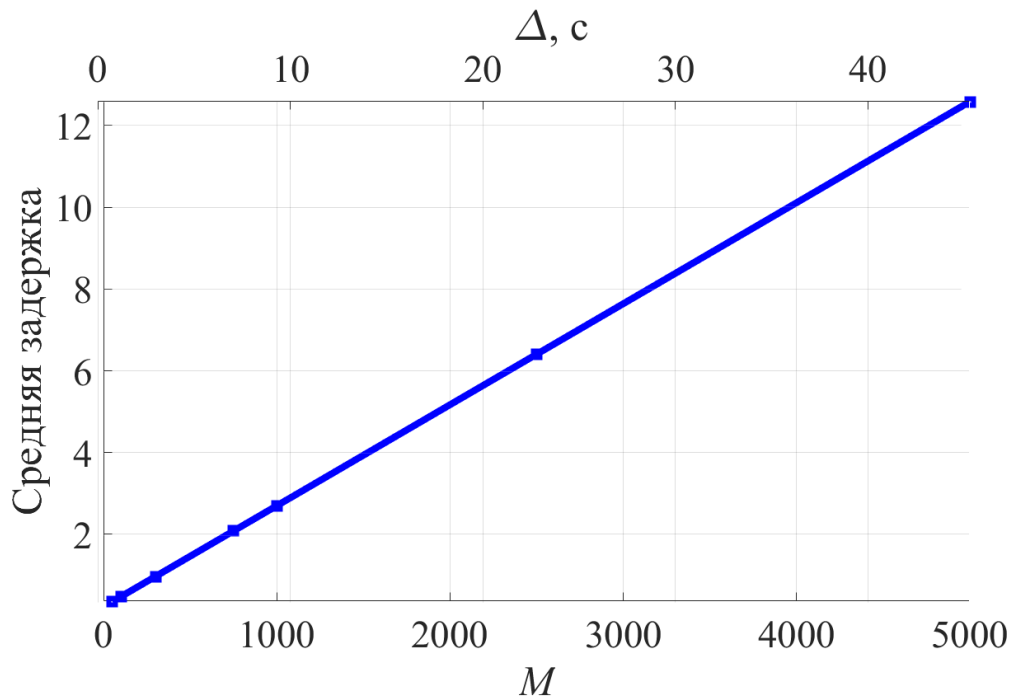


Рисунок 2.12. Зависимость средней задержки в системе при оптимальном распределении абонентов между технологиями от общего числа АУ M при фиксированной нагрузке $\frac{M}{\Delta}$

Следует отметить, что при ограничениях (2.22) и (2.23) Марковская цепь, которая описывает систему со случайной активностью абонентов эргодична и, соответственно, для такой системы с любой заданной точностью могут быть получены зависимости $d_1(\lambda)$ и $d_2(\lambda)$.

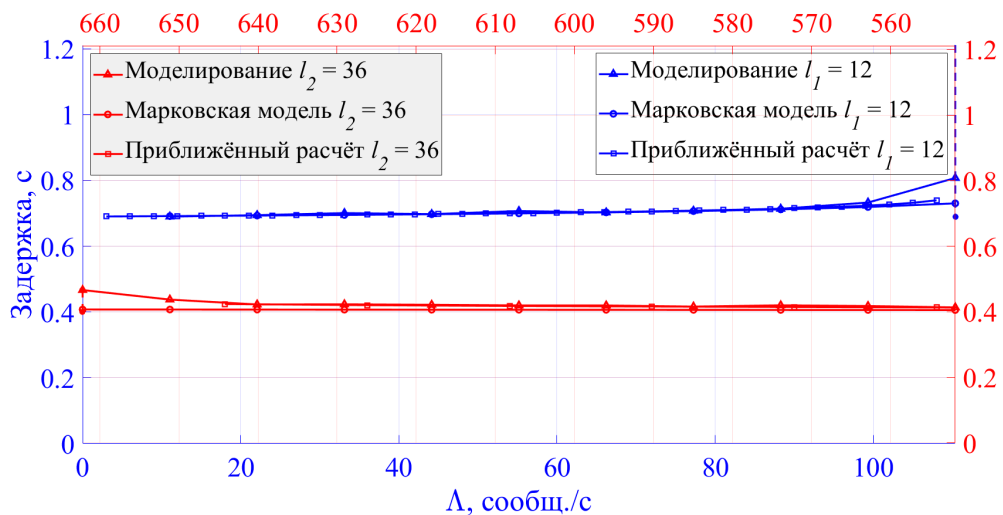


Рисунок 2.13. Задержка передачи сообщения модели двух технологий со случайным опросом

Из рис. 2.13 следует, что такой точки пересечения не наблюдается для модели со случайным опросом абонентов. При этом, средняя задержка для этой

модели выше для технологии LTE-M использующей 36 преамбул для случайного доступа. Это позволяет сделать вывод что при выбранной нагрузке для минимизации средней задержки для случайного опроса АУ, достаточно использовать только технологию LTE-M. Однако, при увеличении интенсивности, как показано на рис. 2.14, пересечение графиков происходит, что позволяет найти оптимальное решение.

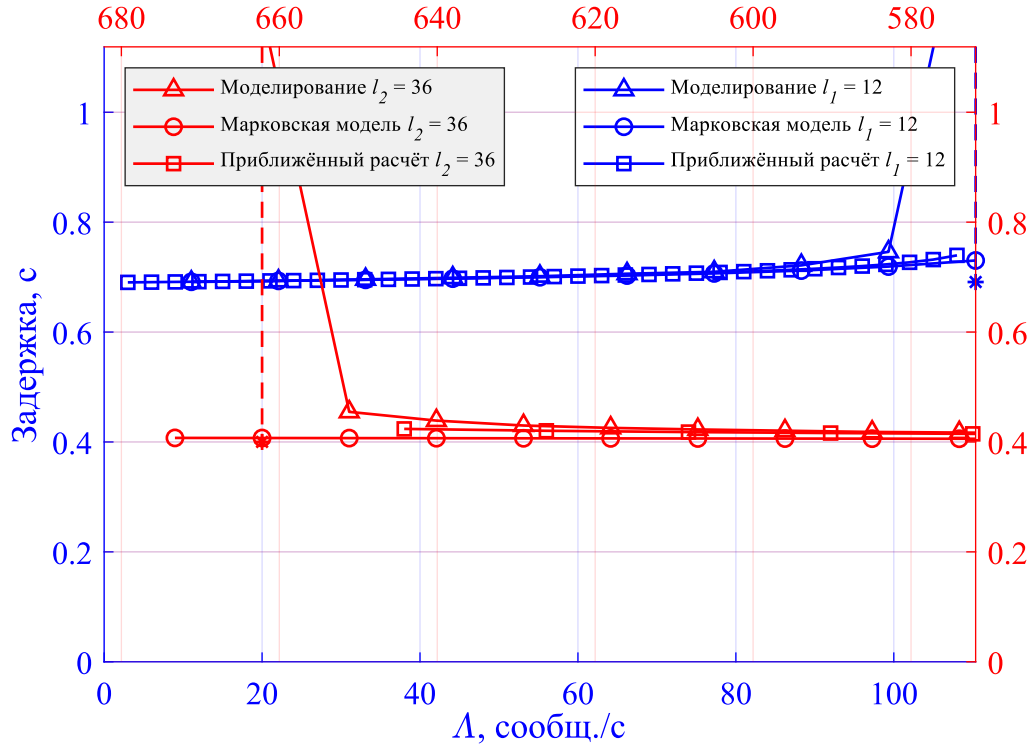


Рисунок 2.14. Задержка передачи сообщения модели двух технологий со случайным опросом при $\Lambda = 682$

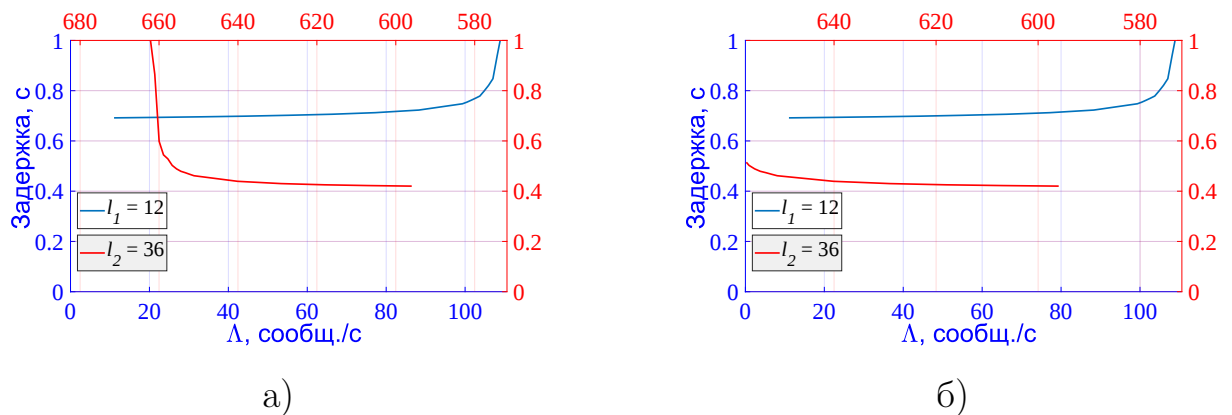


Рисунок 2.15. Задержка передачи сообщения модели двух технологий со случайным опросом при $\Lambda = 682$ (а), при $\Lambda = 657$ (б)

Выбор оптимального распределения потоков между технологиями продемонстрирован для двух случаев. В первом случае интенсивность появления

абонентов в системе $\Lambda = 682$ абонентов/с, а во втором – $\Lambda = 657$ абонентов/с. Зависимости $\tau_1(\Lambda_1)$ и $\tau_2(\Lambda - \Lambda_1)$ для этих двух случаев приведены на рис. 2.15. Для первого случая $\Lambda_1 = 22$ абонентов/с, $\Lambda_2 = 661$ абонентов/с. Во втором случае $\Lambda_2 = 657$ абонентов/с, первая технология не участвует в передаче данных. Таким образом, предложенная модель уменьшает задержку путём распределения интенсивности всей сети между разными технологиями.

2.6 Выводы по разделу

Предложенные модели и методы для технологий, в которых имеется 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 АУ для случая, когда в одной сети используются разные технологии. Разработанная модель и метод позволяют добиться оптимальной сбалансированности этих этапов таким образом, чтобы пропускная способность системы была максимальной. Данное соотношение ресурсов должно выделять на этап случайного доступа 25% от общего частотно-временного ресурса. При этом, пропускная способность увеличивается на 40% по сравнению с случаем, когда на этап случайного доступа отводится 15%.

Предложена модель решения задачи минимизации средней задержки путём распределения ресурсов канала для одновременного использования двух технологий LTE-M и NB-IoT в одной сети и метод уменьшения задержки на 30% путём распределения АУ между этими технологиями.

3. Массовая межмашинная связь в технологии сотовых сетей для подвижной группы объектов

3.1 Вводные замечания по разделу

В данном разделе исследуется система случайного множественного доступа (СМД) с пачечным процессом поступления сообщения. В работах [52] и [53] рассмотрены обобщения древовидных алгоритмов разрешения конфликтов из работ [29] и [54], а пуассоновский входной поток заменяется на дискретный пачечный марковский процесс прибытия (D-BMAP, discrete-time batch Markovian arrival process)[55]. Показывается, что при пачечном характере входного потока с некоторой средней интенсивностью, задержка в системе становится больше, чем при пуассоновском потоке такой же интенсивности. Обзор исследований по анализу древовидных алгоритмов при замене пуассоновского потока на дискретный пачечный марковский процесс прибытия можно посмотреть в [56].

Теперь перейдем к обзору исследований, в которых рассмотрим современные беспроводные системы передачи в условиях пачечного трафика. Здесь выделим три направления исследований: сотовые сети, сети на основе стандарта IEEE 802.11 и аналогичных стандартов, спутниковые сети. Наиболее широко представлены исследования по первому направлению. Здесь достаточно типичной является работа [57]. В данной работе рассмотрен сценарий, в котором имеется одна БС сети LTE-A (Long-Term Evolution Advanced) и большое число АУ. Все АУ, используя процедуру случайного доступа LTE (LTE Random Access Procedure) на некотором ограниченном интервале времени, передают сообщение на БС. Рассмотрим два варианта распределения моментов появления сообщения на этом интервале. Первый вариант - это Бета распределение [58], а второй - равномерное распределение. Авторы описывают процедуру случайного доступа LTE моделью случайного доступа каналов с оптимальной стратегией доступа к такой системе(см., например [50]). При численном анализе задержки фактически используется непрерывная аппроксимация из работы [59][60]. Результаты численного анализа сравниваются с результатами имитационного моделирования и показывается, что при параметрах, соответствующих требованиям рекомендаций 3GPP [58][61], результаты близки. Аналогичная постановка

задачи рассмотрена в работе [62]. Как и в предыдущей работе [57], при получении численных результатов используются параметры из рекомендаций [58]. Подводя итог обзору работ можно сделать вывод, что исследования, в которых рассмотрены современные беспроводные системы передачи в условиях пачечного трафика, подавляющее число авторов исследуют только пачечный трафик и не уделяют должного внимания сценариям, в которых пачки сообщений появляются на фоне некоторого потока, который всегда присутствует в системе. Для анализа не предлагается принципиально нового подхода. Используется развитие классического подхода из [59] на основе численного анализа дискретного марковского процесса. При этом акцент делается на особенностях построения переходной матрицы Марковской цепи с учётом специфики исследуемого сценария и нахождение характеристик системы на основе этой матрицы. Далее описан именно такой сценарий, в которой рассмотрим технологию NB-IoT, специально рассчитанную для использования моделей пачечного трафика, как подробно описано в сценариях оценки, сформулированных в ITU-R M.2412 [63].

3.2 Сценарий с движущимися платформами

В данном разделе рассмотрим системы, в которых входные потоки не могут быть описаны с помощью моделей с бернуллиевскими и пуассоновскими потоками.

Рассмотрим метод анализа вероятностных характеристик обслуживания пачечного трафика в системах NB-IoT [26]. Сети связи пятого поколения предъявляют новые требования к энергоэффективным сетям дальнего радиуса действия, обслуживающим трафик межмашинного взаимодействия [64]. Новые типы приложений, такие, как удаленное управление или изменение характеристик по запросу, а также использование мобильных платформ с интегрированными датчиками или перемещение рядом с неперекрывающимися кластерами [65] приводят к пачечной структуре трафика на беспроводном участке доступа. Наличие пачечного трафика может ухудшить производительность таких сетей, изначально разработанных для поддержки традиционных сценариев использования, характеризующихся асинхронной передачей сообщений. Рассмотрим метод анализа технологии NB-IoT, определенной 3GPP для

поддержки услуг межмашинного взаимодействия в сетях 5G [66][67] под нагрузкой пачечного трафика. Предлагаемый в работе [26] метод основан на использовании марковских процессов и позволяет проводить анализ различных типов развертываний сетей NB-IoT.

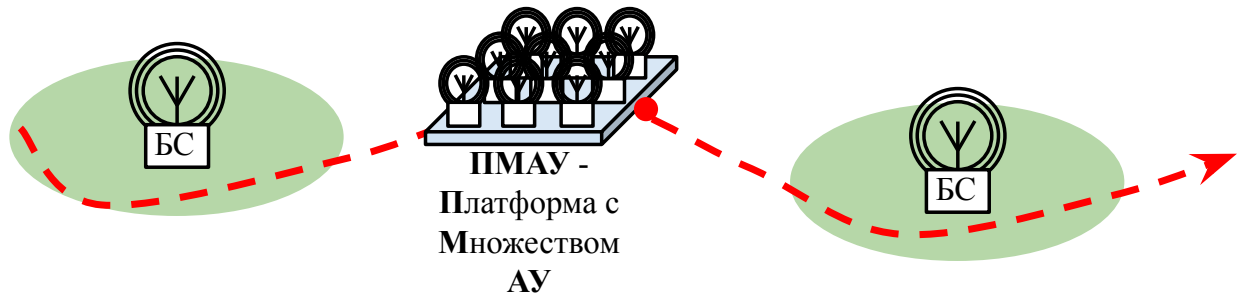


Рисунок 3.1. Модель системы с движущейся платформой.

Как показано на рис. 3.1, рассмотрим сценарий с движущимися платформами, оборудованные с множеством АУ (ПМАУ) (см. [49][68]). Они представляют собой большой сложный объект такой, как судно или поезд с установленными NB-IoT на борту, движущимися через определенную область (см. рис. 3.2)), где расположена 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. При этом, АУ готовы передавать сообщения в любой случайный момент времени. В периоды отсутствия связи готовые к передаче сообщения накапливаются. При входе в зону покрытия БС NB-IoT сформированная пачка сообщений готова к передаче [69].

Таким образом, для новых сценариев использования NB-IoT можно отметить, что [26].

1. Процедура доступа и передачи данных в технологии NB-IoT.

Согласно спецификации NB-IoT [70], передача короткого пакета данных по технологии NB-IoT проходит в три этапа:

- установление синхронизации;
- случайный доступ;
- передача данных.

Рассмотрим два типа АУ (далее – АУ типа I и типа II). АУ типа I в начале работы один раз устанавливают синхронизацию и далее поддерживают ее в процессе работы. АУ типа II выполняют этап установления синхронизации перед передачей каждого сообщения. В сетях

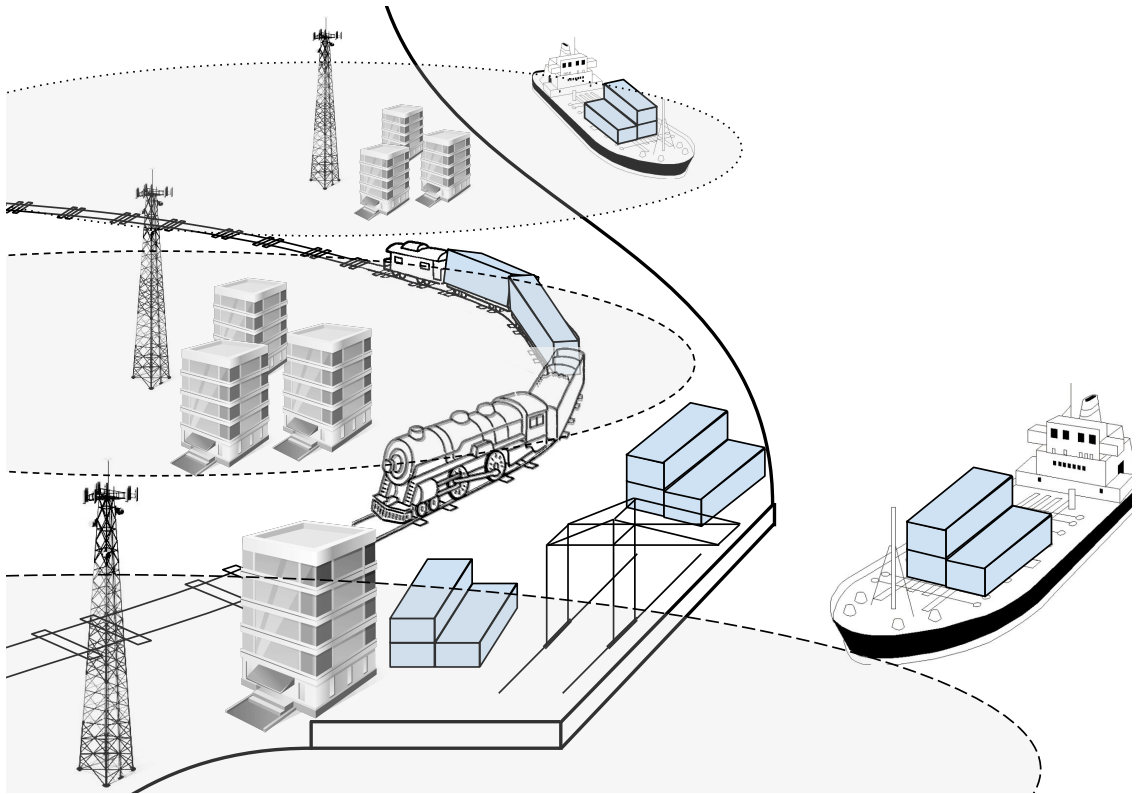


Рисунок 3.2. Платформа с множеством АУ.

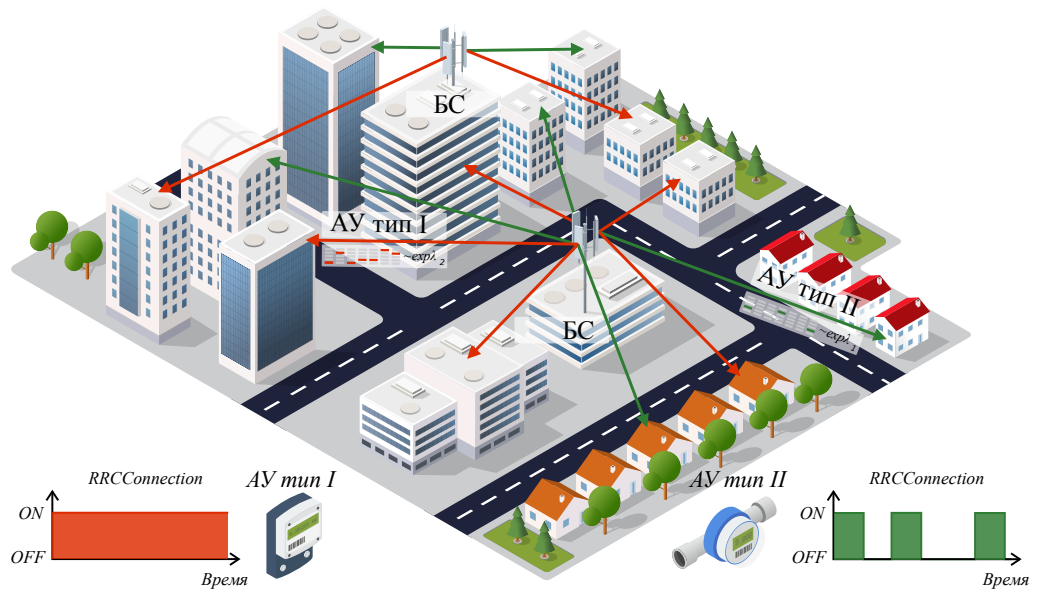


Рисунок 3.3. Передача по расписанию

LTE все время разбито на дискретные интервалы времени, которые называют окнами. Длительность одного окна равна 10 мс [70]. На выполнение каждого этапа затрачивается целое число окон LTE. В общем случае длительность каждого из этапов зависит от конфигурации базовой станции и от случайных факторов (затухание в канале, шумы, случайные моменты появления сообщений и т.п.). Предположим, что

в системе имеется большое число АУ и, при этом, отношение сигнал-шум в радиоканале между базовой станцией и АУ таково, что потери вследствие некорректного декодирования сообщений не происходят. При этих предположениях этапы установления синхронизации и передачи данных занимают фиксированные промежутки времени t_S и t_{data} , соответственно. Длительность этапа случайного доступа случайна, но кратна некоторому интервалу времени длительностью t_R (в англоязычной литературе используется термин random access opportunities, см., например, [57]). Подробное описание случайного доступа в NB-IoT можно найти в [70], а упрощенная модель, которая используется при анализе, описана в работе [57]. Длительность этапа случайного доступа зависит как от числа АУ, которые пытаются получить доступ к каналу, так и от числа специальных ортогональных сигналов (так называемых преамбул [70]). Значения t_S , t_{data} , t_R и число преамбул, которое далее будем обозначать как l , зависят от конфигурации базовой станции и объема передаваемых данных. Далее в работе при анализе будем использовать следующие типовые значения: $t_S = 300$ мс, $t_R = 40$ мс, $t_{data} = 350$ мс и $l = 12$.

2. **Движущиеся платформы.** Рассмотрим системы с движущимися платформами (например, судно, поезд и т.п.), которые оборудованы различными сенсорными устройствами, представляющими собой АУ NB-IoT (см.[49],[68]). Платформы движутся через определенную область, часть которой покрыта сетью NB-IoT. При этом, такие АУ готовы передавать сообщение в любой случайный момент времени. В периоды отсутствия связи сообщения, готовые к передаче, накапливаются. При входе в зону покрытия базовой станции NB-IoT сформированная пачка сообщений готова к передаче. Отметим, что в данном случае в системе присутствуют только АУ типа II.
3. **Передача данных по расписанию и по событиям.** Помимо хорошо известных сценариев, таких, как мониторинг окружающей среды, сейчас обсуждаются сценарии использования сетей NB-IoT для приложений, которые должны получать информацию как через регулярные интервалы времени, так и через случайные. Например, в таких услугах, как интеллектуальный учёт электроэнергии, центральный узел выступает в качестве узла, регулярно запрашивающего информацию о

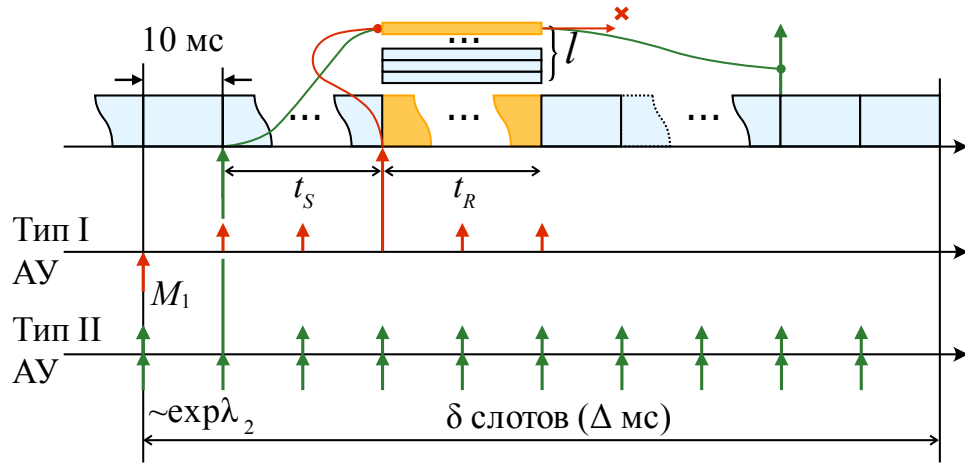


Рисунок 3.4. Временная диаграмма работы системы.

потреблении электроэнергии и получающего данные о некоторых случайных событиях (превышения напряжения и т.п.), см. рис. 3.3. Когда число подключенных АУ достаточно велико, процесс их опроса вызывает пачечную структуру трафика на абонентском интерфейсе [71][72].

При регулярном запросе информации используется АУ типа I, которые управляются с удаленного сервера приложений, и поэтому они всегда активны и поддерживают свой радиointерфейс в активном состоянии. При передаче данных о случайном событии используется АУ типа II, представляющие собой обычные АУ, которые проходят цикл передачи с учётом состояния сна. Эти АУ могут производить некоторые периодические измерения. Их рабочие циклы предполагаются асинхронными.

Рассмотрим систему из работы [32] с интервалами, в которой время разделено на интервалы, как показано на рис. 3.4. Длительность интервала составляет 10 мс, что равно кадру LTE и определяет минимальное время случайного доступа без повторений. Остальные параметры измеряются в терминах этой базовой единицы: (i) длительность синхронизации t_s , (ii) длительность случайного доступа t_R , время передачи данных t_{data} , время обработки сообщения t_H . Значения этих параметров приведены в таблице 3.1.

Примечательно, что в зоне покрытия соты находится фиксированное количество АУ типа I, M_1 . Эти АУ запрашиваются приложениями в начале регулярного временного интервала продолжительностью Δ . Этот временной интервал зависит от типа приложения и может составлять от минут до часов. По запросу все АУ M_1 пытаются передать сообщение выполняя процедуру случайного доступа NB-IoT.

После генерации сообщения оба типа АУ инициируют процедуру случайного доступа в следующем временном окне. Вероятность запуска процедуры случайного доступа равна $p = \min(n/k, 1)$, где n – количество преамбул, k – число АУ, которые конкурируют в окне. Как показано в [50][57], этот подход минимизирует задержку доступа к каналу АУ.

Таблица 3.1. — Параметры системы по умолчанию.

Название параметра	Обозначение	Значение
Количество преамбул	n	12
Время синхронизации	t_S	30 окон
Временной RAP без коллизий	t_R	4 окон
Время обработки сообщения	t_H	1 окно
Время передачи данных	t_{data}	35 окон
Период сообщения для АУ типа I	Δ	1 - 60 мин
Число АУ типа I	m_1	100-10000
Скорость поступления сообщений от АУ типа II	λ_2	1-100 в с

Делается оценка средних задержек трафика АУ типа I и типа II, $E[\tau_1]$ и $E[\tau_2]$, соответственно, которые включают в себя время необходимое для синхронизации, случайного доступа и передачи данных.

Модель, представленная в разделе 3.2, может быть описана двухмерной цепью Маркова $\{N_t^1, N_t^2, t = 1, 2, \dots, \delta\}$, где N_t^1 и N_t^2 – число АУ типа I и АУ типа II системы в момент времени t , соответственно. Набор индексов процесса дискретен с длительностью макроокон Δ/δ , где δ – число окон между прибытиями пакетов от АУ типа I, Δ – время между этими событиями. Процесс определен в пространстве состояний

$$N_t^1 \times N_t^2 = \{0, 1, \dots, M_1\} \times \{0, 1, \dots\}, \quad (3.1)$$

где M_1 – число АУ типа I в системе.

Диаграмма переходов состояний показана с помощью двухмерной модели представлена на рис. 3.5. Как видно из рис. 3.5, переходы ограничены l состояниями. Причина в том, что не более l сообщений могут быть обработаны одновременно из-за ограничений на количество ортогональных каналов в

NB-IoT. Запишем следующее рекурсивные соотношения для АУ типа I

$$N_{t+1}^1 = \begin{cases} M^1 & \text{если } t = 1 \\ N_t^1 - T^1(N_t^1, N_t^2) & \text{иначе} \end{cases}, \quad (3.2)$$

и для АУ типа II

$$N_{t+1}^2 = N_t^2 - T^2(N_t^1, N_t^2) + V_t^2, \quad (3.3)$$

где N_1^2 – число АУ типа II, оставшихся в системе на конец предыдущего периода Δ , V_t^2 – число АУ типа II, ставших активными в окне, λ_2 – интенсивность АУ типа II. Здесь $T(N_t^1, N_t^2)$ – число успешно переданных сообщений АУ типа II.

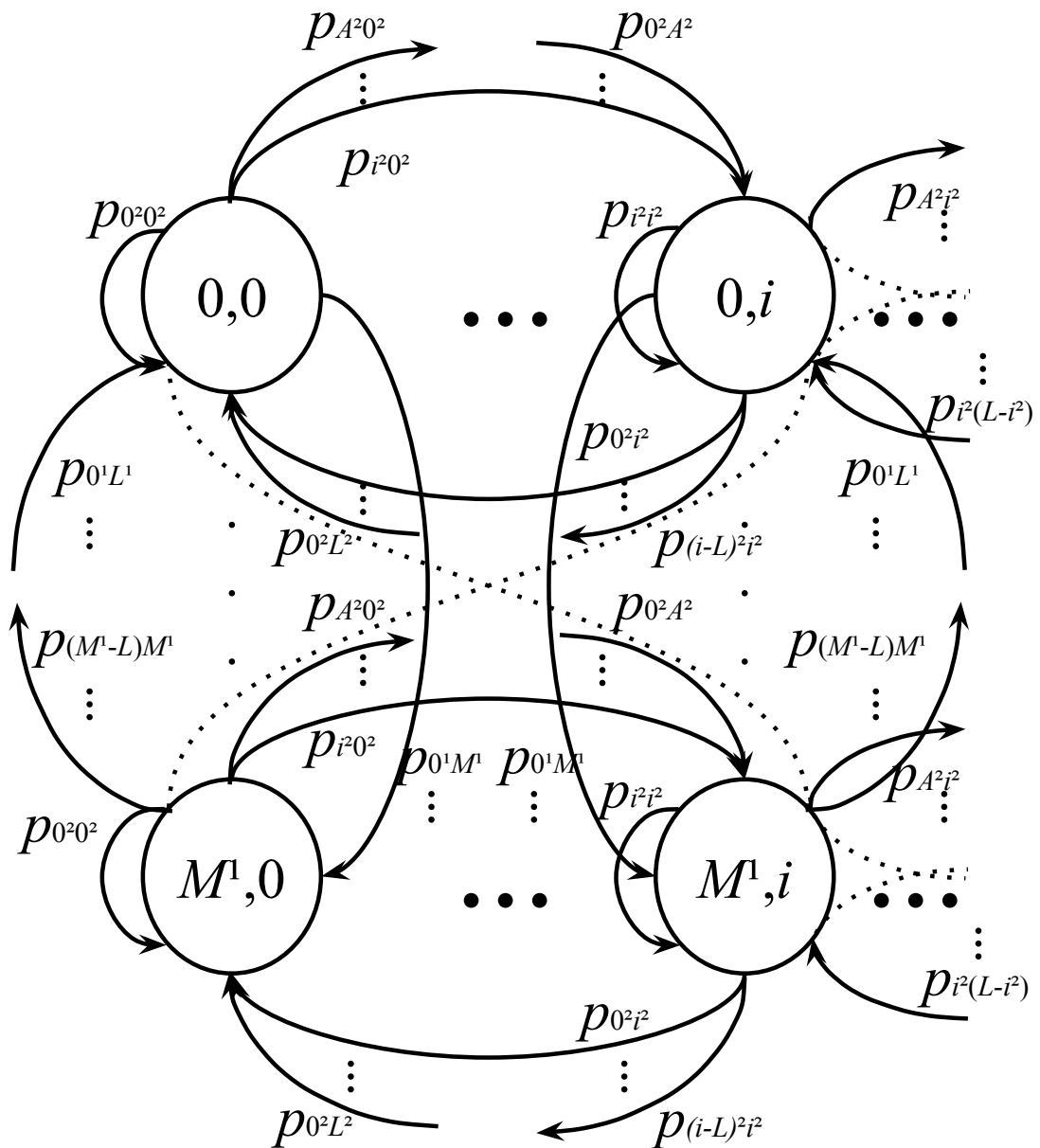


Рисунок 3.5. Диаграмма переходов состояний двухмерной модели.

Для решения представленной модели необходимо построить матрицу вероятностей переходов, использовать ее для решения системы линейных уравнений и, наконец, найти стационарные вероятности состояний двухмерной цепи Маркова [73]. Стационарные вероятности в дальнейшем позволят оценить параметры системы, такие, как среднее число активных АУ обоих типов в системе и связанные с ними средние задержки [74][75]. Однако, пространство состояний такого процесса очень велико, что не позволяет использовать его на практике. Таким образом, хотя эту модель можно описать математически, получить окончательные характеристики с разумным числом АУ типа I в системе сложно. Далее в работе [32] применена технология агрегации состояний (см. [76][77]) для уменьшения размерности процесса.

3.3 Модель, описывающая сценарий с движущимися платформами

Для описания сценария с движущимися платформами используется модель с бернуллиевским входным потоком, введённая разделе 1, со следующим изменением: в системе имеется два состояния ON и OFF . В состоянии ON система работает согласно модели из подраздела 1.4. В состоянии OFF АУ из пассивного состояния может стать активным и будет находиться в активном состоянии до окончания состояния OFF . Время пребывания в состояниях ON и OFF распределено по геометрическому закону распределения с параметрами q_{ON} и q_{OFF} , соответственно. То есть система остается в состоянии ON с вероятностью q_{ON} и переходит в состояние OFF с вероятностью $1 - q_{OFF}$. Данная модель полностью описывается набором параметров: (i) M – число АУ, (ii) q – вероятность перехода АУ в активное состояние, (iii) l – число преамбул, q_{ON} и q_{OFF} .

Работа модели описывается случайным процессом $\{S^t, N_{act}^t, t = 0, 1, \dots, M\}$, где S^t принимает значение 1 в состоянии ON и 0 в состоянии OFF , N_{act}^t – число активных АУ.

Значение компоненты S^{t+1} случайного процесса в окне $t + 1$ зависит только от значения этой компоненты в окне t и формируется следующим образом (см. рис.3.6):

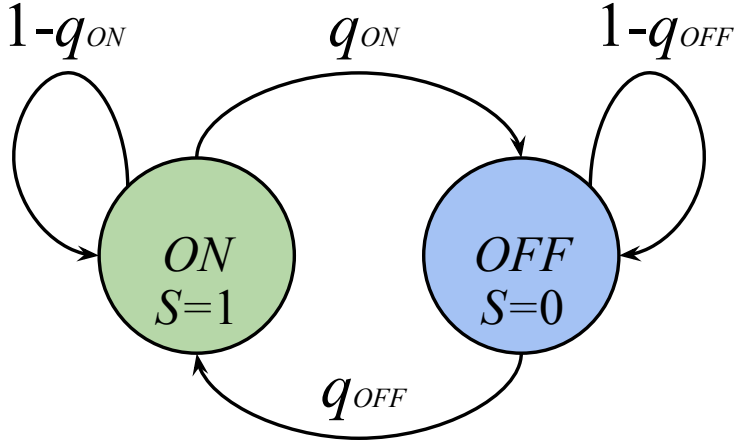


Рисунок 3.6. Состояние ПМАУ.

$$S^{t+1} \begin{cases} 0 \text{ с вероятностью } q_{OFF}, \text{ если } S^t = 0 \\ 0 \text{ с вероятностью } 1 - q_{ON}, \text{ если } S^t = 1 \\ 1 \text{ с вероятностью } q_{ON}, \text{ если } S^t = 1 \\ 1 \text{ с вероятностью } 1 - q_{OFF}, \text{ если } S^t = 0 \end{cases} . \quad (3.4)$$

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:

$$N_{act}^{t+1} = N_{act}^t - T(N_{act}^t, S^t) + V^t(N_{act}^t), \quad (3.5)$$

где $T(N_{act}^t, S^t)$ – количество успешных передач, когда система находится в состоянии S^t и 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 .

