

ГИАПОД	Документ зарегистрирован
	« 04 » 12 20 25 г.
	Вх. № 81-269/25

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Парамонова Александра Ивановича на диссертацию
Степанова Никиты Вячеславовича

«Модели канала случайного множественного доступа для различных сценариев применения крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Актуальность темы диссертации

Интернет вещей (IoT) является одним из приоритетных направлений развития сетей связи, что отражено в рекомендациях международных организаций, осуществляющих деятельность в области стандартизации. Количество интернет-вещей в мире уже превышает количество жителей на планете и имеет тенденции к дальнейшему росту. Одним из секторов IoT являются межмашинные взаимодействия (M2M) или массовые межмашинные взаимодействия (mMTC).

Существуют различные технологии организации каналов в сетях IoT. Некоторые из технологий позволяют обеспечить сравнительно большую зону обслуживания. Сети таких устройств получили название LPWAN. К таким сетям можно отнести большое разнообразие технологий как из семейства сотовых поколений протоколов связи CIoT, так и из открытых разработок нового поколения концепции IoT. Все они обладают специфическими особенностями и ключевыми принципами, общими для всех. Для начала сети рассчитаны на некоторое число устройств, работающих на достаточно большом удалении друг от друга. Следующим общим признаком является задача снижения энергопотребления за счёт использования для связи базовую станцию, с невысокой скоростью передачи данных и простыми алгоритмами коммуникации. Последним отличительным признаком является сохранение средней задержки и вероятности доставки за счёт увеличения полосы частот, возможно увеличение числа абонентских устройств (масштабируемость сети).

LPWAN – это обозначение, которое не переведено в российских стандартах. Прямой его перевод не отражает специфику данной сети, поэтому соискатель предложил в своей работе смысловой перевод и назвал её крупномасштабной сетью с низким энергопотреблением.

Большая дальность в высокоплотной сети приводит к возникновению большого числа задач: 1) Определить общие особенностей передачи данных различных технологий при сравнении известных моделей и методов анализа вероятностно-временных характеристик канала случайного множественного доступа. 2) Предложить методы, позволяющие получать вероятностно-временные характеристики в зависимости от параметров модели.

3) Исследовать влияние перераспределения ресурсов между различными этапами случайного множественного доступа и между различными технологиями в рамках одной сети. 4) Исследовать сценарий перемещения абонентских устройств между базовыми станциями с выходом из зоны покрытия. Итоговой задачей можно считать предложение такой модели, которая отражает основные особенности технологии и подхода, обеспечивающего повышение вероятности доставки сообщений в высокоплотных сетях.

Обеспечение эффективности использования сетевых ресурсов в таких условиях становится первоочередной задачей, для решения которой разрабатываются различные методы, в первую очередь, это методы реализации доступа.

Целью диссертационной работы Степанова Никиты Вячеславовича 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.

Эту цель можно интерпретировать как повышение эффективности систем случайного множественного доступа крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением путем разработки нового модельно-методического аппарата.

Таким образом, можно утверждать, что данная диссертационная работа актуальна и направлена на решение важной задачи, имеющей как теоретическое, так и прикладное практическое значение.

Степень обоснованности, достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность результатов работы подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования, натурными экспериментами, публикациями и выступлениями как на российских, так и на международных конференциях.

Основные результаты диссертации, обладающие научной новизной:

1. В отличие от ранее известных методов расчёта характеристик системы с помощью Марковских цепей предложен метод двухэтапного вычисления переходных вероятностей, позволяющий уменьшить вычислительные затраты в десятки раз (от 24 до 60);

2. Для технологий, в которых имеются этапы случайного доступа и этап передачи данных, впервые 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 впервые

предложен 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, и отличающаяся от ранее известных моделей тем, что зоны действия базовых станций не перекрываются. 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. Впервые 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%.

Публикации по теме диссертации

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.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы и четырех приложений. Общий объем диссертации 183 страницы, включая 71 рисунок, 11 таблиц, список литературы из 128 наименований. В приложениях к диссертационной работе приведены пять документов, подтверждающих внедрение основных результатов диссертационной работы и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Во введении приводится обоснование актуальности выбранной темы диссертационного исследования и степень её разработанности, сформулированы цель, задачи и положения, выносимые на защиту, описывается новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой разделе даётся описание к принципу определения технологий, которые можно отнести к крупномасштабным сетям с низким энергопотреблением. Приводится подробный сравнительный анализ работы технологий сотового Интернета Вещей. Предлагается метод оценки эффективности работы технологий с помощью Марковских цепей для пуассоновского и бернуллиевского входного потока. Для этого рассматривается как одноэтапная, так и двухэтапная процедура передачи данных. Описана ускоренная методика расчёта средней задержки для описанных выше изложенных моделей случайного множественного доступа. Результатом раздела является постановка задачи минимизации средней задержки

передачи данных в канале со случайным множественным доступом для выбранных технологий в системах массовой межмашинной связи.

Полученные в первом разделе результаты сформулированы в первом положении, выносимом на защиту.