3.4 Анализ сценария с движущимися платформами

С учётом вышеизложенного случайный процесс $\{S^t, N_{act}^t, t = 0, 1, \dots\}$ описывается двухмерной цепью Маркова. Введем 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 (3.5), переходные вероятности можно рассчитать по следующим формулам:

$$\begin{cases} p(j, 0|i, 1) = q_{ON} \sum_{m=\max(0, i+j)}^{M-j} pbin(m - (i - j), M - i, 1) Pr\{T = m|i\} \\ p(j, 0|i, 0) = (1 - q_{OFF}) pbin(i - j, M - i, q) \\ p(j, 1|i, 1) = (1 - q_{ON}) \sum_{m=\min(0, i+j)}^{M-j} pbin(m - (i - j), M - i, 1) Pr\{T = m|i\} \\ p(j, 1|i, 0) = q_{OFF} pbin(i - j, M - i, q) \end{cases} \quad (3.6)$$

Для вычисления средней задержки может быть использована трёхшаговая процедура, описанная в конце подраздела 1.5.

Шаг 1. На основе двухмерной Марковской цепи рассчитывается стационарное распределение на парах 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.

Основное отличие здесь будет на шаге 1, где расчёт стационарных вероятностей выполняется из двухмерной матрицы вероятностей перехода рис. 3.8 двухмерной Марковской цепи, по аналогии с моделью из первого раздела диссертационной работы с доопределением трёх матриц при нахождении вне зоны действия БС пересечение 00 и переходы из зоны в зону 10 и 01, соответственно. Исходя из двухмерной модели (см. рис. 3.5), представленной в подразделе 3.2, следует, что диаграмма переходных состояний описывается трёхмерной моделью (см. рис. 3.7).

В качестве примера использования данной модели используется следующий сценарий: платформа, на которой расположено 5000 АУ перемещается по некоторой территории. Среднее время нахождения в зоне действия БС 20 секунд ($T_{ON} = 20$). Исследуется зависимость средней задержки от среднего времени пребывания вне зоны действия БС (T_{OFF}) для следующих трёх случаев: в первом случае среднее время нахождения АУ в неактивном состоянии $T_{inactive} = 1$ с, а во втором случае 1 мин и в третьем случае 10 мин. В случае, когда $T_{OFF} = 0$, платформа всегда находится в зоне действия БС. Соответствие данных сценария и параметров модели, рассмотренной в данном разделе, представлено в таблице 3.2.

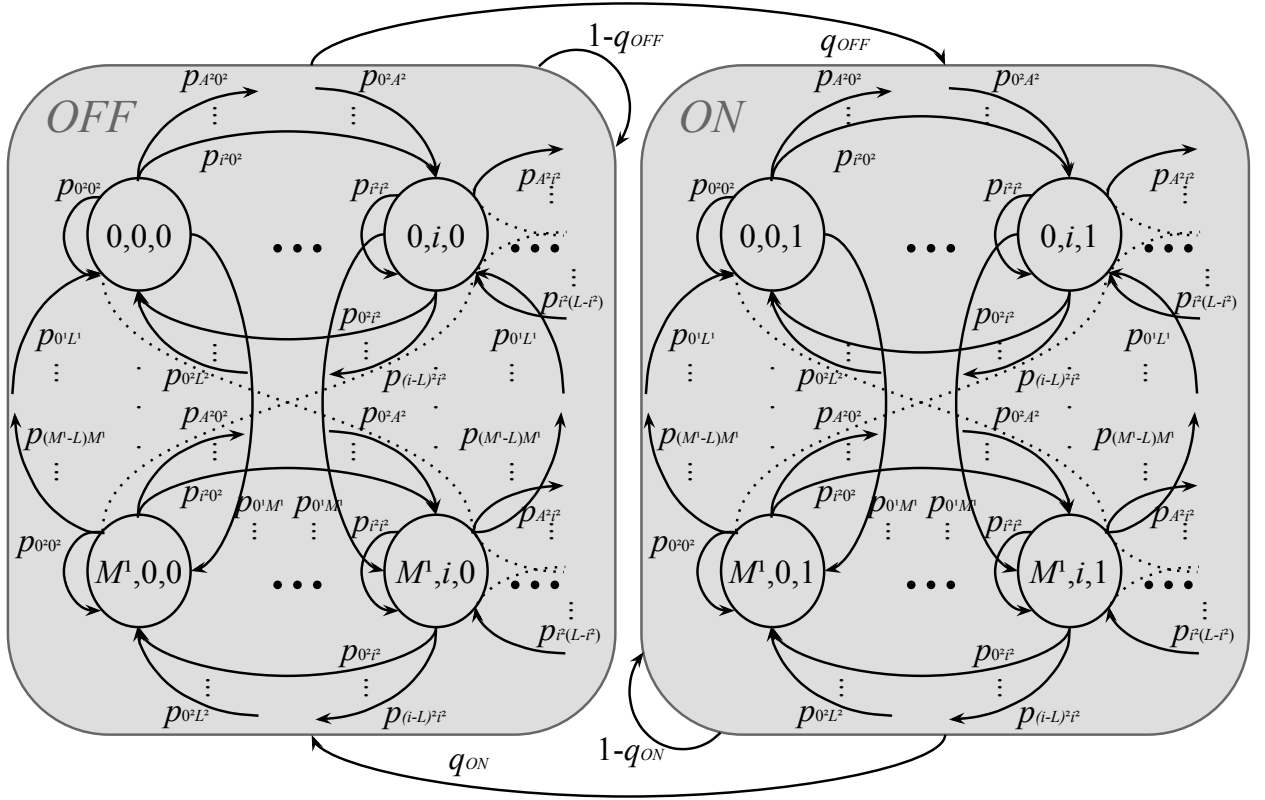


Рисунок 3.7. Диаграмма переходов состояний трёхмерной модели

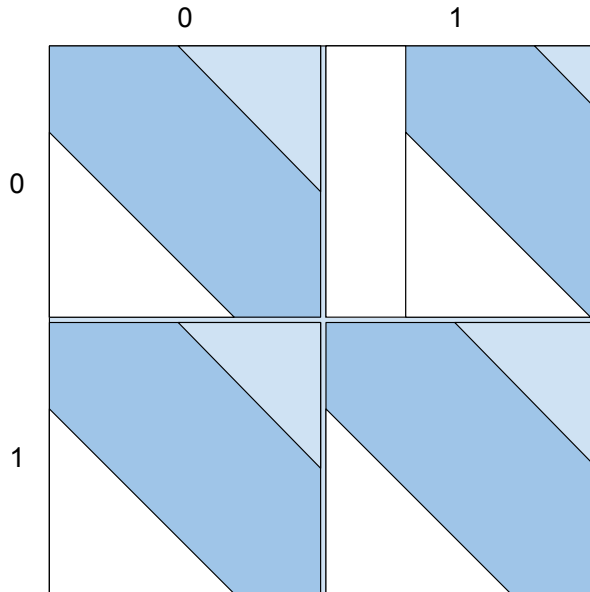


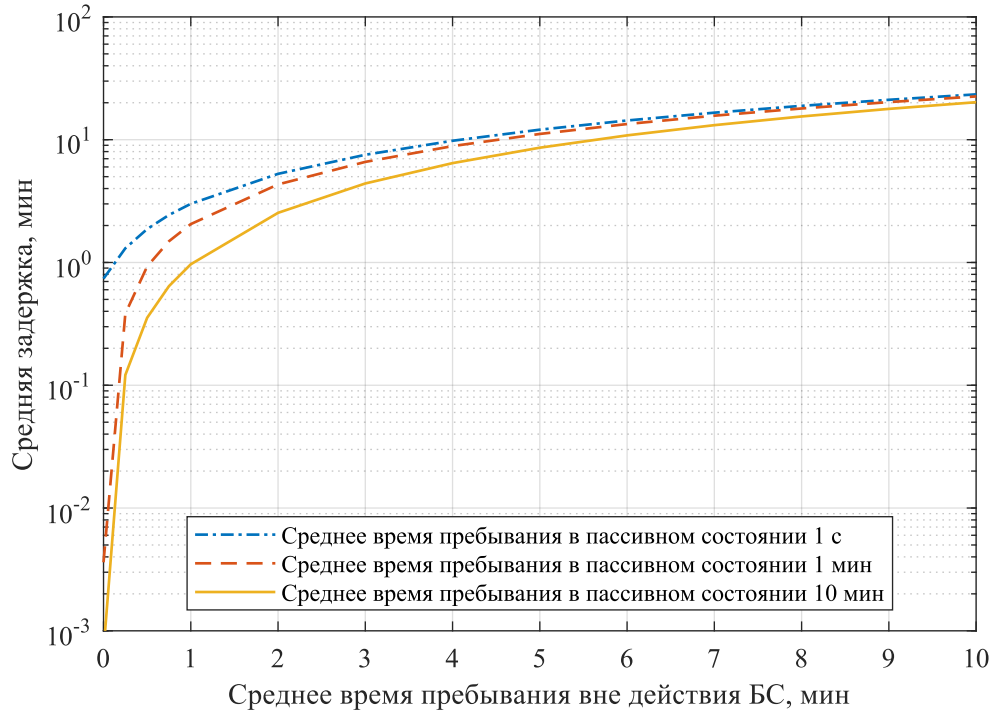
Рисунок 3.8. Структура двухмерной матрицы вероятностей перехода

Для модели на рис. 3.9 представлена зависимость, полученная в результате применения вышеописанной трёхшаговой процедуры вычисления средней задержки.

Введём в рассмотрение модели, описывающие процесс взаимодействия АУ с БС и процесс возникновения сообщений у АУ. Процесс взаимодействия АУ с БС будем описывать моделью многоканальной системы случайного множествен-

Таблица 3.2. — Взаимосвязь между данными сценария и параметрами модели.

Данные сценария	Параметры модели
Среднее время пребывания в зоне действия БС $T_{ON} [c] = 20$	$q_{ON} = 1 - t_{окна} [c] / T_{ON}$
Среднее время пребывания вне зоны действия БС $T_{OFF} [c]$	$q_{OFF} = 1 - t_{окна} [c] / T_{OFF}$
Среднее время пребывания в неактивном состоянии $T_{inactive}$	$q = t_{окна} [c] / T_{inactive}$

Рисунок 3.9. Зависимость средней задержки от среднего времени пребывания вне зоны действия БС (T_{OFF})

ного доступа типа АЛОНА (см. например, [50]). Модель системы, описанная в предыдущем разделе, содержала 5 допущений. В данной модели системы вводятся допущения 1–4 из предыдущего раздела, а вместо 5 допущения вводятся два новых 5 и 6:

Допущение 1. Базовые станции БС₁ и БС₂ обслуживают l_1 и l_2 параллельных каналов случайного множественного доступа. Время передачи по каналу разделено на окна. Все окна имеют одинаковую длительность, равную t_1 и t_2 для БС₁ и БС₂. Окна пронумерованы целыми неотрицательными числами. Далее, для краткости изложения, окном с номером t будем называть окном t . Моменты

разделения окон во всех каналах одинаковы и известны всем абонентам. Абонент может начинать передачу сообщения только в начале очередного окна.

Допущение 2. В каждом окне может произойти одно из трёх событий:

1. в окне передаёт один абонент: событие $У$ – успех;
2. в окне не передаёт ни один абонент: событие $П$ – пусто;
3. в окне передают два или более абонентов: событие $К$ – конфликт.

Допущение 3. Базовая станция анализирует выход канала в конце окна, где узнает о событии в окне и передаёт информацию о событии всем абонентам, которые ассоциированы с данной станцией. Абоненты, у которых есть сообщение, используют эту информацию. И в следующем окне принимают решение передавать или нет сообщение в соответствии с вероятностью: $P_t = \min\left(1, \frac{l}{N_t}\right)$, где N_t – число активных АУ к началу окна t . Заметим, что такой алгоритм работы АУ является оптимальным с точки зрения минимизации средней задержки. На практике он не может быть реализован, так как число активных АУ неизвестно. Для любого алгоритма, который может быть реализован, средняя задержка будет выше [51].

Допущение 4. Предполагается, что зоны покрытия базовых станций таковы, что потери данных, вызванные низким уровнем принимаемого сигнала, пренебрежимо малы.

Допущение 5. Для описания процесса возникновения сообщений будем использовать две модели, которые далее будем называть моделью с пачечным опросом АУ и *моделью со случайной активностью АУ*.

В модели с пачечным опросом M АУ новое сообщение для передачи появляется у всех АУ одновременно с периодом, равным Δ единиц времени. После появления нового сообщения АУ пытается осуществить его передачу на БС, с которой он ассоциирован. Если АУ не предаст сообщение до появления нового сообщения, то не переданное сообщение теряется, и АУ начинает работать с новым сообщением.

Таким образом, модель с периодическим опросом АУ полностью задаётся двумя параметрами: число АУ M и длительность периода Δ . Требуется закрепить M_1 и M_2 АУ за БС₁ и БС₂, соответственно, таким образом, чтобы минимизировать максимальное значение средней задержки при передаче сообщения в системе. При этом $M_1 + M_2 = M$. Отметим, что в реальных условиях сеть оператора связи может использоваться несколькими поставщиками услуг [78], [79]. Таким образом, варьируя значения Δ и M охватываются различные

степени «пачечности» процесса поступления сообщений для заданной фиксированной нагрузки.

Допущение 6. Для модели с периодическим опросом АУ предполагается, что интервал между опросами АУ в соте достаточен, чтобы сообщения АУ могли быть переданы и не оставалось ни одного активного АУ в конце интервала.

Для возможности сравнения моделей полагается, что среднее число сообщений, которые возникают в системе в единицу времени для двух введенных выше моделей одинаково, то есть справедливо равенство $\Lambda = M/\Delta$.

Таблица 3.3 иллюстрирует параметры технологий NB-IoT и LTE-M, используемые в работе [81]. Отметим, что на основе данных, представленных в этой таблице, в дальнейшем осуществляется пересчет временных параметров из окон в единицы времени.

Среднюю задержку для модели с периодическим опросом АУ можно рассчитать тремя способами с разной степенью точности и сложности вычислений.

Первый способ расчёта – это точный метод с помощью Марковской модели, предложенной в [26]. Аналогично вышеописанному в подразделе 3.3 вводится Марковская цепь, описывающая количество активных АУ в момент времени t , при условии, что в первом окне будет задано M активных АУ. Матрица данной Марковской цепи имеет размерность $(M + 1) \times (M + 1)$. Переходные вероятности вычисляются аналогично вышеописанной части, но при $\lambda = 0$. Далее такую матрицу будем обозначать $P(0)$.

Обозначим через B случайную величину, равную числу окон от момента появления сообщений до момента, когда сообщение будет передано. Обозначим через $\delta = \frac{\Delta}{t}$ период появления сообщений в окнах. Рассмотрим алгоритм вычисления зависимости $E[B]$ от M и δ :

Шаг 1. Формируем начальный вектор длины $M + 1$:

$$\bar{p}_0 = (0, 0, \dots, 1); \quad (3.7)$$

Для $t = 1, \dots, \delta$ выполняется следующее действия: вычисляется распределение числа активных АУ в окне t

$$\bar{p}_{t+1} = \bar{p}_t P(0); \quad (3.8)$$

Вычисление среднего числа активных АУ в окне t

$$E[N_t] = \sum_{i=0}^{n-1} ip_t^{(i)} \quad (3.9)$$

Шаг 3. Вычисляем значение $E[B]$ при выбранном значении M и δ

$$b(M, \delta) = \frac{\sum_{i=0}^{\delta} \frac{E[N_i]}{\delta}}{(M - N_{\delta}/\delta)} \quad (3.10)$$

Средняя задержка от момента появления сообщений до момента доставки сообщения на БС вычисляется аналогично модели со случайной активностью АУ, но без учёта времени синхронизации, так как согласно предоставляемой услуги, АУ находятся в состоянии установленной связи (RRC-Connected), то есть, $\tau(M, \Delta) = b(M, \Delta/t_{\text{окна}}) t_{\text{окна}} + t_{\text{данных}}$.

Расчёт средней задержки указанным способом является ресурсоёмким. Это связано с операциями с переходными матрицами больших размерностей, определяющими число активных АУ в каждый момент t .

Второй способ расчёта опирается на рекуррентном уравнении постепенного перехода АУ из активного состояние в состояние без готовых к передаче сообщений. Согласно описанной в работе [81] методике, приближённо среднюю задержку можно рассчитать с помощью рекуррентной формулы среднего числа активных АУ (3.11):

$$\widehat{N}_{t+1} = \widehat{N}_t - \max \left(0, l \widehat{N}_t \frac{P_t}{l} \left(1 - \frac{P_t}{l} \right)^{\widehat{N}_t - 1} \right), \quad (3.11)$$

где $P_t = \min \left(1, \frac{l}{\widehat{N}_t} \right)$, а число активных АУ в первом окне $N_1 = M$.

Далее, средняя задержка вычисляется по формуле (3.10).

Отметим, что, используя как первый, так и второй способы расчёта, нельзя получить явное выражение средней задержки как функции параметров модели. Третий способ, позволяющий получить решение в явном виде, заключается в использовании следующей, более грубой оценке чем (3.11), для числа активных АУ,

$$\widehat{N}_{t+1} = \left(\widehat{N}_t - le^{-1} \right) I \left(\widehat{N}_t \geq le^{-1} \right). \quad (3.12)$$

Для данной оценки будем считать, что все АУ выходят из системы за время le^{-1} , то есть

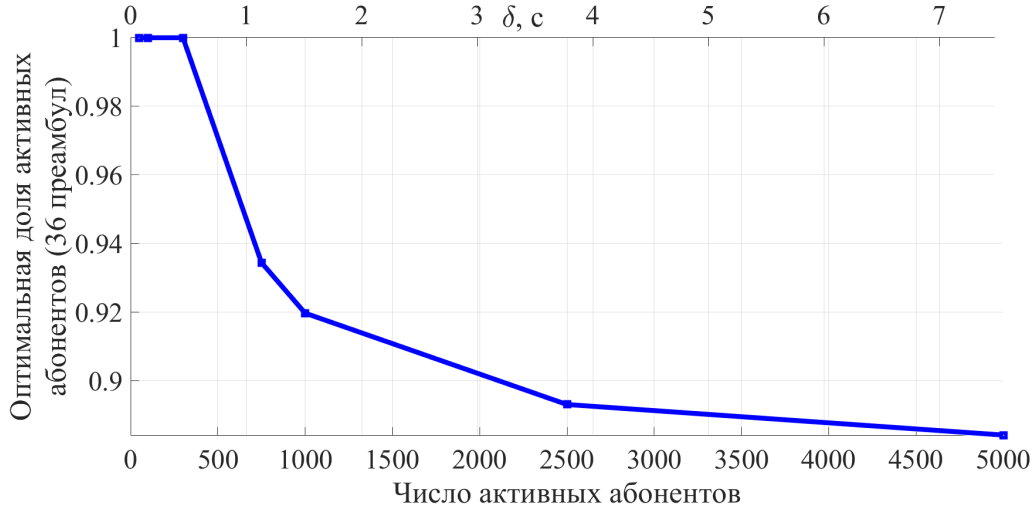


Рисунок 3.10. Оптимальная доля абонентов ассоциированных с LTE-M для модели с периодическим опросом абонентов.

$$\widehat{\widehat{b}}(M, \delta) = \begin{cases} \frac{M}{2le^{-1}}, & \text{если } \frac{M}{le^{-1}} \leq \delta \\ \frac{M}{le^{-1}} - \frac{\delta}{2}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.13)$$

В качестве иллюстрации на рис. 3.11 представлены зависимости среднего числа активных АУ от времени, полученные 4 способами:

1. Имитационное моделирование;
2. Точный расчёт с использованием Марковской цепи (см. формулы (3.7)–(3.9));
3. Приближённый расчёт на основе рекуррентного выражения (3.11);
4. Выражение для задержки в явном виде на основе (3.12).

Отметим, что для среднего числа активных АУ наблюдается хорошее совпадение между всеми четырьмя способами расчёта: тремя рассмотренными способами и имитационным моделированием.

Для выбора оптимального распределения числа АУ M_1 и M_2 для первой и второй технологии, соответственно, требуется решить следующую оптимизационную задачу:

$$\begin{cases} \max(\tau_1(M_1, \Delta), \tau_2(M_2, \Delta)) \rightarrow \min \\ M_1 + M_2 = M \end{cases} \quad (3.14)$$

Для оптимальных значений выполняется равенство $\tau_1(M_1) = \tau_2(M_2)$. Таким образом, для решения этой оптимизационной задачи требуется проделать следующие действия:

- Шаг 1. Численным путём получить зависимость $b_1(M_1, \delta)$;
- Шаг 2. Численным путём получить зависимость $b_2(M_2, \delta)$;

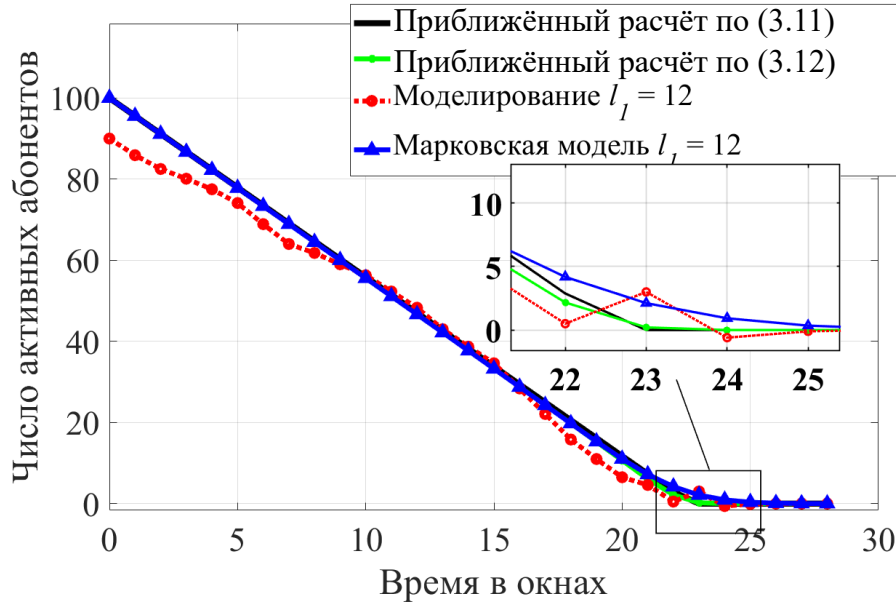


Рисунок 3.11. График зависимости числа активных АУ от времени.

Шаг 3. Численным путем решить следующее уравнение:

$$b_1 \left(M_1, \frac{\Delta}{t_{\text{окно1}}} \right) t_{\text{окно1}} + t_{\text{дан.1}} = b_2 \left(M_2, \frac{\Delta}{t_{\text{окно2}}} \right) t_{\text{окно2}} + t_{\text{дан.2}}$$

Задача решается при следующих ограничениях:

$$M_1 + M_2 = M; \quad (3.15)$$

$$M_1 / (l_1 e^{-1} < \Delta / t_{1, \text{окно}}); \quad (3.16)$$

$$M_2 / (l_2 e^{-1} < \Delta / t_{2, \text{окно}}). \quad (3.17)$$

Следует отметить, что при ограничениях (3.16) и (3.17) к концу периода Δ все абоненты успешно передадут свои сообщения.

Для того чтобы упростить решение можно вместо точных значений $b_1(M_1, \delta)$ и $b_2(M_2, \delta)$ воспользоваться их оценками согласно формуле (3.13) и получить решения в явном виде. Рассмотрим случай $\frac{M_1}{l_1 e^{-1}} < \delta$ и $\frac{M - M_1}{l_2 e^{-1}} < \delta$. Расчёт задержки для первой и второй технологий представлены в формулах (3.18) и (3.19), соответственно:

$$\tau_1 = \frac{M_1}{l_1 e^{-1} 2} t_{1, \text{окно}} + t_{1, \text{дан.}} \quad (3.18)$$

$$\tau_1 = \frac{M - M_1}{l_2 e^{-1} 2} t_{2, \text{окно}} + t_{2, \text{дан.}} \quad (3.19)$$

Для нахождения оптимального значения M_1 требуется решить уравнение:

$$\frac{M_1}{l_1 e^{-1} 2} t_{1, \text{окно}} + t_{1, \text{дан.}} = \frac{M - M_1}{l_2 e^{-1} 2} t_{2, \text{окно}} + t_{2, \text{дан.}}, \quad (3.20)$$

при условии выполнения неравенств (3.16) и (3.17). В таком случае решение уравнения будет: $M_1 = \frac{M l_1 t_{2, \text{окно}} + l_1 l_2 e^{-1} (t_{1, \text{дан.}} - t_{2, \text{дан.}})}{l_1 t_{2, \text{окно}} + l_2 t_{1, \text{окно}}}$

В точке оптимума значение задержки для обеих технологий совпадают и равны:

$$\tau_{\text{опт.}} = \frac{\frac{M l_1 t_{\text{слт}2} + l_1 l_2 e^{-1} (t_{1, \text{дан.}} - t_{2, \text{дан.}})}{l_1 t_{2, \text{окно}} + l_2 t_{1, \text{окно}}}}{l_1 e^{-1} 2} t_{1, \text{окно}} + t_{1, \text{дан.}} \quad (3.21)$$

На рис. 2.12 показаны значения средней задержки как функции от общего числа АУ в системе M и периода опроса абонентов Δ для оптимального распределения абонентов между технологиями LTE-M и NB-IoT. Отметим, что при фиксированной нагрузке $\frac{M}{\Delta}$ средняя задержка сообщения увеличивается с ростом M и Δ . Такое поведение обусловлено пачечной структурой трафика [82]. Для численных расчетов выбрано 12 преамбул для NB-IoT и 5 преамбул для LTE-M.

Таблица 3.3. — Характеристики NB-IoT и LTE-M системных моделей.

Технология	LTE Cat NB 1	LTE Cat M1
Размер пакета	200 байт	200 байт
Количество преамбул	$l_1 = 12$	$l_2 = 36$
Синхронизация	$t_{\text{синх.1}} = 300$	$t_{\text{синх.2}} = 300$
Временный бесконфликтный RAP и время на обработку сообщений	$t_{\text{окно1}} = 40 \text{ мс}$	$t_{\text{окно2}} = 20 \text{ мс}$
Время передачи данных	$t_{\text{дан.1}} = 350 \text{ мс}$	$t_{\text{дан.2}} = 80 \text{ мс}$

Для анализа численных результатов построены рис. 3.13 и 2.13, на которых представлена задержка передачи сообщения для моделей с периодическим и случайным опросом АУ для двух рассмотренных технологий: NB-IoT с 12 преамбулами (красный цвет) и LTE-M с 36 преамбулами (синий цвет) с 500 АУ и др. Параметры, используемые для построения этих графиков, представлены в таблице 3.3. Анализируя представленные данные, отметим, что, во-первых, для модели с периодическим запросом абонентов предложенный метод расчета средней задержки совпадает с имитационным моделированием и Марковской моделью. Для этой модели существует точка пересечения, определяющая оптимальные соотношение числа АУ для различных технологий.

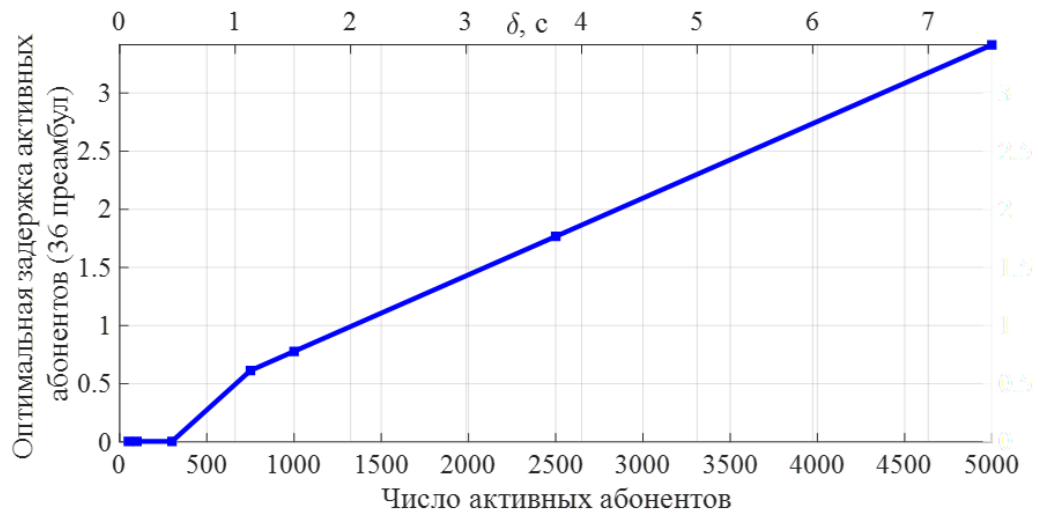


Рисунок 3.12. Модель с периодическим опросом абонентов. Оптимальная задержка абонентов ассоциированных с LTE-M.

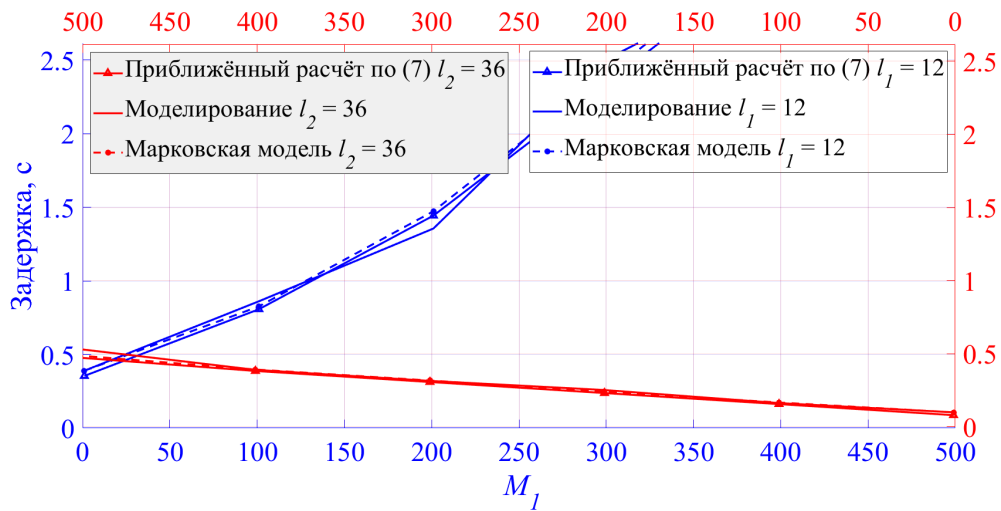


Рисунок 3.13. Модель с периодическим опросом. Задержка передачи сообщения для двух технологий.

На рис. 3.12 показаны значения оптимальной средней задержки в рассмотренной системе, которая соответствует доли абонентов, ассоциированных с технологией LTE-M для модели с периодическим опросом абонентов.

Определив существование оптимальной точки для модели с периодическим опросом абонентов, рассмотрим оптимальное, с точки зрения средней задержки, число АУ и долю общей части абонентов ассоциированных с LTE-M, представленные на рис. 2.12 и 3.10. Отметим, что с ростом числа активных АУ наблюдается линейный рост числа АУ, которые должны быть ассоциированы с технологией LTE-M. Как видно из рис. 3.10, доля абонентов, которые должны быть ассоциированы с технологией LTE-M убывает.

3.5 Особенности построения матриц Марковской цепи

Аппроксимация через агрегацию состояний

Рассмотрим одномерную модель цепи Маркова $\{N_t, t = 1, 2, \dots, \delta\}$, где N_t — общее число АУ обоих типов в системе в момент времени t . Таким образом, пространство состояний процесса — это просто $N_t = \{0, 1, \dots\}$. Вспоминая наши предположения, легко увидеть, что выбор следующего состояния зависит только от текущего. Это подразумевает, что процесс $\{N_t, t = 1, 2, \dots, \delta\}$ является Марковским.

Диаграмма переходов состояний приближенной модели представлена на рис. 3.14. Главное отличие по сравнению с двухмерной моделью на рис. 3.5 заключается в том, что вывод вероятностей переходов теперь проще, поскольку не нужно различать два типа АУ в системе. Однако, такое поведение усложняет вывод интересующих метрик. В частности, последние могут быть получены только в терминах границ и приближений, как обсуждается ниже.

Также при выводе теоретической формулы проще решить задачу нахождения вероятности попадания одного сообщения в канал при условии, что сообщения неразличимы для первого и второго типов АУ. Все остальные свойства модели сохранились, за счет чего уменьшилась размерность и сложность модели.

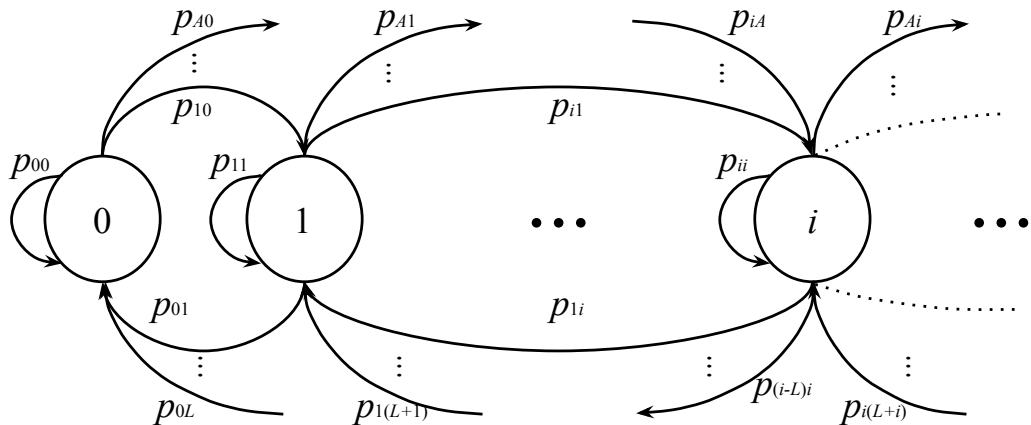


Рисунок 3.14. Диаграмма переходов состояний одномерной модели.

Теперь приступим к параметризации предлагаемой модели. Можно заметить, что число активных АУ типа I и типа II в интервале времени $t + 1$ связано

с числом активных АУ в интервале времени t следующим образом:

$$N_{t+1} = N_t - T(N_t) + V_t + M^1 I(t = 1), \quad (3.22)$$

где V_t – число АУ обоих типов, которые становятся активными в одном окне, $T(N_t)$ – число успешных передач сообщений, когда в системе N_t – число АУ, которое остается в конце предыдущего периода Δ , $I(t = 1)$ – индикаторная функция, т. е. $I(t = 1) = 1$, $I(t \neq 1) = 0$.

Для случая $i > j$ можно записать пороги суммирования, которые определяют ограничение на общее возможное число активных АУ, которое может быть в каждом из вариантов уравнений.

Первые два варианта имеют существенные различия, а последний может быть таким же, как и в случае, когда $i > j$ и $i \leq j$. По этой причине в работе [31] разделяется условная вероятность перехода на две ветви.

Рассмотрим случай, когда $i > j$. Воспользуемся (3.22). Можно рассчитать вероятности перехода $\{N_t, t = 1, 2, \dots, \delta\}$, учитывая все возможные переходы из состояния i в состояние j . События $i > j$ происходят в следующих случаях: (i) когда ни один активный АУ не может успешно передавать, и (ii) в системе достаточно АУ для того, чтобы иметь j активных АУ. Другой вариант — когда ни один новый АУ не становится активным, но число успешно переданных сообщений достаточно для перехода в состояние с j активными АУ. Наконец, третий вариант, когда разница между новыми активными АУ и число успешно переданных сообщений составляет ровно j . При учёте этих деталей, вероятности перехода принимают следующий вид:

$$p_{ij} = p\{j \mid i\} = \sum_{m=\max(0, i-j)}^l \frac{\lambda_2^{m-(i-j)}}{(m - (i - j))!} e^{-\lambda_2} Pr\{T = m \mid i\}, \quad (3.23)$$

где m — число успешно переданных сообщений. Максимальное значение m равно $\max(0, i - j)$, так как в этом случае в систему поступает $m - (i - j)$ новых активных АУ. Верхний предел суммы задается l , так как в окне не может быть успешно передано больше сообщений, чем число ортогональных каналов l . Также отметим, что выражение под знаком суммы в (3.23) состоит из двух членов. Первый член — безусловная вероятность, определяет вероятность определенного числа новых АУ, поступивших в систему в окно. Второй член — условная вероятность, определяет вероятность числа успешно переданных сообщений.

Обращаем внимание, что в (3.23) есть член $Pr\{T = m \mid i\}$, указывающий на вероятность того, что в системе имеется m активных АУ с сообщением,

готовым к передаче. Эта величина принимает значение 0, когда $S_t = 0$. В противном случае имеем

$$Pr\{T = m \mid i\} = \sum_{k=0}^i C_i^k p^k (1-p)^{i-k} P(l, k, m), \quad (3.24)$$

где вероятность определяется параметрами $T = m$, при условии, что цепь находится в состоянии i , C_i^k — сокращение от биномиального коэффициента, т.е. $C_i^k = \binom{k}{i}$.

В (3.24), p — это вероятность того, что активный АУ передает в текущем окне, которая получается следующим образом. Каждый АУ может выбрать определенную преамбулу с вероятностью $1/l$. Следовательно, если в окне больше преамбул, чем активных АУ, каждый АУ передает с вероятностью 1. Наоборот, если активных АУ больше, чем преамбул, то вероятность передачи сообщения от АУ будет меньше 1. Следуя [50], предположим, что АУ следует оптимальной схеме со следующей вероятностью передачи

$$p = \begin{cases} 0 & \text{если } i=0 \\ \min(l/i, 1) & \text{иначе} \end{cases}, \quad (3.25)$$

Последний член в выражении (3.24), $P(l, k, m)$, является вероятностью распределения k сообщений по l каналам, так что m каналов выбираются ровно одним АУ.

Даже опираясь на приближенную одномерную модель, прямой расчет вероятностей перехода в (3.23) все ещё трудоёмок. Причина в сложных биномиальных коэффициентах высокого порядка в $P(l, k, m)$. Далее описан простой вычислительный алгоритм для определения этих вероятностей.

Можно заметить, что вероятность $Pr\{T = m \mid i\}$ можно разложить на следующие компоненты, следуя описанию работы [31]. Во-первых, для случая $i = 0$ имеем $P(l, k, m) = 0$, так как k — это общее число сообщений, отправленных на l каналов для любого числа m каналов, которые выбирают АУ. В случае $i = 1$ у нас есть только один компонент $P(l, k, m)$, отличный от нуля. Другие компоненты $C_i^k p^k (1-p)^{i-k}$ определяют биномиальную вероятность того, что k из i сообщений будут успешно переданы. Чтобы пройти по всем i состояниям, берётся сумма по всем значениям от 0 до i . Кроме того, когда $i \rightarrow \infty$ [80], выполняется следующее приближение

$$Pr\{T = m \mid i\} = C_l^m e^{-m} (1 - e^{-m})^{l-m}, \quad (3.26)$$

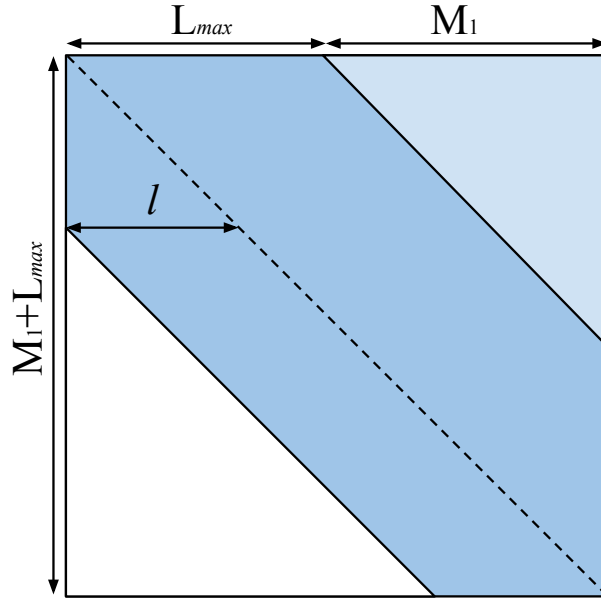


Рисунок 3.15. Структура матрицы вероятностей перехода

где m – число успешных передач. Обоснованием (3.26) является то, что когда число АУ стремится к бесконечности, вероятность того, что конкретная преамбула будет выбрана только одним АУ, составляет e^{-1} . Соответственно, вероятность того, что m преамбул из l будут выбраны только одним АУ, следует биномиальному закону с вероятностью успеха e^{-1} .

Единственным отсутствующим параметром теперь является $P(l, k, m)$, т.е. вероятность распределения k сообщений по l каналам, так что m каналов выбираются ровно одним АУ. Следуя [28], выведем решение для оценки точных значений стационарных вероятностей $P(l, k, m)$ в Приложении А. Это решение легко представляется как

$$P(l, k, m) = \frac{(-1)^m l! k!}{l^k m!} \sum_{f=m}^{\min(l, k)} \frac{(-1)^f (l-f)^{k-f}}{(f-m)!(l-f)!(k-f)!}, m \leq k, \quad (3.27)$$

и $P(l, k, m) = 0$, $m > k$.

Нахождение средней задержки в модели включает в себя нахождение стационарных вероятностей двумерной цепи Маркова. Вероятности, полученные с помощью (3.23), удобно представить в виде квадратной матрицы вероятностей переходов по состояниям цепи Маркова, как показано на рис. 3.15. Для практических расчетов число строк и столбцов должно быть усечено до $M_1 + L_{\max}$. Здесь M_1 представляет число АУ типа I в системе, $L_{\max}$ — значения, выбранные таким образом, чтобы сумма элементов в первой строке была приблизительно равна 1 с заданной точностью, например, 10^{-6} .

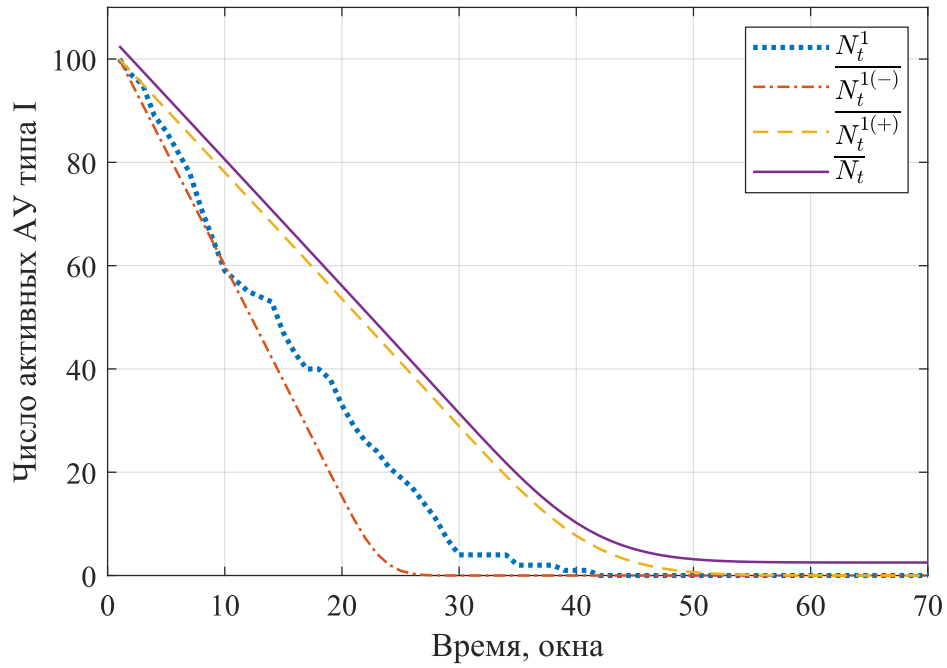


Рисунок 3.16. Среднее количество активных АУ типа I в течение Δ

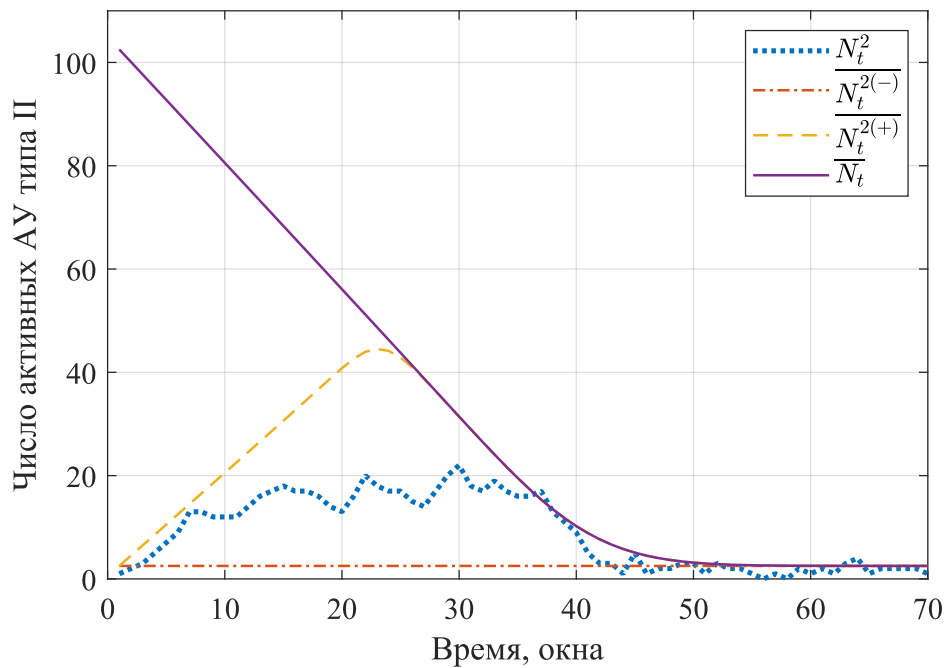


Рисунок 3.17. Среднее число активных АУ типа II в течение Δ

Рассмотрим интересующие нас метрики — средние задержки пакетов АУ типа I и типа II. Их можно точно рассчитать, используя двухмерную модель, или аппроксимировать с помощью одномерной модели. Сначала в работе [31] рассмотрим первый подход, а затем определим границы числа активных АУ с помощью одномерной модели.

Рассмотрим матрицу вероятностей перехода двумерной цепи Маркова, которая полностью определяется параметрами λ_2 и M_1 . Предположим, что распределение числа АУ типа I и типа II (N_1^1, N_1^2) известно в начальном временном интервале, когда все АУ типа I становятся активными. В частности, синяя линия на рис. 3.16 и 3.17 показывает временную эволюцию числа АУ типа I и типа II в системе как функцию времени, полученную с помощью компьютерного моделирования для $\lambda_2 = 2.5$, $M_1 = 100$.

Используя матрицу вероятностей перехода, можно получить распределение пары (N_1^1, N_1^2) в каждом последующем временном интервале, $t = 2, 3, \dots, \delta$ и, таким образом, определить их средние значения $E[N_t^1]$ и $E[N_t^2]$, соответственно. Таким образом, число активных АУ в течение временного интервала Δ может быть представлено как

$$E[N^1] = \sum_{t=1}^{\delta} \frac{E[N_t^1]}{\delta}, E[N^2] = \sum_{t=1}^{\delta} \frac{E[N_t^2]}{\delta}. \quad (3.28)$$

Тогда, используя результат Литтла, получаем

$$E[D_1] = \frac{E[N^1]\delta}{M_1}, E[D_2] = \frac{E[N^2]}{\lambda_2}. \quad (3.29)$$

Принимая во внимание специфику двумерной Марковской модели, описанную в разделе 3.2, интересующие нас метрики $E[\tau_1]$ и $E[\tau_2]$, измеряемые в секундах, рассчитываются как

$$E[\tau_1] = (E[D_1]t_R + t_{data}) 10^{-2}, E[\tau_2] = (t_S + E[D_2]t_R + t_{data}) 10^{-2}. \quad (3.30)$$

Обращаем внимание, что метод, основанный на двумерной цепи Маркова, связан с довольно высокой вычислительной сложностью. Для этой цели рассмотрим верхние границы для средней задержки производительности АУ типа I и типа II. Аналогично двумерному случаю рассмотрим состояние матрицы вероятностей перехода в первом окне интервала. Это состояние зависит от интенсивности пакетов АУ типа II, λ_2 , и число АУ типа I, M_1 . Также, аналогично случаю двумерной цепи Маркова, можно определить среднее число активных АУ обоих типов во всех последующих окнах, $E[N_t]$. Изменение числа активных АУ от времени $\{N_t, t = 1, 2, \dots, \delta\}$ показано на рис. 3.16 и 3.17 черными линиями. Обращаем внимание, что в начале интервала N_t объединяет оба типа АУ. Однако, число АУ типа I уменьшается с течением времени, и в конечном итоге только АУ типа II начинают вносить вклад в N_t . Таким образом,

начиная с определенного временного интервала, распределение АУ типа II будет совпадать с распределением обоих типов АУ в оставшейся части интервала Δ . Поэтому среднее значение $E[N]$ получается как

$$E[N] = \sum_{t=1}^{\delta} \frac{E[N_t]}{\delta}. \quad (3.31)$$

Обращаем внимание, что поскольку одномерная Марковская модель включает в себя двухмерную, в представлении агрегации состояний справедливо следующее [83]:

$$E[N] = E[N^1] + E[N^2]. \quad (3.32)$$

Рассмотрим теперь систему, в которой нет АУ типа II, т. е. $\lambda_2 = 0$. Среднее число активных АУ в этой системе ограничено снизу $\overline{N}_t^1$. Поведение этой метрики, обозначенной как $E[N_t^{1(-)}]$, проиллюстрировано на рис. 3.16 и 3.17 красными линиями. Значение $E[N^{1(-)}]$, усредненное за период Δ , дает нижнюю границу для $E[N^1]$. Эту метрику можно получить, подставив $E[N^{1(-)}]$ в (3.32), чтобы получить

$$E[N] > E[N^{1(-)}] + E[N^2], \quad (3.33)$$

и подразумевая, что $E[N^2] < E[N] - E[N^{1(-)}] = E[N^{2(+)}]$, что также проиллюстрировано на рис. 3.16 и 3.17, таким образом, приходя к

$$E[D_2] < \frac{E[N] - E[N^{1(-)}]}{\lambda_2}. \quad (3.34)$$

Напротив, рассмотрим систему без АУ типа I, т. е. $M_1 = 0$. Среднее число АУ в этой системе является нижней границей для $E[N_t^2]$, что также показано на рис. 3.16 и рис. 3.17. Подобно предыдущему случаю, соответствующие средние значения по Δ , $E[N^{2(-)}]$, являются нижней границей для $E[N^2]$. Поскольку АУ типа I отсутствуют, распределение N_t по всему интервалу Δ обеспечивается определенной Марковской моделью и может быть найдено для любого заданного λ_2 . Подставляя нижнюю границу для $E[N^2]$ в (3.32), получаем

$$E[N] > E[N^1] + E[N^{2(-)}], \quad (3.35)$$

что приводит к $E[N^1] < E[N] - E[N^{2(-)}] = E[N^{1(+)}]$, что также показано на рис. 3.16. Таким образом, получаем приближение средней задержки для АУ типа

I в следующей форме

$$E[D_1] < \frac{\delta(E[N] - E[N^{2(-)}])}{M_1}. \quad (3.36)$$

Подстановка правых частей (3.34) и (3.36) в (3.30) вместо $E[D_2]$ и $E[D_1]$ дает верхние границы для средней задержки

$$\begin{aligned} E[\tau_1] &< \left(\frac{\delta(E[N] - E[N^{2(-)}])}{M_1} t_R + t_{data} \right) 10^{-2}, \\ E[\tau_2] &< \left(t_S + \frac{E[N] - E[N^{1(-)}]}{\lambda_2} t_R + t_{data} \right) 10^{-2}. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Для того, чтобы оценить точность предлагаемой модели необходимо рассмотреть два источника ошибок. Они возникают из допущений, необходимых для аналитического вычисления и простоты численной оценки. Первый связан с заменой подробной двухмерной Марковской модели на одномерную аппроксимацию. Использование границ задержки вместо точных задержек вызывает вторую ошибку. Сначала рассмотрим первую ошибку, а далее оценим точность аппроксимаций для средней задержки сообщений.

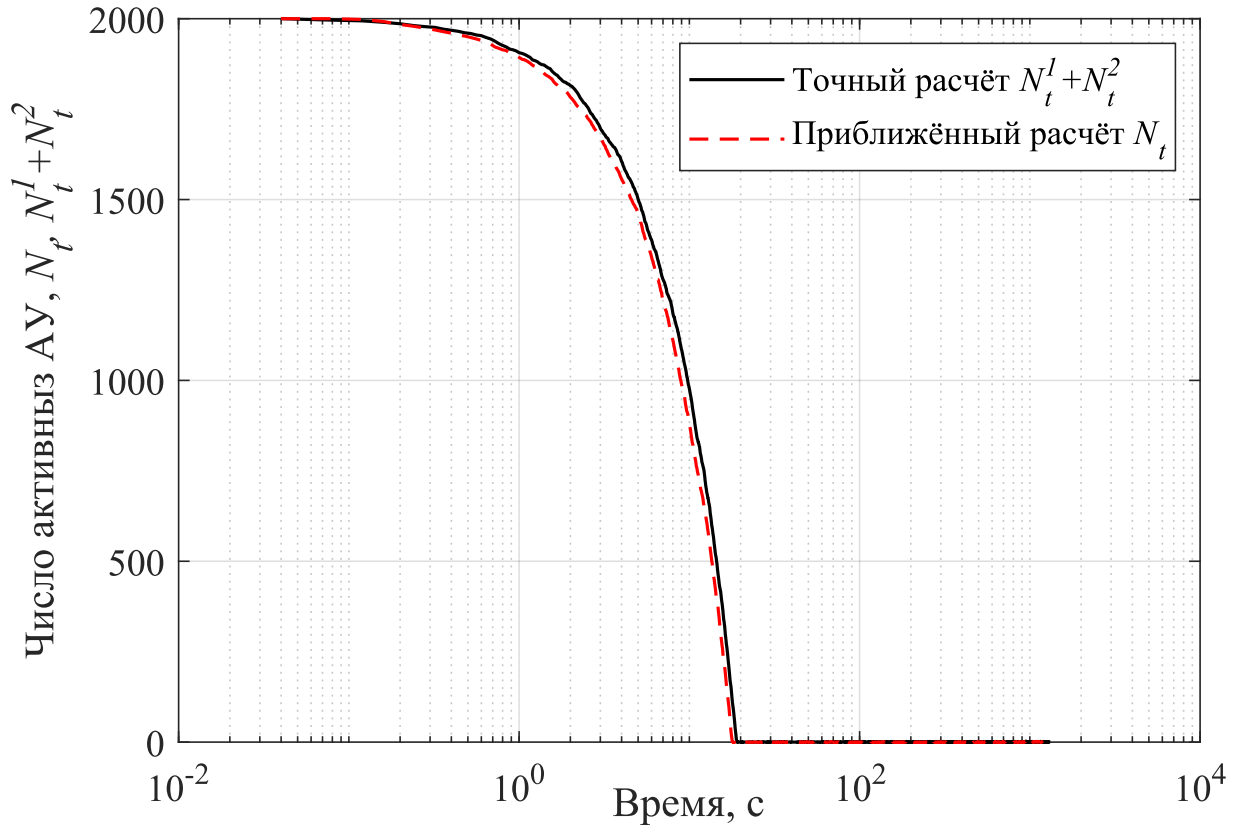


Рисунок 3.18. Активные АУ в течение одного цикла Δ

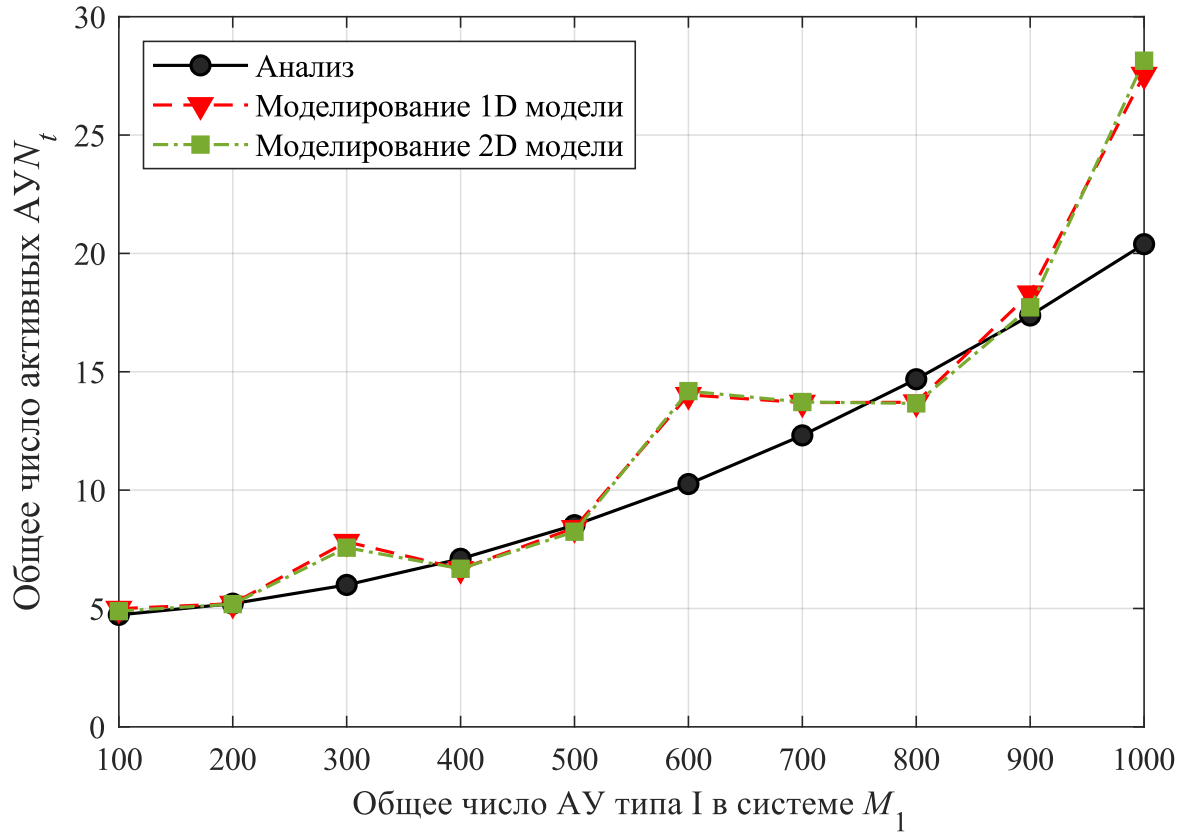


Рисунок 3.19. Среднее число активных АУ в системе

Для оценки точности аппроксимации двухмерной модели одномерной достаточно рассмотреть общее число активных АУ в системе. Напомним, что в первом случае отслеживаем АУ типа I и АУ типа II отдельно, тогда как во втором случае фиксируется общее число АУ обоих типов. На рис. 3.18 представлено общее число активных АУ в течение одного интервала Δ , полученное путем моделирования рассмотренной модели и усреднения по 100 реализаций для 500 АУ типа I и интенсивности $\lambda_2 = 0.1$ сообщений в секунду от АУ типа II. Как можно заметить, приближенная одномерная модель точно фиксирует число АУ. Этот вывод подтверждает гипотезу о том, что характеристики распределения числа АУ в системе для двух рассмотренных моделей совпадают.

Чтобы оценить, верна ли вышеупомянутая гипотеза для других параметров системы, на рис. 3.19 показано сравнение двух моделей для разного числа АУ типа I. Как можно заметить, представленные данные близки, что означает, что замена сложной двухмерной модели на более простую не приводит к ошибке. Это также дополнительно подтверждается на рис. 3.20, демонстрирующем дополнительную кумулятивную функцию распределения (CCDF, Complementary Cumulative Distribution Function) числа активных АУ в системе.

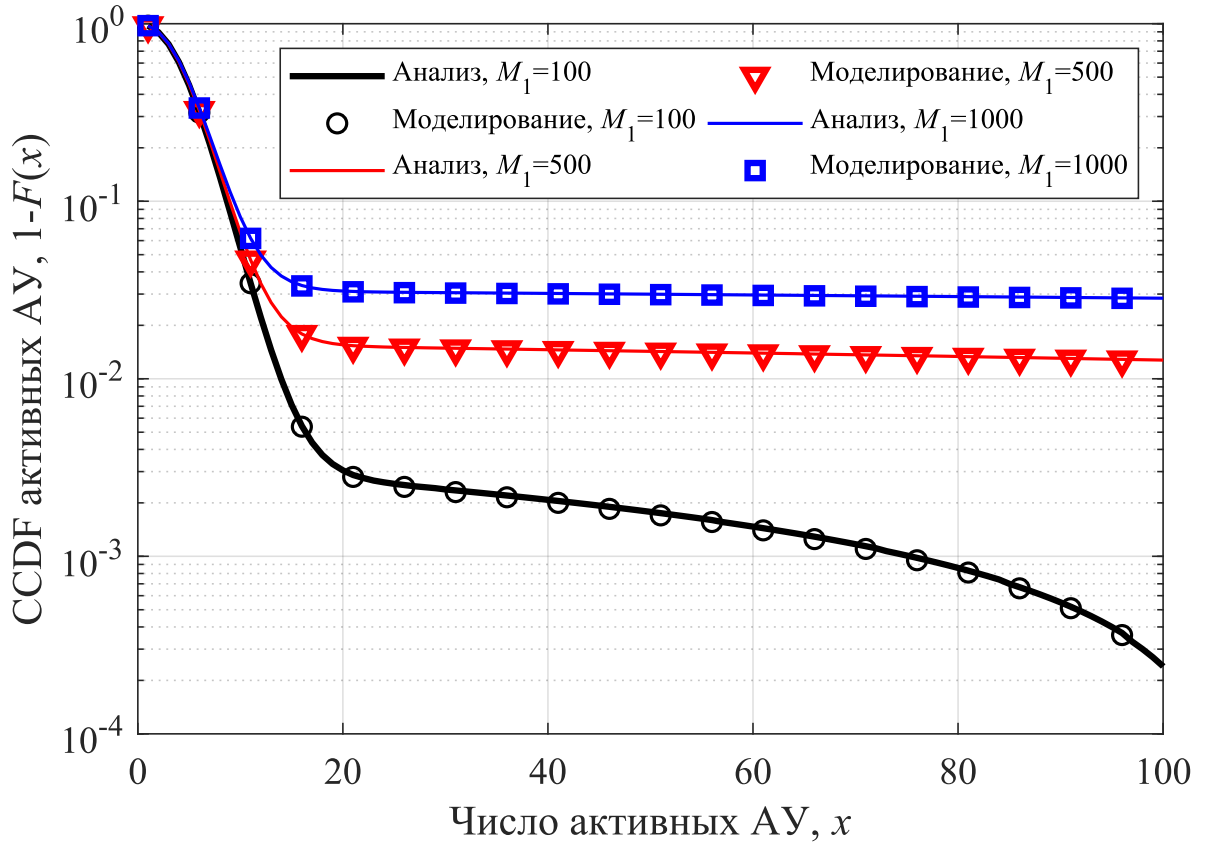


Рисунок 3.20. Кумулятивная функция распределения

Обращаем внимание, что для практических развертываний необходимо понимать область производительности системы, когда задержка передачи сообщений обоих типов трафика не стремится к бесконечности. По этой причине продолжим оценку области устойчивости системы. Напомним, что рассмотренная система устойчива, если поток входного трафика меньше потока выходного трафика. С этой целью на рис. 3.21 показаны интенсивности входного и выходного трафика в зависимости от числа АУ типа I и интенсивности АУ типа II. Как можно заметить, выходная интенсивность ограничивает входную интенсивностью, чтобы удовлетворить эргодическому условию системы. В частности, выходная интенсивность пересекается с входной при $\lambda_2 = 4$ и больших значениях $M_1 > 9000$.

Напомним, что для времени передачи 40 мс интенсивность сообщений типа II $\lambda_2 = 4$ при стандартном времени между прибытиями сообщений 2 ч, указанном в М.2410 [84], приводит к 72×10^4 АУ типа II в зоне покрытия одной соты NB-IoT. Таким образом, предлагаемая модель может быть использована для оценки производительности услуг 5G mMTC на основе NB-IoT с целевым показателем 10^6 АУ/км² [85] с числом АУ типа I до 9000, требующих посто-

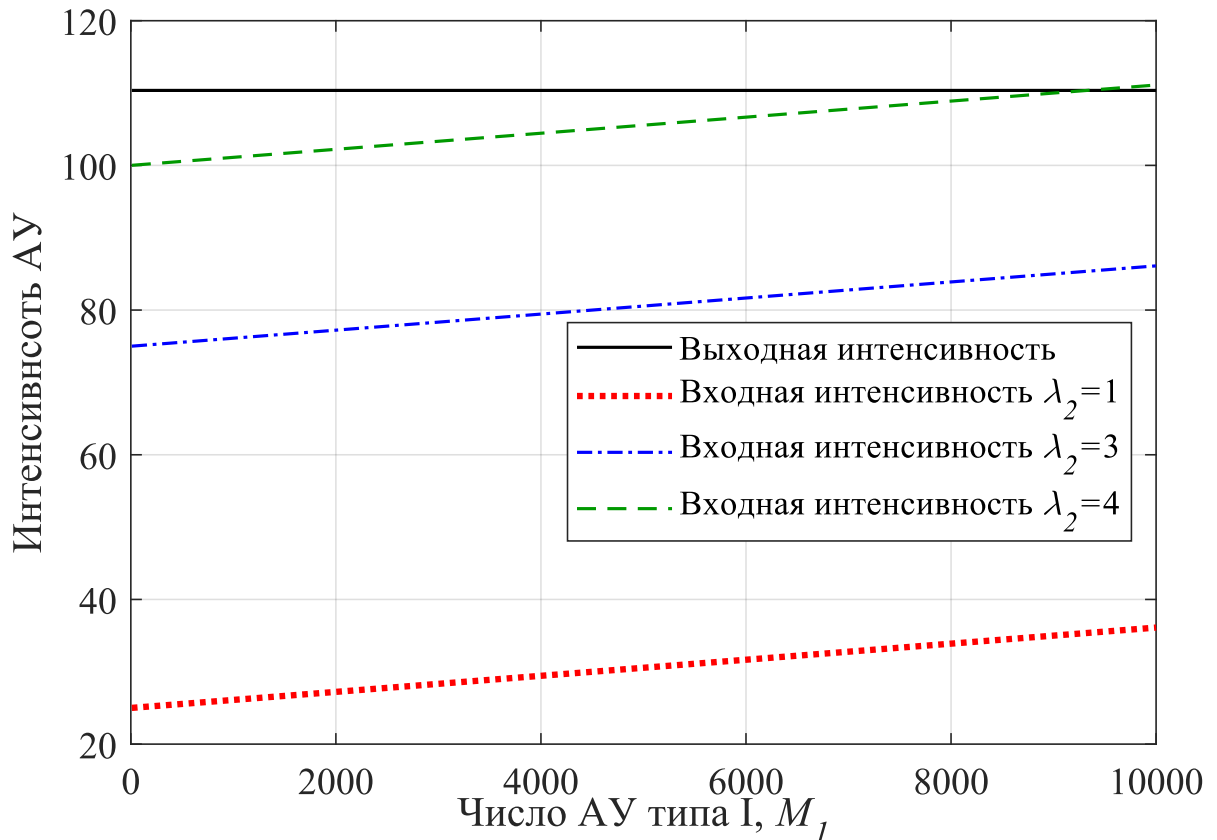


Рисунок 3.21. Область устойчивости рассмотренной системы

янного подключения. Область стабильности для других параметров трафика может быть оценена с помощью предлагаемой модели. При планировании сети эти ограничения должны учитываться оператором сети. Однако, в работе [32] подчеркивается, что стабильность системы не подразумевает, что другие показатели производительности остаются в указанных пределах. Теперь приступим к анализу задержки.

Выявив точное приближение общего числа активных АУ в системе с помощью одномерной модели и определив область стабильности системы, оценим точность приближения задержки сообщения АУ типа I на основе предложенной модели. С этой целью на рис. 3.22 показана средняя задержка для обоих типов АУ в зависимости от числа АУ типа I. Анализируя представленные результаты, можно заметить, что разработанное приближение точно соответствует фактической средней задержке, испытываемой АУ типа I во всем рассмотренном диапазоне числа АУ. Для АУ типа II соответствие хорошее до относительно высоких значений числа АУ типа I в системе, например, 10^3 . Для более высоких значений числа АУ типа I модель начинает переоценивать задержку АУ типа II.

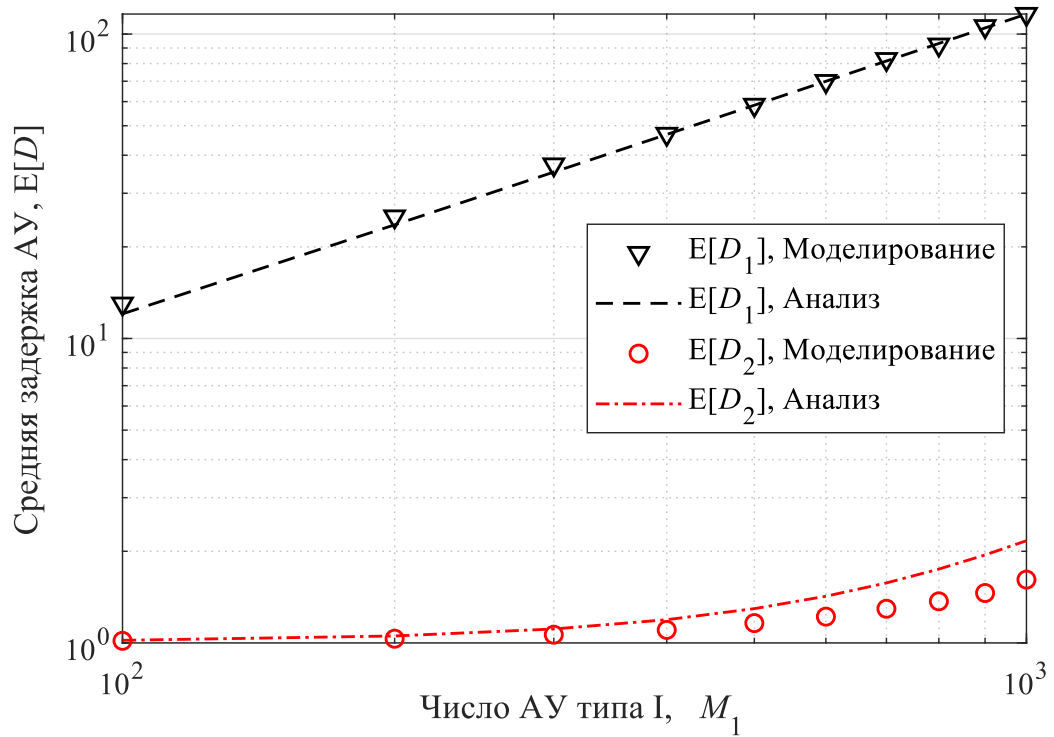


Рисунок 3.22. Приблизительные значения задержки для рассмотренных типов АУ

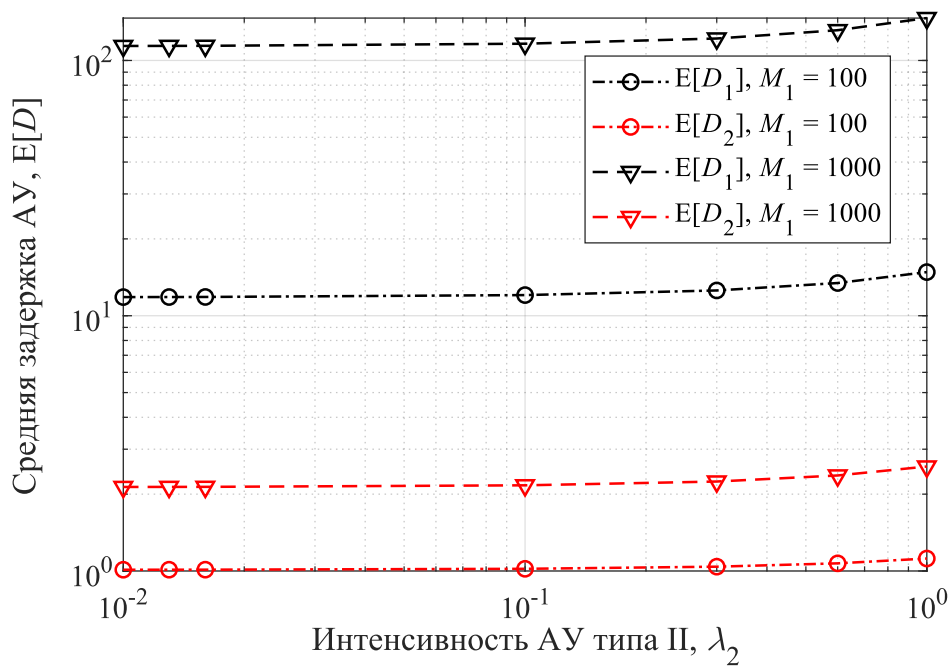


Рисунок 3.23. Средняя задержка от интенсивности сообщений АУ типа II

Определив подходящую аппроксимацию задержки и область стабильности системы, приступаем к оценке производительности задержки для типов трафика. С этой целью на рис. 3.23 и 3.24 показана средняя задержка обоих типов трафика в зависимости от числа АУ типа I и интенсивности сообщений АУ ти-

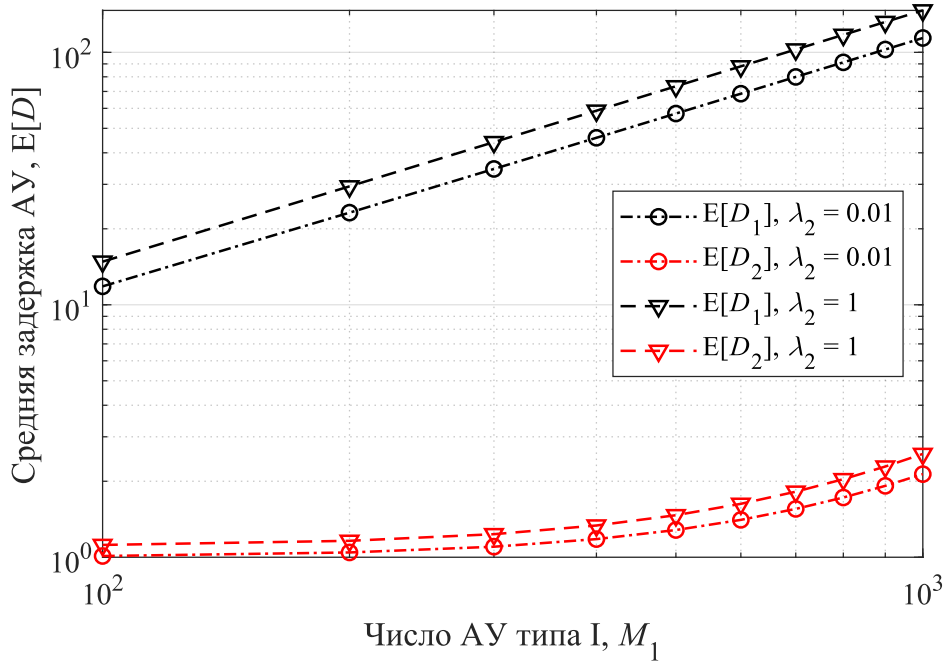


Рисунок 3.24. Средняя задержка от числа АУ типа I

па II в системе для $\Delta = 15$ мин. Анализируя представленные данные, можно заметить, что интенсивность АУ типа II не оказывает заметного влияния на производительность обоих типов трафика. Обоснованием является то, что тип нагрузки, создаваемой этими АУ, хорошо распределен во времени. Напротив, при увеличении числа АУ типа I средняя задержка обоих типов трафика оказывается отрицательной. Как и ожидалось, график линейный в то время как средняя задержка АУ типа II увеличивается экспоненциально к числу АУ типа I. Заметно, что это увеличение начинает проявляться примерно с 500 АУ. Однако это конкретное значение зависит от числа АУ типа I и значения времени цикла Δ .