Во второй разделе разработаны базовые модели системы массовой межмашинной связи с фиксированным числом абонентских устройств для одноэтапной и двухэтапной передачи в рамках технологий сотовых систем межмашинной связи. Разработанные модели описывают системы для неподвижных объектов при использовании одной и нескольких технологий в рамках одной сети. Результатом второго раздела являются доказательства оптимального разделение частотно-временного ресурса между этапом случайного доступа и этапом передачи данных при сохранении стабильной работы системы случайного множественного доступа и оптимального распределения числа абонентских устройств между технологиями для повышения предельной скорости передачи. При этом достигается повышение скорости передачи до 40% за счёт распределения частотно-временного ресурса между этапами и уменьшение задержки для типового сценария на 30% путём распределения устройств между технологиями, соответственно.

Полученные во втором разделе результаты сформулированы во втором положении, выносимом на защиту.

В третьем разделе вводится модель массовой межмашинной связи в технологии сотовых сетей для подвижной группы объектов. Рассматривается сценарий двухэтапной передачи на базе модели из первого раздела для пуассоновского и бернуллиевского входных потоков, но в отличие от модели в первом разделе появляются интервалы времени, когда сообщения от абонентских устройств не достигают ближайшей базовой станции.

В результате исследований получена зависимость средней задержки доставки сообщений на базовую станцию от среднего времени пребывания вне зоны и в зоне действия базовых станций.

Полученные в третьем разделе результаты сформулированы в третьем положении, выносимом на защиту.

В четверном разделе

Приведён систематизированный обзор особенностей технологии LoRa. Оценка возможностей технологии показала критические отличия данной технологии от ранее описанных. Для этого проведена оценка вероятности успешного приёма сообщений при частичном наложении сигналов от разных абонентских устройств эмпирическим способом. Проведено доказательство на основе эмпирических результатов максимизации средней вероятности доставки сообщений за счёт выбора параметров работы абонентских устройств. Продолжен новый подход к решению оптимизационной задачи, которая называется минимаксной оптимизацией. Результаты натурных экспериментов подтвердили

достоверность аналитического доказательства минимаксной оптимизационной задачи и работу моделирующей программы.

Доказательство приведено с помощью теории Марковских цепей на основе модели многоканальной одноэтапной системы случайного множественного доступа, приведённого в первом разделе.

Полученные в разделе результаты сформулированы в четвертом положении, выносимом на защиту.

В заключении автор приводит перечень полученных результатов.

Замечания по диссертационной работе

В тексте диссертации имеются следующие недостатки:

1. В диссертационной работе не рассмотрены возможные пути улучшения крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением за счёт изменений физического уровня. Автор ограничился рассмотрением уровня выше физического.

2. В разделе 1.4 при введении моделей канала случайного множественного доступа введены термины «преамбула» для двухэтапной передачи и «канал» для одноэтапной передачи. В табл. 1.3 указаны разделы, где используют данные термины. При этом в дальнейшем тексте диссертационной работы в ряде случаев вместо термина «преамбула» используется термин «канал», например, см. стр. 82, 83, 91, 92, 93.

3. В диссертационной работе нет достаточного обоснования того, что рассматриваются только три технологии NB-IoT, LTE-M, LoRa и не рассматриваются другие технологии, которые могут быть использованы в крупномасштабных сетях с низким энергопотреблением.

Также имеются ряд опечаток в тексте диссертации:

1. Опечатка в пунктуации на стр. 54 («случайного доступа, больше, чем количество») и в обозначении на стр. 56 («значение Λ_{cr} $\Rightarrow$ »).

2. Обозначения на рис. 2.4 отличаются от комментариев к данному рисунку, в котором используются буквенные обозначения состояний в англоязычном формате.

По тексту автореферата могут быть сделаны замечания:

1. В автореферате при описании второго раздела на стр. 12 не описан алгоритм вычисления значения Λ_{cr} , а только описана основная идея этого алгоритма.

Приведенные выше замечания не снижают качества выполнения работы и ценности полученных результатов.

Выводы и заключение

Диссертационная работа Степанова Никиты Вячеславовича, посвящена решению научной задачи, имеющей существенное значение для повышения эффективности сетей Интернета вещей путем разработки модельно-методического

аппарата, обеспечивающего стабильность и энергоэффективность работы систем массовой межмашинной связи.

Работа Степанова Никиты Вячеславовича является законченной научно-квалификационной работой, результаты которой обладают научной новизной и практической значимостью. Материалы исследования в достаточно полном объеме отражены в публикациях автора и прошли апробацию на научных конференциях. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

На основании вышесказанного считаю, что диссертационная работа «Модели канала случайного множественного доступа для различных сценариев применения крупномасштабных сетей с низким энергопотреблением» полностью соответствует критериям, которым должна отвечать диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции от 16.10.2024).), а ее автор Степанов Никита Вячеславович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

« 28 » ноябрь 2025 г.

Официальный оппонент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

д.т.н., профессор

А.И. Парамонов

Подпись (-и) руки

А.И. Парамонов

заверяю

ения персоналом

Д. Смородинцева

18.11.2025

Сведения об оппоненте: Парамонов Александр Иванович, гражданин Российской Федерации, доктор технических наук по специальностям 05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций, профессор. Профессор кафедры сетей связи и передачи данных федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича». Адрес: 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д.22, корп.1, литера А, Ж., <http://www.sut.ru/>, +7 (812) 326-31-50, alex-in-spb@yandex.ru.