Другим важным наблюдением является то, что наличие АУ типа I влияет на соответствие технологии NB-IoT требованиям 5G mMTC, формализованным в ITU-R M.2410 [85]. Напоминаем, что согласно этой рекомендации предел задержки установлен на уровне 10 с для 10^6 АУ, предполагая, что каждое АУ генерирует не более 1 сообщения за два часа. Кроме того, напоминаем, что продемонстрированная система стабильна примерно до 10^4 и 72×10^4 АУ типа I и типа II, соответственно. Однако, наблюдая за данными, представленными на рис. 3.24, можно заметить, что средняя задержка АУ типа I уже превышает 10 с, даже для 100 АУ типа I в системе. В то же время, он остается значительно ниже для обычных АУ даже для 10^3 АУ типа I в системе. Таким образом, можно

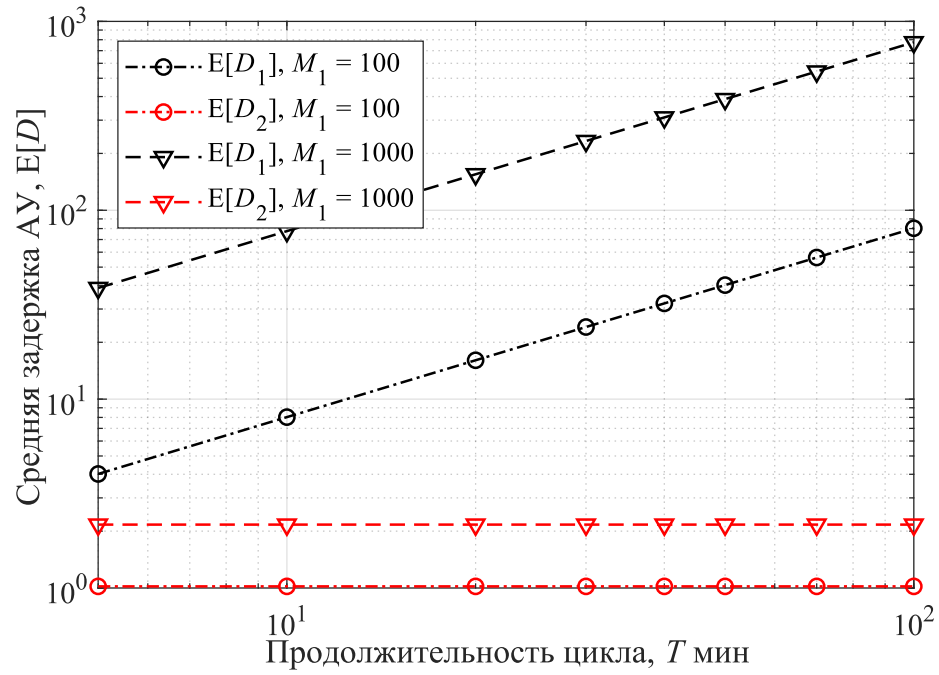


Рисунок 3.25. Зависимость средней задержки большого числа АУ типа I, $\lambda_2 = 0.1$

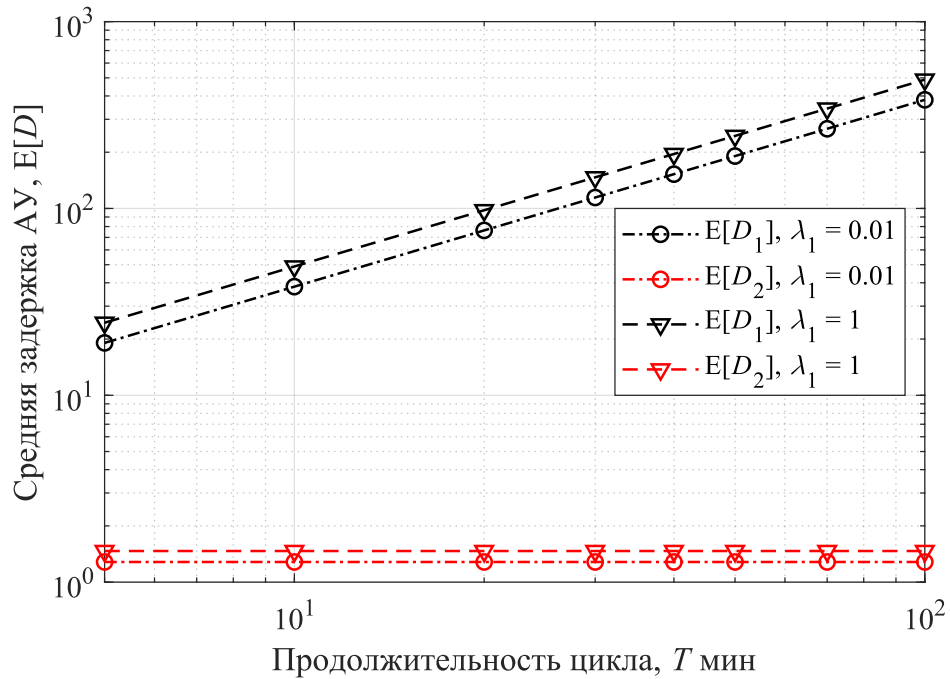


Рисунок 3.26. Интенсивность прибытия большого числа сообщений от АУ типа II

сделать вывод, что наличие АУ, требующих постоянного подключения, ставит под сомнение применимость технологии NB-IoT в ее нынешнем виде для сред со смесью рассмотренных типов трафика.

Другим параметром, который может повлиять на производительность задержки рассмотренных типов трафика, является время цикла Δ . С этой целью на рис. 3.25 и 3.26 показаны средние задержки рассмотренных типов трафика в зависимости от продолжительности цикла Δ . Анализируя представленные данные, можно заметить, что длительность интервала цикла не влияет на производительность задержки рассмотренных типов трафика. Обоснованием является то, что прибытие АУ типа I для обслуживания хорошо локализовано во времени для рассмотренных параметров системы. Другими словами, мгновенная задержка при прибытии АУ типа I резко возрастает. Однако из-за того, что система находится в стабильных условиях и значительно недогружена для рассмотренных входных параметров, период, когда АУ типа I существуют в системе, намного меньше продолжительности цикла Δ . Меньшие, нереалистичные значения Δ приводят к быстрому росту задержки, но система, как правило, не реагирует на любую разумную продолжительность Δ .

3.6 Выводы по разделу

Введена модель, описывающая сценарий перемещения объекта, состоящего из группы АУ, между зонами действий БС, в рамках которой получена зависимость средней задержки доставки сообщений от соотношения среднего времени пребывания вне зоны действия БС и в зоне действия БС. Показано снижение задержки до 41% за счёт увеличения среднего времени пребывания в пассивном состоянии, если среднее время пребывания вне зоны действия БС 1 минута, в зоне действия – 20 минут и среднее время нахождения АУ в пассивном состоянии 2 минуты.

4. Массовая межмашинная связь, построенная по технологии LoRa

4.1 Вводные замечания

Для анализа характеристик сетей, построенных по технологии LoRaWAN, в данном разделе рассмотрим использование моделей, введенных в разделе 1.

Среди десятков технологий LPWAN и подобных им доступных сегодня, технология LoRaWAN является одной из самых популярных [86][87]. По сути, технология LoRaWAN объединяет фирменную модуляцию LoRa, разработанную компанией Semtech, стандарт доступа к среде с открытым исходным кодом (MAC, Media Access Control) и сетевой уровень (NWK, Network Layer), разработанный LoRa Alliance. Одной из ключевых особенностей этой технологии является использование техники модуляции с чирп-расширением спектра с переменным коэффициентом расширения (SF, Spreading Factor), добавленным поверх линейно изменяющейся несущей частоты. АУ могут изменять SF, чтобы адаптироваться к условиям радиоканала, жертвуя временем передачи сообщения в эфир для обеспечения необходимой дальности связи. Последовательности расширения для различных SF выбираются таким образом, чтобы создавать ортогональные радиосигналы, тем самым минимизируя помехи между передачами от различных АУ. В таблице 4.1 приведены примеры назначения SF, возможные для типичной сети LoRaWAN, работающей в диапазоне ISM 868 МГц ЕС. Обратите внимание, что спецификация LoRaWAN [58] определяет несколько опций MAC, называемых классами, причем класс А является базовым и наиболее часто используемым. По сути, работа АУ класса А очень близка к работе классического ALOHA, расширенного скачкообразной перестройкой частоты и двумя слотами нисходящей линии связи, добавляемыми после каждой передачи восходящей линии связи.

Широко распространённая в настоящее время технология LoRa включает в себя закрытый протокол физического уровня (метод модуляции LoRa и тесно связанный с ним метод помехоустойчивого кодирования) и набор открытых протоколов вышележащих уровней (LoRaWAN). Отсутствие описания протокола физического уровня является проблемой при разработке способов улучшения работы систем, построенных на технологии LoRa. Целью настоящей работы

является систематизированное описание принципов построения физического уровня. Данная работа построена следующим образом: сначала описываются специфические особенности модуляции LoRa и возможный способ демодуляции, указываются типы ошибок, которые могут возникать. С учётом этих особенностей объясняются методы помехоустойчивого кодирования и дополнительные механизмы управления служебной информации с учётом специфики модуляции LoRa. Результатом работы является как описание принципов построения физического уровня, так и обзор работ, в которых предлагаются способы повышения эффективности технологии LoRa. Предложены варианты изменения алгоритмов получения данных на физическом уровне на приёмной стороне, без изменения алгоритмов формирования сигналов на передающей. Для подходов, которые меняют физический уровень на приёмной стороне, требуется изменение протокола LoRa. Поэтому в данной работе не рассмотрены подходы, меняющие физический уровень кодера для улучшения системы. Систематизированное описание принципов построения физического уровня позволит специалистам, использующим технологию LoRa, предложить свои способы повышения эффективности работы системы. При разработке систематизированного описания физического уровня использовались результаты работ различных авторов, которые проводили эксперименты с реальными АУ. При этом, некоторые результаты этих работ противоречат друг другу по причине отсутствия описания некоторых процедур технологии в спецификации LoRa.

4.2 Обзор специфических особенностей физического уровня технологии LoRa

В систематизированном описании [89] отметим, что имеется большое число работ, в которых авторы, базируясь на своём опыте работы с реальными устройствами Semtech Corporation, пытаются описать работу физического уровня LoRa. Однако в большинстве работ авторы детально описывают какую-либо часть физического уровня, но не описывают работу в целом. Авторы не дают обоснования тех принципов, на основе которых различные части физического уровня взаимодействуют между собой. Кроме того, в большинстве русскоязычных работ авторы используют терминологию, напрямую заимствованную из

англоязычных работ, что в ряде случаев противоречит устоявшейся терминологии в данной предметной области.

Для преодоления вышеотмеченного недостатка сначала проведём обзор особенностей реализации физического уровня протокола LoRa. Опишем принцип формирования физического сигнала в технологии LoRa и обоснуем, что этот принцип оказывает влияние на все другие решения, которые используются на физическом уровне LoRa. Отметим, что в настоящее время в русскоязычной литературе отсутствует устоявшийся термин для обозначения элементарного сигнала модуляции LoRa. Предлагаем 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 равный числу бит, которое можно передать в одном ЛВЧМ–символе. В работе [89] описывается, как значение SF и уровни сигнала влияют на то, успешно или нет будет осуществлён приём сигналов от разных абонентов. В конце рассмотрения физического уровня делаем вывод, что если уровни сигналов от разных абонентов отличаются не более чем на 6 дБ, то сигналы с разными значениями SF не оказывают влияние друг на друга.

Само понятие LoRa представляет собой аббревиатуру от английского Long Range, что в устоявшейся терминологии системы означает формат радиомодуляции, который обеспечивает большую дальность по сравнению с прямой частотной манипуляцией FSK (от англ. Frequency Shift Keying). Большая дальность действия достигается комбинацией следующих решений: используется метод расширенного спектра, называемый Chirp Spread Spectrum (CSS) или его аналог *Линейно Частотной Модуляции* (ЛЧМ); используется помехоустойчивое кодирование (в сочетании с маскированием и перемежением). Полезным эффектом применения LoRa модуляции является высокая чувствительность. Приёмник может получать сигналы ниже уровня шума. По этой причине передатчик может передавать с меньшей мощностью. О протоколе LoRa можно сказать, что это надёжная, энергоэффективная и низкоскоростная система, которая удобна для использования в сфере Интернета вещей (IoT, Internet of Things).

Во многих исследованиях модуляции LoRa [90-100] испытывают возможности для назначения параметров системы по частоте передач, полосе пропускания, скорости помехоустойчивого кодирования, а также изменения SF в зависимости от характеристик канала для достижения наилучших условий работы. По этой причине рассмотрим ключевые параметры технологии:

1. Полоса пропускания B , означающая разницу между минимальной и максимальной частоте сигнала;
2. Коэффициент расширения SF – это параметр, определяющий число бит в степени 2, закодированных в один символ сигнала LoRa. В работах, связанных с данной темой, обычно обозначают SF с числовым значением, например, SF_7 . Для удобства изложения будем обозначать как $SF = 7$;
3. Скорость кодирования (CR, Code Rate), которая задаёт параметры помехоустойчивого кода.
4. Длина преамбулы и значение специального синхронизирующего сигнала (в англоязычных источниках используется термин SyncWord). Число символов преамбулы изменяется в зависимости от режимов работы АУ и чувствительности приёмника базовой станции в сетях LoRaWAN. Значение синхронизирующего сигнала может обозначать тип сети (публичная или частная), а также специфическое значение для канала FSK;
5. Наличие или отсутствие отдельно выделенного заголовка сообщения. В англоязычной литературе называется явный заголовок (implicit header), если для него выделено отдельное поле пакета. Если используется явный заголовок, то в нём указываются размер поля информационных данных, значение параметра CR и наличие или отсутствие контрольной суммы CRC (от англ. Cyclic redundancy check). В неявном заголовке поля данных значений не передаются;
6. Наличие или отсутствие режима подстройки скорости под SF (в англоязычной литературе такой режим получил обозначение LowDataRateOptimization);
7. Наличие или отсутствие 16-бит контрольной суммы CRC для поля информационных данных. Перед тем как подробнее рассмотреть влияние каждого из вышеперечисленных параметров на структуру пакета, познакомимся с особенностью формирования символа сигнала LoRa.

4.3 Экспериментальная оценка вероятности успешного приёма сообщений при частичном наложении сигналов от разных абонентских устройств

В работе [101] анализируются особенности работы приёмного устройства БС, при различных условиях наложения перекрытий сигналов от разных АУ, передающих сигналы с одинаковым значением SF. В большинстве работ по анализу технологии LoRa (Long Range) предполагаются методики, которые основаны на предположении, что при любом наложении сообщений с одинаковым коэффициентом расширения спектра SF и близкими по мощности на базовой станции сообщения не распознаются [102].

Опишем методики и анализ перекрытий сообщений. Данная методика позволит определить условия успешного приёма для сценария, когда мощность сигнала от всех АУ одинаковая, при этом все АУ используют одинаковые SF. Они сконфигурированы по сценарию из раздела 4.2. Однако, период передачи в данном разделе по восходящей линии связи составит 7 секунд, без подтверждений отправленных пакетов для получения интенсивности, схожей с интенсивностью в реальных системах при заданном числе АУ. При этом нет возможности задавать фиксированную задержку. Для обеспечения задержки, как и в предыдущих разделах, случайным образом включаем АУ. Большое число АУ позволит повысить вероятность наложения сообщений в канале, за счёт этого результаты будут более близки к реальной системе. В рамках проведения экспериментов будем считать, что все АУ располагаются в одинаковых радио-условиях, так как расположены близко друг от друга.

Анализ перекрытия сообщений выполнялся в несколько этапов.

1. Получение набора меток времени для каждого АУ. Каждая метка времени указывает на окончание приема передачи на базовой станции от определенного АУ.
2. Интерполирование меток времени окончания передачи сообщений, которые не были приняты на базовой станции.
3. Поиск для каждого пакета ближайшего пакета по значению метки времени из наборов успешно переданных и интерполированных пакетов.
4. Проверка наличия факта пересечения по формуле (4.1). Если разница значений времени принятия рассмотренного пакета (T) и ближайшего к

нему (T_i) пакета меньше времени передачи сообщения (t), то произошло перекрытие.

$$x_i = |T - T_i| < t. \quad (4.1)$$

5. Определение участка перекрытия по разнице значений времени принятия пакетов. В результате увеличивается один из счетчиков определенного участка. Увеличивается счетчик не принятых сообщений, если рассмотренный пакет был из набора интерполированных. И наоборот, увеличивается счетчик успешно принятых сообщений, если рассмотренный пакет из набора, полученного от БС.

Стоит заметить, что сообщения появляются в соответствии с пуассоновским входным потоком, поэтому пересечение трех и более сообщений крайне маловероятны и не рассматриваются в данном анализе. Однако, все же если в конфликте пресечения участвуют три и более пакетов, то данное событие всё равно считается перекрытием наблюдаемого пакета и наиболее значимого для него пакета, т.е. того, который ближе всего расположен к началу наблюдаемого. Так как длина преамбулы равна 8 байт, а длина пакета равна 64 байтам, время передачи пакета разбивается на 9 участков (первый участок будет соответствовать времени передачи преамбулы), в которых отмечаются события (см. рис. 4.1).

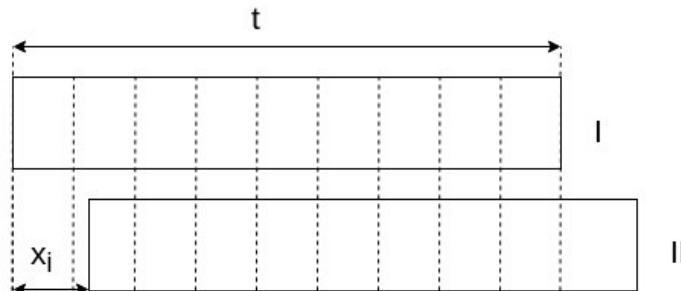


Рисунок 4.1. Пример перекрытия пакетов

После анализа производится построение гистограммы зависимости вероятности успешного принятия сообщения от участка перекрытия. Вероятность рассчитывается как отношение значения счетчика успешно принятых сообщений на данном участке к общему числу переданных сообщений, участвовавших в событии перекрытия.

Для проверки этой методики использовалось оборудование: базовая станция RisingHF Type:RHF2S008 [103] и устройства Vega SI-11 - pulse counter [104].

В результате проведения экспериментов с числом АУ порядка 20, получена гистограмма вероятности успешной доставки группы АУ, когда передан только один пакет. На рис. 4.2 хорошо видно смещение относительно нуля в правую сторону, так как в этом случае мешающий пакет передавался позже.

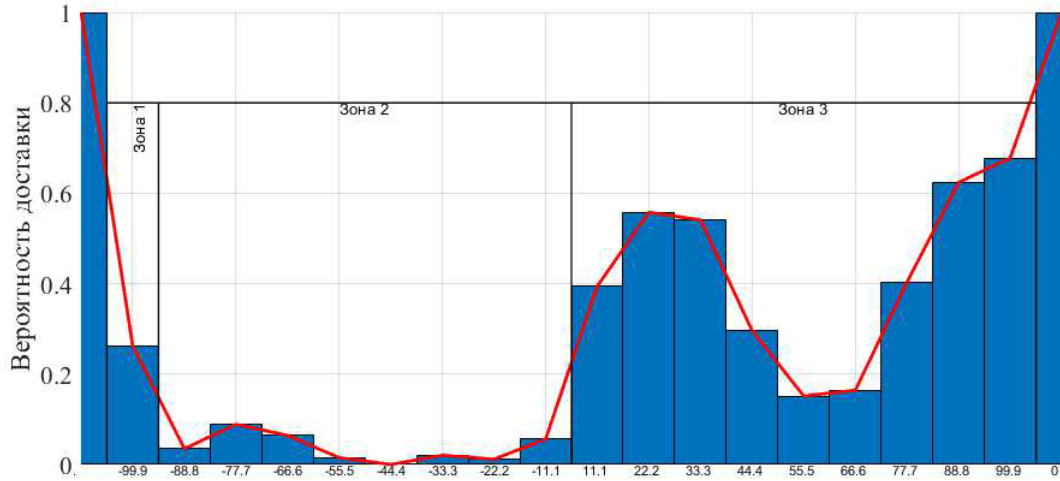


Рисунок 4.2. Вероятность успешной доставки относительно участка, в котором произошло перекрытие

Результаты близки к результатам из работ [105], [106]. Наличие зоны 2 обусловлено в первую очередь тем, что после начала передачи пакета, базовая станция становится неактивной для принятия новых кадров, вследствие чего происходит потеря пакетов в течение времени $\frac{8}{9}t$. В одной из работ приведено аналогичное утверждение [107].

Описание возникновения конфликтов на основе полученных результатов в работе [108], для рассмотренного сценария, предполагается что оба пакета не будут приняты БС, при любом наложении. Таким образом, расчёт вероятности успешной доставки $Pr\{Y\}$ вычисляется по следующей формуле:

$$Pr\{Y\} = e^{-\lambda N^2 t}, \quad (4.2)$$

где λ – интенсивность пуассоновского входного потока, N – число АУ, t – время передачи сообщения.

Используя результаты эксперимента, уточним данную формулу (4.2). Для упрощения дальнейших рассуждений введём следующие обозначения:

A_0 – событие, в котором у наблюдаемого сообщения нет пересечений с другими сообщениями;

A_1 – событие, которое возникает при пересечении с одним мешающим сообщением.

Выведем вероятность успешной доставки с учётом введённых обозначений:

$$Pr \{Y\} = \sum_{i=0}^{\infty} Pr \{Y | A_i\} Pr \{A_i\}. \quad (4.3)$$

Если раскрыть сумму, то формула расчёта вероятности успешной доставки примет следующий вид:

$$Pr \{Y | A_0\} Pr \{A_0\} + Pr \{Y | B_1 A_1\} Pr \{B_1 A_1\} + \\ + Pr \{Y | B_2 A_1\} Pr \{B_2 A_1\} + Pr \{Y | B_3 A_1\} Pr \{B_3 A_1\}, \quad (4.4)$$

где B_i – это такое событие, в котором начало мешающего сообщения находится в зоне с номером $i = \overline{1,3}$.

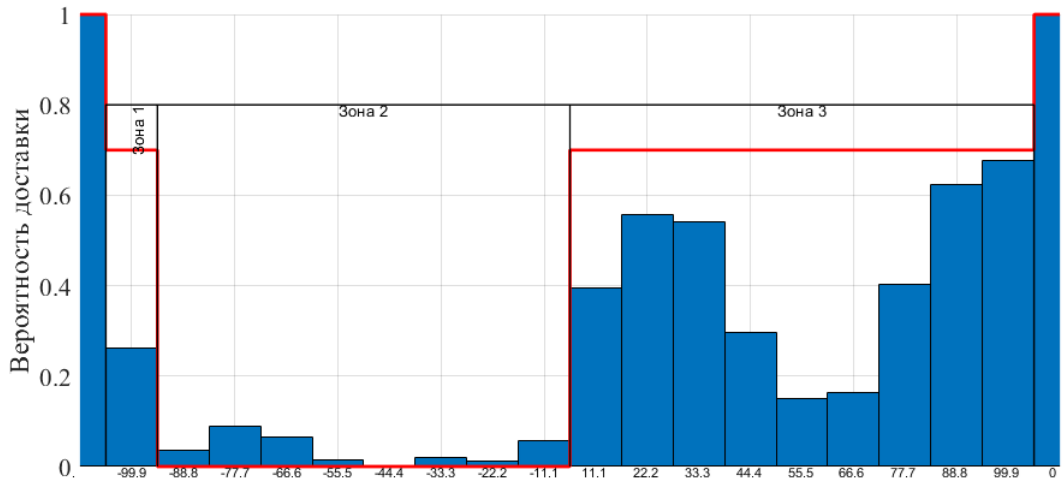


Рисунок 4.3. Вероятности успешной доставки сообщений при пересечении с моделью оценки вероятности успешной доставки

На основе экспериментов получена зависимость вероятности успешной доставки от смещения. Полученные результаты смещений и вероятностей успешной доставки аппроксимируем, поделив область пересечений на три зоны и присвоив данным областям фиксированные значения (см. рис. 4.3). Данные действия опишем с помощью системы допущений.

Допущение 1. Если сообщения ни с кем не пересекаются, то вероятность доставки такого сообщения равна 1 ($Pr \{Y | A_0\} = 1$). Это следует из условий модели системы.

Допущение 2. Если сообщение пересекается и начало мешающего сообщения попадает в зону 1 и зону 3, то будем считать вероятность успешной доставки равной P_1 ($Pr \{Y | B_1 A_1\} = Pr \{Y | B_3 A_1\} = P_1$).

Допущение 3. Если сообщения пересекаются и начало мешающего сообщения попадает в зону 2, то будем считать вероятность успешной доставки в таком случае равной 0 ($Pr \{Y \mid B_2 A_1\} = 0$).

По результатам анализа перекрытий сообщений, представленных на рис. 4.3, определяем размеры зон. Делаем вывод, что после начала передачи, АУ захватывает БС и передает сообщение с некоторой вероятностью P_1 . Сообщения от других АУ не принимаются в течение времени $\frac{8}{9}t$. С учётом введённых допущений и анализа экспериментальных результатов, теоретическую формулу вероятности доставки сообщения (4.4) можно представить в следующем виде:

$$Pr \{Y\} = e^{-\lambda N 2t} + P_1 k \lambda N 2t e^{\lambda N 2t}, \quad (4.5)$$

где $k = \frac{2-(1-\tau)}{2}$, τ – доля преамбулы от длины пакета. В нашем случае доля преамбул составляет 1/9 от длины пакета, так как длина преамбулы равна 8 байтам и длина пакета равна 72 байтам (64 байта информационной части и 8 байт преамбулы) [107].

Первое слагаемое уравнения (4.5) определяет вероятность возникновения события A_0 , в котором сообщение успешно передаётся. Второе слагаемое отражает возникновение ситуаций попадания в зоны 1 и 3, при котором вероятности успешного приёма равны P_1 . Кроме того второе слагаемое учитывает попадание мешающего сообщения в зону 2, где выполняется допущение 3.

В работе [109] описаны эксперименты, в которых изменялось число АУ и оценивалась вероятность успешной доставки сообщений. На рис. 4.4 представлены их результаты. При этом имеются ранее известные оценки, определяющие верхнюю и нижнюю границы вероятности успешной доставки для данного сценария. Они представлены на рисунке красным и синим цветом, соответственно. Пунктирной линией выделен график, полученный с помощью предлагаемой модели, который входит в доверительный интервал для проведённых экспериментов. Таким образом, предложенная методика позволяет оценить работу реальной системы. Модель дает хорошую оценку вероятности доставки при числе АУ больше 20.

По результатам проведенных экспериментов и анализа перекрытий сообщений предлагается модель, позволяющая уточнить теоретическую формулу вероятности успешной доставки сообщения при перекрытии двух пакетов.

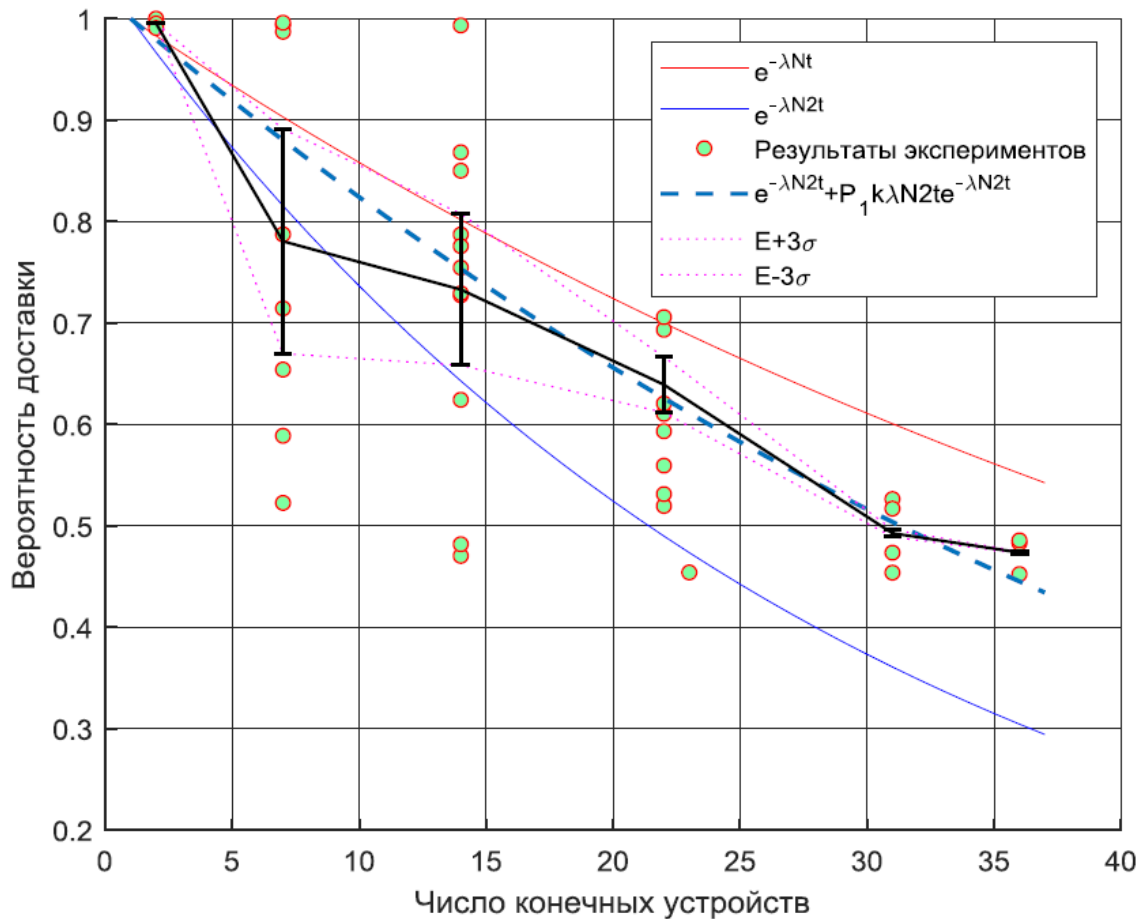


Рисунок 4.4. Экспериментальные данные с результатами предлагаемой модели

В работе [110] проведено исследование коллизии сигналов LoRa с помощью методики измерения интерферирующих сигналов LoRaWAN. В большинстве существующих работ по анализу коллизий сообщений АУ, предлагаются методы, ограниченные по числу реальных АУ и возможностям точного повторения экспериментов. В предлагаемой методике применяется набирающее популярность Software Defined Radio, которое позволяет записывать сигналы на компьютер. С помощью обработки сигналов на компьютере и последующем излучении в беспроводной канал на приёмнике базовой станции LoRaWAN проводим анализ таких сигналов. Результаты анализа конфликтов совпали с результатами работ, полученные другими методами.

Во многих теоретических [108][111] и экспериментальных [101][112] исследованиях предполагают, что на одном SF возникают конфликты. Однако существует более сложная система моделирования, где учитывается, что конфликт существует не всегда [113]. Кроме того, существуют и теоретические работы [114] по этому вопросу.

В работе [107] проводилась оценка коэффициента доставки пакета (PDR, Packet Delivery Ratio) во время конфликтов двух сообщений. Главным достоинством проведённых авторами опытов является точное определение позиции пересечения сигналов и анализ работы на основе реальных АУ. Недостатком данной методики является то, что при большем числе наложений сообщений возможны более непредсказуемые итоги коэффициента доставки сообщений при различных наложениях.

В работе [105] более точно был описан канал затухания путём анализа влияния двух одновременных передач LoRa друг на друга, используя физические АУ LoRaWAN и шлюз в лабораторной установке с радиочастотным экранированием. Недостатком данного исследования является анализ только полного наложения полезной информации конфликтующих сообщений. Отсюда, имитационная модель, построенная на основе полученных результатов натурных экспериментов, учитывает успешный приём только если один из пакетов был принят в том случае, когда последние шесть символов преамбулы и заголовка пакета не совпали.

Авторы работы [101] тоже хотели оценить вероятности доставки сообщений при пересечении. Однако их метод опирался на случайный процесс пересечения, что соответствует реальному поведению АУ и перекрытиями более двух конфликтующих сообщений. Недостатком же стало отсутствие точного определения места перекрытия в структуре пакета LoRa.

В данной работе планируется объединить все достоинства. Основой служит статья [101], где есть точное описание результатов наложений с точными сдвигами и структурой пакета сообщения. В работе [115] применяется наложение сигналов со сдвигом ещё на этапе формирования сигнала, что позволит объединить достоинства всех этих работ с помощью такого устройства как SDR (от англ. Software Defined Radio).

Основная идея подхода заключается в имитации сигнала от нескольких АУ для БС с помощью одного устройства (SDR/генератора сигналов).

Планировалось сгенерировать кадр LoRaWAN «вручную», но из-за сложности и закрытости протокола, было принято решение записать сигналы с реальных АУ. На рис. 4.5 представлена схема стенда.

Контроль приема пакетов осуществлялся на базовой станции (БС), а характеристики самого сигнала на анализаторе спектра и втором SDR (с использованием ПО CubicSDR).

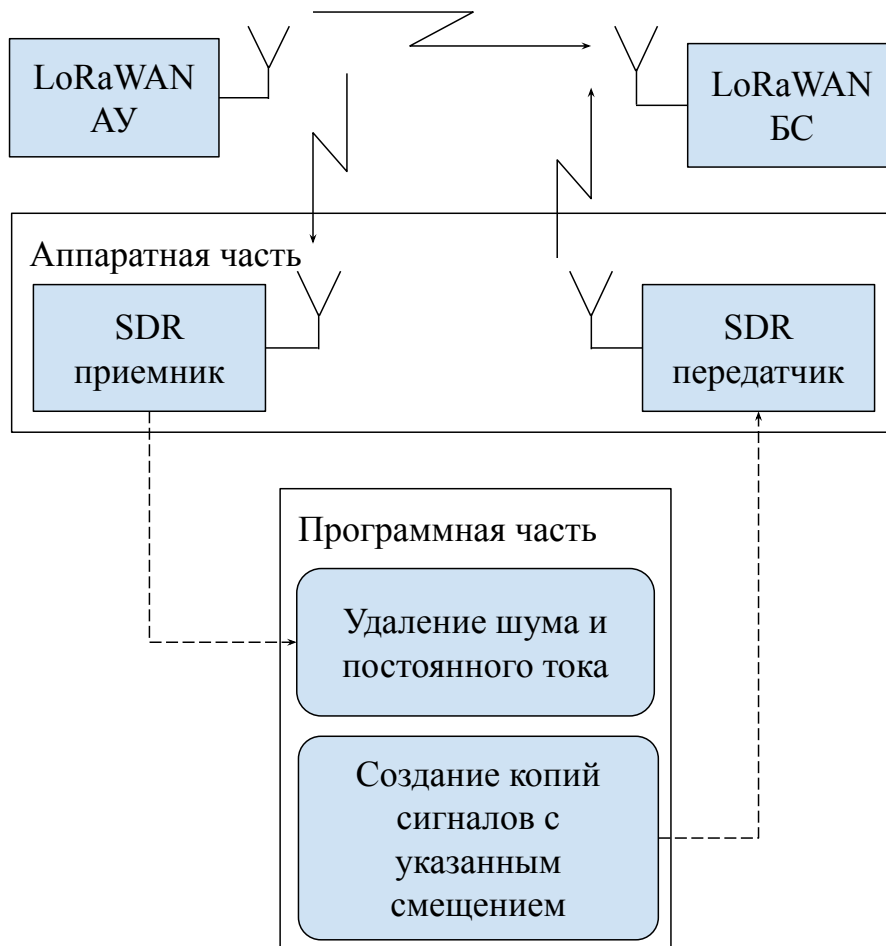


Рисунок 4.5. Схема стенда

Опишем основной этап формирования сигнала на передачу. В цифровом виде генерируются файлы, являющиеся результирующей случаев из статьи [107] (сигнал от АУ 2 (s_2 с мощностью P_2) в 4 раза мощнее, чем от АУ 1 (s_1 с мощностью P_1)):

Случай 1: Кадр (s_2), излучаемый с большей мощностью (P_2), приходит на 4 символа позже захвата приемника. Приемник пытается слушать кадр (s_1), который излучен с более слабой мощностью (P_1), но тот перебивается более сильным (Оба кадра теряются).

Случай 2: Кадр (s_2), излучаемый с большей мощностью (P_2), приходит в момент передачи заголовка CRC от более слабого источника (P_1). Приемник сбивает фиксацию на кадр (s_1), который излучен с более слабой мощностью и начинает слушать второй кадр (Кадр от более мощного источника декодируется).

Случай 3: Кадр (s_2), излучаемый с большей мощностью (P_2), приходит в момент передачи заголовка кадра (s_1) от более слабого источника (P_1). Прием-

ник продолжает обрабатывать кадр от слабого источника, но сигнал от более мощного источника перебивает данные (Оба кадра теряются).

Случай 4: Кадр (s_2), излучаемый с большей мощностью (P_2), приходит в момент до передачи CRC данных (payload) кадра (s_1) от более слабого источника (P_1). Приемник продолжает обрабатывать кадр от слабого источника, но сигнал от более мощного источника перебивает данные (Оба кадра теряются).

Для наглядности все случаи наложений приведены на рис. 4.6

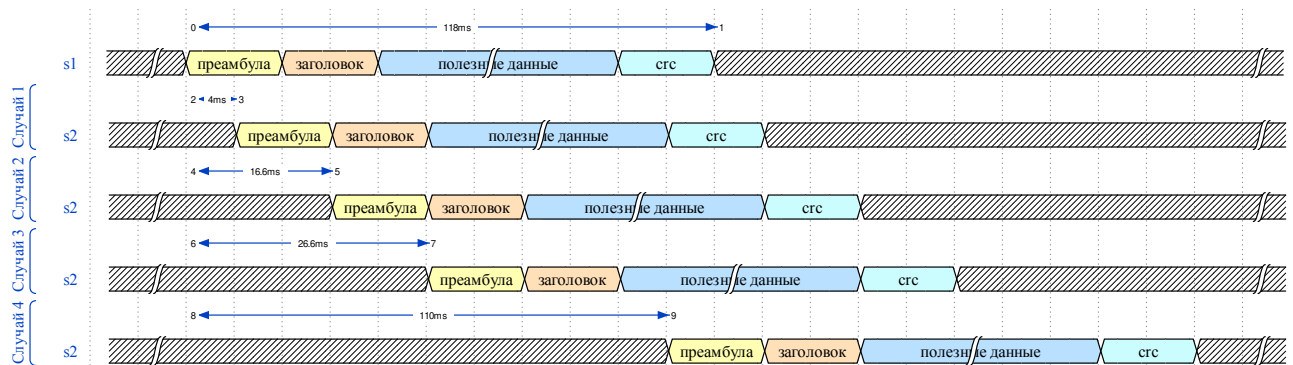


Рисунок 4.6. Наложение сигналов при всех случаях

Во время экспериментов выявлены интересные особенности. Поэтому было решено рассмотреть случаи, в которых вторым по времени приходил равный или меньший по мощности сигнал. А также были сгенерированы производные от этих случаев, в которых сигнал от АУ 1 по излучаемой мощности был равен сигналу АУ 2 и, в котором сигнал от АУ 1 был в 4 раза больше сигнала АУ 2.

Структура файлов получилась следующая:

1. Файл $P_1 < P_2$, при $P_1 = 2$ дБм, $P_2 = 8$ дБм – это массив из 4 строк с результирующей сигналов $s_1 + s_2$, как в статье [107]. В каждой строке хранится результирующая для своего случая, где обозначение $P_1 < P_2$ обозначает сценарий работы, когда основной сигнал в 4 раза меньше интерферирующего сигнала. Второй сигнал (или интерферирующий) имеет задержки с учётом четырёх случаев, описанных выше.
2. $P_1 = P_2$ – это массив из 4 строк с результирующей сигналов $s_1 + s_2$, в каждой строке хранится результирующая для своего случая, при равных по мощности сигналах, где $P_1 = P_2$ обозначает сценарий, когда оба сигнала идентичны по мощности как в работе [101].
3. $P_1 > P_2$, при $P_1 = 8$ дБм, $P_2 = 2$ дБм – это массив из 4 строк с результирующей сигналов $s_1 + s_2$. В каждой строке хранится результирующая

для своего случая, первый сигнал больше второго в 4 раза, где обозначение $P1 > P2$ является обратным сценарием относительно $P1 < P2$. В этом случае исходное сообщение будет мощнее интерферирующего, а задержка определяется относительно начала инициализирующего сигнала будет более слабым сигналом.

Файлы, полученные в бинарном виде для *hackrf_transfer*, передаются на SDR. Результаты о получении/обработке излученного сигнала на базовой станции фиксируются на LoRaWAN сервере через лог. В случае для SDR, с помощью скрипта Matlab, излучается ровно 100 сигналов для каждого случая.

Из рис. 4.7 видно, что результаты с устройства SDR очень похожи на результаты двух реальных АУ из работы [107], где при разной мощности АУ иницирующего и интерферирующего, с мощностью 2 и 8 дБм, соответственно, вероятность доставки сообщения интерферирующего АУ должна быть более высокий, только в случае наложения 2. Однако стоит обратить внимание на то, что у SDR есть успешно принятые сообщения и в случае наложения 1, и в случае наложения 3.

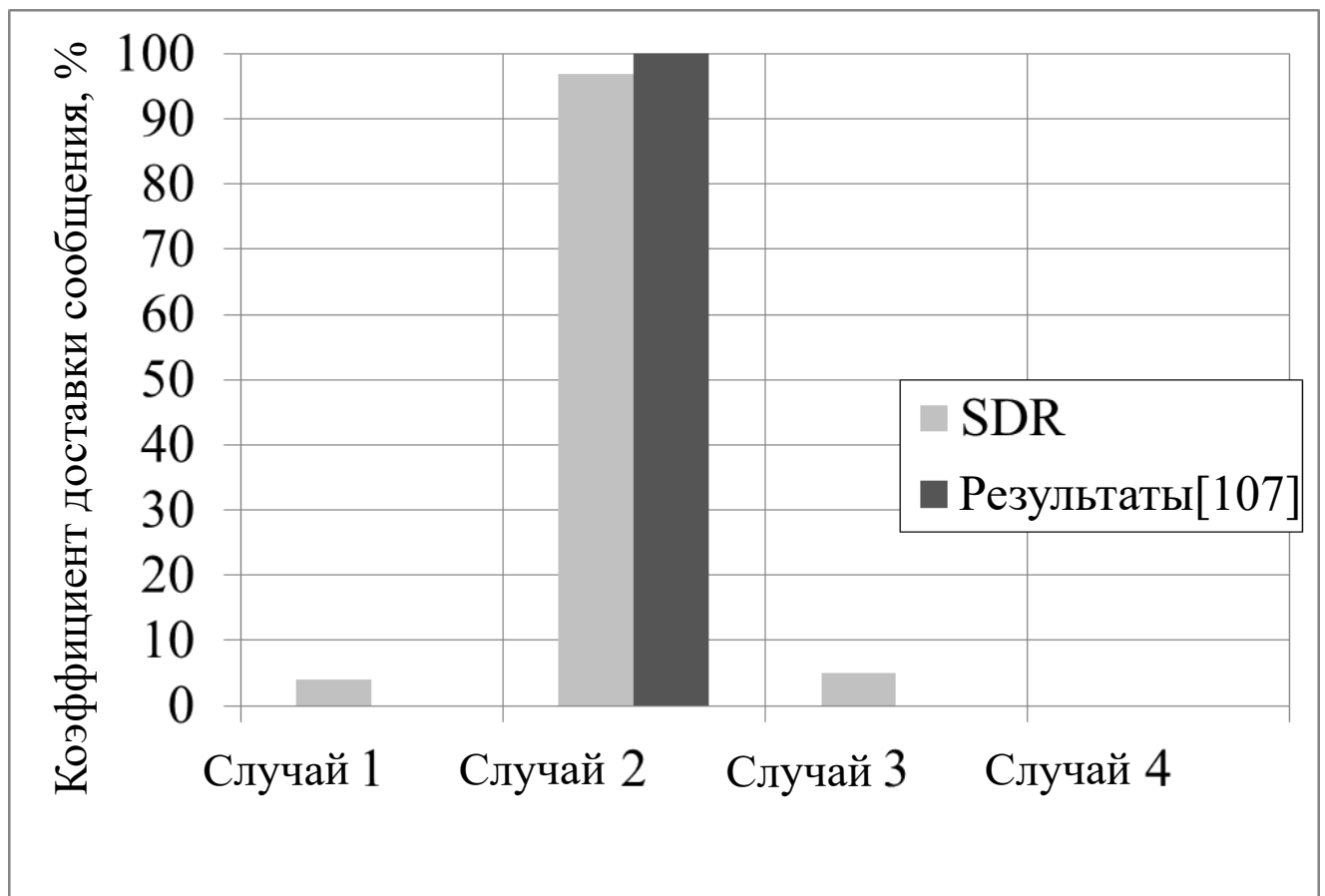


Рисунок 4.7. Результаты сценария $P1 < P2$

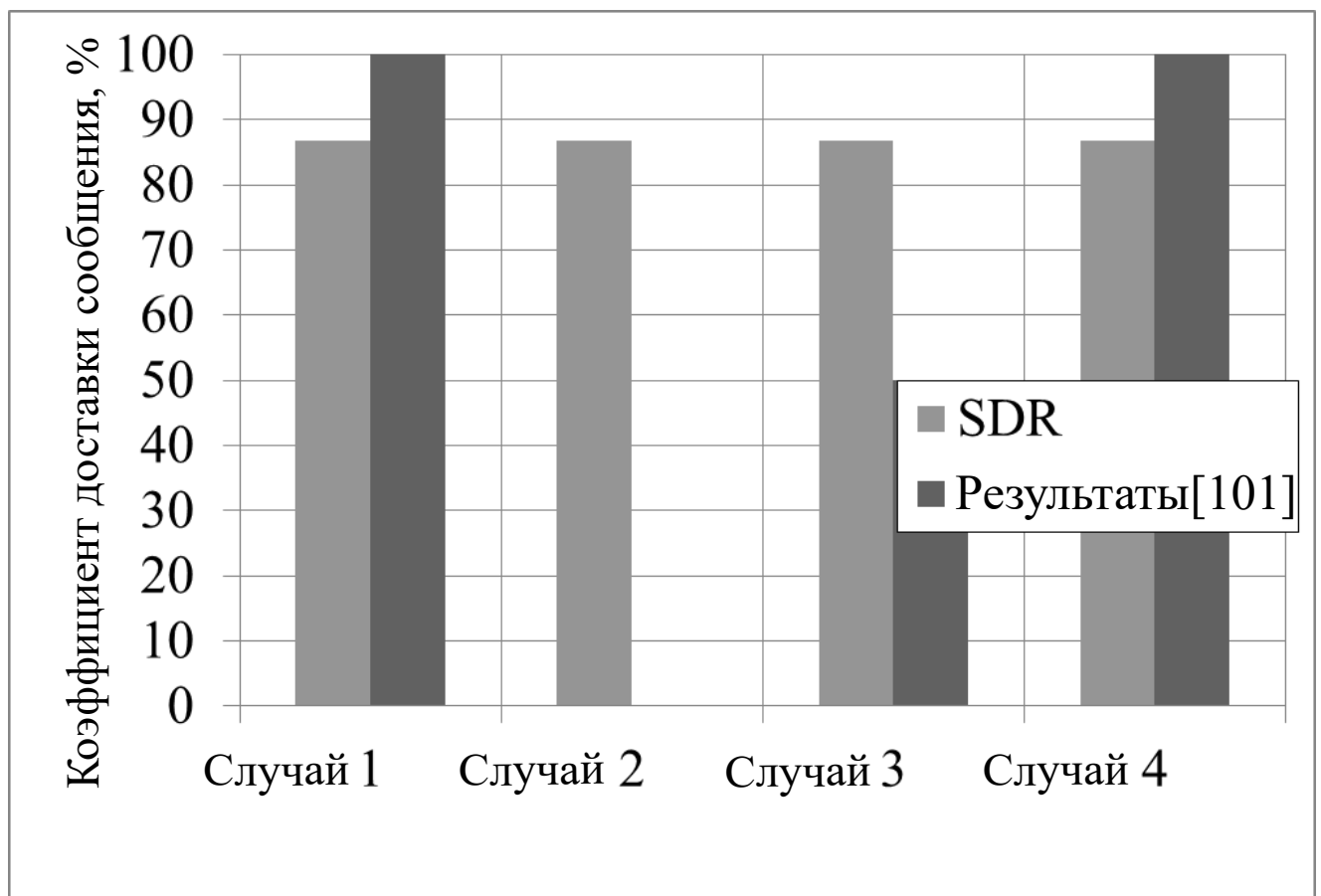
Этого в работе [107] не было зафиксировано. Можно сделать вывод о том, что, скорее всего более качественные компоненты радиопередатчика SDR вносят достаточные улучшения в выходной сигнал из тракта передатчика по сравнению с обычными АУ с более дешёвыми элементами. Из данного сценария можно получить достаточно большое разнообразие сценариев наложения различного числа АУ и разных искажениях сигнала на этапе программной обработки сигналов. Найти причины возникновения успешного приёма без учёта внутренних шумов измерительных приборов (в нашем случае это может быть осциллограф или анализатор спектров).

Теперь, по аналогии с работой [101], рассмотрим результаты экспериментов с одинаковыми мощностями интерферирующего и инициализирующего сигналов.

Результаты, представленные на рис. 4.8, показывают, что по данным, полученным на SDR, при незначительных потерях (около 15%) интерферирующий сигнал успешно принимается при всех четырех случаях наложения. Как и по результатам рис. 4.7, в данном случае результаты не совпадают с результатами работы [101] скорее всего из-за более качественных элементов радиоприёмника. Помимо этого, отличительной особенностью [101] является анализ полученных коэффициентов доставки пакетов при различных наложениях сообщений без точного определения границ временных сдвигов этих сообщений.

Для сравнения рассмотрим два предыдущих сценария вместе с третьим, который не был описан в других работах, где первый сигнал имеет большую мощность, чем второй.

Результаты третьего сценария $P_1 > P_2$ (см. рис. 4.9) показали, что более мощный сигнал, стоящий перед мешающим, более слабым по мощности сигналом, имеет большую вероятность доставки сообщений в сравнении с другими сценариями. Кроме того, как и в первом сценарии, есть незначительный выигрыш при пересечении сигналов во втором случае.

Рисунок 4.8. Результаты сценария $P1 = P2$

4.4 Задача максимизации средней вероятности доставки сообщений за счёт выбора параметров работы абонентских устройств

Спецификация LoRaWAN сама по себе [88] и единственное известное нам более раннее исследование, посвященное этой проблеме [112], предлагают АУ выбирать минимально возможный SF. Это делается для того, чтобы минимизировать время, затрачиваемое АУ на передачу восходящего канала (и прием нисходящего канала), тем самым увеличивая энергетическую полезность АУ. Несмотря на то, что этот способ «минимального времени» имеет смысл для разреженных сетей нечасто передающих АУ, в случае густонаселенных сетей он может иметь некоторые недостатки. Поэтому в работах [117],[118] предлагается другой метод назначения SF для АУ в сети LoRaWAN, который превосходит способ «минимального времени» по вероятности доставки данных. Путём моделирования работы сети устройств LoRaWAN в работе [117] на примере нескольких установок оценена производительность предлагаемого метода

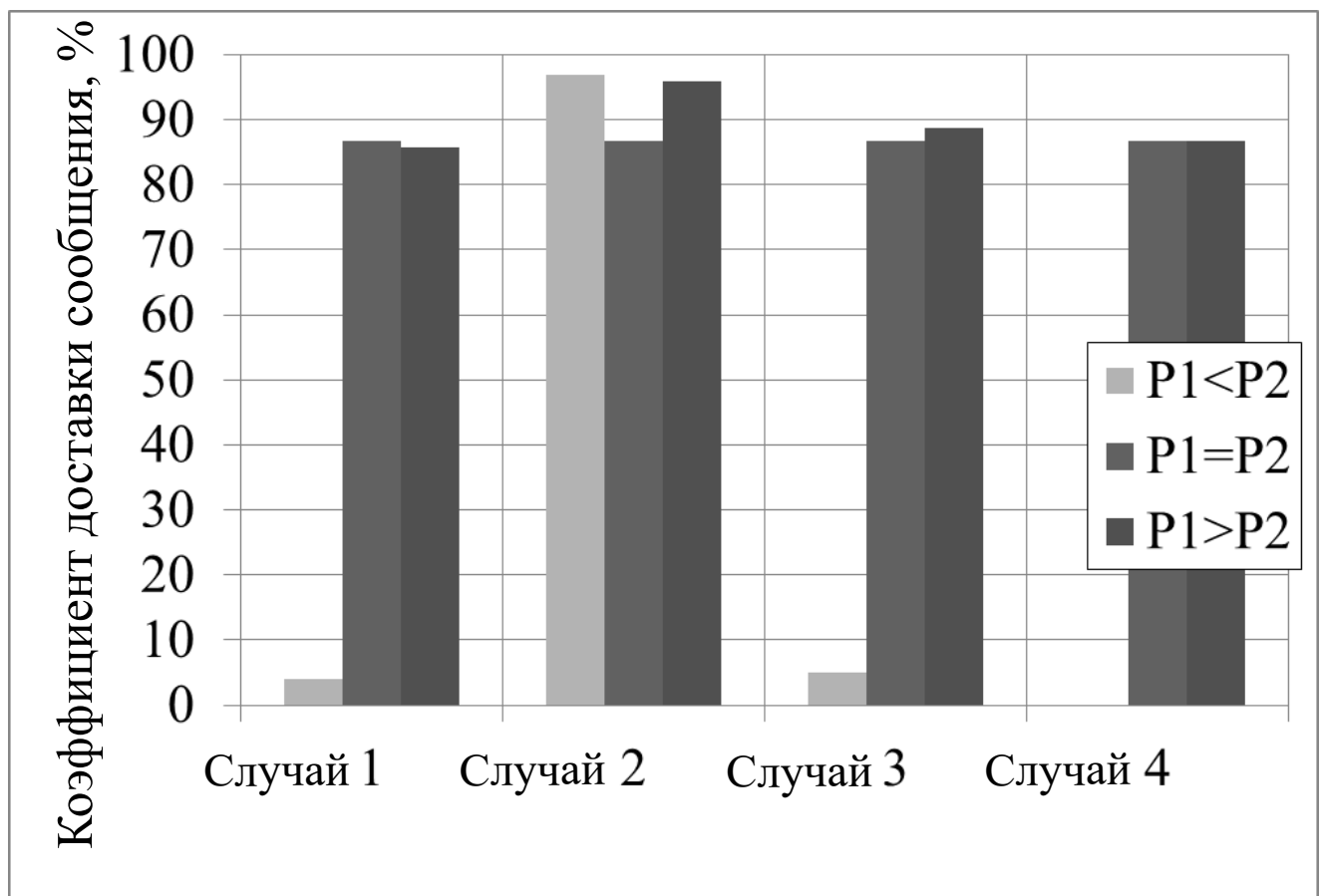


Рисунок 4.9. Результаты всех трёх сценариев

и сравнение её с производительностью современного (SotA, state-of-the-art) способа «min-time».

В модели системы рассмотрим городской район, где одна LoRaWAN БС расположена в центре круга определенного радиуса. АУ случайным образом размещены внутри этого круга. В среднем каждые десять минут АУ отправляет 8-байтовый пакет данных в БС по восходящей линии связи без подтверждений. Обращаем внимание, предполагается интервал между пакетами, распределённой экспоненциально с параметром λ и нет никакой нисходящей связи. Мощность передачи АУ постоянна (например, 14 дБм). Для простоты далее в работе [117] рассмотрено только одно значение ширины канала (125 кГц) и несущей частотой 868,1 МГц без ограничений рабочего цикла (DC, duty cycle). Для многочастотных каналов результаты можно получить, умножив их на один канал, в то время как DC можно учесть, изменив значение λ . Для радиоканала воспользуемся «моделью потерь на пути распространения по логарифмическому расстоянию», аналогичную той, что была сделана в [112], и устанавливаем те же самые параметры.

Также вводим следующие два предположения:

Таблица 4.1. — Схемы модуляции-кодирования (т.е. скорости передачи данных (DR, Data rate)) для LoRaWAN для диапазона ЕС 868 МГц [88][116]

DR	Модуляция	SF	Полоса пропускания, кГц	Макс. полезная нагрузка, байт	Время вещания 8-байтового пакета, мс
0	LoRa	12	125	59	1581.056
1	LoRa	11	125	59	790.528
2	LoRa	10	125	59	452.608
3	LoRa	9	125	123	226.30
4	LoRa	8	125	230	127.9
5	LoRa	7	125	230	70.91
6 ^a	LoRa	7	250	230	35.46
7 ^a	FSK	n/a	50	230	5

^aнеобязательный

Предположение 1. Все АУ находятся в одинаковых радиоусловиях, и если происходит одновременная передача от двух или более АУ с одинаковым SF , ни один из пакетов не будет успешно принят БС.

Предположение 2. Если ни один другой АУ не передает с SF_k , БС получает этот пакет с вероятностью один. В случае, если передачи двух АУ с SF_i и SF_k перекрываются по времени и i меньше k , то принимается пакет, отправленный с SF_i .

Необходимо максимизировать правильную скорость доставки пакетов PDR, под которой понимается отношение пакетов восходящей линии связи, правильно полученных шлюзом LoRaWAN, ко всем пакетам восходящей линии связи, отправленным всеми АУ, и которая определяется по формуле:

$$PDR = \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} \frac{n_i e^{-2\lambda t_i}}{N}, \quad (4.6)$$

где n_i – число АУ, работающих с использованием SF_i , а N – общее число АУ, λ – интенсивность потока данных с АУ, t_i – время передачи пакета при использовании SF_i (см. таблицу 4.1), k_{min} и k_{max} – минимально и максимально возможные SF , соответственно. Конкретно нас интересуют такие $n_{k_{min}} \dots n_{k_{max}}$, которые в сумме дают N и максимизируют PDR.

Для решения этой задачи оптимизации используем метод множителей Лагранжа. Сначала составляется функция Лагранжа:

$$L(n_{k_{min}}, n_{k_{min}+1}, \dots, n_{k_{max}}, \alpha) = \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} \frac{n_i e^{-2\lambda t_i}}{N} + \alpha(N - \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} n_i), \quad (4.7)$$

где α – это неопределенный множитель Лагранжа.

Затем вычисляем частную производную функции (4.7) по n_i .

$$\frac{\partial L}{\partial n_i} = \frac{-\alpha N + e^{-2\lambda t_i} - 2\lambda t_i n_i e^{-2\lambda t_i}}{N}, \quad (4.8)$$

где $i = k_{min}, \dots, k_{max}$. Далее составим систему уравнений, приравняв к нулю частные производные функции Лагранжа.

$$\frac{\partial L}{\partial n_i} = 0, \quad (4.9)$$

где $i = k_{min}, \dots, k_{max}$. Таким образом, получаем систему уравнений:

$$e^{-2\lambda t_i} (1 - 2\lambda t_i n_i) - \alpha N = 0, \quad (4.10)$$

где $i = k_{min}, \dots, k_{max}$.

Поскольку все уравнения системы одинаковы и отличаются только значением индекса i , для того чтобы равенство (4.10) соблюдалось, должна выполняться следующая система для решения задачи оптимизации:

$$\begin{cases} t_k n_k = t_{k_{min}+1} n_{k_{min}+1} = \dots = t_{k_{max}} n_{k_{max}} \\ \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} n_i = N \end{cases}, \quad (4.11)$$

где $i = k_{min}, \dots, k_{max}$. Отсюда получаем

$$n_i = \frac{\frac{1}{t_i}}{\sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} \frac{1}{t_i}} \cdot N \quad (4.12)$$

Проведение преобразований и округление результата до ближайшего целого числа дает нам следующие решения, определяющие оптимальное число АУ, работающих с SF_i как

$$n_i = \frac{\prod_{j=k_{min}, j \neq i}^{k_{max}} t_j}{\sum_{l=k_{min}}^{k_{max}} \prod_{j=k_{min}, j \neq l}^{k_{max}} t_j} \cdot N \quad (4.13)$$

Для оценки потенциального увеличения количества потребляемой энергии АУ в результате использования сетей LoRaWAN предложены способы назначения SF, основанные на результатах, представленных в [119]. В частности, используя уравнение (1) и данные из Таблицы 5 из [119] оценено среднее потребление тока АУ, работающего с различными SF, как

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=k_{min}}^{k_{max}} I_{avg_{SF_i}} V t_{SF_i} \quad (4.14)$$

где $I_{avg_{SF_i}}$ – средний потребляемый ток (на основе данных [119]), V – напряжение питания (в нашем случае 3,5 В), а t_{SF_i} – время передачи кадра восходящей линии связи с использованием SF: SF_i (см. таблицу 4.1).

Для иллюстрации предлагаемого способа назначения SF рассмотрим случай, когда $N = 1000$ и существует только два возможных SF: SF_7 и SF_8 . В этом случае (4.6) можно записать как

$$PDR = \frac{n_7 \cdot e^{-2\lambda n_7 t_7}}{n} + \frac{n_8 \cdot e^{-2\lambda n_8 t_8}}{N}, \quad (4.15)$$

где $k_{min} = 7$, $k_{max} = 8$.

На рис. 4.10 показано влияние числа АУ, использующих SF_8 , на PDR для двух иллюстративных значений λ . PDR показано отдельно для АУ, работающих с SF_7 (красным), SF_8 (зеленым) и для всех N АУ вместе (синим). Число АУ, максимизирующих PDR для сети в целом, полученное с помощью предлагаемого способа, отмечено черной точкой. Обращаем внимание, что традиционный метод назначения SF, основанный исключительно на индикаторе силы радиосигнала (RSSI) для описанного сценария, заставил бы все узлы отправлять данные, используя минимально возможный SF, т. е. SF_7 . Как видно из рис. 4.10 (число АУ с $SF_8 = 0$), PDR в этом случае составляет около 20%, в то время как предлагаемый способ увеличивает его более чем на 33%.

Чтобы глубже понять работу и полезность предлагаемого метода назначения SF и сравнить его с подходами SotA, проведён ряд модуляций с использованием сетевого симулятора NS-3. Симуляции были сделаны с использованием модели LoRaWAN, разработанной Van den Abeele и др. и использованной в [119], которая доступна на [120].

Логика работы дополнительного программного обеспечения, реализующего предлагаемый способ назначения SF, заключается в следующем:

1. В самом начале SF выбирается на основе критерия PER (от англ. Packet Error Ratio) 0,01 [112].

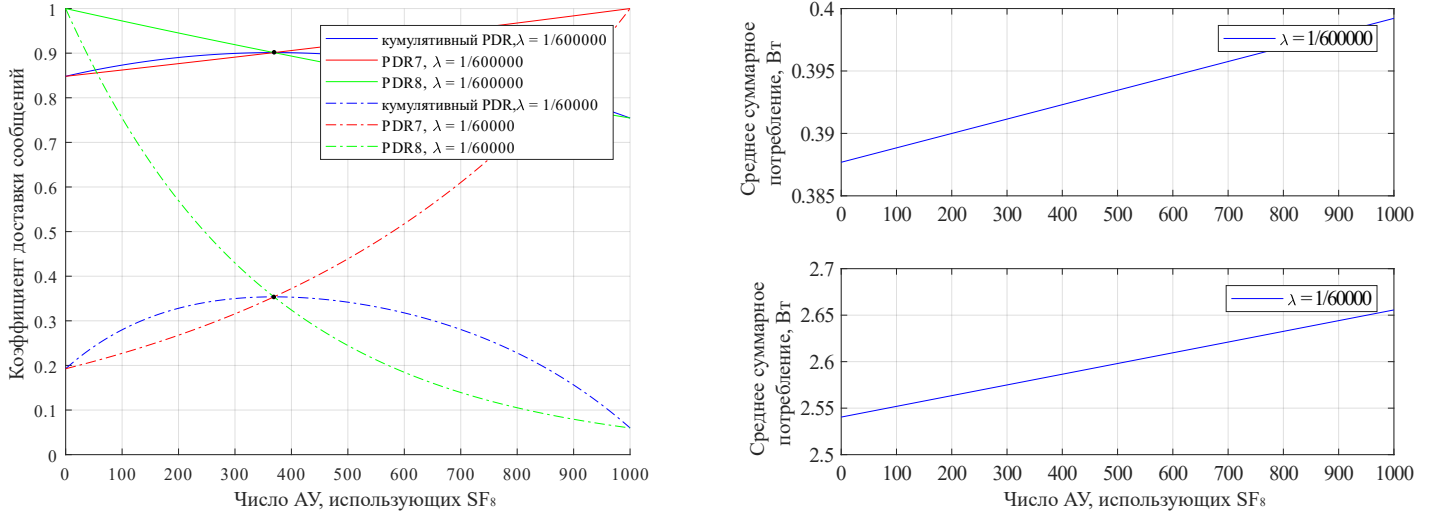


Рисунок 4.10. Влияние числа АУ на PDR для двух случаев с одним SF (т.е., SF_7 и SF_8) и для сети с двумя SF, с распределением АУ в соответствии с предложенным способом

2. Используя уравнение (4.13) определяется числом АУ $n_{k_{min}}, n_{k_{min}+1}, \dots, n_{k_{max}}$ с использованием каждого $SF_{k_{min}}, SF_{k_{min}+1}, \dots, SF_{k_{max}}$
3. АУ распределяются между группами SF путем случайного выбора необходимых АУ для каждой группы.

Рассмотрим сеть, состоящую из 100, 500, 1000, 5000 или 10000 LoRaWAN АУ класса А, расположенных на расстоянии 1 км от БС. Все остальные ключевые параметры моделирования соответствуют уже представленным в данном разделе выше. Моделирование проводилось для нескольких сценариев, которые различались количеством доступных SF. А именно, рассмотрены случаи сети, использующей два ($k_{min} = 7, k_{max} = 8$), три ($k_{min} = 7, k_{max} = 9$) или шесть различных SF ($k_{min} = 7, k_{max} = 12$). В качестве базового сценария моделируется сеть, использующая традиционный способ распределения SF LoRaWAN на основе силы сигнала и критерия PER 0,01 ([88] и [112]), в результате чего все узлы получают минимально возможный SF.

Результаты для PDR, рассчитанные как отношение пакетов uplink, полученных БС, к отправленным АУ, показаны на рис. 4.11. Как видно из представленных результатов, с увеличением числа АУ в сети, работающей по предлагаемому способу назначения SF, PDR начинает превосходить подходы SotA. В частности, для 5000 АУ предлагаемый способ приводит к увеличению PDR до 22%, а при 10000 АУ - до 41% по сравнению с базовым сценарием.

Также, как и ожидалось, возможность использования большего значения SF выгоднее, чем меньшего.

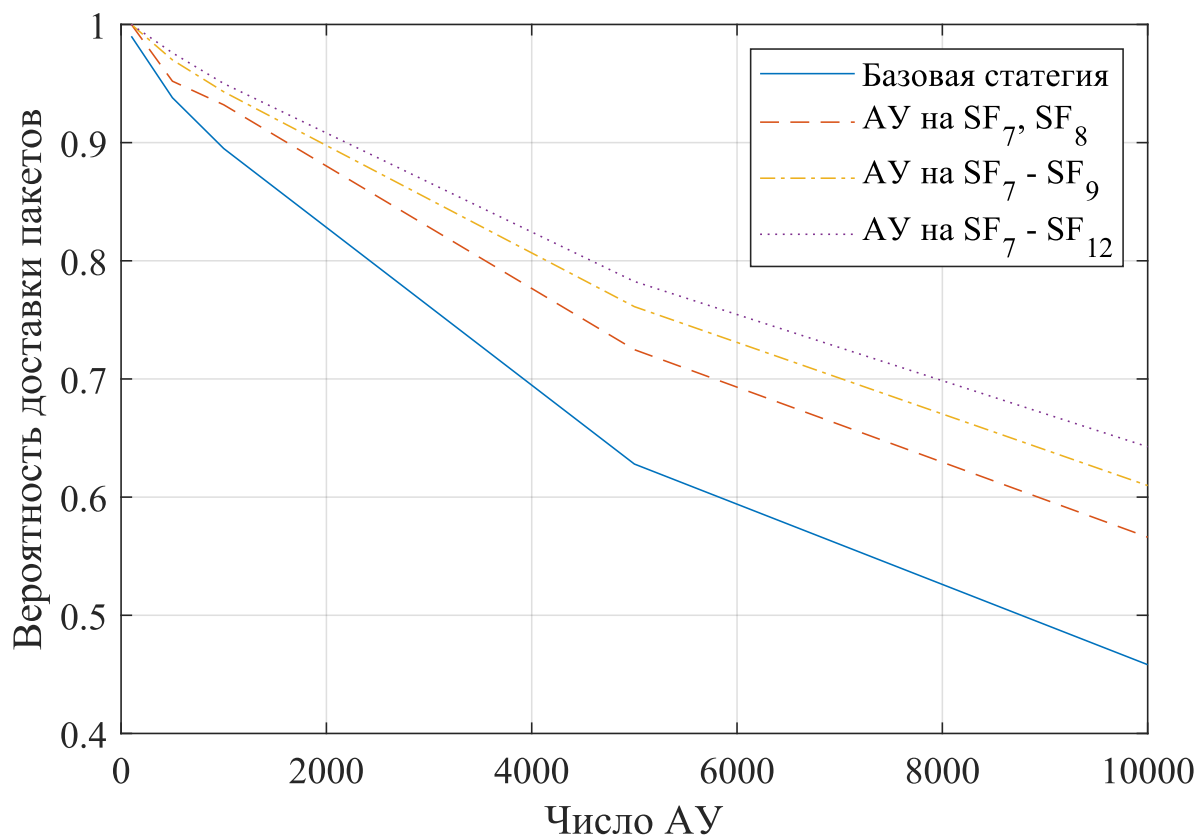


Рисунок 4.11. Влияние числа АУ на вероятность доставки пакетов для разных способов назначения SF

Для характеристики разницы в энергопотреблении между предлагаемым способом назначения SF и SotA использована методология, описанная выше. Соответствующие результаты и средние потери энергии, по сравнению с исходным подходом, представлены на рис. 4.11. Как можно видеть, использование двух SF и предлагаемый способ приводит к увеличению энергопотребления на один процент, в то время как для шести SF среднее потребление увеличивается на восемь процентов. Обращаем внимание, что, как это видно из рис. 4.11, первый приводит к увеличению PDR на 23%, а второй - более чем на 40% по сравнению с базовым способом «min-time».

В статье [117] сформулировано и предложено решение проблемы улучшения масштабируемости LoRaWAN LPWAN, обеспечив эффективный выбор параметра SF, используемого АУ. Сформулирована и решена соответствующая задача оптимизации и продемонстрирована работа способов назначения SF для сценария, когда все АУ находятся в одинаковых радиоусловиях. Проведенное

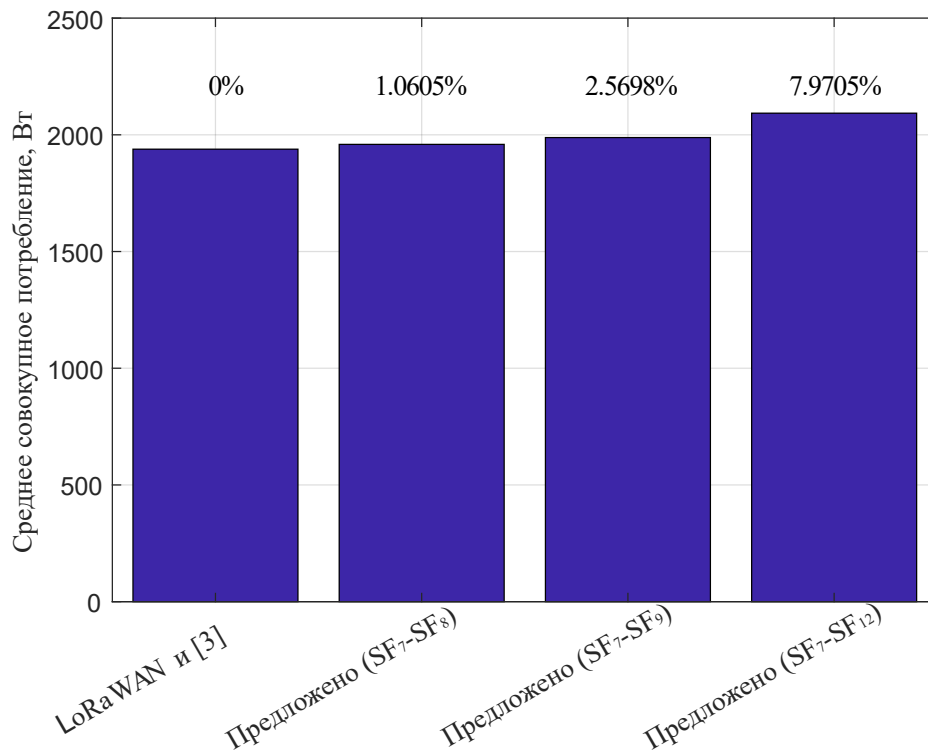


Рисунок 4.12. Среднее энергопотребление сети для различных способов назначения SF для 10000 АУ

моделирование показывает, что по сравнению с современными подходами, предложенными в [88] и [112], для плотных сетей предлагаемый метод увеличивает вероятность доставки данных по восходящей линии связи на 20–40%. Ценой такого выигрыша является увеличение среднего энергопотребления на 1–8 % соответственно. Важно отметить, что результаты показывают, что современные способы назначения SF LoRaWAN не являются оптимальными с точки зрения масштабируемости, и демонстрируют один из возможных способов улучшения масштабируемости LoRaWAN.

Обращаем внимание, что в статье [117] довольно много ограничений. Например, не рассмотрено наличие эффекта захвата, а также меж-SF-интерференцию и управление мощностью передачи, и фактические механизмы и процедуры для модификации SF (например, реализацию механизмов адаптивной скорости передачи данных). Модель описывается сценарием, когда все узлы находятся в одинаковых радиоусловиях, передают пакеты одинакового размера и есть только один шлюз.

4.5 Минимаксная оптимизационная задача

Рассмотрим протокол верхнего уровня Интернета Вещей LoRaWAN, который применяет такие АУ, которые отличаются режимами включения приемника на стороне АУ. В силу того АУ LoRaWAN отличаются определены классы. Устройства класса А можно считать наиболее дешёвыми, они имеют наименьшее энергопотребление. В силу того, что у данных АУ односторонний канал (открывают канал приёмника на короткое время сразу после передачи данных вверх). С учётом того, что АУ с разными SF не мешают друг другу, рассмотрим многоканальную одноэтапную систему случайного множественного доступа, модель которой представлена в разделе 1 диссертационной работы.

Рассмотрим сценарий, когда сеть развёртывается на такой небольшой территории, что всем АУ можно назначить SF_7 . Для такого плотного развёртывания предлагается упрощённая модель, отражающая основные особенности технологии LoRa, формулируются и решаются задачи максимизации вероятности доставки за счёт того, что некоторым АУ назначаются SF отличные от SF_7 .

Для постановки задачи оптимизации введем ряд допущений, отражающих основные особенности рассмотренного сценария, но используем ряд упрощений.

Допущение 1. В системе из N АУ, устройства равномерно распределены по окружности радиуса R . В центре находится БС. Указана модель потерь на трассе между БС и АУ. Мощность всех АУ одинакова и равна P_t . Значение SF для каждого АУ распределяется в соответствии с моделью потерь в тракте и мощностью такой, что в случае отсутствия других АУ, вероятность успешной доставки сообщения равна единице.

Допущение 2. Число байтов в сообщении равно L_b . Интервалы между сообщениями равны экспоненциальным случайным величинам с параметром $\lambda = 1/T$, где T - среднее величина интервала между сообщениями.

Допущение 3. Если сообщения от АУ с различными значениями SF накладываются на БС, то оба сообщения успешно принимаются.

Допущение 4. Если сообщения от АУ с одинаковыми значениями SF накладываются на БС, то сообщение, полученное ранее, успешно принимается.

Допущение 5. Пусть SF назначено число i для некоторого АУ в соответствии с допущением 1. Если SF назначено число $i + 1$ для этого АУ, то при

отсутствии других АУ вероятность успешной доставки сообщения с этого АУ равна 1.

Допущение 6. Пусть SF с номером i будет установлен для какого-либо АУ в соответствии с допущением 1. Если SF назначено этому АУ номер $i - 1$, то вероятность успешной доставки сообщения с этого АУ равна 0.

Модель полностью определяется моделью потерь пути и набором параметров:

- R - радиус круга;
- N - число АУ;
- Pt - мощность АУ;
- Lb - количество байтов в сообщении;
- T - средний интервал между сообщениями.

Далее будет зафиксирована модель потери пути прохождения сигнала из [121] и параметров $Pt = 14$ дБм, $Lb = 10$ байтов и $T = 5$ мин.

Скорость доставки пакетов может рассчитываться на основе допущений 1–6 с использованием следующей формулы:

$$PDR = \sum_{i=7}^{12} \frac{n_i e^{-\lambda t_i n_i}}{N}, \quad (4.16)$$

где n_i - число АУ, которым назначено SF_i в соответствии с предположением 1, а N - общее число АУ, t_i - время передачи пакета с полезной нагрузкой $Lb = 10$ байтов, при использовании SF_i (см. таблицу 4.2).

Таблица 4.2. — Значения эфирного времени от SF [122]

SF	Эфирное время для 10–байтового пакета, мс
12	1482.75
11	823.3
10	370.69
9	205.82
8	113.15
7	61.7

Если в соответствии с допущением 1 нет АУ с определённым индексом i , то соответственно АУ с индексом i равно 0.

В отношении введенной модели определим плотную и ультраплотную сеть. Если для некоторого $k < 12$ все $n_i = 0$ для $i > k$, то сеть будет называться плотной сетью. При $k = 7$ сеть будет называться ультраплотной сетью.

Целью оптимизации является выделение SF устройствам таким образом, чтобы вероятность доставки была максимальной. Задача оптимизации, в этом случае, формулируется следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=7}^{12} \frac{m_i e^{-\lambda t_i m_i}}{N} \rightarrow \max \\ \sum_{i=7}^{12} m_i = N \\ m_7 \leq n_7 \\ m_8 \leq n_8 + n_7 - m_7 \\ \vdots \\ m_{12} \leq n_{12} + n_{11} - m_{11} \end{array} \right. \quad (4.17)$$

где n_i и m_i - число АУ с номером SF до (см. Допущение 1) и после оптимизации, соответственно.

4.6 Решение задачи оптимизации

Сначала рассмотрим частный случай, когда $n_i = 0$ для $i > 7$ (ультраплотная сеть). В этом случае задача оптимизации принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=7}^{12} \frac{m_i e^{-\lambda t_i m_i}}{N} \rightarrow \max \\ \sum_{i=7}^{12} m_i = N \end{array} \right. \quad (4.18)$$

Решение этой задачи оптимизации описано в [112], а оптимальные m_i вычисляются по следующей формуле (методом множителей Лагранжа):

$$m_i = \frac{\prod_{i=7, j \neq i}^{12} t_j}{\sum_{i=7}^{12} \prod_{i=7, j \neq i}^{12} t_j} \cdot N \quad (4.19)$$

Замечание 1.

Следует отметить, что в результате этого решения, вероятности доставки для АУ с различными SF одинаковы:

$$e^{-\lambda t_7 n_7} = e^{-\lambda t_8 n_8} = \dots = e^{-\lambda t_{12} n_{12}} \quad (4.20)$$

Вернемся к рассмотрению общего случая. Далее, задачу оптимизации (4.17) будем называть основной проблемой оптимизации, а систему (4.18) будем называть вспомогательной задачей оптимизации. Для решения проблемы, в общем случае, вводятся дополнительные параметры $k_{min} = 7$ и $k_{max} = 12$, и выполняются следующие шаги:

Шаг 1. Для значений $n_{k_{min}}, \dots, n_{k_{max}}$ решается вспомогательная задача оптимизации (как если бы все АУ были на SF k_{min}), что приводит к значениям $m_{k_{min}}, \dots, m_{k_{max}}$. Затем проверяем выполнение ограничений, включенных в основную задачу оптимизации (уравнение 4.17). Если ограничения выполнены, то основная проблема оптимизации решена. В противном случае выполняется шаг 2.

Шаг 2. Общее число АУ уменьшилось на $n_{k_{min}}$ ($N = N - n_{k_{min}}$) и $m_{k_{min}} = n_{k_{min}}$ (оптимизация числа АУ на данном SF k_{min} невозможна). Затем снова выполняется шаг 1, но со значением k_{min} , увеличенным на единицу.

Такой цикл повторяется до тех пор, пока основная задача оптимизации не будет решена или пока k_{min} не станет равным k_{max} .

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{n_i} \sum_{i=7}^{12} \frac{n_i e^{-\lambda t_i n_i}}{N} \\ \text{При условии, что} \\ \sum_{i=7}^{12} n_i = N \\ n_i \geq 0, i = 7, \dots, 12 \end{array} \right. , \quad (4.21)$$

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, использующие SF_i .

Сформулированная выше задача оптимизации дает оптимальное решение только для идеализированной модели, соответствующей введенной выше системе допущений. Чтобы учесть особенности реальной системы, представим следующий алгоритм назначения SF и мощности АУ. Алгоритм содержит несколько этапов:

Этап 1. Назначение SF выполняется. Методом назначения SF из [112] получаем набор чисел $n_7, n_8, \dots, n_{12}$.

Этап 2. Задача оптимизации решена (см. Раздел 4.6) и получен набор чисел $m_7, m_8, \dots, m_{12}$.

Этап 3. Если для некоторого i выполняется неравенство $m_i < n_i$, то выбираются устройства $(n_i - m_i)$ с наиболее удаленным от БС SF_i . Этим устройствам $(n_i - m_i)$ назначается $SF_i + 1$, и мощность уменьшается (если это возможно).

Для демонстрации оптимизации были выполнены моделирование и численные расчеты для 1000 и 3000 АУ. Для моделирования использовался NS3 из [112]. В этом случае, физические особенности LoRa были приняты во внимание, см. [112], значительно более точно, чем было сделано в допущениях 1-6, . В соответствии со сценарием, АУ были распределены по кругу радиусом от 1000 до 3000 метров с шагом 500 метров, около одной ГВт. В соответствии с допущением 1, в зависимости от расстояния от центра круга были назначены следующие SF:

- SF_7 : от 0 до 1740 метров
- SF_8 : от 1740 до 2200 метров
- SF_9 : от 2200 до 2700 метров
- SF_{10} : от 2700 до 3300 метров
- SF_{11} : от 3350 до 4150 метров
- SF_{12} : от 4150 метров

Например, для круга с радиусом 1000 м, все АУ были на SF_7 , а для круга с радиусом 3000 м, АУ были распределены следующим образом: $SF_7 = 73$ АУ, $SF_8 = 37$, $SF_9 = 52$, $SF_{10} = 38$ АУ. Для наглядности представлен рис. 4.13 для 200 приборов в радиусе 3000 м.

На рис. 4.13 маркерами обозначены АУ, настроенные на разных значениях SF. В этом случае окружности указывают приблизительные границы зон, где АУ должны устанавливать SF в соответствии с сигнатурой этой зоны в случае использования типичного сценария.

Для распределенных АУ вероятность успешной доставки была рассчитана по формуле 4.16 и проведено моделирование. Результаты представлены на рис. 4.14.

Затем для распределенных АУ была решена задача оптимизации, получены новые значения числа АУ на конкретных значениях SF ($m_7, \dots, m_{12}$). Рассчитывается вероятность доставки сообщения после оптимизации. АУ перераспределяются в соответствии с алгоритмом, описанным выше для моделиро-

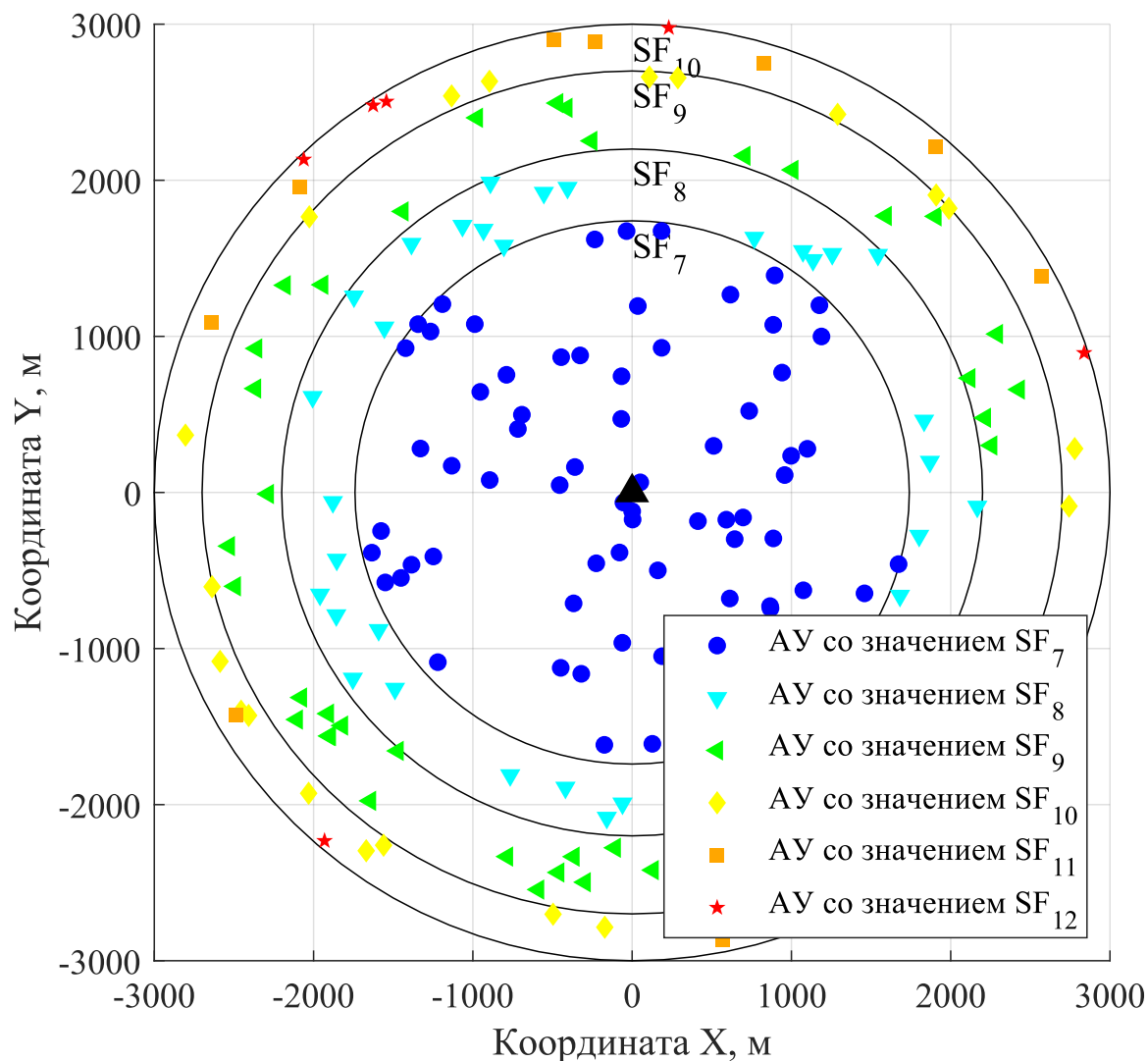


Рисунок 4.13. Распределение 200 АУ в радиусе 3000 м

вания. Результаты моделирования и теоретических расчетов также показаны на рис. 4.14 в виде графика. Следует отметить, что при моделировании не было изменений мощности АУ.

По результатам вычислений и моделирования рассчитывалось значение относительного усиления, полученного в результате оптимизации. (рис. 4.15).

На рис. 4.15 можно отметить, что чем меньше становится сеть, тем меньше коэффициент усиления.

Прежде чем обсудить результаты, сделаем следующее замечание.

Замечание 2

При моделировании особенности технологии LoRaWAN учитывались больше, чем в упрощенной модели. При моделировании событий, описанных в допущениях 3—6, на то, был ли приём успешным или нет, влияли уровень прини-

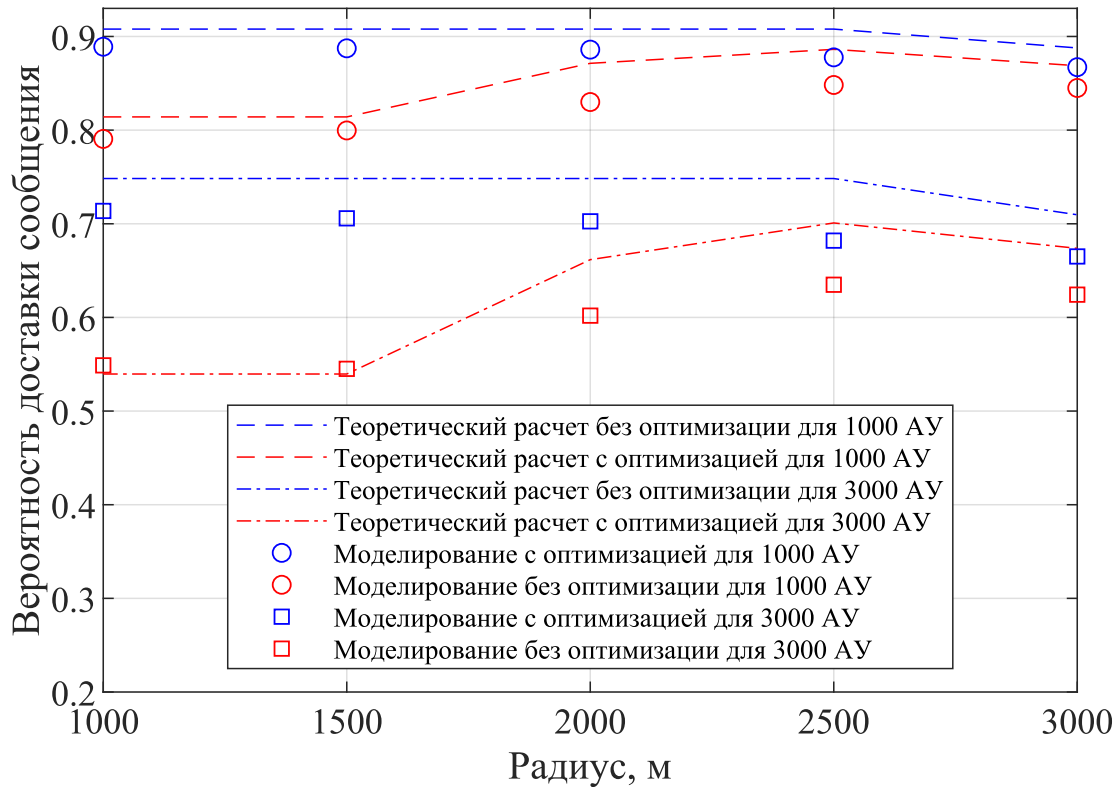


Рисунок 4.14. Зависимость вероятности доставки сообщения от радиуса круга

маемой мощности, уровень мощности мешающего сигнала, уровень шума и то, как сигналы от различных АУ перекрываются на входе БС. Это не было учтено в упрощенной модели, которая объясняет разницу между результатами численного расчета и моделирования. Однако эта разница не является существенной.

График численного расчета на рис. 4.14 показывает, что вероятность доставки сообщения без оптимизации до определенной точки увеличивается с увеличением расстояния, на котором распределяются АУ. Это связано с тем, что с увеличением радиуса круга АУ постепенно распределяются по растущему числу различных SF, согласно методу из [112]. Дальнейшее увеличение расстояния приводит только к уменьшению вероятности успешной доставки, поскольку теперь с увеличением радиуса все больше и больше АУ будут назначаться только для больших SF. Также видно, что в точках 1000 м и 1500 м все АУ находятся на минимуме 7 SF и создают помехи друг для друга (допущение 4). Решение проблемы оптимизации позволяет распределять АУ в соответствии с различными SF и, таким образом, увеличивать вероятность доставки сообщений в соответствии с предположением 3. Как видно из графика теоретического расчета, АУ могут быть оптимально распределены с использованием основной задачи опти-

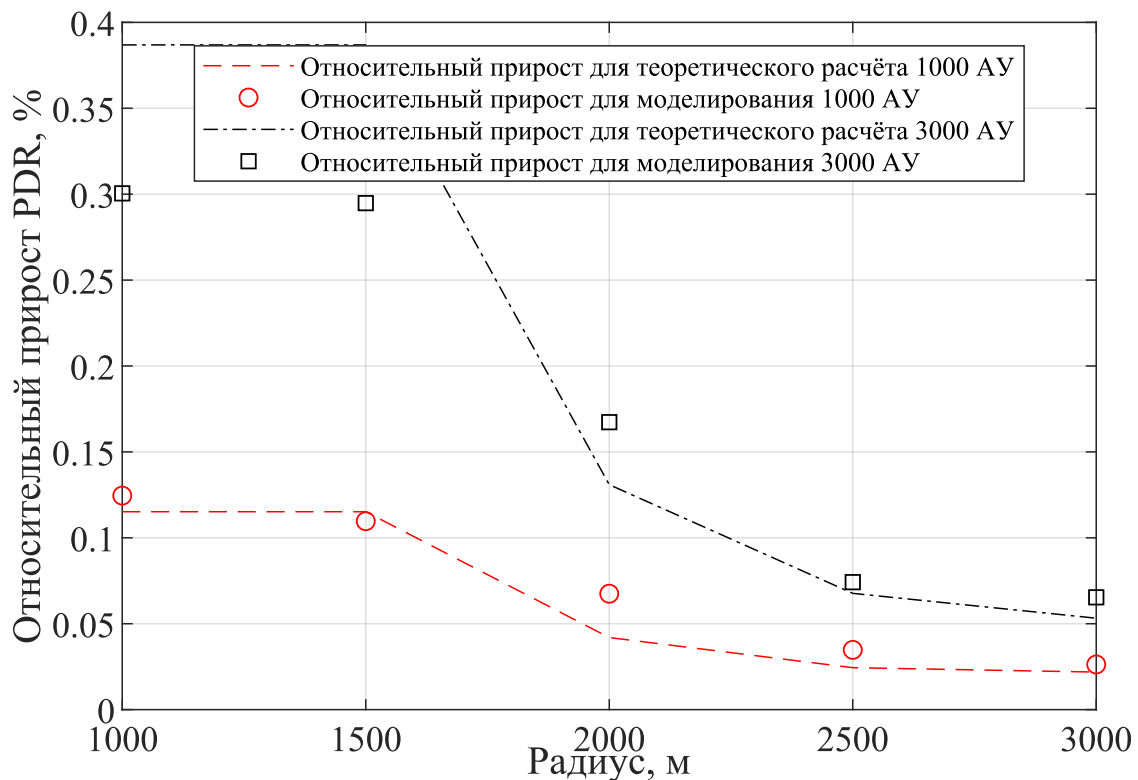


Рисунок 4.15. Относительный выигрыш в вероятности доставки сообщения от радиуса круга для 1000 и 3000 АУ

мизации до 2500 м, после чего АУ с меньшей SF становятся недостаточными и для распределения используется вспомогательная задача оптимизации.

Оптимальное назначение SF для упрощенной модели не является оптимальным для уточненной модели (см. Замечание 3), поскольку вероятности успешной доставки для разных SF не одинаковы (см. Замечание 2). Это можно увидеть на графике, показанном на рис. 4.16, который показывает численный расчет и результаты моделирования для сценария распределения 1000 АУ по окружности 3000 м.

Кроме того, одной из причин различий в значениях моделирования и теоретических расчетов является то, что сообщения в SF_{12} мешают другим SF . Чтобы избежать этого, можно снизить мощность некоторых АУ на SF_{12} . Однако в представленном моделировании это сделано не было.

В работе был рассмотрен сценарий сбора данных с большого числа АУ, расположенных на открытой местности, с использованием одного частотного канала, и была представлена упрощенная модель. Для представленной модели была сформулирована и решена оптимизационная задача максимизации PDR. На основе решения задачи оптимизации был предложен метод назначе-

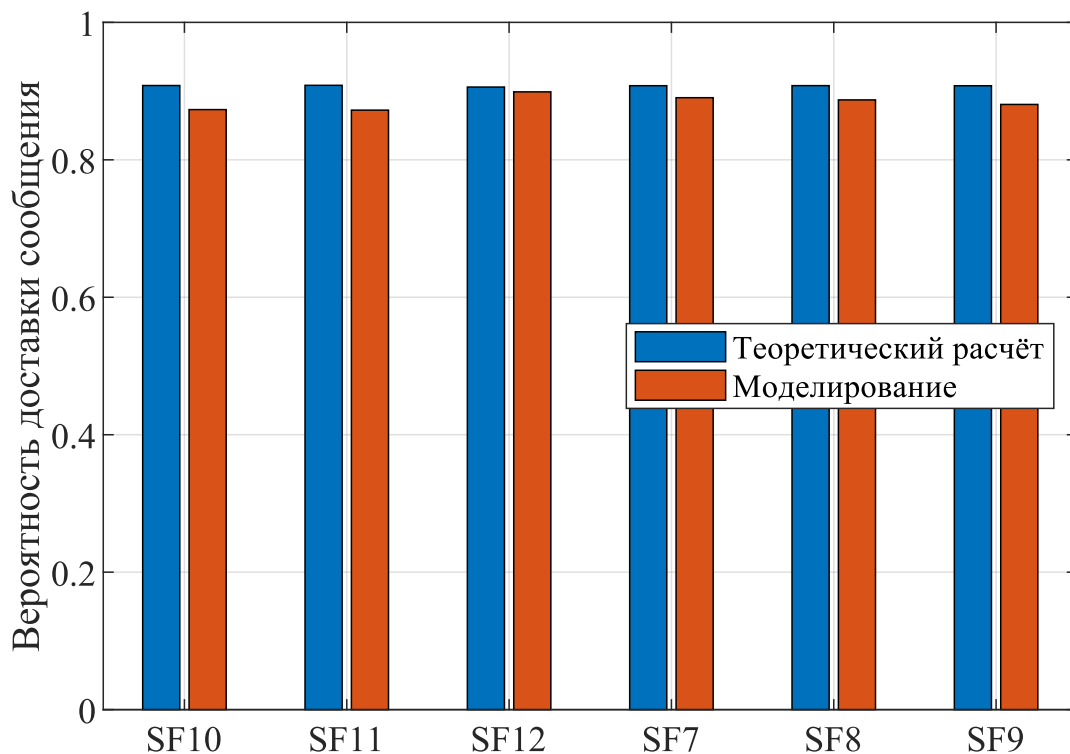


Рисунок 4.16. Зависимость вероятности доставки сообщения для каждого SF ния SF-устройств на этапе развертывания сети, который был протестирован с использованием моделирования в среде NS3. При моделировании функции технологии LoRaWAN учитывались лучше, чем в упрощенной модели. Моделирование показало, что для 3000 АУ предлагаемый способ позволяет получить усиление в PDR по сравнению с известным способом назначения SF, на 15% и 30% с радиусом сети 2 км и 1 км, соответственно. Упрощенная модель дает близкие значения. Таким образом, упрощения, использованные при введении модели, не оказали существенного влияния на результат.

Представленная в работе упрощенная модель может быть использована для оценки PDR в плотных сетях LoRaWAN и анализа влияния параметров сети на PDR. Метод назначения SF, предложенный в этой работе, может быть обобщён на другие сценарии использования сети LoRaWAN. В частности, этот метод может быть легко обобщён для случая использования нескольких каналов, в то время как значения PDR, полученные в этой работе, не отличаются с увеличением числа АУ пропорционально числу каналов.

При назначении оптимальным способом 10000 АУ SF₇ и SF₈ увеличивается вероятность доставки пакетов на 23%, а при назначении всех возможных

SF – более чем на 40% по сравнению со случаем, когда всем АУ назначается значение SF_7 .

Далее в диссертации рассмотрим обобщение оптимизационной задачи на случай, когда АУ располагаются на большей территории, где не всем АУ можно назначить SF_7 [123-126].

Приведём краткое описание модели из работы [111]. Данная модель отражает основные особенности технологии LoRa при плотном размещении устройств (англ. Highdensity networks), для которой введены следующие допущения:

Допущение 1. Все АУ находятся в одинаковых радиоусловиях. Если передача осуществляется только одним АУ при использовании любого значения SF от 7 до 12, то сообщение будет успешно принято;

Допущение 2. Если одновременно передают два и более АУ на одном и том же значении SF, то ни одно из сообщений не будет успешно принято;

Допущение 3. Если одновременно передают несколько АУ с разными значениями SF, то все сообщения от этих АУ будут успешно приняты.

Задача максимизации средней вероятности доставки в системе представлена в системе уравнений (4.21).

Результатом решения оптимизационной задачи является распределение числа всех АУ между $SF_7, \dots, SF_{12}$. По причине того, что все АУ находятся в одинаковых радиоусловиях, существенным является только то число АУ ($n_7, \dots, n_{12}$), которое используют определённое значение SF, а не уникальный номер АУ.

Аналогичная оптимизационная задача рассмотрена в большом числе исследований, обзор которых проведён в работе [127]. Проблемы, которые возникают при решении этой оптимизационной задачи проиллюстрируем на примере. Пусть все сообщения имеют размер 10 байт, время передачи сообщения при использовании разных значений SF приведено в таблице 4.2. Средний интервал между появлениями сообщений у абонентов – 300 секунд, а длина интервала распределена по экспоненциальному закону.

Данная задача относится к классу задач дискретного программирования. Однако, если число АУ достаточно большое, то для упрощения решения задачи можно отказаться от требования, что n_i являются целыми числами и решать эту задачу как задачу нелинейного непрерывного программирования с ограничениями типа равенств и неравенств. Результаты, полученные при решении

данной задачи, можно округлять до ближайшего целого. Далее в работе рассмотрим именно такой подход.

На рис. 4.17 приведена зависимость средней вероятности успешной доставки от числа АУ, полученная в результате решения оптимизационной задачи (4.21) и вероятность доставки сообщений для случая, когда все АУ используют значение SF равное 7. Так же на рисунке приведены зависимости минимальной и максимальной вероятности доставки сообщений. Из рис. 4.17 следует, что при использовании АУ разных значений SF (т.е. $n_7, \dots, n_{12}$), средняя вероятность доставки при любом числе АУ превышает среднюю вероятность доставки по сравнению со случаем, когда все АУ используют значение SF равное 7 (т.е. $n_7 = N$). Однако, при большом числе АУ решение оптимизационной задачи (4.21) может привести к тому, что для АУ с разными значениями SF, вероятность доставки может существенно отличаться.

Для преодоления этого недостатка, сформулируем минимаксную оптимизационную задачу (4.22):

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{n_i} \min \left(\frac{n_7 e^{-\lambda t_7 n_7}}{N}, \frac{n_8 e^{-\lambda t_8 n_8}}{N} \dots \frac{n_{12} e^{-\lambda t_{12} n_{12}}}{N} \right) \\ \text{При условии, что} \\ \sum_{i=7}^{12} n_i = N \\ n_i \geq 0, i = 7, \dots, 12 \end{array} \right. , \quad (4.22)$$

Результаты оптимизационной задачи (4.22) также представлены на рис. 4.17. Следует отметить, что средняя вероятность доставки незначительно ниже, чем при использовании оптимизационной задачи (4.21). При этом, в отличие от решения первой оптимизационной задачи, вероятность доставки для всех АУ оказывается одинаковой при любом числе АУ. Можно сделать вывод, что начиная с 5000 до 15000 АУ на рис. 4.17 результаты вероятности доставки без оптимизации (зелёная линия) будет проигрывать любому из решений задачи с оптимизацией на 30% – 67%.

Для обобщения оптимизационной задачи рассмотрим полученные результаты для случая, когда АУ располагаются на большей территории, где не всем АУ можно назначить SF_7 .

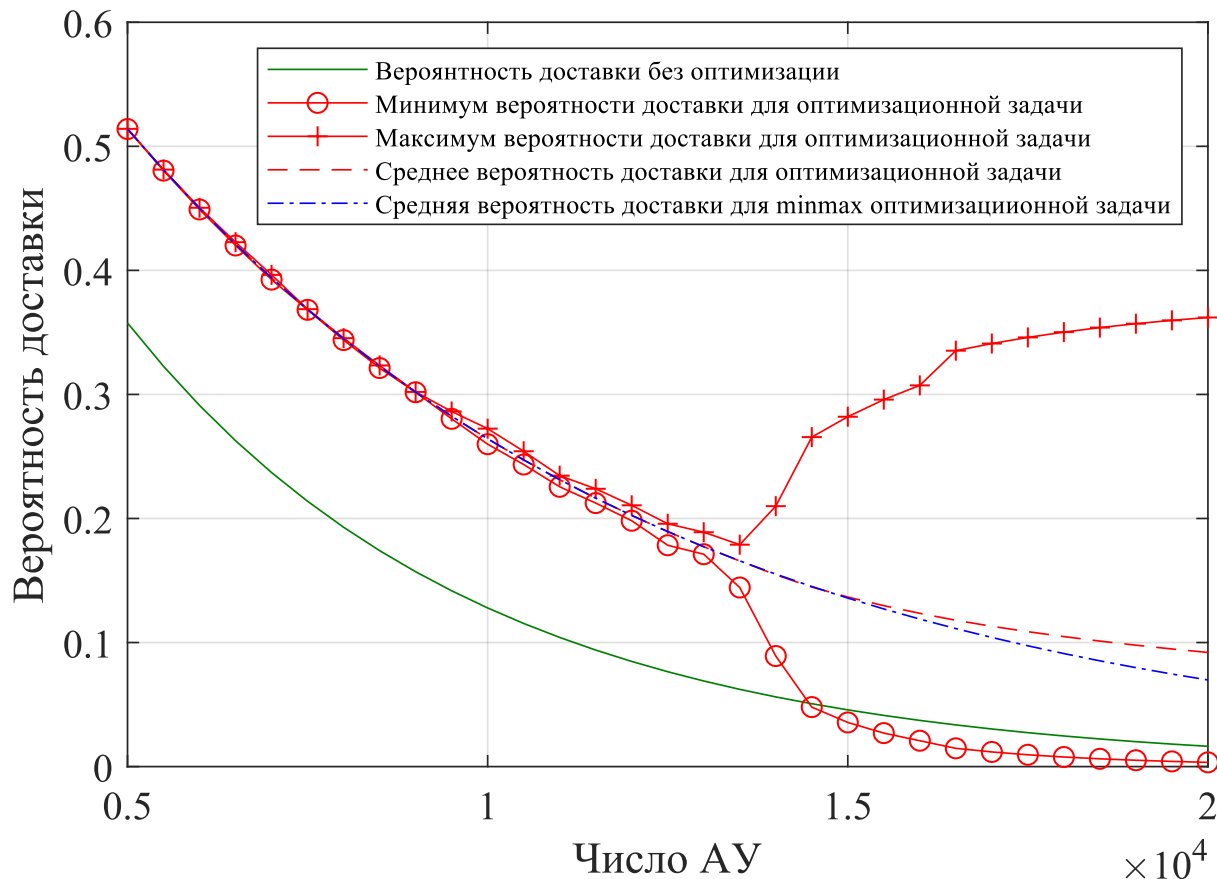


Рисунок 4.17. Зависимость вероятности доставки сообщений от числа АУ

4.7 Натурный эксперимент, подтверждающий корректность модели, используемой при формулировке минимаксной оптимизационной задачи

В данном разделе описывается методика проведения натурных экспериментов для небольшого числа АУ для оценки вероятности доставки в системе с большим числом АУ. Идея методики заключается в том, что интервалы между передачами АУ при проведении эксперимента выбираются такими, что суммарная интенсивность потока сообщений получается такая же, как в системе с большим числом АУ.

В работе [128] решается задача, в которой показано влияние множества АУ друг на друга. Эта задача очень важна для оценки производительности сети. Ключевым параметром для оценки эффективности системы является вероятность успешной доставки пакетов от АУ до БС. Параметры будут зафикс-

сированы на сервере LoRaWAN. В работе даётся оценка вероятности успешной доставки в реальных экспериментах.

В ходе экспериментов на БС отправляются пакеты от фиксированного числа АУ. Информация от БС используется на входе программного комплекса. Эксперимент проводится с сопоставлением алгоритма работы программы. Результатами становится информация, по которой оцениваются вероятности успешной доставки. В реальных экспериментах нет возможности использовать тысячи АУ одновременно. Поэтому в статье [128] описывается методика, позволяющая использовать замену 4 АУ в натурном эксперименте на 1000 АУ в реальной системе с помощью математической модели.

Если все АУ используют одно значение SF и последний выбран так, то при отсутствии перекрытий сообщения успешно доставлялись. Однако, в случае любого перекрытия пакетов сообщения не доставляются, вероятность успешной доставки рассчитывается по формуле (4.23).

$$Pr \{T = 2t_{\text{сообщ.}}\} = e^{-\lambda N 2t}, \quad (4.23)$$

где T – перекрытие сообщений, при котором сообщение не распознаётся; λ – интенсивность входного потока; N – число АУ; t – длительность пакета.

В ситуации, когда сообщения не могут быть распознаны при полном наложении сообщений, вероятность успешной доставки можно найти с помощью теоретической формулы (4.24).

$$Pr \{T = 2t_{\text{сообщ.}}\} = e^{-\lambda N t}. \quad (4.24)$$

Данные вероятности представлены на рис. 4.18 в качестве верхней и нижней границы средней вероятности доставки сообщений.

Во многих работах для анализа масштабируемости сети LoRaWAN рассматривалась вероятность успешной доставки. В типовом сценарии с большим числом АУ в реальных системах $N_p = 10000$, с большим интервалом передачи сообщения (Например, $T_p = 10$ мин), короткими пакетами (Например, $t_p = 41.22$ мс (10 байт) [122]) и интенсивностью передачи один раз в T_p ($\lambda_p = 1/600$). В пределах исследуемой системы интенсивность рассчитывается как:

$$t_p \cdot N_p \cdot \lambda_p = 0,687. \quad (4.25)$$

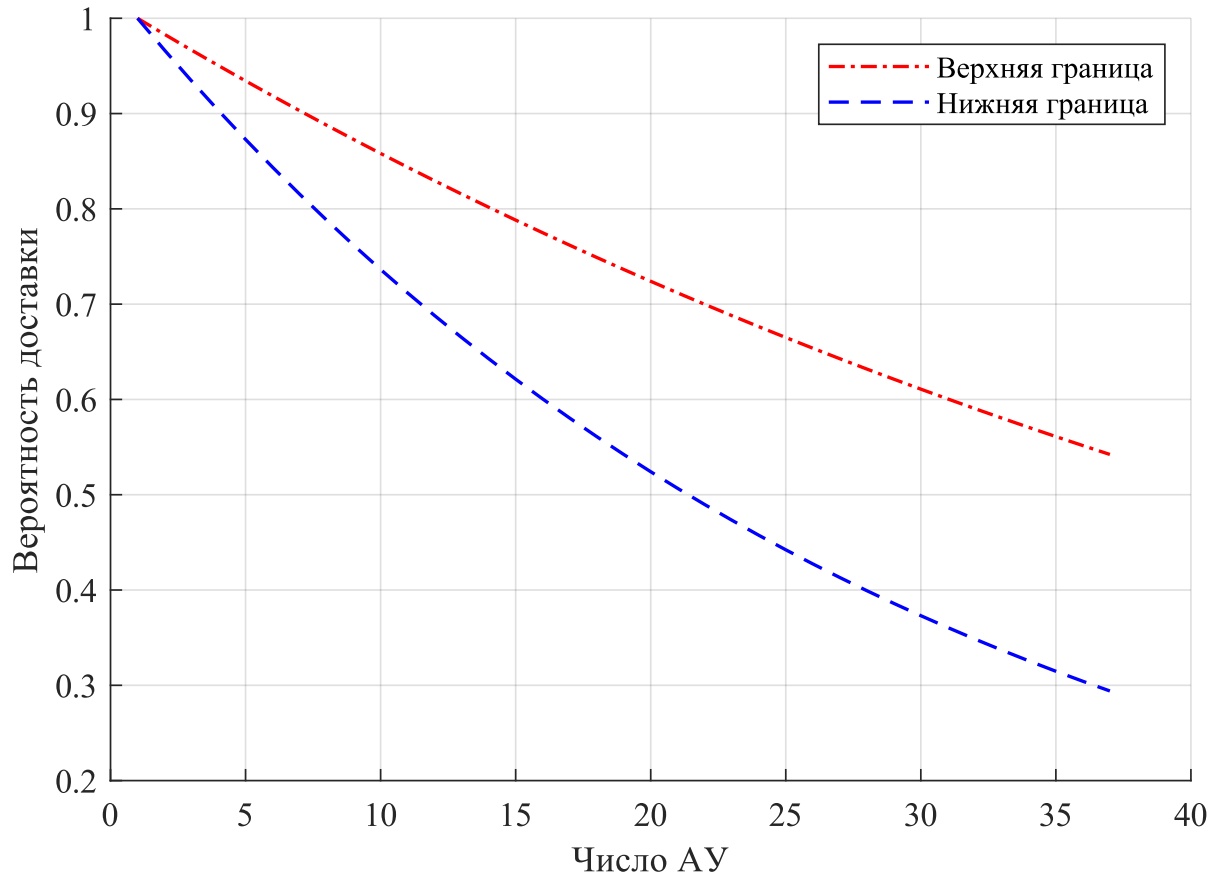


Рисунок 4.18. Теоретические расчёты для типового сценария

Эти параметры реальной системы можно наблюдать на БС в соответствии с документацией [122] и стандартных АУ.

Провести экспериментальное исследование при таком числе АУ не представляется возможным. Однако, следует учитывать следующее условие: в эксперименте необходимо сократить время повторных передач сообщений и увеличить длину сообщения. Учитывая ограничения конфигурации прошивки и характеристики АУ, интервал передачи сообщений с одного АУ $T_{э.} = 7$ с [104]. Отсюда интенсивность передачи сообщений $\lambda_{э.} = 1/7$, номер АУ $N_{э.} = 41$. Интенсивность в экспериментальном исследовании равна:

$$T_{э.} N_{э.} \lambda_{э.} \approx T_p N_p \lambda_p, \quad (4.26)$$

где $t_{э.}$ — длительность длинного пакета, заданная из условия проведения эксперимента (Например, 118,02 мс (64 байт) [122]).

Таким образом имитируется большое количество перекрытий сообщений в реальных условиях, откуда получается следующее соотношение: четыре сообщения в экспериментальной системе на тысячу сообщений в реальной.

Для оценки эффективности работы системы был разработан программный комплекс, который должен упростить сложную работу по получению и обработке данных. Комплекс управляет ходом эксперимента, получает информацию с LoRaWAN-сервера и рассчитывает вероятность доставки. В данном комплексе встроен алгоритм отключения АУ.

Для запуска программного стенда необходимо задать таблицу с описанием эксперимента. В ней есть список АУ, которые будут использоваться в эксперименте. Программа выполняет перебор АУ и предлагает оператору на каждой итерации включить новое АУ. Если оператор допустил ошибку и не включил одно АУ, можно будет увидеть эту ошибку в выходном файле. Когда все АУ включены, оператор задает команду на запуск эксперимента. Время эксперимента является входным параметром. Оператор может его изменить.

На втором компьютере должен быть запущен сервер. Сам сервер имеет доступ к лог-файлам БС, где записывается информация обо всех АУ.

Когда время эксперимента закончится, программа начнет получать и обрабатывать данные. С помощью API (Application Program Interface) сервера программа с протоколом websocket подключается к серверу и отправляет json-запрос для каждого АУ. В ответе сервера есть счётчик пакетов. Нумерация пакетов идет по порядку, и можно подсчитать, сколько пакетов не было получено на БС.

После разбора ответа сервера и обработки данных, информация записывается в выходной файл. Формат файла имеет следующий вид – все строки имеют три значения – идентификатор АУ, число доставленных и отправленных пакетов. Такой формат удобен для дальнейшей работы.

После завершения эксперимента программа предложит оператору отключить АУ по некоторому алгоритму. Этот алгоритм описан ниже.

Программный комплекс можно разделить на две части: управление экспериментом и обработка данных.

Управление экспериментом имеет три этапа: этап включения приборов, этап ожидания окончания времени эксперимента и этап выключения приборов. Все этапы подробно рассмотрены далее.

Для запуска программы необходимо задать две таблицы в формате xls. Первая таблица содержит идентификаторы АУ, которые будут использоваться в эксперименте. Вторая таблица содержит два значения во всех строках: идентификатор АУ (EUI, Extended Unique Identifier) и ID АУ. С ID работать проще,

чем с EUI, и эта таблица предназначена для облегчения работы оператора. EUI используется для отправки запроса на сервер.

После запуска программа выполнит перебор АУ. Программа получает идентификатор АУ и сопоставляет его с EUI. Эти значения будут сохранены в памяти в виде матрицы. Матрица имеет размер $2 \times N$, где N – число используемых АУ в эксперименте. Матрица будет использоваться для перехода от ID к EUI.

АУ будут запускаться в том порядке, в котором они расположены в таблице. Если АУ не было включено, эта информация будет записана в выходной файл. Эта информация будет использоваться позже в алгоритме выключения АУ.

Когда матрица готова, программа сохраняет время начала эксперимента и находит время окончания эксперимента. Затем программа ждет окончания эксперимента. Когда время истекает, программа делает перебор строк матрицы. Одна итерация создает запрос для одного АУ. Все запросы имеют следующие важные значения: EUI устройства, время начала и время окончания эксперимента. Эти значения позволяют делать точный выбор по времени. Ответы сервера отправляются на разбор. Когда разбор заканчивается, результаты записываются в выходной файл.

На вторичный выход будет записана информация о временных метках всех пакетов. Этот файл вспомогательный (чтобы посмотреть ход эксперимента).

Для формирования очереди отключения АУ, все АУ будут разбиты на три набора: набор с высоким приоритетом, набор со средним приоритетом и набор с низким приоритетом. Далее будет рассмотрен алгоритм отключения АУ.

Шаг 1. Отключение АУ с высоким приоритетом. В этот момент часть файла out заканчивается для использования, эта часть используется для формирования первой очереди АУ для отключения. В этой очереди устройства ввода, которые были ответом во время эксперимента. Программа просит отключить устройства из этой очереди.

Если, после выключения какого-либо АУ, другое АУ начинает отвечать, это АУ ставится в очередь со средним приоритетом.

Шаг 2. Отключение АУ со средним приоритетом. Когда первая очередь опустеет, начнется отключение АУ из второй очереди.

Шаг 3. Отключение АУ с низким приоритетом. Последними будут отключены АУ из третьей очереди.

Когда необходимые данные сохраняются в памяти, начинается обработка данных. Программа перебирает все значения счетчика пакетов. Если какие-то значения пропущены, программа вычисляет, сколько пакетов было пропущено.

Для расчета числа доставленных пакетов, программа получает ответ с сервера о числе всех пакетов за время эксперимента. Это значение представляет собой число доставленных пакетов.

Конечный вид выходного файла: информация об эксперименте, затем информация об АУ, которая была получена после выключения какого-либо АУ.

Архитектура программного комплекса - сервер-клиент. Комплекс является клиентом LoRaWAN-сервера. Сервер получает json-запрос. После установки соединения с сервером начнется процесс авторизации. Если этот процесс пройдет успешно, программа передаст запрос на сервер. Ответ от сервера пойдет на разбор. Этот ответ будет иметь формат json. В строке есть лишние значения. Они будут обрезаны. После разбора программа произведёт расчёт числа пакетов и запишет их в файл.

Было проведено несколько экспериментов с заданным числом АУ. Для разных экспериментов было использовано 7, 14, 22, 31 и 36 АУ, которые в типовом сценарии соответствуют 1718, 3436, 5399, 7607 и 8835, соответственно. Результаты продемонстрированы на рис. 4.19. Квадратными маркерами обозначены сами опыты с заданным числом АУ. Чёрная линия отражает средний результат вероятности успешной доставки для проведённых экспериментов.

В работе [117] рассмотрен сценарий с 1000 АУ в одинаковых радио-условиях, отправляющими короткие сообщения на БС с SF_7 . С некоторым допущением было показано, у какой части АУ можно изменить SF с 7 на 8, что увеличит вероятность доставки сообщений. На рис. 4.20 показана зависимость верхней и нижней границ вероятности успеха от измененного числа АУ с SF_8 . В левой точке на горизонтальной оси значение 0 соответствует 8835 с SF_7 и 0 АУ в реальной системе.

В соответствии с вышеизложенным методом, для эксперимента было взято 36 АУ. Была настроена конфигурация для имитации 8835 АУ реальной системы. Число АУ с SF_7 и SF_8 представлено в таблице 4.3.

Результаты эксперимента представлены на рис. 4.20. Пунктирно линией выделен график верхней границы вероятности успеха, сплошная линия де-

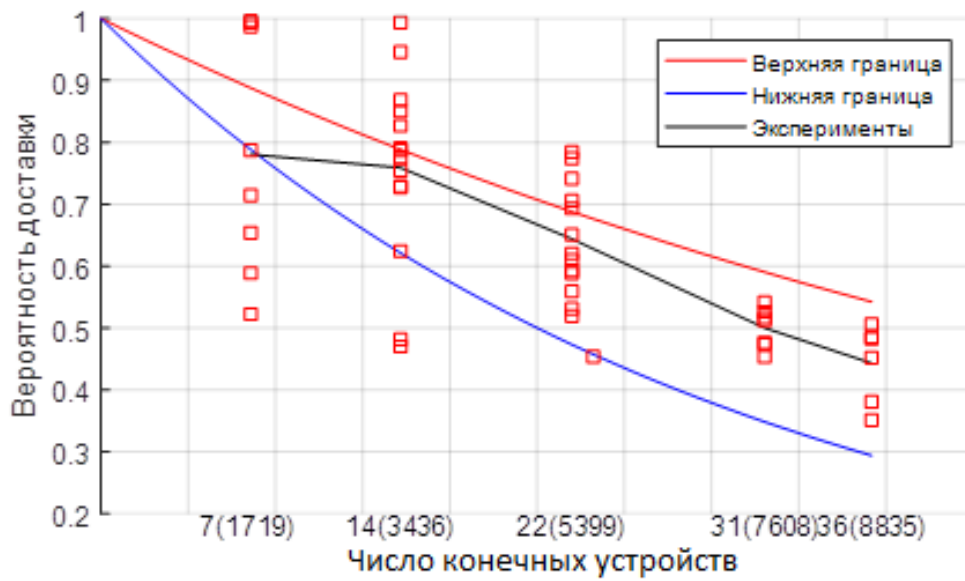


Рисунок 4.19. Результаты, полученные с помощью программного комплекса

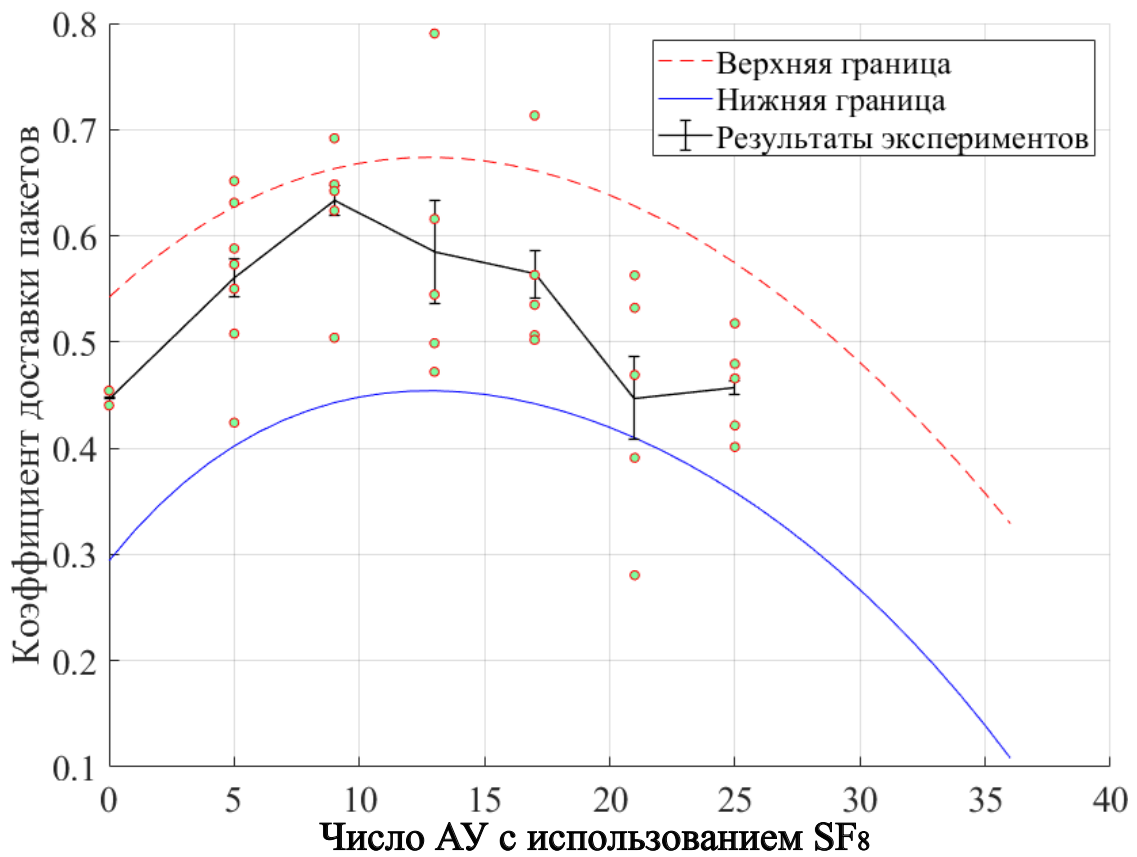


Рисунок 4.20. Зависимость вероятности успешной доставки от числа АУ со SF_8 монстрирует нижнюю границу вероятности успеха, кружки указали результат эксперимента.

Идея, описанная в работе [117], позволяет повысить вероятность успеха. Оптимальная комбинация АУ с SF_7 и SF_8 при меньшем их количестве отличается относительно оптимального значения в работе [117]. Это связано с тем,

Таблица 4.3. — Соотношение числа АУ реальной системы к числу АУ в эксперименте

	Число АУ				
Число АУ с SF_7 в эксперименте	36	31	22	14	7
Число АУ с SF_8 в реальной системе	0	1227	1718	3436	5399
Число АУ с SF_7 в реальной системе	8835	7608	5399	3436	1718
Число АУ с SF_8 в эксперименте	0	5	7	14	22

что в [117] используется ряд допущений, которые недействительны для реальной системы.

Проведённые натурные эксперименты подтверждают, что упрощённая модель, которая использовалась при рассмотрении данного оптимизационного решения, может быть использована для максимизации вероятности успешной доставки для системы, в которой имеется относительно небольшое число АУ.

4.8 Выводы по разделу

Предложена упрощенная модель, отражающая основные особенности технологии LoRa. Сформулирована и решена минимаксная оптимизационная задача по «выравниванию» вероятностей доставки сообщений от разных АУ. Не оптимизированный алгоритм с использованием одинаковых параметров системы, где АУ, находящимися в одинаковых условиях, работает с меньшей вероятностью доставки сообщений и с увеличением числа АУ с 5000 до 15000 такой проигрыш составит 30% – 67%.

Использование предложенной минимаксной оптимизационной задачи назначения параметров АУ в сети, позволяет обеспечить одинаковые вероятности доставки всех АУ, находящиеся в одинаковых радиоусловиях. При этом незначительно проигрывает решению оптимизационной задачи максимизации средней вероятности доставки.

Заключение

В диссертационной работе описаны крупномасштабные сети с низким энергопотреблением при разных особенностях функционирования, основанные на процессах случайного множественного доступа, типов трафика и этапов подключения абонентов. Полученные результаты работы заключаются в следующем:

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%.

Список сокращений и условных обозначений

АБГШ	— аддитивный белый гауссовский шум
АУ	— абонентское устройство
БС	— базовая станция
ГРОС	— гибридная решающая обратная связь
ЛВЧМ	— линейно-возрастающий частотно модулируемый
ЛЧМ	— линейно частотная модуляция
ПМАУ	— платформа с множеством абонентских устройств
СМД	— случайный множественный доступ
КАМ	— квадратурно амплитудная модуляция
ФМн	— фазовая манипуляция
АСК	— acknowledge, положительное подтверждение
AGCH	— access grant channel, канал разрешения доступа
API	— application program interface, программный интерфейс приложения
BLE	— bluetooth low energy, bluetooth с низким энергопотреблением
BTTI	— basic transmission time interval, основной интервал времени передачи
СС	— coverage classes, класс расширения
CCDF	— complementary cumulative distribution function, дополнительная кумулятивная функция распределения
СЕ	— coverage enhancement, расширение покрытия
CIoT	— cellular internet of things, сотовый Интернет вещей
СР	— cyclic prefix, циклический префикс
СR	— code rate, скорость кодирования
CRC	— cyclic redundancy check, циклический избыточный код
CSI	— channel state information, информация о состоянии канала
CSS	— chirp spread spectrum, метод расширенного спектра
D-BMAP	— discrete-time batch markovian arrival process, дискретный пакетный марковский процесс прибытия
DC	— duty cycle, рабочий цикл
DCI	— downlink control information, информация управления нисходящей линией связи
DR	— data rate, скорость передачи данных

- EC-BCCCH — extended coverage broadcast control channel, канал управления расширенного покрытия
- EC-CCCH — extended coverage common control channel, расширенное покрытие общего канала управления
- EC-GSM-IoT — extended coverage for GSM-based internet of things, расширенный охват Интернета вещей на базе GSM
- EC-PACCH — extended coverage packet associated control channel, канал управления с расширенным покрытием, связанный с пакетной передачей
- EC-PDTCH — extended coverage packet data traffic channel, канал трафика данных с расширенным покрытием
- EC-SCH — extended coverage synchronization channel, канал синхронизации с расширенным покрытием
- eDRX — extended discontinuous reception, расширенный прерывистый прием
- EUI — extended unique identifier, идентификатор конечного устройства
- FCCH — frequency correction channel, канал коррекции частоты
- FCFS — first come, first served, планирование выполняется в порядке очереди
- FDD — frequency division duplex, дуплексная передача с разделением по частоте
- FDMA — frequency division multiple access, множественный доступ с частотным разделением
- FSK — frequency-shift keying, частотная манипуляция
- GSM — groupe special mobile, рабочая группа по подвижной связи
- IoT — internet of things, Интернет вещей
- ISM — industrial, scientific, medical, промышленная, научная и медицинская полоса частот
- ITU-R — international telecommunication union radiocommunication sector, сектор радиосвязи международного союза электросвязи
- LoRa — long range, дальняя радиосвязь
- LoRaWAN — long range wide area network, широкополосная сеть дальнего радиуса действия
- LPWAN — low-power wide-area network, энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия
- LTE — long-term evolution, долговременная эволюция
- LTE-A — long-term evolution advanced, продвинутая связь долговременной эволюции
- LTE-M — long-term evolution for machines, связь машинного типа долговремен-

ной эволюции

MAC — media access control, управление доступом к среде передачи данных

MCS — modulation and coding scheme, индекс модуляции и схемы кодирования

MIB — main information block, главный информационный блок

MIoT — mobile internet of things, мобильный Интернет вещей

mMTC — massive machine-type communication, массовая межмашинная связь

MPDCCH — MTC physical downlink control channel, канала управления нисходящей линии связи

NACK — negative acknowledge, отрицательное подтверждение

NB-Fi — narrow band fidelity, передача данных в узком диапазоне

NB-IoT — narrow band internet of things, узкополосный Интернет вещей

NCCE — narrowband control channel element, элемент узкополосного канала управления

NPDCCH — narrowband physical downlink control channel, узкополосный физический канал управления нисходящей линии связи

NPDSCH — narrowband physical downlink shared channel, узкополосный физический канал общей нисходящей линии связи

NRS — narrowband reference signal, узкополосный опорный сигнал

NSSS — narrowband secondary synchronization signal, узкополосный сигнал вторичной синхронизации

NWK — network layer, сетевой уровень

OFDM — orthogonal frequency-division multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов

OFDMA — orthogonal frequency division multiple access, технология множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов

OOK — on-off keying, включено-выключено

PBCH — physical broadcast channel, физический широковещательный канал

PCID — physical cell identity, уникальный идентификатор соты

PDCH — physical data channel, физический канал данных

PDCP — packet data convergence protocol, протокол конвергенции пакетной передачи данных

PDR — packet delivery ratio, вероятность доставки

PD SCH — physical downlink shared channel, общий канал нисходящей линии связи

PER — packet error ratio, коэффициент ошибок пакетов

PGF — probability generating function, вероятность производящей функции

PRB — physical resource block, блок физических ресурсов

PSM — power saving mode, режим энергосбережения

PSS — primary synchronization signal, первичный сигнал синхронизации

PUSCH — physical uplink shared channel, общий канал восходящей линии связи

RACH — random access channel, канал случайного доступа

RAP — random access procedure, процедура случайного доступа

RAR — random access response, ответ произвольного доступа

RAT — radio access technology, технология радио доступа

RFID — radio frequency identification, радиочастотная идентификация

RLC — radio link control, протокол управления соединением в радиоканале

RRC — radio resource control, протокол управления радиоресурсами

RU — resource block, ресурсный блок

SC-MTCH — single cell multicast transport channel, канал передачи данных для одной ячейки сети с многоадресной передачей

SDR — software defined radio, программно-определяемое радио

SF — spreading factor, коэффициент расширения

SIB — system information block, блок системной информации

SR — scheduling request, запрос планирования

SSS — secondary synchronization signal, вторичный сигнал синхронизации

TA — timing advance, опережение по времени

TAU — tracking area update, обновление зоны отслеживания

TBS — transport block sizes, размеры транспортных блоков

TDD — time division duplex, дуплекс с временным разделением

TDMA — time division multiple access, множественный доступ с разделением по времени

TS — time slot, временной интервал

UCI — uplink control information, управление информацией восходящей линии связи

UL — uplink, восходящая линия связи

UL-SCH — uplink shared channel, общий восходящий канал связи

Wi-Fi — wireless fidelity, стандарт беспроводной точности

ZigBee — «zigzag» «bee», от названия поведения медовых пчёл

Список литературы

- [1] ГОСТ Р 58210-2018 / ISO/IEC TR 29181-1:2012. Информационные технологии. Сети будущего. Формулировка проблем и требований. Ч. 1. Общие аспекты. – М.: Стандартинформ, 2018. – 31 с.
- [2] ISO/IEC TR 29181-1:2012 Information technology – Future Network – Problem statement and requirements – Part 1: Overall aspects. URL: <https://www.iso.org/standard/57480.html> (дата обращения 10.02.2010).
- [3] Росляков А. В. Будущие сети: обзор подходов к новой телекоммуникационной парадигме // Электросвязь. – 2020. – №. 9. – С. 30-37.
- [4] Рудневский А. Перспективы технологий LTE для IoT и их реализация в модулях Telit // Беспроводные технологии. – 2017. – №. 3. – С. 43-45.
- [5] 3GPP TS 23.682. Architecture Enhancements to Facilitate Communications With Packet Data Networks and Applications. – 2011.
- [6] Chen M. Miao, Y., Jian, X., Wang, X., Humar, I., Cognitive-LPWAN: Towards intelligent wireless services in hybrid low power wide area networks // IEEE Transactions on Green Communications and Networking. – 2018. – Т. 3. – №. 2. – С. 409–417.
- [7] Popli S., Jha R. K., Jain S., A survey on energy efficient narrowband internet of things (NB-IoT): Architecture, application and challenges // IEEE Access. – 2018. – Т. 7. – С. 16739–16776.
- [8] Sharma S. K., Wang X., Toward massive machine type communications in ultra-dense cellular IoT networks: Current issues and machine learning-assisted solutions // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Т. 22. – №. 1. – С. 426–471.
- [9] Zhang L., Liang Y. C., Xiao M., Spectrum sharing for Internet of Things: A survey // IEEE Wireless Communications. – 2018. – Т. 26. – №. 3. – С. 132–139.

- [10] Qin Z., Li, F. Y., Li, G. Y., McCann, J. A., Ni, Q., Low-power wide-area networks for sustainable IoT // IEEE Wireless Communications. – 2019. – Т. 26. – №. 3. – С. 140-145.
- [11] Xia N., Chen H. H., Yang C. S., Emerging technologies for machine-type communication networks // IEEE Network. – 2019. – Т. 34. – №. 1. – С. 214-222.
- [12] GSM Association, NB-IoT deployment guide to basic feature set requirements, version 2.0 // White paper, Official Document CLP. – 2018. – Т. 28.
- [13] GSM Association, LTE-M Deployment Guide to Basic Feature Set Requirements. – 2018.
- [14] Grant S. 3gpp low power wide area technologies-gsma white paper //gsma.com. – 2016. – С. 1.
- [15] Liberg O., Sundberg, M., Wang, E., Bergman, J., Sachs, J., Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance. Academic Press. – 2017.
- [16] Feltrin L., Tsoukaneri, G., Condoluci, M., Buratti, C., Mahmoodi, T., Dohler, M., Verdone, R., Narrowband IoT: A survey on downlink and uplink perspectives // IEEE Wireless Communications. – 2019. – Т. 26. – №. 1. – С. 78-86.
- [17] Ayoub W., Samhat, A. E., Nouvel, F., Mroue, M., Prévotet, J. C., Internet of mobile things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in lpwans standards and supported mobility // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – Т. 21. – №. 2. – С. 1561-1581.
- [18] Qadir Q. M., Rashid, T. A., Al-Salihi, N. K., Ismael, B., Kist, A. A., Zhang, Z., Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs // IEEE Access. – 2018. – Т. 6. – С. 77454-77473.
- [19] Степанов Н.В. Обзор технологий CIoT: особенности и последовательность работы устройств // Успехи современной радиоэлектроники. – 2022. – Т. 76. – № 12. – С. 90-99.
- [20] Wang Y. P. E., Lin, X., Adhikary, A., Grovlen, A., Sui, Y., Blankenship, Y., Razaghi, H. S., A primer on 3GPP narrowband Internet of Things // IEEE communications magazine. – 2017. – Т. 55. – №. 3. – С. 117-123.

- [21] Borkar S. R. Long-term evolution for machines (LTE-M) //LPWAN technologies for IoT and M2M applications. Academic Press. – 2020. – С. 145-166.
- [22] Lauridsen M. Studies on mobile terminal energy consumption for LTE and future 5G. – 2015. – p. 321
- [23] Бегишев В. О. и др. Стратегии распределения радиоресурсов в гетерогенных сетях с трафиком Narrow-Band IoT //Системы и средства информатики. – 2017. – Т. 27. – №. 4. – С. 64-79.
- [24] Multiplexing and multiple access on the radio path, URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gts/05/0502/03.08.00_60/gsmmts_0502sv030800p (дата обращения 10.03.2021).
- [25] Zhao X., Dai L. Connection-based Aloha: Modeling, optimization, and effects of connection establishment //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2023. – Т. 23. – №. 2. – С. 1008-1023.
- [26] Степанов Н. В., Тюрликов А. М., Бегишев В. О. Метод анализа вероятностных характеристик обслуживания пачечного трафика в системах NB-IoT //Электросвязь. – 2022. – №. 6. – С. 8-15.
- [27] Кузьмичев С. А., Степанов Н. В., Тюрликов А. М. Методы назначения параметров оконечных устройств при развертывании сети LoRaWAN //Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах. 2020. С. 241-245.
- [28] Szpankowski W. Statistic analysis of multiaccess systems with random access and feedback : дис. – Ph. D. thesis, University of Gdansk. – 1980.
- [29] Tsybakov B. S., Mikhailov V. A. Free synchronous packet access in a broadcast channel with feedback //Problemy peredachi informatsii. – 1978. – Т. 14. – №. 4. – С. 32-59.
- [30] Stepanov N., Turlikov A., Begishev V. Balancing the Data Transmission and Random Access Phases in 6G mMTC Radio Technologies //IEEE Communications Letters. – 2023. – Т. 27. – №. 12. – С. 3419-3423.

- [31] Степанов Н. В., Тюрликов А. М., Бегишев В. О. Оптимальные ассоциации устройств в сетях межмашинного взаимодействия стандартов NB-IoT и LTE-M // Системы и средства информатики. – 2022. – Т. 32. – №. 3. – С. 63-70.
- [32] Stusek M. et al. Optimizing NB-IoT communication patterns for permanently connected mMTC devices // 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE. – 2022. – С. 1413-1418.
- [33] Stepanov N. et al. A lower bound on the average identification time in a passive RFID system // International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. – Cham : Springer International Publishing. – 2018. – С. 524-534.
- [34] Yankovskii N. A. et al. Enhanced Algorithm for Dynamic Changing of Frame Size in Radio Frequency Identification Systems // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE. – 2022. – С. 1-4.
- [35] Masek P. et al. Quantifying NB-IoT Performance in 5G Use-Cases With Mixture of Regular and Stochastic Traffic // IEEE Internet of Things Journal. – 2024.
- [36] Hui H., Chen W. Delay analysis of reservation based random access: A tandem queue model // GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference. IEEE. – 2022. – С. 2758-2763.
- [37] Vinel A. et al. Capacity analysis of reservation-based random access for broadband wireless access networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2009. – Т. 27. – №. 2. – С. 172-181.
- [38] Tsybakov B. Survey of USSR contributions to random multiple-access communications // IEEE transactions on information theory. – 1985. – Т. 31. – №. 2. – С. 143-165.
- [39] Polyanskiy Y. A perspective on massive random-access // 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). – IEEE, 2017. – С. 2523-2527.
- [40] Rivest R. Network control by Bayesian broadcast // IEEE Transactions on Information Theory. – 1987. – Т. 33. – №. 3. – С. 323-328.

- [41] Mihajlov V. A. Geometrical analysis of the stability of Markov chains in $m+$ and its application to throughput evaluation of the adaptive random multiple access algorithm // Problems of Information Transmission. – 1988. – Т. 24. – №. 1. – С. 47-56.
- [42] Polyanskiy Y., Poor H. V., Verdú S. Channel coding rate in the finite blocklength regime // IEEE Transactions on Information Theory. – 2010. – Т. 56. – №. 5. – С. 2307-2359.
- [43] Степанов, Н. В. Производительность системы mMTC с ранним детектированием коллизий преамбул / А. М. Тюрликов // 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.
- [44] Gnedenko B. V., Kolmogorov A. N. Limit theorems for sums of independent random variables // Gostehizdat. – 1947. – Т. 10.
- [45] Jang H. S. et al. An early preamble collision detection scheme based on tagged preambles for cellular M2M random access // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2016. – Т. 66. – №. 7. – С. 5974-5984.
- [46] Kleinrock L. Queuing Systems, Volume I: Theory. – 1975.
- [47] Petrov V. et al. Vehicle-based relay assistance for opportunistic crowdsensing over narrowband IoT (NB-IoT) // IEEE Internet of Things journal. – 2017. – Т. 5. – №. 5. – С. 3710-3723.
- [48] Begishev V. et al. Resource allocation and sharing for heterogeneous data collection over conventional 3GPP LTE and emerging NB-IoT technologies // Computer Communications. – 2018. – Т. 120. – С. 93-101.
- [49] Stepanov N., Moltchanov D., Turlikov A. Modeling the NB-IoT transmission process with intermittent network availability // International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. – Cham : Springer International Publishing. – 2020. – С. 241-254.

- [50] Galinina O. et al. Stabilizing multi-channel slotted aloha for machine-type communications //2013 IEEE International Symposium on Information Theory. – IEEE, 2013. – С. 2119-2123.
- [51] Галинина О. С., Андреев С. Д., Тюрликов А. М. Учет специфики доступа большого числа устройств при межмашинном взаимодействии в современных сотовых сетях //Информационно-управляющие системы. – 2018. – №. 4 (95). – С. 105-114.
- [52] Van Houdt B., Blondia C. Stability and performance of stack algorithms for random access communication modeled as a tree structured QBD Markov chain. – 2001. – С. 247-270.
- [53] Blondia C., Houdt B. Throughput of Q-ary splitting algorithms for contention resolution in communication networks. – 2004. – С. 135-164.
- [54] Capetanakis J. Tree algorithms for packet broadcast channels //IEEE transactions on information theory. – 2003. – Т. 25. – №. 5. – С. 505-515.
- [55] Moltchanov D., Koucheryavy Y., Harju J. The model of single smoothed MPEG traffic source based on the D-BMAP arrival process with limited state space //Proc. of ICACT. – 2003. – С. 55-60.
- [56] Block R. Design and analysis of multiple access algorithms : дис. – University of Antwerp. – 2017.
- [57] Koseoglu M. Lower bounds on the LTE-A average random access delay under massive M2M arrivals //IEEE Transactions on Communications. – 2016. – Т. 64. – №. 5. – С. 2104-2115.
- [58] 3GPP TR 37.868 Study on RAN Improvements for Machine-type Communications. R11. V11.0.0. Sep. 2011.
- [59] Kleinrock L., Lam S. Packet switching in a multiaccess broadcast channel: Performance evaluation //IEEE transactions on Communications. – 1975. – Т. 23. – №. 4. – С. 410-423.
- [60] Kobayashi H., Onozato Y., Huynh D. An approximate method for design and analysis of an ALOHA system //IEEE Transactions on Communications. – 1977. – Т. 25. – №. 1. – С. 148-157.

- [61] Petrov V. et al. When IoT keeps people in the loop: A path towards a new global utility //IEEE Communications Magazine. – 2018. – T. 57. – №. 1. – С. 114-121.
- [62] Wei C. H., Bianchi G., Cheng R. G. Modeling and analysis of random access channels with bursty arrivals in OFDMA wireless networks //IEEE transactions on wireless communications. – 2014. – T. 14. – №. 4. – С. 1940-1953.
- [63] Series M. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020 //Report ITU. – 2017. – T. 2512. – №. 0.
- [64] Masek P. et al. Tailoring NB-IoT for Mass Market Applications: A Mobile Operator's Perspective //2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE. – 2018. – С. 1-7.
- [65] Adame T., Bel A., Bellalta B. Increasing LPWAN scalability by means of concurrent multiband IoT technologies: an industry 4.0 use case. – 2019.
- [66] Stusek M. et al. LPWAN coverage assessment planning without explicit knowledge of base station locations //IEEE Internet of Things Journal. – 2021. – T. 9. – №. 6. – С. 4031-4050.
- [67] Волков А. Н., Мутханна А. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 //Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 78. – №. 2. – С. 32-43.
- [68] Kavuri S. et al. Performance analysis of onshore NB-IoT for container tracking during near-the-shore vessel navigation //IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Т. 7. – №. 4. – С. 2928-2943.
- [69] Abbas R. et al. Random access for M2M communications with QoS guarantees //IEEE Transactions on Communications. – 2017. – Т. 65. – №. 7. – С. 2889-2903.
- [70] ETSI 3GPP TS 136 201 LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); LTE physical layer; General description. R.14. V.14.1.0. Apr. 2017.
- [71] Zhou C., Zhao J., Liu H. Adaptive status report with congestion control in NB-IoT //2019 Sixth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS). – IEEE, 2019. – С. 1-5.

- [72] Zhang H. et al. Connecting intelligent things in smart hospitals using NB-IoT //IEEE Internet of Things Journal. – 2018. – Т. 5. – №. 3. – С. 1550-1560.
- [73] Stefanovic C., Popovski P., Vukobratovic D. Frameless ALOHA protocol for wireless networks //IEEE Communications Letters. – 2012. – Т. 16. – №. 12. – С. 2087-2090.
- [74] Häggström O. Finite Markov chains and algorithmic applications. – Cambridge University Press. – 2002. – Т. 52.
- [75] Meyer C. D. Matrix analysis and applied linear algebra. – Society for Industrial and Applied Mathematics. – 2023.
- [76] Feinberg B. N., Chiu S. S. A method to calculate steady-state distributions of large Markov chains by aggregating states //Operations Research. – 1987. – Т. 35. – №. 2. – С. 282-290.
- [77] Franceschinis G., Muntz R. R. Bounds for quasi-lumpable Markov chains //Performance Evaluation. – 1994. – Т. 20. – №. 1-3. – С. 223-243.
- [78] Kim Y. M. et al. Intelligent micro energy grid in 5G era: Platforms, business cases, testbeds, and next generation applications //Electronics. – 2019. – Т. 8. – №. 4. – С. 468.
- [79] Shen Y. et al. EV charging behavior analysis using hybrid intelligence for 5G smart grid //Electronics. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 80.
- [80] Цыбаков Б. С., Михайлов В. А. Свободный синхронный доступ пакетов в широкополосный канал с обратной связью //Проблемы передачи информации. – 1978. – Т. 14. – №. 4. – С. 32-59.
- [81] 3GPP TR 37.910 Study on Self Evaluation Towards IMT-2020 Submission. R15. V16.1.0. Sep. 2019.
- [82] Vikhrova O. et al. Paging group size distribution for multicast services in 5G networks //IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). – IEEE, 2020. – С. 484-489.

- [83] Kemery J. G., Snell J. L. Finite Markov Chains: With a New Appendix"Generalization of a Fundamental Matrix. – 1960.
- [84] Series M. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface (s) //Report. – 2017. – T. 2410. – C. 2410-2017.
- [85] Gbadamosi S. A., Hancke G. P., Abu-Mahfouz A. M. Building upon NB-IoT networks: A roadmap towards 5G new radio networks //IEEE Access. – 2020. – T. 8. – C. 188641-188672.
- [86] Alliance L. Why LoRaWAN is the foundation for smart building success [Электронный ресурс]. – 2020
- [87] LoRaWAN and Sigfox lead lpwans, interoperability via compression, URL:<http://techblog.comsoc.org/2017/10/25/lora-wan-and-sigfox-lead-lpwans-inter> (дата обращения 10.07.2018).
- [88] N. Sornin et al., LoRaWAN specification 1.1, LoRa alliance, 2017.
- [89] Степанов Н. В. Систематизированный обзор особенностей реализации физического уровня протокола LoRa //Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17. – №. 11. – С. 11-26.
- [90] Yazdani N. et al. Divide and Code: Efficient and Real-time Data Recovery from Corrupted LoRa Frames //2022 19th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON). – IEEE, 2022. – С. 235-243.
- [91] Elshabrawy T., Robert J. Evaluation of the BER performance of LoRa communication using BICM decoding //2019 IEEE 9th International Conference on Consumer Electronics (ICCE-Berlin). – IEEE, 2019. – С. 162-167.
- [92] Chen Q., Wang J. AlignTrack: Push the limit of LoRa collision decoding //2021 IEEE 29th International Conference on Network Protocols (ICNP). – IEEE, 2021. – С. 1-11.
- [93] Choi R., Lee S. G., Lee S. Reliability improvement of LoRa with arq and relay node //Symmetry. – 2020. – Т. 12. – №. 4. – С. 552.

- [94] You L. et al. Quick and reliable LoRa physical-layer data aggregation through multi-packet reception //arXiv preprint arXiv:2212.06582. – 2022.
- [95] Sallum E. et al. Improving quality-of-service in LoRa low-power wide-area networks through optimized radio resource management //Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2020. – T. 9. – №. 1. – C. 10.
- [96] Lavric A. et al. LoRa traffic generator based on software defined radio technology for lora modulation orthogonality analysis: Empirical and experimental evaluation //Sensors. – 2020. – T. 20. – №. 15. – C. 4123.
- [97] Zorbas D. et al. Improving LoRa network capacity using multiple spreading factor configurations //2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT). – IEEE, 2018. – C. 516-520.
- [98] Cuomo F. et al. EXPLoRa: Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations //2017 IEEE 13th international conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WiMob). – IEEE, 2017. – C. 1-8.
- [99] Reynders B. et al. Improving reliability and scalability of lorawans through lightweight scheduling //IEEE Internet of Things Journal. – 2018. T. 5. – №. 3. – C. 1830-1842.
- [100] Fawaz H. et al. Cooperation for spreading factor assignment in a multioperator LoRaWAN deployment //IEEE internet of things journal. – 2020. – T. 8. – №. 7. – C. 5544-5557.
- [101] Kuzmichev S. A., Stepanov N. V. Experimental Research to Determine the Conditions for Successful Reception of Messages in the LoRaWAN //2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE, 2019. – C. 1-4.
- [102] Goursaud C., Gorce J. M. Dedicated networks for IoT: PHY/MAC state of the art and challenges //EAI endorsed transactions on Internet of Things. – 2015.
- [103] RisingHF UM01719 RHF2S008P4G User Manual V1.2. Apr. 2017.

- [104] Vega-Absolute. Pulse Counter VEGA SI-11 User manual. R21. V1.1. Jan. 2019.
- [105] Haxhibeqiri J. et al. LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements //Sensors. – 2017. – T. 17. – №. 6. – С. 1193-1217.
- [106] Sorensen R. B. et al. Analysis of LoRaWAN uplink with multiple demodulating paths and capture effect //ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). – IEEE, 2019. – С. 1-6.
- [107] Rahmadhani A., Kuipers F. When LoRaWAN frames collide //Proceedings of the 12th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization. – 2018. – С. 89-97.
- [108] Georgiou O., Raza U. Low power wide area network analysis: Can LoRa scale? //IEEE Wireless Communications Letters. – 2017. – Т. 6. – №. 2. – С. 162-165.
- [109] Кузьмичёв С. А., Степанов Н. В. Экспериментальные исследования для определения условий успешного приёма сообщений в сети LoRaWAN //Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. – 2019. – С. 214-220.
- [110] Efimov S. E., Stepanov N. V., Turlikov A. M. Research LoRaWAN collide signals with used SDR //2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE, 2021. – С. 1-5.
- [111] Gusev O. et al. Data delivery efficient spreading factor allocation in dense LoRaWAN deployments //2019 XVI International Symposium"Problems of Redundancy in Information and Control Systems"(REDUNDANCY). – IEEE, 2019. – С. 199-204.
- [112] Van den Abeele F. et al. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3 //IEEE Internet of Things Journal. – 2017. – Т. 4. – №. 6. – С. 2186-2198.
- [113] Marini R. et al. LoRaWANsim: A flexible simulator for LoRaWAN networks //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 3. – С. 695.
- [114] Qadir Q. M. Analysis of the reliability of LoRa //IEEE Communications Letters. – 2020. – Т. 25. – №. 3. – С. 1037-1040.

- [115] Ефимов С. Е., Степанов Н. В., Тюрликов А. М. Исследования LoRaWAN-коллизии сигналов с использованием SDR // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. – 2021. – С. 92-98.
- [116] N. Sornin *et al.*, LoRaWAN 1.1 regional parameters, LoRa alliance. – 2017.
- [117] Tiurlikova A., Stepanov N., Mikhaylov K. Method of assigning spreading factor to improve the scalability of the LoRaWAN wide area network // 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – IEEE, 2018. – С. 1-4.
- [118] Tiurlikova A., Stepanov N., Mikhaylov K. Wireless power transfer from unmanned aerial vehicle to low-power wide area network nodes: Performance and business prospects for LoRaWAN // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2019. – Т. 15. – №. 11. – С. 1550147719888165.
- [119] Casals L. et al. Modeling the energy performance of LoRaWAN // Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 10. – С. 2364.
- [120] imec-idlab/ns-3-dev-git, URL: <https://github.com/imec-idlab/ns-3-dev-git/tree/lorawan> (дата обращения 10.07.2018).
- [121] Slabicki M., PremSankar G., Di Francesco M. Adaptive configuration of LoRa networks for dense IoT deployments // NOMS 2018-2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. – IEEE, 2018. – С. 1-9.
- [122] Calculate the air time of your LoRa frame, URL: <https://www.loratoools.nl/#/airtime> (дата обращения 15.08.2019).
- [123] El-Aasser M., Elshabrawy T., Ashour M. Joint spreading factor and coding rate assignment in LoRaWAN networks // 2018 IEEE global conference on internet of things (GCIoT). – IEEE, 2018. – С. 1-7.
- [124] Yatagan T., Oktug S. Smart spreading factor assignment for LoRaWANs // 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). – IEEE, 2019. – С. 1-7.
- [125] Cuomo F. et al. Towards traffic-oriented spreading factor allocations in LoRaWAN systems // 2018 17th annual mediterranean ad hoc networking workshop (Med-Hoc-Net). – IEEE, 2018. – С. 1-8.

- [126] Lima E. et al. Adaptive priority-aware LoRaWAN resource allocation for Internet of Things applications //Ad Hoc Networks. – 2021. – T. 122. – C. 102598.
- [127] Silva F. S. D. et al. A survey on long-range wide-area network technology optimizations //IEEE Access. 2021. T. 9. C. 106079-106106.
- [128] Ilderyakov M. S., Stepanov N. V. Using a small number of devices to experimentally estimate the packet delivery ratio on a LoRaWAN network with a large number of end devices //2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – IEEE, 2019. – C. 1-4.

Список рисунков

1.1	Зависимость технологий LPWAN от скорости и дальности	14
1.2	Зависимость технологий LPWAN от времени работы и числа устройств	15
1.3	Обобщённый процесс от включения АУ до подключения к сети и передача сообщения БС (штриховкой обозначены опциональные сигналы или сигналы, присутствующие не во всех технологиях CIoT)	19
1.4	Мультиплексирование по времени физических каналов нисходящей линии связи на якорной несущей NB-IoT [15]	21
1.5	Один блок повторения преамбулы NPRACH и пример отношения тонов между четырьмя группами символов [15]	23
1.6	Последовательность и временные соотношения при передаче данных в нисходящем и восходящем каналах NB-IoT [20]	25
1.7	Сигналы синхронизации LTE-M FDD [20]	27
1.8	Размещение каналов синхронизации и передача системной информации EC-GSM-IoT [13]	31
1.9	Состояние АУ	35
1.10	Зависимость $Pr \{T = m i\}$ от T	40
2.1	Описание системы	44
2.2	Временная диаграмма модели системы	46
2.3	Пример, иллюстрирующий рассмотренную модель	48
2.4	Иллюстрация возможных системных событий	49
2.5	Блок-схема алгоритма вычисления значения Λ_{cr}	51
2.6	Зависимость Λ_{cr} от числа слотов на передачу при $\gamma = 1$ (а), при $\gamma = 10$ (б)	52
2.7	Число АУ в очереди на первом и втором этапах	55
2.8	Выходная интенсивность λ_{out} , как функция n_1/n	57
2.9	Средняя задержка, как функция от n_1	58
2.10	Последовательность обмена сигнальными сообщениями между БС и АУ при выполнении процедуры случайного доступа LTE-M	60
2.11	Последовательность обмена сигнальными сообщениями между БС и АУ при выполнении процедуры случайного доступа NB-IoT	61

2.12	Зависимость средней задержки в системе при оптимальном распределении абонентов между технологиями от общего числа АУ M при фиксированной нагрузке $\frac{M}{\Delta}$	67
2.13	Задержка передачи сообщения модели двух технологий со случайным опросом	67
2.14	Задержка передачи сообщения модели двух технологий со случайным опросом при $\Lambda = 682$	68
2.15	Задержка передачи сообщения модели двух технологий со случайным опросом при $\Lambda = 682$ (а), при $\Lambda = 657$ (б)	68
3.1	Модель системы с движущейся платформой.	72
3.2	Платформа с множеством АУ.	73
3.3	Передача по расписанию	73
3.4	Временная диаграмма работы системы.	75
3.5	Диаграмма переходов состояний двухмерной модели.	77
3.6	Состояние ПМАУ.	79
3.7	Диаграмма переходов состояний трёхмерной модели	81
3.8	Структура двухмерной матрицы вероятностей перехода	81
3.9	Зависимость средней задержки от среднего времени пребывания вне зоны действия БС (T_{OFF})	82
3.10	Оптимальная доля абонентов ассоциированных с LTE-M для модели с периодическим опросом абонентов.	86
3.11	График зависимости числа активных АУ от времени.	87
3.12	Модель с периодическим опросом абонентов. Оптимальная задержка абонентов ассоциированных с LTE-M.	89
3.13	Модель с периодическим опросом. Задержка передачи сообщения для двух технологий.	89
3.14	Диаграмма переходов состояний одномерной модели.	90
3.15	Структура матрицы вероятностей перехода	93
3.16	Среднее количество активных АУ типа I в течение Δ	94
3.17	Среднее число активных АУ типа II в течение Δ	94
3.18	Активные АУ в течение одного цикла Δ	97
3.19	Среднее число активных АУ в системе	98
3.20	Кумулятивная функция распределения	99
3.21	Область устойчивости рассмотренной системы	100

3.22	Приблизительные значения задержки для рассмотренных типов АУ	101
3.23	Средняя задержка от интенсивности сообщений АУ типа II	101
3.24	Средняя задержка от числа АУ типа I	102
3.25	Зависимость средней задержки большого числа АУ типа I, $\lambda_2 = 0.1$	103
3.26	Интенсивность прибытия большого числа сообщений от АУ типа II	103
4.1	Пример перекрытия пакетов	110
4.2	Вероятность успешной доставки относительно участка, в котором произошло перекрытие	111
4.3	Вероятности успешной доставки сообщений при пересечении с моделью оценки вероятности успешной доставки	112
4.4	Экспериментальные данные с результатами предлагаемой модели	114
4.5	Схема стенда	116
4.6	Наложение сигналов при всех случаях	117
4.7	Результаты сценария $P1 < P2$	118
4.8	Результаты сценария $P1 = P2$	120
4.9	Результаты всех трёх сценариев	121
4.10	Влияние числа АУ на PDR для двух случаев с одним SF (т.е., SF_7 и SF_8) и для сети с двумя SF, с распределением АУ в соответствии с предложенным способом	125
4.11	Влияние числа АУ на вероятность доставки пакетов для разных способов назначения SF	126
4.12	Среднее энергопотребление сети для различных способов назначения SF для 10000 АУ	127
4.13	Распределение 200 АУ в радиусе 3000 м	133
4.14	Зависимость вероятности доставки сообщения от радиуса круга	134
4.15	Относительный выигрыш в вероятности доставки сообщения от радиуса круга для 1000 и 3000 АУ	135
4.16	Зависимость вероятности доставки сообщения для каждого SF	136
4.17	Зависимость вероятности доставки сообщений от числа АУ	139
4.18	Теоретические расчёты для типового сценария	141
4.19	Результаты, полученные с помощью программного комплекса	145
4.20	Зависимость вероятности успешной доставки от числа АУ со SF_8	145

Список таблиц

1.1	Конфигурация и длительность одного ресурсного блока (RU) для восходящего канала в рамках NB-IoT	26
1.2	Схемы модуляции и кодирования PDSCH в LTE-M [15]	30
1.3	Организация моделей построения сетей по разделам.	41
2.1	Параметры по умолчанию для числовой оценки	55
2.2	Сравнение основных параметров NB-IoT и LTE-M	62
3.1	Параметры системы по умолчанию.	76
3.2	Взаимосвязь между данными сценария и параметрами модели.	82
3.3	Характеристики NB-IoT и LTE-M системных моделей.	88
4.1	Схемы модуляции-кодирования (т.е. скорости передачи данных (DR, Data rate)) для LoRaWAN для диапазона ЕС 868 МГц [88][116]	122
4.2	Значения эфирного времени от SF [122]	129
4.3	Соотношение числа АУ реальной системы к числу АУ в эксперименте	146

А

Распределение объектов по ячейкам случайным образом

В этом приложении выводится $P(l, k, m)$, используемый в (3.24) для параметризации вероятностей перехода приближенной Марковской модели. Рассмотрим k неразличимых сообщений от активных АУ, которые должны быть переданы по l ортогональным каналам. Обозначим через $\chi(k)$ число каналов, которые содержат ровно одно сообщение. В общем случае это случайная величина, которая может принимать значения от 0 до $\min(l, k)$. Нас интересует ее функции распределения масс (pmf) $P(l, k, m)$. Представленный ниже анализ в значительной степени опирается на подход, предложенный в [28], и использует аппарат вероятностных производящих функций (PGF, Probability Generating Function). С этой целью кратко опишем его шаг за шагом.

Шаг 1. Пусть $G(z)$ будет PGF случайной величины $\chi(k)$, имеющей дискретное распределение с конечным числом элементов, т. е.

$$G(z) \triangleq \sum_{m=0}^l \text{Pr}\{\chi(k) = m\} z^m. \quad (\text{A.1})$$

Шаг 2. Разлагая введенный PGF в ряд Тейлора вокруг точки $z = 1$, получаем

$$G(z) = \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} \frac{d^m G(z)}{dz^m} \Big|_{z=1} (z-1)^m. \quad (\text{A.2})$$

Используя результаты Приложения A.1, покажем, что

$$\frac{d^m G(z)}{dz^m} \Big|_{z=1} = E[\chi(k)(\chi(k)-1) \dots (\chi(k)-m+1)]. \quad (\text{A.3})$$

Вводя следующие обозначения

$$\varphi^{[m]}(\cdot) \triangleq \begin{cases} \varphi(\cdot)[\varphi(\cdot)-1] \dots [\varphi(\cdot)-m+1] & \varphi(\cdot) \geq m \\ 0 & \varphi(\cdot) < m \end{cases}, \quad (\text{A.4})$$

можно записать (A.2) в следующей форме

$$G(z) = \sum_{m=0}^l \frac{1}{m!} E[\chi^{[m]}(k)] (z-1)^m. \quad (\text{A.5})$$

Шаг 3. Теперь нам нужно вычислить необработанные моменты рассматриваемой случайной величины, $E [\chi^{[m]}(k)]$, как обсуждалось в Приложении A.2, что приводит к

$$E [\chi^{[m]}(k)] = l^{[m]} \frac{k^{[m]}}{l^m} \left(1 - \frac{m}{l}\right)^{n-m}. \quad (\text{A.6})$$

Шаг 4. Подставляя (A.6) в (A.5), получаем выражение для производящей функции

$$G(z) = \sum_{m=0}^l \frac{l^{[m]} k^{[m]}}{l^m} \left(1 - \frac{m}{l}\right)^{k-m} \frac{(z-1)^m}{m!}. \quad (\text{A.7})$$

Шаг 5. Следуя [28], инвертируем полученную PGF, используя способ разложения дробей, чтобы получить pmf $P(l, k, m)$ случайной величины $\chi(k)$ как

$$\begin{cases} \frac{(-1)^m l! k!}{l^k m!} \sum_{f=m}^{\min(l, k)} \frac{(-1)^f (l-f)^{k-f}}{(f-m)!(l-f)!(k-f)!} & m \leq k \\ 0 & m > k \end{cases}. \quad (\text{A.8})$$

A.1 Доказательство по индукции для PGF

Утверждение A.1. Для PGF дискретной случайной величины $\chi(k)$ справедливо следующее утверждение

$$\frac{d^m G(z)}{dz^m} \Big|_{z=1} = E[\chi(k)(\chi(k) - 1) \dots (\chi(k) - m + 1)]. \quad (\text{A.9})$$

Доказательство. Докажем (A.9), используя метод математической индукции. Для $m = 1$ можем записать

$$\frac{d^1 G(z)}{dz^1} \Big|_{z=1} = \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} n (1)^{n-1} = \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} n = E[\chi(k)]. \quad (\text{A.10})$$

Аналогично, для $m = 2$ можем записать

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 G(z)}{dz^2} \Big|_{z=1} &= \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} n(n-1)(1)^{n-2} = \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} n(n-1) = \\
&= \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} n^2 - n = \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} n^2 - \\
&\quad - \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} n = E[\chi^2(k)] - E[\chi(k)] = \\
&= E[\chi^2(k) - \chi(k)] = E[\chi(k)(\chi(k) - 1)].
\end{aligned} \tag{A.11}$$

Теперь выдвигаем гипотезу, что для некоторого $m > 2$ справедливо следующее:

$$\begin{aligned}
\frac{d^m G(z)}{dz^m} &= \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} \frac{d^m(z^n)}{dz^m} = \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} \prod_{j=0}^m (n-j) z^{n-j} \Big|_{z=1} = \\
&= \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} \prod_{j=0}^m (n-j) = E \left[\prod_{j=0}^m (\chi(k) - j) \right].
\end{aligned} \tag{A.12}$$

Теперь, для некоторого $m + 1$ видим, что

$$\begin{aligned}
\frac{d^{m+1} G(z)}{dz^{m+1}} &= \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} \frac{d^{m+1}(z^n)}{dz^{m+1}} = \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} \prod_{j=0}^{m+1} (n-j) z^{n-j} \Big|_{z=1} = \\
&= \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} \prod_{j=0}^{m+1} (n-j) = \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} \prod_{j=0}^m (n-j) n - \\
&\quad - \sum_{n=0}^l Pr\{\chi(k) = n\} \prod_{j=0}^m (n-j)(m+1) = E \left[\prod_{j=0}^m (\chi(k) - j) \chi(k) \right] - \\
&\quad - E \left[\prod_{j=0}^m (\chi(k) - j) (m+1) \right] = E \left[\prod_{j=0}^m (\chi(k) - j) (\chi(k) - (m+1)) \right] = \\
&= E \left[\prod_{j=0}^{m+1} (\chi(k) - j) \right],
\end{aligned} \tag{A.13}$$

(A.9) доказана. □

A.2 Доказательство утверждения об успешном выборе одним абонентом одной преамбулы

Определим индикаторную случайную величину как

$$\Theta_i = \begin{cases} 1 & \text{ровно одно сообщение занимает преамбулу} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (\text{A.14})$$

Используя (A.14) $\chi(k)$ можно записать как

$$\chi(k) = \sum_{i=0}^l \Theta_i. \quad (\text{A.15})$$

такой, что (в статье [28] такие множества называются множеством всех m вариаций множества $\{1, 2, \dots, l\}$ и обозначаются A_m).

Теперь предстоит сформулировать следующее утверждение.

Утверждение A.2. *Степени случайной величины $\chi^{[m]}(k)$ можно записать с помощью следующего расширения:*

$$\chi^{[m]}(k) = \sum_{A_m} \Theta_{i,1} \Theta_{i,2} \dots \Theta_{i,m}, \quad (\text{A.16})$$

где сумма вычисляется по всем возможным наборам m элементов из множества $\{1, 2, \dots, l\}$, обозначаемого A_m .

Доказательство. Доказательство приведено в [28]. □

Используя Утверждение 1, получаем следующее предложение.

Утверждение A.3. *Средние значения последовательности случайных величин $\chi^{[m]}(k)$ определяются по формуле*

$$E \left[\chi^{[m]}(k) \right] = l^{[m]} \frac{k^{[m]}}{l^m} \left(1 - \frac{m}{l} \right)^{k-m}. \quad (\text{A.17})$$

Доказательство. Среднее значение $\chi^{[m]}(k)$ можно записать как

$$\begin{aligned} E \left[\chi^{[m]}(k) \right] &= E \left[\sum_{i, 1 \neq i, 2 \dots i, m} \Theta_{i,1} \Theta_{i,2} \dots \Theta_{i,m} \right] = \\ &= \sum_{A_m} Pr \{ \Theta_{i,1} = 1, \Theta_{i,2} = 1 \dots \Theta_{i,m} = 1 \} = \\ &= l^{[m]} Pr \{ \Theta_1 = 1, \dots, \Theta_m = 1 \}. \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Используя допущение о независимом выборе преамбул, (A.18) можно переписать как

$$Pr\{\Theta_1 = 1, \dots, \Theta_m = 1\} = \frac{k^{[m]}}{l^m} \left(1 - \frac{m}{l}\right)^{k-m}. \quad (\text{A.19})$$

Наконец, подставляя (A.19) в (A.18), получаем

$$E \left[\chi^{[m]}(k) \right] = l^{[m]} \frac{k^{[m]}}{l^m} \left(1 - \frac{m}{l}\right)^{k-m}, \quad (\text{A.20})$$

что завершает доказательство Утверждения. □

Б

Акт об использовании от ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ ИТО»



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ГАЗПРОМНЕФТЬ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ОПЕРАТОР»
(ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ ИТО»)

Адрес для корреспонденции:
Московский пр-т, д. 60/129, лит. А, Санкт-Петербург, 190013
ОКПО 71215767, ОГРН 1038900845995,
ИНН 8905032518, КПП 783801001
Тел.: +7 812 493-25 63
e-mail: ito@gazprom-neft.ru
ito.gazprom-neft.ru

А К Т

об использовании результатов диссертационной работы
Степанова Никиты Вячеславовича
на тему

«Модели канала случайного множественного доступа для различных сценариев
применения крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением»,
представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

Председателя Артамонова Рема Александровича — директора дирекции
цифрового инжиниринга

и членов комиссии:

Маркова Сергея Александровича — практики технологий киберфизических
систем

Бусарева Марка Александровича — руководителя программы разработки
системных решений

составила настоящий акт об использовании научных результатов, полученных в
диссертационной работе Степанова Н.В., а именно определение сценариев
применения мультисервисной беспроводной сети на месторождении с использованием
разнородных стандартов и протоколов связи в том числе NB-IoT, LTE и др. в рамках
реализации НИОКР А210001554 «ОКР Мультисервисная гетерогенная беспроводная
IIoT-сеть» по договору №ГПН-22/08000/02495/P/085-2Д от 27 мая 2022г с ПАО «Газпром
Нефть».

На основе разработанных функционально-технических требований для
использования мультисервисной беспроводной гетерогенной сети была подтверждена
технологическая гипотеза о том, что применение сети на основе различных
беспроводных технологий в том числе NB-IoT и LTE повысит эффективность передачи
данных. Предложенный автором метод анализа позволил оценить потенциальные
возможности использования протоколов NB-IoT и LTE Cat-M на стадии проектирования
стенда мультисервисной беспроводной гетерогенной сети.

Указанные результаты диссертационной работы имеют существенное значение
для развития исследований в области использования крупномасштабных сетей с

ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ ИТО»

низким энергопотреблением для улучшения ТТХ перспективных изделий, разрабатываемых и внедряемых в ПАО «Газпром Нефть».

Председатель комиссии:

Директор дирекции цифрового
инжиниринга

Члены комиссии:

Руководитель практики технологий
киберфизических систем

Руководитель программы
разработки системных решений



Артамонов Р.А.

Марков С.А.

Бусарев М.А.

26.10.2022г

В

Акт об использовании от ООО «НПО ПКРВ»



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Научно-производственное объединение
программные комплексы реального времени»

Юридический адрес: Пресненская наб., д. 8, стр. 1, эт. 44, пом. 441М, оф. 7, Москва, 123112
Почтовый адрес: Банный пер., д. 9, Москва, 129110
e-mail: info@pro-pkrv.ru, тел.: +7 (495) 921-01-27, факс: +7 (491) 243-43-90 (доб.137), +7 (495) 221-05-50 (доб. 0792)
ОКПО 67611629, ОГРН 1107154016529, ИНН/КПП 7105509/36/770301001

№ _____
на _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по

разработке

ООО «НПО ПКРВ»

Рыжов А.Ю.



07.02.2024

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Степанова Никиты Вячеславовича
на тему «Модели канала случайного множественного доступа для различных
сценариев применения крупномасштабных сетей с низким
энергопотреблением»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе:

Председателя

Ваганова М.А. – д-ра техн. наук, Начальника Управления разработки РЭС

и членов комиссии:

Бондаренко А.В. – начальник комплексного отдела,

Попова А.С. – заместитель начальника отдела разработки ИО

составила настоящий акт об использовании научных результатов,
полученных в диссертационной работе Степанова Н.В., в опытно-
конструкторских работах (ОКР) ООО «НПО ПКРВ».

Пропускная способность беспроводных сетей зависит как от доли
частотно-временного ресурса канала связи, выделенной непосредственно для

2

передачи данных, так и от времени, затрачиваемого на организацию связи, которое, в свою очередь, зависит от доли частотно-временного ресурса, выделенного для организации случайного доступа к каналу связи. Задача оптимального перераспределения общего частотно-временного ресурса канала связи между этими частями является ключевой для формирования алгоритмов функционирования беспроводных сетей.

Поэтому в ОКР, проводимых на нашем предприятии, оказалось актуальным совместное использование полученных в диссертационной работе Степанова Н.В. модели канала случайного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением и метода перераспределения частотно-временного ресурса канала связи между его частями, выделенными для передачи данных по каналу связи и для организации случайного доступа к данному каналу.

Применение данных модели и метода для анализа конкретных беспроводных сетей с известными характеристиками потока сообщений и перераспределение частотно-временного ресурса на основе результатов проведённого анализа позволяют максимизировать пропускную способность беспроводных сетей. В частности, для одной из разрабатываемых на нашем предприятии беспроводных сетей повышение доли частотно-временного ресурса, выделенного на организацию случайного доступа, с 15% до 25% позволило повысить пропускную способность сети в целом на 40% для сценария mMTS при следующих параметрах: общее число отсчётов 700, 30 слотов на передачу данных. Таким образом, результаты диссертационной работы имеют существенное значение для практического синтеза алгоритмов функционирования крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением.

Председатель комиссии:

Начальник Управления
разработки РЭС, д-р техн. наук



Ваганов М.А.

Члены комиссии:

Начальник комплексного отдела



Бондаренко А.В.

Заместитель начальника отдела разработки ПО



Попов А.С.

Г

Акт об использовании от АО «КОТЛИН-НОВАТОР»Экз. № 1**УТВЕРЖДАЮ**Генеральный директор-главный конструктор
АО «Котлин-Новатор»В.А. Жук
«29» февраля 2024 г.**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы

Степанова Никиты Вячеславовича

на тему

«Модели и методы для анализа вероятностно-временных характеристик канала
случайного доступа в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением»,
представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наукСоставлен на основании Протокола научно-
технического совета АО «Котлин-Новатор» № 2
от «29» февраля 2024 г.

Комиссия в составе:

Председатель комиссии:

Главный конструктор БРЭО

К.А. Жук;

Члены комиссии:

Заместитель главного конструктора БРЭО, начальник отдела 89

Е.А. Фальков;

Начальник отдела 76

А.В. Жеглов;

Начальник отдела 79

А.В. Чайковский

Начальник отдела 88

К.Е. Метельский;

Начальник отдела 90

И.Ю. Базаров;

Начальник отдела 98

Е.В. Кузьмина;

Начальник лаборатории отдела 89

К.А. Таквинчин;

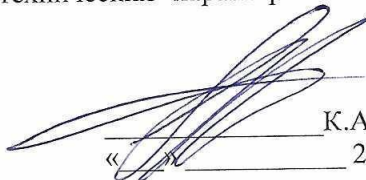
29 февраля 2024 года составила настоящий акт об использовании научных результатов, полученных в диссертационной работе Степанова Н.В., а именно методы назначения параметров работы оконечных устройств, позволяющие повысить вероятность доставки данных от 30% до 67% при изменении числа устройств от 5000 до 15000 в высокоплотных крупномасштабных сетях, построенных на базе протокола LoRa (Long Range) в системах передачи данных, а также технологии расширения спектра на основе линейно-частотной модуляции для организации систем связи могут быть использованы в опытно-конструкторских работах (ОКР) АО «Котлин-Новатор».

Проведенные в рамках ОКР испытания показали, что разработанные автором методы анализа позволяют оценить потенциальные возможности использования протокола LoRa на стадии проектирования изделий.

Указанные результаты диссертационной работы имеют существенное значение для развития исследований в области использования крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением для повышения тактико-технических характеристик перспективных изделий разработки АО «Котлин-Новатор».

Председатель комиссии:

Главный конструктор БРЭО

 К.А. Жук
«__» __ 20__ г.

Члены комиссии:

Заместитель главного конструктора БРЭО,
начальник отдела 89

 Е.А. Фальков
«__» __ 20__ г.

Начальник отдела 76

 А.В. Жеглов

Начальник отдела 79

«__» __ 20__ г.

Начальник отдела 88

 А.В. Чайковский

Начальник отдела 90

«__» __ 20__ г.

Начальник отдела 98

 К.Е. Метельский

Начальник лаборатории отдела 89

«__» __ 20__ г.

 И.Ю. Базаров

«__» __ 20__ г.

 Е.В. Кузьмина

«__» __ 20__ г.

 К.А. Таквинчин

«__» __ 20__ г.

Д

Акт об использовании от ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»
(ГУАП)

ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057,
E-mail: info@guap.ru, http://new.guap.ru, ОГРН 1027810232680, ИИН/КПП 7812003110/783801001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ГУАП,

Доктор экономических наук, профессор

Ю.А. Антомина

«23» 12 2024



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы

Степанова Никиты Вячеславовича

на тему «Модели канала случайного множественного доступа для различных сценариев применения крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением»

Комиссия в составе:

Председателя Николая Николаевича Майорова — проректора по научно-технологическому развитию;

Членов комиссии:

Бестугина Александра Роальдовича — директора института радиотехники и инфокоммуникационных технологий, члена научно-технического совета;

Оленева Валентина Леонидовича — заведующего кафедрой аэрокосмических компьютерных и программных систем, члена научно-технического совета ГУАП;

Очередной Ларисы Петровны — заместителя директора Центра координации научных исследований ГУАП.

составила акт о том, что результат диссертационной работы Степанова Никиты Вячеславовича «Модели канала случайного множественного доступа для различных сценариев применения крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук:

— модель анализа характеристик обслуживания пакетного трафика в сетях связи NB-IoT используется в научно-исследовательской деятельности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», в частности, в гос. задании 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», в гранте № 22-19-00305 «Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов».

Предложенная модель позволяет оценивать задержку в получении информации о состоянии объекта, состоящего из партии грузов, мониторинг состояния которых осуществляется с использованием технологии NB-IoT. При этом рассматривается типовой сценарий перемещения объекта по территории с частичным покрытием сотовых сетей (среднее время пребывания вне зоны действия базовых станций 1 минута, в зоне действия — 20 минут и среднее время нахождения ЛУ в пассивном состоянии 2 минуты). Анализ показывает возможное снижение задержки на 41% за счёт увеличения среднего времени пребывания в пассивном состоянии.

Председатель комиссии,
проректор по научно-технологическому развитию
д.т.н., доцент

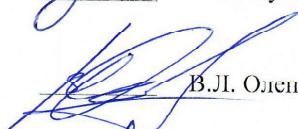

Н.Н. Майоров

Члены комиссии:

Директор института радиотехники
и инфокоммуникационных технологий, д.т.н., профессор


А.Р. Бестугин

Заведующий кафедрой аэрокосмических компьютерных
и программных систем, к.т.н., доцент


В.И. Оленев

Заместителя директора Центра
координации научных исследований Г УАП


Л.И. Очередина

Е

Акт об использовании от АО «НИИ Масштаб»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
АО «НИИ «Масштаб» по научной работе
кандидат технических наук
А.Г. Фортинский

«04» июля 2025 года

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Степанова Никиты Вячеславовича
на тему

«Модели канала случайного множественного доступа для различных сценариев применения
крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением»,
представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научные результаты, полученные в диссертационной работе Степанова Н.В., в частности, модели для анализа характеристик обслуживания пачечного трафика в сетях с множеством устройств NB-IoT, перемещающихся по территории, частично покрытой базовой станцией, применяются в НИОКР и для формирования научно-технического задела в АО «НИИ «Масштаб». На практике, когда известны зоны радиопокрытия базовыми станциями и реальные характеристики движения устройств NB-IoT, результаты анализа позволяют получить количественную оценку средней задержки при передаче сообщений от периодичности их передачи устройствами NB-IoT. Использование результатов анализа и полученной количественной оценки позволяет провести перенастройку периодичности передачи сообщений устройствами NB-IoT без уменьшения среднего времени доведения. Проведённая перенастройка при некоторых сценариях практического использования снижает количество передач, необходимых для доведения сообщения, до 10 раз, соответствующим образом снижая энергетические расходы, что имеет особенное практическое значение для автономных устройств с низким энергопотреблением, таких как устройства NB-IoT.

Указанные результаты диссертационной работы имеют существенное значение в области использования крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением.

Председатель комиссии:

Советник генерального директора АО «НИИ «Масштаб»
Заместитель председателя НТС АО «НИИ «Масштаб»
доктор технических наук, доцент

 К.З. Биятдинов

Члены комиссии:

Начальник научно-системного центра

 С.П. Гагарин

Начальник научно-технического отдела

 Е.В. Хрусталёва

ВЕРНО (Одобрено решением НТС. Протокол НТС № 20 от 04.07.2025):

Ученый секретарь

«04» июля 2025 года

 Е.В. Хрусталёва

Организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Масштаб»

Почтовый адрес: ул. Кантемировская, д.5, лит. А, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194100

Тел.: +7(812) 309-03-21, адрес электронной почты: k.bilyatdinov@mashtab.org, сайт: <https://www.mashtab.org/>

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025667212

**Программная реализация сокращённого вычисления в
два этапа при исследовании процедуры случайного
множественного доступа с использованием аппарата
Марковских цепей**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Автор(ы): *Степанов Никита Вячеславович (RU)*



Заявка № 2025666403

Дата поступления 03 июля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 июля 2025 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 0692e7c1a6300b54f240f670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов