

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича»

На правах рукописи

Фам Ван Дай

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЯЧЕЙСТЫХ СЕТЯХ ДАЛЬНЕГО РАДИУСА
ДЕЙСТВИЯ**

2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Киричѐк Руслан Валентинович

Санкт-Петербург – 2021

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Анализ появления и развития энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия и ячеистых сетей.....	11
1.1 Беспроводные технологии передачи данных для приложений Интернета вещей	11
1.2 Перспективные энергоэффективные сети дальнего радиуса действия	15
1.3 Анализ существующих технологий ячеистых сетей	28
1.4 Обоснование необходимости использования ячеистой топологии в энергоэффективных сетях дальнего радиуса действия.....	31
1.5 Постановка задачи исследования.....	34
1.6 Выводы по главе	34
Глава 2. Анализ методов маршрутизации в беспроводных ячеистых сетях.....	36
2.1 Анализ международных исследований по маршрутизации в беспроводных ячеистых сетях.....	36
2.2 Реактивные протоколы маршрутизации	37
2.3 Проактивные протоколы маршрутизации.....	39
2.4 Гибридные протоколы маршрутизации	41
2.5 Выводы по главе	41
Глава 3. Разработка моделей и методов маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия.....	43
3.1 Гибридные ячеистые сети как элемент сетевой инфраструктуры для устройств Интернета вещей в умных городах	43
3.2 Модель энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия....	47
3.2.1 Технология передачи данных LoRa.....	47
3.2.2 Структура ячеистой сети LPWAN в рамках системы умных городов .	49
3.2.3 Аналитические и имитационные модели.....	56
3.3 Метод маршрутизации на основе оценки комплексного показателя качества соединения	62
3.3.1 Метод оценки комплексного показателя качества соединения	62
3.3.2 Метод поиска маршрута	71
3.3.3 Моделирование и результаты	73
3.3.4 Результаты сравнения с протоколом AODV	85

3.4	Метод маршрутизации на основе машинного обучения с подкреплением	87
3.4.1	Подход машинного обучения к маршрутизации	87
3.4.2	Машинное обучение с подкреплением	90
3.4.3	Метод обучения выбора маршрута	90
3.4.4	Моделирование и результаты	93
3.5	Выводы по главе	98
Глава 4.	Метод передачи мультимедийного трафика в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия	100
4.1	Описание фрагмента энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия для передачи мультимедийного трафика	100
4.2	Экспериментальное исследование	103
4.2.1	Описание экспериментальной установки	103
4.2.2	Результаты экспериментального исследования	108
4.3	Выводы по главе	118
	Заключение	120
	Список сокращений и условных обозначений	124
	Список литературы	126
	Приложение А. Листинги программы	139
	Приложение Б. Документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационной работы	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В настоящее время развитие концепции Интернета вещей (ИВ) привело к появлению различных приложений, начиная от умных носимых устройств до приложений «умный дом» и «умный город». Сбор и передача данных происходит через Интернет и предполагает возможность дистанционного мониторинга и управления устройствами на базе того или иного сервиса. При этом инфокоммуникационная инфраструктура играет важную роль для обеспечения подключения устройств к сетям связи общего пользования. Развитие энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (LPWAN – Low-Power Wide-Area Network) как составной части Интернета вещей было рассмотрено в рамках национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» в разделе «Построение узкополосных беспроводных сетей Интернета вещей на территории Российской Федерации» по направлению «Информационная инфраструктура».

Базовой основой концепции Интернета вещей являются беспроводные сенсорные сети, представляющие большое количество устройств с батарейным питанием, распределенных на заданной территории. По аналогии с беспроводными сенсорными сетями устройства Интернета вещей в своем большинстве представляют миниатюрные устройства с батарейным питанием, которые подключаются к Интернету напрямую или с использованием шлюзов. На этапе становления концепции Интернета вещей возник вакуум технологий для обеспечения энергоэффективной передачи на большие расстояния, однако в период 2012–2015 гг. возник новый класс сетей, в который вошло множество технологий передачи данных. Появление данных технологий актуально в умных городах с плотной застройкой для обеспечения гарантированной доставки данных. С каждым годом количество устройств, которые необходимо подключить к Интернету, значительно увеличивается. Это

влечет необходимость установки дополнительных базовых станций, шлюзов или промежуточных узлов для обеспечения соединения конечных устройств.

Как отмечено в национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации», для развития цифровой экономики должны быть последовательно и повсеместно внедрены энергоэффективные сети дальнего радиуса действия во всех отраслях экономики с территориальным покрытием малых городов и поселков городского типа. Технологии Интернета вещей способны внести большой вклад в повышение технико-экономических показателей работы отраслей реальной экономики, снижение затрат, повышение эффективности и производительности труда.

Энергоэффективные сети дальнего радиуса действия также возможно рассматривать как элемент беспроводных сенсорных сетей (БСС). До 2012 года активное развитие получили технологии и протоколы БСС, такие как ZigBee, Z-Wave, 6LowPAN и др. Персональные сети на базе данных протоколов и технологий активно использовались в системах автоматизации, сигнализации, а также в промышленности для сбора данных с датчиков. Отличительная особенность данных сетей заключалась в низком энергопотреблении узлов и самоорганизации. Такие сети достаточно легко развернуть за счет использования ячеистой топологии. С одной стороны, большинство существующих беспроводных сенсорных сетей имеет малое расстояние передачи данных. С другой стороны, энергоэффективные сети дальнего радиуса действия были предложены для обеспечения большей дальности связи и тем самым позволяют решить существующие недостатки с передачей данных на большие расстояния. Однако в настоящее время большинство энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия использует звездную топологию, по которой осуществляется прямое соединение между конечными устройствами и базовой станцией или шлюзом. Это не позволяет эффективно использовать данные сети в плотной городской застройке и подчеркивает необходимость применения ячеистой топологии для энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия.

Как следствие, насущной задачей является разработка моделей и методов маршрутизации, позволяющих увеличение покрытия зоны обслуживания сети и ко-

эффицента доставки пакетов в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия. Методы маршрутизации всегда играют важную роль для самоорганизующихся сетей, БСС и также беспроводных ячеистых сетей. В связи с развитием концепции ИВ в умных городах в 2020 г. международная организация ETSI начала разработку нового стандарта DECT-2020 NR, обеспечивающего массовую связь машинного типа (mMTC) и сверхнадежную связь с малой задержкой (URLLC) в сетях пятого поколения с поддержкой ячеистой топологии.

Диссертационная работа посвящена исследованию задач маршрутизации, которые позволят более эффективно организовать и обеспечить расширение зоны обслуживания энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия за счет применения ячеистой топологии, а также предоставлению услуг по передаче изображений на базе этой сети. В этой связи результаты диссертационного исследования представляются весьма актуальными.

Степень разработанности темы

Модели и методы маршрутизации всегда являлись важнейшими объектами исследований для любых сетей связи. Прикладным исследованиям по беспроводным сенсорным сетям или самоорганизующимся сетям особенно уделяется большое внимание в различных областях. В последнее десятилетие был достигнут существенный прогресс в развитии технологии Интернета вещей, в том числе в исследовании беспроводных сенсорных сетей и энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия. В частности, было опубликовано большое число работ по данной тематике. Среди работ отечественных и зарубежных авторов можно отметить труды В.В.Бутенко, В.М. Вишневого, Б.С. Гольдштейна, В.Г. Карташевского, А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, К.Е. Самуйлова, В.К.Сарьяна, М.А. Сиверса, С.Н.Степанова, А.В. Рослякова, А.Е. Рыжкова, В.О. Тихвинского, Ю.В.Гайдамаки, Р.В.Киричка, Е.А. Кучерявого, Д.А.Молчанова, А.С.А. Мутханна, А.А.Аteya, J. Andrews, J. Araniti , M. Dohler, N. Himayat, F. Baccelli, S. Rangan, T. Rappoport, S. Singh и других. Их работы позволили оценить возможности энергоэффективных

сетей дальнего радиуса действия для умных городов, найти новые подходы к построению инфраструктуры беспроводных сетей Интернет вещей, а также обеспечению качества обслуживания сетей связи ИВ.

Объект исследования

Объектом исследования является энергоэффективная ячеистая сеть дальнего радиуса действия.

Предмет исследования

Предметом исследования являются методы маршрутизации.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы – увеличение покрытия зоны обслуживания сети и коэффициента доставки пакетов на основе предлагаемых моделей и методов маршрутизации.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе последовательно решаются следующие **задачи**:

- проанализировать энергоэффективные сети дальнего радиуса;
- проанализировать беспроводные ячеистые сети и протоколы маршрутизации для них;
- разработать модель фрагмента энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия с учетом особенностей инфраструктуры умных городов;
- разработать метод оценки качества линии связи на основе комплексного показателя соединения с использованием машинного обучения;
- разработать метод маршрутизации на основе оценки комплексного показателя качества соединения;
- разработать метод маршрутизации на основе обучения с подкреплением;
- разработать метод передачи мультимедийного трафика в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Фрагмент энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия представлен в виде системы массового обслуживания, на базе которой была разработана имитационная модель, отличающаяся от известных тем, что используется ячеистая топология с различной связностью. На базе серии компьютерных экспериментов определены пороговые уровни параметров качества обслуживания при различных характеристиках рассматриваемой сети связи.

2. Разработаны методы маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия на основе комплексного показателя канала связи и машинного обучения с подкреплением, отличающиеся от известных тем, что позволяют обеспечить эффективную передачу данных между узлами ячеистой сети и повысить охват зоны покрытия по сравнению с энергоэффективными ячеистыми сетями дальнего радиуса действия с топологией «звезда», а также уменьшить задержку доставки пакетов при высокой нагрузке за счет самообучения на основе собираемых данных.

3. Разработан метод передачи мультимедийного трафика в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия, отличающийся от известных тем, что позволяет передавать изображения через сеть LoRa с поддержкой ячеистой топологии и поддержкой заданных параметров передаваемых изображений.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Теоретическая значимость заключается в расширении модельно-методического аппарата сетей ячеистой структуры, учитывающего параметры трафика, качества обслуживания и надежности, а также методов маршрутизации и услуги передачи изображения в сетях связи Интернета вещей с ячеистой топологией.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что она может быть использована для организации узкополосных беспроводных сетей связи Интернета вещей с поддержкой ячеистой или многоскачковой топологии, что повысит зону обслуживания без необходимости установки дополнительных базовых станций, а также способствует развитию приложений умных устойчивых го-

родов за счет преимущества узкополосных беспроводных сетей. Результаты диссертационной работы могут быть применены при проектировании сетей связи Интернета вещей в умных городах, а также для сбора данных с устройств Интернета вещей в условиях плотной городской застройки.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории вероятностей, математической статистики, теории графа и теории массового обслуживания, машинного обучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель фрагмента энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия с учетом особенностей инфраструктуры умных городов.
2. Методы маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия на основе оценки комплексного показателя качества соединения и машинного обучения с подкреплением.
3. Метод передачи мультимедийного трафика в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность полученных автором научных и практических результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием математического и имитационного моделирования, соответствием расчетов с результатами экспериментальных исследований, проведенных лично автором. Основные теоретические и практические результаты работы, в том числе разработанные имитационные модели, использованы в учебном процессе кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при чтении лекций и проведении практических занятий и лабораторных работ, а также при проведении испытаний в научно-исследовательской и испытательной лаборатории инновационных инфокоммуникаций ПАО «Ростелеком», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 20th International Conference NEW2AN 2020 and 13th Conference ruSMART 2020 (Санкт-Петербург, 2020); 23st International Conference on Distributed Computer and Communication Networks, DCCN 2020 (Москва, 2020); 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) (Санкт-Петербург, 2020); 22th International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2020 (Корея, 2020); на VI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Интернет вещей и 5G (INTHITEN 2020)» (Санкт-Петербург, 2020); на 75-й и 76-й конференциях Санкт-Петербургского отделения Общероссийской общественной организации «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова» (СПб НТОРЭС) (Санкт-Петербург, 2020, 2021), X Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» СПбГУТ (Санкт-Петербург, 2021); 4th International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS) (Санкт-Петербург, 2020).

Публикация по теме диссертации

Основные результаты диссертации изложены в 19 опубликованных работах, в том числе 3 работы – в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; 9 работ – в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science; 7 публикаций – в других изданиях и материалах конференций.

Личный вклад автора

Результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

Соответствие специальности

Диссертационная работа соответствует пунктам п. 2, 12, 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СЕТЕЙ ДАЛЬНОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ И ЯЧЕИСТЫХ СЕТЕЙ

1.1 Беспроводные технологии передачи данных для приложений Интернета вещей

Важнейшими элементами ИВ являются технологии передачи данных (ПД), которые позволяют устройствам взаимодействовать друг с другом, с базовыми станциями, со шлюзами [17, 19, 22]. Если рассматриваем сети связи пятого поколения 5G/IMT-2020, то большинство приложений требует высокую скорость передачи данных и малую задержку. Это необходимо для мониторинга в режиме реального времени, а также для отправки команд управления [8]. Также следует учитывать, что существует множество приложений ИВ, которые предполагают работу от одного комплекта элементов питания до 10 лет. Для таких приложений необходимо, чтобы технология передачи данных обеспечивала низкое энергопотребление и длительный срок работы от батареи [10]. Как правило, такие сети не требовательны к сетевым задержкам и не предполагают взаимодействие с конечными устройствами в реальном времени.

Существует множество критериев классификации этих технологий передачи данных, например, радиус действия, топология. Условно их можно разделить на 4 основных типа в зависимости от требуемой энергоэффективности устройства Интернета вещей (высокая и низкая) и расстояния (большая и малая дальность).

В период 2000–2010 гг. было разработано много технологий беспроводной передачи данных, которые не были ориентированы на низкое энергопотребление. Это накладывало отпечаток на необходимость часто заменять батарею. Кроме

этого, параллельно развивались беспроводные сенсорные сети, которые предполагали низкое энергопотребление за счет небольших сеансов связи и перехода в режим «сна». Большой и малый радиус действия представляют технологии, которые позволяют передавать данные на большие и малые расстояния, обеспечивая при этом заданный уровень качества обслуживания (QoS).

Группа: высокое энергопотребление и малое расстояние.

В эту группу включают наиболее известные технологии Wi-Fi и Bluetooth (1.0-4.0). Беспроводная сеть Wi-Fi позволяет устройствам подключаться и обмениваться информацией на расстоянии до 100 метров. В сети Wi-Fi используется два свободных диапазона частот 2,4 ГГц и 5 ГГц. Технология Wi-Fi предоставляет большую скорость передачи данных, поэтому имеет возможность трансляции видео в режиме реального времени. Технология Bluetooth позволяет передавать данные между двумя устройствами или между одним и несколькими устройствами на короткое расстояние до 15 метров. В технологии Bluetooth также используется диапазон частот 2,4 ГГц.

Обе технологии обладают высокой пропускной способностью, высокой скоростью передачи данных, низкой задержкой, но имеют малый радиус действия. Высокая скорость передачи данных для этих технологий предполагает повышенное энергопотребление, поэтому они не подходят для приложений, в которых требуется экономить энергию.

Группа: высокое энергопотребление и большое расстояние.

Данная группа представлена сетями сотовой связи GSM и LTE, которые обеспечивают связь на большие расстояния. Данные стандарты связи наиболее распространены во всем мире. Изначально GSM и LTE были разработаны как элементы сетей связи общего пользования для предоставления услуг подвижной связи и не учитывали специфику различных приложений ИВ и, как следствие, не адаптированы для трафика генерируемого устройствами Интернета вещей. С появлением концепции ИВ и различных приложений ИВ начались работы по усовершенствованию стандартов связи LTE с целью учета специфики трафика Интернета вещей и особенности энергопотребления. Разработка стандартов LTE для ИВ ведется на

базе консорциума, разрабатывающего спецификации для мобильной телефонии 3GPP [42].

Несмотря на проводимые работы по модернизации стандартов LTE, технологии этого типа по-прежнему характеризуются высоким энергопотреблением из-за сложных механизмов сигнализации и обеспечения безопасности. Большинство этих функций не требуется для приложений ИВ и взаимодействия с большим количеством устройств. Также стоит отметить, что сотовые сети изначально предназначены для таких устройств, как смартфоны и планшеты, поэтому достаточно сложно модернизировать сетевую инфраструктуру для приложения ИВ, включающую высокую плотность устройств Интернета вещей на квадратный километр и ограниченную емкость элемента питания.

Группа: низкое энергопотребление и малое расстояние.

Данная группа включает множество технологий персональных сетей связи (PAN-Personal Area Network), таких как Z-Wave, IEEE 802.15.4, Bluetooth Low Energy (BLE), а также RFID, технологий ближней коммуникации NFC (Near Field Communication) и технологий со сверхширокой полосой пропускания UWB (Ultra-wide bandwidth) [7–9].

Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE) специфицируется на разработке стандартов, в том числе IEEE 802.15.4. Эта группа стандартов ориентирована на технологии передачи данных для беспроводных сенсорных сетей и, как следствие, для сетей связи ИВ. Стандарт разработан для устройств со сверхнизким энергопотреблением и описывает физический и канальный уровни по модели ISO/OSI. Технологии передачи данных, в которых используется данный стандарт, поддерживают устойчивую передачу с использованием спектрального расширения прямой последовательности и схемы модуляции O-QPSK (смещение квадратурной фазовой манипуляции), обеспечивающей скорость передачи данных до 250 кбит/с. На основе этой технологии могут быть развернуты различные топологии, что позволяет обеспечить большое покрытие для данной сети связи.

Модернизированная технология Bluetooth (начиная с версии 4.0) ориентирована для устройств Интернета вещей и предполагает низкое энергопотребление,

что отражено в наименовании BLE – Bluetooth Low Energy. Технология в основном используется для подключения носимой электроники к шлюзу для приложений мониторинга и управления умными устройствами. Сегодня технология BLE поддерживается в большинстве смартфонов и широко используется для мобильных приложений. Максимальная скорость передачи данных достигает 3 Мбит/с при использовании схемы модуляции GFSK (гауссовская частотно-сдвиговая манипуляция), расстояние передачи данных BLE составляет до 100 метров [42].

Технология ближней коммуникации NFC позволяет двум электронным устройствам осуществлять передачу данных в пределах 10 см. Технология работает в нелицензируемом диапазоне частот 13,56 МГц и обеспечивает скорость передачи данных от 106 до 424 кбит/с. В настоящее время технология NFC стала популярной для обеспечения мобильных платежей с использованием смартфонов, банковских карт, электронных проездных билетов.

Технология UWB использует широкую полосу пропускания (больше 500 МГц), поэтому она может обеспечить высокую скорость передачи данных, которая достигает 1 Гбит/с. Недостатком данной технологии является ограниченный радиус действия, который составляет менее 60 см. С такой высокой скоростью и таким небольшим расстоянием передачи данных UWB часто используется для приложений специального назначения в персональных сетях связи [32].

По результатам рассмотрения данной группы можно констатировать, что рассмотренные технологии предназначены для устройств со сверхнизким энергопотреблением, но ограничены очень малым расстоянием передачи данных.

Группа: низкое энергопотребление и большое расстояние.

Группа сетей такого типа имеет наименование энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия LPWAN (Low-Power Wide-Area Network). Такие сети появились в последнем десятилетии для удовлетворения требований по подключению устройств ИВ к сети. В данную группу включают такие технологии, как LoRa, Sigfox, Ingenu, Wiegthless-P, NB-Fi, XNB Open UNB, SNB, NB-IoT и др. За последние годы сети LPWAN стали новой парадигмой, в которой найден компромисс между дальностью связи и энергоэффективностью. Ожидается в развитии LPWAN,

что диапазон покрытия сети может достичь от нескольких до десятков километров, а срок службы батареи составит до десяти лет [14, 18, 56].

В соответствии с требованиями развития различных приложений ИВ были рассмотрены перечисленные группы сетей связи для разработки и внедрения услуг ИВ. В настоящее время фактическое количество устройств, которое необходимо подключить к сети, постоянно увеличивается. Тем не менее существуют ограничения, которые формируют для исследователей различные научные задачи по разработке новых протоколов передачи данных на базе существующей инфраструктуры с целью подключения большого количества устройств. Группе энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия уделяется большое внимание, так как именно они рассматриваются для обеспечения взаимодействия низкоорбитальной космической группировки с наземным сегментом для обеспечения повсеместного покрытия. Для удовлетворения предъявляемым требованиям в данной группе активно развиваются узкополосные беспроводные технологии для ИВ. В следующем параграфе будут рассмотрены предпосылки появления и развития таких сетей в области разработки приложений и услуг ИВ.

1.2 Перспективные энергоэффективные сети дальнего радиуса действия

По прогнозам IoT Analytics, LPWAN – это самая быстрорастущая технология подключения к Интернету вещей в ближайшие 5 лет. Согласно прогнозам, количество подключений LPWAN увеличится на 109% в год и к 2023 году должно превысить отметку в 1 млрд. подключенных устройств. В настоящее время рынок все еще находится на ранней стадии и характеризуется высокой степенью технологической фрагментации. В своем аналитическом отчете IoT Analytics проанализировали 16

технологий LPWAN и обнаружили, что в настоящее время доля трафика создаваемого устройствами в таких сетях не оказывает существенного влияния на структуру трафика в сетях связи общего пользования [76].

Цели энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия

Сети LPWAN появились, когда появилась насущная необходимость в разработке приложений ИВ с низким энергопотреблением и передачей данных с датчиков на большое расстояние [14]. В 2013 году возникла идея о создании глобальной сети, охватывающей до несколько десятков километров в сельской местности. Целью такой сети являлось обеспечение подключения большого количества датчиков и исполнительных устройств, расположенных на сельхоз угодьях. Согласно первоначальной задумке, такой тип сетей наиболее подходил именно для сельской местности ввиду отсутствия плотной застройки и возможности передачи данных в прямой видимости [94]. Однако для установления связи с устройствами необходимы шлюзы или базовые станции, которые позволяли бы подключить данные сети к Интернету. Таким образом, для ограничения эксплуатационных расходов операторов требуется наличие инфраструктуры сети доступа. Шлюз или базовая станция должны обслуживать большое количество узлов, распределенных на большой территории. Среди ограничений также стоит отметить, что увеличение радиуса покрытия не может быть получено путем увеличения мощности излучения, так как низкое энергопотребление очень важно для узлов ИВ.

Кроме того, для передачи данных в сетях LPWAN часто используются нелицензированные диапазоны частот, что позволяет еще больше снизить стоимость сети (поскольку стоимость использования лицензированных диапазонов частот может быть очень высокой). Ожидается, что данные сети будут предоставлять возможность обработки небольшого количества пакетов данных, поэтому сети нацелены на новые приложения [78, 87, 90, 107], такие как умные города, умные счетчики, логистика, мониторинг, домашняя автоматизация, безопасность и т.д.

Как ожидалось, что после появления первых узкополосных беспроводных технологий, LPWAN стал одной из самых быстрорастущих сетей в сфере ИВ для обеспечения повсеместного подключения в умных городах или сельских районах.

Все эти приложения прокладывают путь к новым рынкам и новым бизнес-приложениям. Кроме того, поскольку стоимость инфраструктуры достаточно низкая, постоянно появляются все новые более эффективные технологии, которые обеспечивают сервисы в различных городах и странах. Хорошо известны и популярны на рынке, а также в научных исследованиях технология LoRa от Semtech, технология UNB от Sigfox и технология RPMA от Ingenu.

В контексте развития LPWAN была сформулирована новая задача, которая сменилась от расширения скорости передачи данных к ожидаемому росту количества подключенных устройств, расположенных с высокой плотностью. Исследование и разработка узкополосных беспроводных сетей предполагает реализацию следующих требований:

- низкое энергопотребление: данные должны отправляться с наименьшей мощностью в небольшие временные интервалы;
- низкие затраты на устройства и инфраструктуру: количество базовых станций должно быть минимизировано, а устройства должны быть простыми, легкими и с малыми вычислительными возможностями;
- возможность обработки передачи пакетов малого размера;
- масштабируемость и способность взаимодействовать с очень большим количеством узлов;
- большой радиус покрытия сети.

Анализ технологий энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия

Для решения задачи увеличения радиуса покрытия сетей LPWAN возможно изменить настройки базовых станций для обеспечения не прямой связи с конечными устройствами [76]. Радиус покрытия базовой станции можно увеличить путем:

- увеличения мощности передачи конечных устройств, но такое решение не подходит из-за повышения энергопотребления;
- разработки сверхчувствительных и интеллектуальных приемников, но это увеличит стоимость базовой станции в несколько раз;

– разработки новых технологий передачи данных для сетей LPWAN. В последнее время это решение было принято операторами и научным сообществом. На практике были взяты два основных направления: расширение спектра и уменьшение спектра.

По первому направлению – расширение спектра – известны технологии LoRa и Inguenu. Данные отправляются в гораздо большей полосе частот, чем традиционно. Метод модуляции позволяет восстанавливать сигнал, даже если его приемная мощность ниже минимального уровня шума, потому что за счет внедрения механизмов кодирования возможно обеспечить исправление ошибок. Кроме того, каждый сеанс передачи данных может быть направлен с учетом различных методов расширения спектра, которые задаются в зависимости от заданных параметров. Это позволяет контролировать одновременную передачу данных на смежных каналах.

По направлению уменьшения спектра целесообразно рассмотреть технологии Sigfox UNB и NB-IoT. В перечисленных технологиях данные передаются с очень низкой скоростью при простой схеме модуляции, чтобы обеспечить минимальное использование спектра. Преимущество такого метода заключается в том, что воспринимаемый шум (после фильтрации сигнала) уменьшается, поскольку он линейно зависит от занятости спектра сигнала.

Оба направления решают вопрос увеличения дальности передачи различными способами. Sigfox UNB достигает этого благодаря очень узкой полосе пропускания, которая вызывает очень низкий уровень шума, в то время как LoRa достигает своей эффективности за счет применения кодирования.

В настоящее время технологии сети связи LPWAN включают большое разнообразие альтернатив, таких как узкополосные технологии ИВ (NB-IoT), долгосрочная эволюция для машинного взаимодействия LTE-M, LoRa с CSS, Sigfox с UNB, Inguenu и Weigthless с RPMA. Ниже рассмотрим отечественные и зарубежные технологии, которые являются характерными представителями сетей LPWAN.

А. Технология «СТРИЖ»

Технология «СТРИЖ» является собственной отечественной разработкой, основанной на компонентной базе российского производства. Решение «СТРИЖ»

для ИВ включает в себя все уровни модели OSI от физического до прикладного [23].

В основе технологии передачи данных лежит собственный узкополосный энергоэффективный радиопrotocol, оптимизированный для межмашинного обмена данными на больших расстояниях.

Одним из преимуществ данной технологии является то, что «СТРИЖ» не имеет определенной зависимости от конкретной аппаратной составляющей и использует чипы различных производителей, исходя из коммерческой целесообразности и применимости к конкретному решению. Также стоит отметить, что, имея собственное производство, «СТРИЖ» разрабатывает радиомодули, платформы, устройства, инфраструктуру и программное обеспечение самостоятельно. В свою очередь, это позволяет полностью контролировать процесс производства и оптимизировать стоимость на каждом этапе, для того чтобы конечная стоимость соответствовала реалиям отечественного рынка. Учитывая ограничения по частотному ресурсу в России, возрастающие потребности в беспроводных решениях и тренд на увеличение количества беспроводных устройств, «СТРИЖ» использовал узкополосный подход для модуляции сигнала на физическом уровне. «СТРИЖ» использует узкополосный сигнал, ширина полосы канала передающего устройства составляет 50 Гц, при минимальном битрейте в 50 бит/сек. Узкополосный сигнал в 50 Гц и высокая энергетика на каждый бит передаваемой информации обеспечивают хороший энергетический потенциал канала связи в 175 дБм и высокую помехоустойчивость. «СТРИЖ» в 500 кГц, имея ширину канала в 100 Гц, выделяет 5000 каналов для одновременной работы в заданном районе. Таким образом, 5000 устройств могут одновременно выходить в эфир без риска коллизий и потери сигнала [23].

Б. Технология LoRa

LoRa – это технология беспроводной связи, разработанная французской компанией Cyleo, а затем приобретенная корпорацией Semtech в 2012 году. LoRa использует нелицензированный диапазон частот ISM 868 МГц в Европе, 912 МГц в Америке и 433 МГц в Азии [92].

В 2015 г. был создан альянс LoRa, специализирующийся на развитии протокола канального уровня LoRaWAN, в основе которого на физическом уровне используется технология модуляции LoRa [65]. В существующих спецификациях данного протокола и соответствующих сетей описана поддержка топологии «звезда», что создает ряд недостатков в условиях плотной городской застройки.

В. Технология LTE-M/NB-IoT

Узкополосный ИВ NB-IoT является частью релиза 13 спецификации 3GPP, который был опубликован в середине 2016 года. Технология может поддерживаться только за счет обновления программного обеспечения поверх существующей инфраструктуры LTE. Сеть NB-IoT может быть развернута внутри одной несущей GSM 200 кГц, внутри одного блока физических ресурсов LTE 180 кГц или внутри защитной полосы LTE [6]. Таким образом, пропускная способность относительно узка по сравнению с GSM и LTE. NB-IoT использует множественный доступ с частотным разделением с одной несущей (FDMA) в восходящем канале связи и ортогональную FDMA в нисходящем канале связи. Скорость передачи данных ограничена 250 кбит/с по нисходящему каналу связи и 20 кбит/с по восходящему каналу связи [42].

Сотовые сети работают в лицензированном спектре и исторически ориентированы, прежде всего, на высококачественную передачу голоса и услугу передачи данных. Для устройств ИВ ключевыми аспектами являются стоимость радиомодулей и энергопотребление. Существующие сотовые сети, включая стандартный LTE, не отвечают требованиям для IoT-устройств, поэтому организация 3GPP, стандартизирующая мобильные технологии, разработала новые категории стандарта LTE [42]. Целью новых категорий 3GPP для IoT-устройств является снижение стоимости, увеличение зоны покрытия и времени автономной работы (возможность работать на одном комплекте элементов питания более 10 лет). Cat-0 был представлен в релизе 12 в качестве промежуточного шага к конкурентной спецификации LTE для приложений ИВ. В релизе 13 определены категория М (для ее обозначения также используются аббревиатуры eMTC и LTE-M) и технология NB-IoT, иногда ее называют категорией M2. LTE Cat-M – оптимизированная версия

для ИВ, где основным изменением является снижение полосы пропускания системы с 20 МГц до 1,4 МГц. Другим важным изменением является уменьшение мощности передачи до 20 дБм. Это сокращение устраняет необходимость во внешнем усилителе мощности и позволяет использовать одночиповое решение (радиомодуль и контроллер на одном чипе), что также снижает стоимость.

Одним из очевидных преимуществ применения LTE-M и NB-IoT для связи устройств ИВ является использование существующей инфраструктуры LTE. Согласно Глобальной ассоциации поставщиков мобильного оборудования (GSA), в настоящее время запущено 480 сетей LTE по всему миру. Сеть LTE-M предусматривает максимальную совместимость с инфраструктурой (подразумевается прямое подключение к существующим сотовым сетям без шлюза), уже имеющейся у операторов сотовой связи, и может быть развернута путем обновления программного обеспечения на существующих сетях LTE и GSM.

NB-IoT – это относительно новое направление развития решений для Интернета вещей в рамках 3GPP, хотя оно и предусматривает тесное взаимодействие и интеграцию с LTE. В данном случае предлагается использовать новый тип радиодоступа, характеристики которого существенно отличаются от характеристик имеющихся систем. Количество устройств, обслуживаемых одной базовой станцией, теоретически может достигать 50 тысяч. Как полагает ряд экспертов, переработка протоколов канального уровня в NB-IoT позволит значительно (до 90%) снизить стоимость соответствующих устройств NB-IoT по сравнению с устройствами, которые используют LTE категории M.

Недостатки этих сетей состоят в том, что для их функционирования необходим лицензируемый спектр частот, тарифы на передачу данных могут быть высокими для не требовательного к скоростям оборудования, стоимость устройств, работающих в стандарте LTE, остается выше, чем в сетях LPWAN и т.д. К преимуществам можно отнести использование инфраструктуры существующих мобильных операторов, поддержку роуминга, высокие скорости передачи данных для мультимедийного оборудования и устройств, которым необходимо функционировать в режиме реального времени.

Г. Технология Sigfox

SigFox – технология, разработанная французской компанией SIGFOX специально для приложений Интернета вещей. Самое большое распространение SigFox получила в Европе. Эта технология использует базовые станции, в которых применяется ультразвуковая полоса (UNB) частот с двоично-фазовой манипуляцией (BPSK), а для кодирования данных меняется фаза несущей радиоволны. Это позволяет уменьшить уровень шума на принимающей стороне, следовательно, сделать принимающие устройства более дешевыми [14, 96]. Сеть SigFox состоит из следующих элементов: устройства ИВ, базовой станции (шлюза), облачного сервера (вычислительные ресурсы, сервера, хранилища данных).

Концепция технологии SigFox подразумевает, что все устройства подключены к облачному серверу SigFox (альтернативные подключения невозможны по условиям договора). Таким образом, обмен данными имеет следующий вид:

- при помощи радиосигналов устройство передает данные на базовую станцию, расположенную в непосредственной близости от самого устройства;
- базовая станция проверяет целостность сообщения, осуществляет демодуляцию и передает его в облако;
- облако аутентифицирует отправителя и определяет получателя на основе уникального в пределах сети идентификатора (в качестве получателя могут выступать различные сервера клиентов, приложения ИВ и так далее). Аналогичным образом осуществляется двухсторонняя связь.

Существующий стандарт SigFox подразумевает использование полосы 100 Гц на канал и поддержку скорости передачи данных менее 0,1 кбит/с. Также SigFox определяет максимальное количество сообщений от базовой станции до конечного устройства в день – 140 сообщений. При этом каждое сообщение должно быть размером не более 12 байт (исключая служебную информацию). Количество сообщений, исходящих от конечного устройства, – 4 сообщения в день с полезной нагрузкой 8 байт. При этом пропускная способность технологии – 200 кГц [96].

В SigFox узлы могут использоваться в двух конфигурациях:

- режим P2P – прямой связи между узлами (интерфейс LAN);
- гибридный режим – SigFox/P2P (P2P + шлюз в сети SigFox).

В режиме P2P узлы могут подключаться непосредственно друг к другу и сразу отправлять сообщения, при этом отправка будет бесплатная, так как передача данных происходит без транзитного канала, т.е. внутри сети.

В гибридном режиме используется сочетание SigFox и P2P режимов, позволяющих отправлять только определенные сообщения через сеть. В этом случае используется один узел в качестве шлюза сети (режим P2P + Sigfox), а остальные узлы находятся в режиме P2P.

Технология SigFox подходит для приложений, которым необходимо отправлять небольшой объем данных. Системы сигнализации, мониторинг местоположения являются примерами односторонних систем, которые могут использовать SigFox. В приложениях такого типа сигнал для передачи сообщения обычно отправляется несколько раз в сутки. У данного способа есть некоторые ограничения, такие как сокращение времени автономной работы, а также невозможность гарантировать, что сообщение фактически получено адресатом. На данный момент SigFox не поддерживает организацию двунаправленного соединения, однако производители работают над этим.

Д. Технология Weightless

Weightless – это открытый стандарт LPWAN от Weightless SIG (Special Interest Group) [109]. В настоящее время опубликованы три стандарта подключения:

Weightless-P – для восходящего и частично нисходящего канала связи;

Weightless-W – для работы в частотах телевизионного диапазона;

Weightless-N – только для восходящего канала связи, но с широкой зоной покрытия.

Weightless-N поддерживает низкое энергопотребление. Weightless-N идеально подходит для сенсорных сетей при реализации прикладных решений, связанных со снятием показаний температуры, контролем уровня жидкости в резервуарах, измерением динамических показателей и др.

Weightless-P – это узкополосная технология LPWAN для решений ИВ, предполагающая высокую плотность размещения конечных устройств, долгосрочную работу от батареи и двунаправленную связь. Особенности этой технологии являются масштабируемость, оптимизация восходящей и нисходящей линии связи, широкая зона покрытия, длительный срок службы от батареи и повышенный уровень безопасности. Weightless-P использует узкий диапазон групп модуляций, предлагая реализацию двунаправленной линии связи для того, чтобы обеспечить высокое качество обслуживания (QoS).

Weightless-P является наиболее масштабируемой субгигагерцовой технологией LPWAN. Одна базовая станция Weightless-P поддерживает больше устройств, чем любая другая технологии LPWAN в субгигагерцовом диапазоне. Высокая емкость базовых станций минимизирует затраты на развертывание.

Можно выделить десять основных характеристик Weightless-P:

- узкополосная технология (12,5 кГц для ширины канала);
- спектрально-эффективная модуляция;
- работает по всему диапазону лицензионных полос частот (освобожденных от субгигагерцовых ISM);
- поддержка роуминга;
- адаптивная скорость от 200 до 100 кбит/с.

Ресурсы в субгигагерцовом нелицензируемом спектре ограничены, и трафик от других технологий неуклонно растет. Поэтому Weightless-P использует узкополосные 12,5 кГц каналы, что позволяет передавать больше данных, чем способны передавать другие технологии, работающие в этом спектре.

Кроме того, Weightless-P поддерживает TDMA (Time Division Multiple Access, TDMA) и FDMA (Frequency Division Multiple Access), то есть является синхронной технологией (каждое устройство и базовая станция точно знает, когда передавать, а когда принимать данные). Множественный доступ с временным разделением каналов представляет собой метод доступа к каналу для локальных сетей

средних размеров. Это позволяет нескольким пользователям совместно использовать один и тот же частотный канал путем использования различных временных интервалов для передачи своих данных. Множественный доступ с частотным разделением каналов – это еще один способ доступа к каналу, где пользователям предоставляется индивидуальный частотный диапазон и координируется доступ нескольких пользователей. После отправки конечным узлом данных, базовая станция Weightless-P сообщает каждому устройству точное время и канал для использования для того, чтобы избежать коллизий и обеспечить успешную доставку важных данных.

Метод адаптивной скорости передачи данных обеспечивает оптимальную производительность сети и увеличивает срок службы батарей конечных устройств, т.к. он регулирует фактическую скорость передачи данных в зависимости от расстояния от каждого узла до базовой станции. Чем ближе к базовой станции оконечные узлы, тем доступна более высокая скорость передачи данных. Это приводит к более короткому эфирному времени и более низкой выходной мощности. С другой стороны, узлы, которые наиболее удалены от базовой станции, используют самую низкую скорость передачи данных и самую высокую выходную мощность.

Weightless-P поддерживает AES-128/256 шифрование и аутентификацию, как терминала, так и сети. Он обеспечивает прямое исправление ошибок (FEC), автоматический запрос повторной передачи (ARQ), адаптивное кодирование каналов (ACC), роуминг и повторный выбор соты. В случае с двунаправленным каналом связи осуществляется поддержка обновления прошивки и ключа безопасности.

Технология активно используется в смарт-измерениях, системах слежения, диагностике и модернизация транспортных средств, мониторинге состояния здоровья, считывании показателей датчиков и умных приборов, смарт-инфраструктуре электронных платежей и др.

Е. Сравнение сетей

Рассмотрев существующие и перспективные радиотехнологии для реализации приложений Интернета вещей, невозможно выбрать одну или даже две луч-

шие. Каждая технология имеет право быть использованной в различных приложениях, и выбор конкретной технологии напрямую зависит от требований конкретного приложения. Для сравнения данных технологий необходимо учитывать следующие параметры:

- объем данных: необходимо понимание того, как часто будут передаваться данные и какая пропускная способность канала передачи данных для этого потребуется;
- энергоэффективность: необходимо определить, возможна ли работа от стационарного питания или необходима поддержка полной автономности устройств, которые должны будут работать длительное время;
- масштабируемость: в сети должны параллельно работать миллионы различных устройств, масштабирование сети не должно вызывать дополнительных сложностей;
- глобальность: требуется обеспечить широкий территориальный охват и, как следствие, передачу информации на большие расстояния;
- проникающая способность: устройства, располагающиеся в подвалах, шахтах и т.д., должны иметь возможность передавать сигнал наружу с учетом железобетонных конструкций на пути;
- стоимость устройств: устройства должны быть дешевы и доступны для рядового потребителя, а готовые решения должны быть рентабельны для бизнеса;
- простота: принцип «поставил и забыл» – пользователь всегда выбирает наиболее простые и понятные в эксплуатации, а также надежные устройства;
- безопасность: должна быть учтена возможность подключения устройств, участвующих в работе критически важных приложений.

Узкополосные беспроводные сети связи SigFox, NB-IoT, LTE-M, Weightless-R, «Стриж» могут быть применены для любого практического приложения Интернета вещей. Технология SigFox является отличным решением для большинства приложений Интернета вещей, которым не требуется обмен большим

количеством данных. Однако существенным недостатком SigFox является отсутствие сетевой инфраструктуры в различных городах России. Наибольшим преимуществом Weightless-P является построение ее на основе инфраструктуры существующих сотовых сетей; синхронная сеть обеспечивает высокую вероятность успешной доставки данных с первой попытки. Технологии, построенные на базе существующих сотовых сетей, – это будущее для всех приложений, требующих высокую скорость передачи данных, но не критичных к сроку службы от аккумуляторов. Такими технологиями являются NB-IoT, LTE-M. Однако сети 5G/IMT-2020 предполагают дополнительное строительство сетевой инфраструктуры, вытекающее из особенностей новой технологии. Именно из-за этих особенностей сети 5G/IMT-2020 являются наиболее перспективными на сегодняшний день. Преимущество LTE-M и NB-IoT над этими решениями заключается в том, что они могут использовать существующую сетевую инфраструктуру. Действительно, поставщики базовых станций утверждают, что для внедрения технологий LTE-M и NB-IoT потребуется только обновление программного обеспечения для поддержки последних релизов стандартов. В этой связи стоимость развертывания сети является крайне низкой.

В большинстве существующих сетей, о которых шла речь выше, используется топология «звезда» для организации взаимосвязи устройств с базовой станцией или шлюзом. Это ставит вопрос о возможности построения самоорганизующихся узкополосных беспроводных сетей связи ИВ, что позволит расширить радиус покрытия сети без подключения дополнительных базовых станций. Именно данному направлению исследования просвещена настоящая диссертация.

1.3 Анализ существующих технологий ячеистых сетей

В настоящее время получили широкое применение несколько технологий ячеистых сетей для различных приложений. Ниже рассмотрены наиболее популярные конкурирующие технологии и протоколы (Wi-Fi, Bluetooth, Thread, ZigBee и Z-Wave) для сетей разного масштаба PAN, WLAN и др. Каждый протокол имеет различные технические характеристики, преимущества и область применения. Рассмотрим особенности каждого из них.

Стандарт IEEE 802.11s. Этот стандарт был разработан как расширение топологии ячеистой сети для традиционных сетей Wi-Fi, функционирующих по стандарту IEEE 802.11 [1]. Изначальная идея использования таких сетей заключалась в расширении зоны покрытия сети Wi-Fi. Хотя спецификация допускает участие в сети любых типов ячеистых станций (Mesh STA), но согласно спецификации не предусмотрено никаких специфических условий для приложений ИВ, связанных с низким энергопотреблением. Спецификация IEEE 802.11s включает реализацию протокола маршрутизации HWMP. Кроме того, узел может быть членом либо традиционной сети Wi-Fi, либо ячеистой сети, но не обеих одновременно. Это характерно для случаев, когда ячеистые сети IEEE 802.11s используются в качестве устройств-ретрансляторов для доставки трафика на базе технологии Wi-Fi, а не для подключения конечных пользователей на уровне доступа. Таким образом, ячеистые сети IEEE 802.11s более актуальны как транспортные сети и не подходят для подключения устройств ИВ.

Bluetooth. Как было отмечено ранее, это один из основных сетевых протоколов ИВ и рассматривается как протокол беспроводной связи на короткие расстояния с поддержкой режима низкого энергопотребления. В настоящее время спецификации Bluetooth активно обновляются. Наиболее актуальные версии BLE – версии 5.x, в которых реализована поддержка ячеистой топологии построения сети

[110]. Ячеистая сеть BLE Mesh имеет довольно низкую пропускную способность и относительно высокую задержку для устройств с низким энергопотреблением.

Предлагаемая сеть применяется для приложений ИВ с целью передачи небольшого объема данных от датчиков или носимой электроники (часы, браслеты и т.д.) [40, 69]. Хотя пропускная способность между двумя узлами теоретически может достигать 3 Мбит/с, ячеистая топология и базовая спецификация значительно ограничивают полосу пропускания, доступную для одного узла. Кроме того, расстояние связи между узлами составляет до 100 м, поэтому BLE Mesh подходит для приложений ИВ с малой зоной покрытия. Маршрутизация в сети BLE Mesh основывается на базе алгоритма широковещательной рассылки (flooding). Таким образом, все узлы с функцией ретрансляции будут ретранслировать сообщения другим узлам в пределах досягаемости. Затем принимающие узлы снова ретранслируют сообщение, если они не получили его ранее или не закончилось время жизни сообщения (TTL). Это приводит к широковещательным штормам, когда по сети рассылается служебная информация, приводящая к деградации самой сети при большом количестве подключенных устройств.

Thread. Один из наиболее широко поддерживаемых сетевых протоколов. Протокол Thread был разработан компанией Nest, которую позже приобрела корпорация Google. Помимо Google, на сегодняшний день несколько крупных компаний активно участвует в разработке протокола Thread. Протокол является открытым сетевым протоколом, он основан на спецификации IPv6 и широко использует другие стандартные протоколы IEEE 802.15.4 для подключения на физическом и канальном уровнях модели ISO/OSI и 6LoWPAN для маршрутизации через IP-сеть [50, 105].

ZigBee. Данный протокол первоначально разработан вместе со стандартом IEEE 802.15.4. Первая публикация стандарта «Спецификация ZigBee 2004» была представлена в 2005 г. На текущий момент было представлено несколько новых релизов версий протокола Zigbee. Текущая спецификация Zigbee 3.0 основана на всех предыдущих и включает поддержку IP-адресации. Протокол Zigbee использует стандарт IEEE 802.15.4 для физического и канального уровней модели ISO/OSI

и профили Zigbee PRO для верхних уровней модели ISO/OSI для управления маршрутизацией и сетью. Метод маршрутизации основан на известном протоколе AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) [39].

Z-Wave. Один из наиболее распространенных протоколов беспроводных ячеистых сетей, принадлежащий компании Silicon Labs. Развитие протокола осуществляет альянс Z-Wave, который управляет сертификацией и лицензиями. Сетевой стек Z-Wave похож на другие аналогичные протоколы, однако существуют различия в отдельных уровнях. На физическом и канальном уровнях модели ISO/OSI Z-Wave используется канал связи согласно Рекомендации ITU-T G.9959. Разница состоит в том, что в сетях Z-Wave используются диапазоны ISM ниже ГГц, поэтому дальность ПД может быть больше по сравнению с другими протоколами. Для сетей на базе Z-Wave скорость ПД составляет 100/40 кбит/с в США и 100/20 кбит/с в Европе и других странах. Данный протокол использует маршрутизации сообщений от источника для организации ячеистой топологии сети. В сети существует минимально один основной контроллер или дополнительные вторичные контроллеры, имеющие функционал управления маршрутизацией и безопасностью [105].

Сравнение некоторых характеристик для рассматриваемых технологий и протоколов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение существующих технологий и протоколов ячеистых сетей

Характеристики	IEEE 802.11s	BLE Mesh	Z-Wave	ZigBee, Thread (IEEE 802.15.4)
Диапазон	< 100 м	< 50 м	< 50 м	< 100 м
Пропускная способность	54 Мбит/с – 1,3 Гбит/с	125 кбит/с – 2 Мбит/с	10–100 кбит/с	20–250 кбит/с
Энергопотребление	Высокое	Низкое	Низкое	Низкое
Топология	Ячеистая	Ячеистая	Ячеистая	Ячеистая

Как видно из таблицы, используя Zigbee, BLE или Z-Wave, два устройства могут обмениваться данными на небольшом расстоянии. В отличие от этих технологий, другие технологии, рассмотренные ранее, такие как LoRa или Sigfox, обеспечивают связь на большие расстояния для устройств ИВ [93, 96]. Кроме этого, существует разница в перечисленных технологиях для построения топологии сети: «звезда», «многопрыжковая» или «ячеистая». Ячеистая или многопрыжковая топология являются альтернативными решениями в беспроводных сенсорных сетях для расширения покрытия сети без необходимости использования дополнительных шлюзов, поэтому целесообразно рассмотреть подходы к адаптации данной топологии для энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия [51, 80].

1.4 Обоснование необходимости использования ячеистой топологии в энергоэффективных сетях дальнего радиуса действия

За последние 10 лет появились новые технологии с большим радиусом действия и с низким энергопотреблением, что привело к быстрому развитию приложений Интернета вещей. Например, данные датчика могут передаваться на большие расстояния с эффективным энергопотреблением с использованием технологии LoRa [56, 29]. Однако при такой большой дальности передачи данных достижение обширного покрытия со звездообразной топологии все еще затруднено, если шлюз или базовая станция установлены в условиях плотной городской застройки. Данная проблема может быть решена путем установки большого количества шлюзов. С другой стороны, для обеспечения надежной связи по-прежнему необходима ретрансляционная сеть с множеством ретрансляторов, которую может обеспечить ячеистая топология сети.

В книге «Беспроводные ячеистые сети» [34] авторы описывают беспроводную ячеистую сеть (WMN), состоящую из нескольких узлов с радиointерфейсом,

организованных по ячеистой топологии. В беспроводной ячеистой сети узлы могут обмениваться данными между собой через другие узлы, в отличие от звездной топологии сети, где устройства взаимодействуют через центральный концентратор. Для организации беспроводной ячеистой сети может использоваться любая беспроводная технология, поддерживающая многоадресное соединение.

Большинство технологий ячеистых сетей были разработаны на основе технологии ПД малой дальности (персональные сети). С другой стороны, существуют приложения ИВ, которые требуют передавать данные на большие расстояния. Сеть связи на основе технологии LoRa с поддержкой ячеистой топологии позволяет реализовать переадресацию данных между узлами к узлу получателю. С применением технологии LoRa в качестве физического уровня можно реализовать энергоэффективную ячеистую сеть дальнего радиуса действия [30, 79, 85].

При внедрении технологий умных городов (УГ) возникает ряд проблем, связанных с обеспечением связности конечных узлов данной системы. Одной из основных проблем является обеспечение высокой дальности передачи данных в городских условиях. Современные сети мобильной связи плохо подходят для задач передачи малых объемов данных от низкопроизводительных вычислительных устройств с подключенными к ним датчиками/исполнительными устройствами вследствие высокого уровня потребления модулей мобильной связи и большого объема служебного трафика, передаваемого по данным сетям. Для подключения такого типа устройств к сетевой инфраструктуре УГ используются энергоэффективные сети с дальним радиусом действия [78, 91]. Дальность передачи данных в сетях LPWAN варьируется от 1 до 10 км в городских условиях, в зависимости от мощности приемопередатчика и типа питания конечного узла. Согласно характеристикам типовой базовой станции LPWAN, в каждой подсети может функционировать до 50 тыс. конечных устройств, одновременно передающих данные концентратору со скоростью от 0,3 до 37,5 Кбит/с [65, 70, 102]. Приведенные технические характеристики позволяют реализовать на базе данных систем сеть с высокой плотностью размещения КУ.

Как отмечалось ранее, в большинстве случаев системы LPWAN реализуются на базе звездной топологии [65]. Тем не менее в случаях, когда невозможно обеспечить гарантированно качественную связь КУ с базовой станцией, целесообразно использовать другую распространенную сетевую топологию – ячеистую. Данная топология позволяет организовать сетевое соединение не только между КУ и базовой станцией, но и КУ между собой. Данное решение теоретически позволяет увеличить количество устройств в сети на одну базовую станцию и увеличивает надежность передачи данных в сети вследствие наличия множества маршрутов доставки данных до цели назначения [80].

В большинстве случаев КУ передают данные устройствам, находящимся за пределами локальной сети LPWAN. Для решения данных задач используются устройства, называемые шлюзами LPWAN, необходимыми для обеспечения взаимодействия КУ и устройств, расположенных во внешней сети. В большинстве существующих систем функции шлюза и концентратора объединены в одно устройство – базовую станцию, а обработка данных производится на удаленных серверах. Данная структура сети является приемлемой в том случае, если к данной системе не предъявляются строгие требования к времени реакции системы, которые достигаются с помощью сокращения времени доставки и обработки данных. Данная проблема наиболее часто решается с помощью двух подходов: организации локального граничного или туманного сервера в локальной сети или с помощью расширения функциональности шлюза сети LPWAN. Шлюз с расширенной функциональностью называется гетерогенным шлюзом (ГШ) [59, 60]. Данный шлюз позволяет динамически, в зависимости от требований, добавлять новое программное обеспечение для обработки данных от КУ в пределах локальной сети.

Следовательно, при правильной организации энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия может быть расширена зона обслуживания сети. Добавление узлов может рассматриваться как присоединение новой сети к существующей сети, где соединяющиеся узлы становятся транзитными узлами.

1.5 Постановка задачи исследования

Таким образом, в соответствии с поставленной целью в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия;
- провести анализ беспроводных ячеистых сетей и протоколов маршрутизации для них;
- разработать модель фрагмента энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия с учетом особенностей инфраструктуры умных городов;
- разработать методы маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия на основе оценки комплексного показателя качества соединения и машинного обучения с подкреплением;
- разработать метод передачи мультимедийного трафика в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия.

1.6 Выводы по главе

1. В данной главе были проанализированы беспроводные технологии передачи данных для приложений Интернета вещей. В том числе были рассмотрены перспективы развития энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия, которые используются для обеспечения передачи данных от устройств Интернета вещей на большие расстояния и при малом энергопотреблении.

2. В рамках главы проведен анализ развития беспроводных сенсорных сетей и ограничения энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия. Сделан вывод

о необходимости реализации ячеистой топологии для эффективной передачи данных в умных городах в условиях плотной городской застройки. Такая реализация позволит увеличить радиус зоны обслуживания узлов в сети и надежность обмена данными для устройств Интернета вещей.

3. Поставлены задачи, которые необходимо решить в рамках диссертационной работы, среди которых основной является разработка моделей и методов маршрутизации для энергоэффективных ячеистых сетей дальнего радиуса действия, а также разработка метода передачи изображений на базе такой сети.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ ЯЧЕИСТЫХ СЕТЯХ

2.1 Анализ международных исследований по маршрутизации в беспроводных ячеистых сетях

Проектирование и разработка протоколов маршрутизации в беспроводных ячеистых сетях являются важной задачей при передаче данных между узлами сети.

Как правило, маршрутизация базируется на определенных параметрах, которые в целом связаны с производительностью сети, например, минимальное количество переходов, наличие ошибок в канале передаче данных, сетевые задержки в каналах связи и другие. В сетях с ячеистой топологией маршрутизация представляется одной из ключевых функций для организации эффективной передачи данных между узлами сети. Эффективная маршрутизация в ячеистых сетях позволяет организовать взаимодействие нескольких десятков тысяч устройств без возникновения коллизий.

Типично протоколы маршрутизации делятся на три типа в зависимости от информации о топологии сети, используемой для построения маршрутов: проактивный, реактивный и гибридный.

Существует большое количество исследований, посвященных разработке эффективной маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях с ячеистой топологией. В [41, 44] авторы констатируют, что протокол AODV показал лучшую производительность, чем другие протоколы маршрутизации (DSR, DSDV) с увеличением количества узлов для всех показателей производительности (сквозная задержка, избыточность при маршрутизации, количество полученных пакетов, коэффициент доставки пакетов, количество отброшенных пакетов). В [97] авторы отметили, что протокол DSR показывает хорошую производительность при быстрой передаче

данных, но имеет высокую долю потерянных пакетов. В [63] авторы доказали, что протокол AODV более эффективен с точки зрения джиттера и сквозной задержки по сравнению с DYMO (протокол динамической маршрутизации по требованию MANET), DSR, OSLR, ZRP.

В [68] Макодиа и соавт. пришли к выводу, что протокол AODV рекомендуется для защищенной связи. Кроме того, отмечается, что AODV также обеспечивает стабильное значение средней пропускной способности [104].

В дополнение к этим оценкам можно отметить, что благодаря своим характеристикам протокол OSLR хорошо подходит для больших и высокоплотных сетей со случайным трафиком. Однако для развертывания таких сетей необходимо несколько шлюзов, чтобы обеспечить большую территорию в сети LoRa. Также стоит отметить, что при анализе протоколов маршрутизации не будет делаться упор на выбор узлов ретрансляторов и обновление информации о топологии согласно [66].

Несмотря на то, что протокол DSDV менее требователен к ресурсам управления, чем протокол OLSR [7], при использовании статических узлов не требуются непрерывные обновления, как в типовых сценариях развертывания сетей LoRa ввиду того, что расположение узлов остается неизменным.

Поскольку реактивные протоколы требуют рассылки служебной информации о топологии только при изменении маршрутов или необходимости создания нового маршрута, они позволяют снизить накладные расходы на управление и, следовательно, затраты на потребляемую энергию по сравнению с проактивными протоколами [74].

2.2 Реактивные протоколы маршрутизации

Реактивные протоколы маршрутизации характеризуются тем, что они строят маршруты к другим узлам только тогда, когда они необходимы. Процесс поиска и

построения маршрута выполняется, когда узел хочет установить связь с другим узлом, о котором у него нет информации о возможных маршрутах в таблице маршрутизации [44, 63]. Такие протоколы отличаются от проактивных протоколов тем, что маршрут между двумя узлами определяется только по запросам передачи данных. Кроме того, время хранения информации о маршруте в памяти ограничено, поэтому дополнительно требуется ожидание для поиска маршрута, в случае если ранее это время истекло. Примерами таких протоколов являются AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) и DSR (Dynamic Source Routing).

Протокол динамической векторной дистанционной маршрутизации по требованию AODV является протоколом маршрутизации по требованию, поскольку маршрут к пункту назначения определяется только тогда, когда узел хочет отправить данные в этот пункт назначения [37, 64]. В данном случае узел-отправитель передает соседним узлам запрос RREQ (Route Request) для получения информации о маршруте. Соседние узлы рассылают запрос своим соседям, пока запрос не достигнет промежуточного узла, у которого есть необходимая информация о маршруте к месту назначения, или пока запрос не достигнет узла назначения.

Если соседние узлы получили пакет с запросом, то дальнейшие приходящие пакеты отбрасываются. Более того, порядковый номер фиксируется в поле пакета запроса для гарантии того, что маршруты свободны от петель и что ответы промежуточного узла на запросы маршрута являются самыми последними. Для построения обратного пути ответа на запросы к узлу отправителю записывается тот узел, от которого запрос был получен первым. Когда ответный пакет с маршрутом возвращается к узлу отправителю, узлы на пути записывают данный маршрут в свои таблицы маршрутизации. В случае когда узлы перемещаются, узлы-отправители могут повторно инициировать отправление запроса о маршруте к узлу назначения. Если один из промежуточных узлов перемещается, то соседние узлы, находящиеся рядом, формируют уведомление об отказе предоставления канала и отправляют уведомление своим соседям в восходящем направлении и так далее, пока он не достигнет узла назначения. В случае если мобильность узлов увеличивается, запросы для формирования таблиц маршрутизации также увеличиваются.

Протокол динамической маршрутизации от источника DSR – это протокол маршрутизации, предложенный специально для использования в многозвенных мобильных одноранговых сетях. Для данного протокола имеется две фазы для обнаружения и обслуживания маршрута, т.е. данные две фазы помогают узлам находить и сохранять лучшие исходные маршруты к пункту назначения. Исходная маршрутизация – это маршрутизация без петель, при которой промежуточные узлы не нуждаются в какой-либо актуальной маршрутной информации, позволяя узлам кэшировать маршрутную информацию для будущего использования [46]. Каждый узел контролирует содержание пакетов для получения информации о маршруте от источника и пересылает его на основе этой информации. Если информация о маршрутизации не найдена в пакете, он предоставит исходный маршрут. Когда пункт назначения неизвестен, узел кэширует пакет и находит информацию о маршруте до пункта назначения, отправляя запросы маршрута всем ближайшим узлам. Затем он отправляет Route-Replies обратно источнику [47].

2.3 Проактивные протоколы маршрутизации

Для проактивных протоколов маршрутизации характерно, что информация об изменении топологии периодически рассылается между всеми узлами сети [44]. На основании этой служебной информации формируется предварительная таблица маршрутизации для каждого узла. Следовательно, протокол упреждающей маршрутизации не позволяет обнаруживать маршруты, поскольку маршрут назначения сохраняется и поддерживается в таблице. Таблицы маршрутизации необходимо периодически обновлять. Проактивные протоколы используются там, где часто возникают требования к маршрутам. Однако недостатком этих протоколов является то, что они обеспечивают большое время сходимости для различных приложений [74]. В качестве примеров проактивных протоколов можно привести некоторые

протоколы, такие как DSDV (Destination Sequenced Distance Vector), OLSR (Optimized Link State Routing).

Протокол маршрутизации с последовательным вектором расстояния DSDV был основан на распределенном алгоритме Беллмана-Форда [89]. По данному протоколу каждый маршрут помечен порядковым номером, который исходит от пункта назначения, что указывает на так называемый возраст маршрута [103]. Порядковый номер используется, чтобы отличать устаревшие маршруты от новых и, таким образом, избежать образования петель. Узлы периодически передают свои таблицы маршрутизации своим ближайшим соседям. Узлы также передают свою таблицу маршрутизации, если в ней произошло значительное изменение по сравнению с последним отправленным обновлением. Таким образом, обновление происходит как по времени, так и по событиям. Чтобы избежать колебаний в обновлениях маршрута, протокол DSDV использует данные «времени установления», которые используются для прогнозирования времени, когда маршрут станет стабильным. Информация о разрыве того или иного маршрута может быть обнаружена, если никакие широковещательные пакеты не были получены в течение некоторого времени от бывшего соседнего узла. Все узлы пытаются найти возможные пути к узлам назначения и подсчитать количество переходов к каждому пункту назначения, а затем сохранить их в своих таблицах маршрутизации. Широковещательные сообщения о новом маршруте содержат адрес пункта назначения, количество переходов для достижения пункта назначения, порядковый номер полученной информации о пункте назначения, а также новый уникальный порядковый номер для широковещательной передачи нового маршрута [103].

2.4 Гибридные протоколы маршрутизации

Гибридная маршрутизация появилась на стыке проактивных и реактивных с целью уменьшения накладных расходов на процесс маршрутизации и, как следствие, уменьшения задержки передачи данных. Преимуществами данных протоколов являются более высокая эффективность и масштабируемость. Однако явным недостатком является высокая задержка при обнаружении новых маршрутов [38]. Примером является протокол зональной маршрутизации ZRP (Zone Routing Protocol).

Протокол ZRP сочетает в себе преимущества как проактивных, так и реактивных протоколов. Для обнаружения маршрутов реактивные протоколы маршрутизации имеют длительную задержку при запросе маршрута и неэффективное распределение пакетов, в то время как проактивные протоколы маршрутизации используют избыточную пропускную способность для передачи служебной информации о маршрутах. Протокол ZRP используется для решения данных проблем, сочетая преимущества проактивных и реактивных протоколов. При использовании протокола ZRP сеть фактически разделяется на несколько локальных зон узлов, где внутри зоны используется проактивный протокол маршрутизации, а между зонами используется протокол реактивной маршрутизации.

2.5 Выводы по главе

1. В ячеистых сетях процесс маршрутизации является одной из основополагающих и сложных задач для обеспечения гарантированной передачи данных от узла отправителя к узлу получателя с минимальным временем сходимости сети в случае разрыва того или иного маршрута. Проанализированы различные типы

маршрутизации, а также описаны различные способы выбора маршрута в зависимости от соответствующей метрики. Метрика маршрутизации является элементом для оптимизации построения маршрута в беспроводной ячеистой сети.

2. Построение маршрутов может быть проактивным или реактивным, что соответствует типам протокола маршрутизации. По результатам анализа показано, что проактивные протоколы для построения таблицы маршрутизации должны собирать всю информацию о состоянии маршрутов в сети для нахождения маршрутов между узлами, в то время как реактивные протоколы маршрутизации для нахождения маршрутов осуществляют опрос соседних узлов в случае необходимости. Для выбора оптимального маршрута используется метрика минимального количества ретрансляторов (промежуточных узлов).

3. Кроме того, необходимо учитывать другие параметры качества обслуживания, такие как сетевая задержка и потери при передаче данных. Это особенно важно при рассмотрении энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия, которые могут быть развернуты для приложений Интернета вещей, в том числе в умных городах с плотной застройкой и сложной помеховой обстановкой. Учитывая эти ограничения, для энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия с топологией «звезда» целесообразно рассмотреть возможность использования альтернативных способов маршрутизации для организации взаимодействия узлов с заданным качеством обслуживания.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЯЧЕИСТЫХ СЕТЯХ ДАЛЬНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ

3.1 Гибридные ячеистые сети как элемент сетевой инфраструктуры для устройств Интернета вещей в умных городах

В настоящее время результатом повсеместного внедрения концепции Интернета вещей, а также информационных технологий в промышленность стало развитие четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) [18, 21, 111]. Как известно, приложения Интернета вещей разрабатываются в различных областях, обеспечивая не только возможность дистанционного мониторинга, но удаленного управления различным оборудованием [16, 20]. Результатом сбора информации от различных устройств являются массивы больших данных, которые позволяют предоставлять пользователям дополнительные сервисы [54, 57]. С учетом развития умных городов во всем мире, как одного из приложений ИВ, сформулированы требования для технологий передачи данных: большая зона покрытия, бесшовная связь между зонами, простое подключение и обмен данными между устройствами [35]. На основе анализа технологий (см. главу 1) можно сделать вывод, что наибольшее распространение в умных городах получили технологии и протоколы ZigBee, Bluetooth Low Energy (BLE), LoRa, Sigfox или Z-Wave. Общие характеристики данных сетей: низкое энергопотребление и низкая скорость передачи данных.

При внедрении различных технологий передачи данных в городскую инфраструктуру возникают проблемы с обеспечением гарантированной связности конечных точек системы. В данном параграфе представлена концепция гибридной беспроводной ячеистой сети для умных городов. Результат реализации такой сети –

энергоэффективные сети дальнего радиуса действия осуществляют передачу данных между сетями ближнего действия через ячеистую или многозвездную топологию.

Согласно рекомендации ITU-T Y.4903/L.1603, в умных городах необходимо обеспечить сеть доступа с полным покрытием для предоставления различных сервисов, упрощающих жизнь горожан [2]. Однако в данной рекомендации не описаны конкретные технологии широкополосного и узкополосного доступа в Интернет. У каждой технологии есть свои особенности, преимущества и недостатки. Однако ни одна технология не может претендовать на универсальность для всех приложений ИВ, поскольку для разных приложений существуют разные требования. Ввиду того, что наибольшее число устройств Интернета вещей представлено в виде автономных модулей с батарейным питанием, целесообразно рассмотреть технологии и архитектуру сети, ориентированные на данный тип устройств.

Таким образом, возникает идея организации ячеистой или многоскачковой связи для устройств ИВ, работающих в городской среде.

Обычно датчики и исполнительные механизмы подключаются к сети Интернет через шлюз. Конечные узлы (датчики, исполнительные механизмы) – это маломощные устройства на базе контроллера, взаимодействующие с датчиками и/или исполнительными механизмами [78, 83, 84]. Гибридная сеть может использоваться в системе умного города, как показано на рисунке 1.

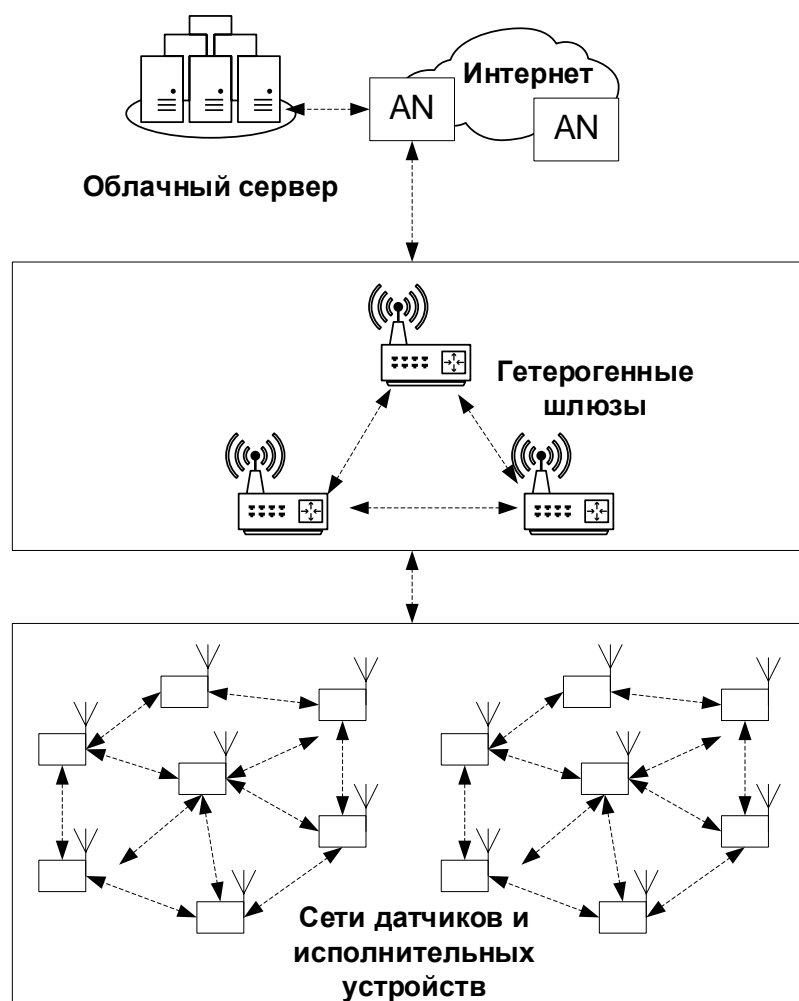


Рисунок 1 – Гибридные сети в системе умного города

Первый уровень представляет собой сети беспроводных датчиков и исполнительных механизмов, которые функционируют в виде автономных сетей для обеспечения различных сервисов, обеспечивают многозвенную связь между узлами. Данные с этих узлов могут быть переданы через шлюзы в пункт назначения. В рамках данной концепции было предложено использовать ячеистую сеть на основе технологии LoRa для подключения датчиков и исполнительных устройств. Кроме того, устройства, оснащенные другими интерфейсами (Wi-Fi и BLE), также могут подключаться к конечным пользователям. Это возможно благодаря размещению на одном радиомодуле несколько чипов, поддерживающих различные технологии передачи данных. Так, используя отладочную плату TTGO LoRa32, можно реализовать три сетевых интерфейса, таких как LoRa, Wi-Fi и BLE 4.1.

Второй уровень представляет собой сеть гетерогенных шлюзов [63, 68, 97]. Организацию сетевой иерархии можно упростить за счет использования специальных модулей, сочетающих в себе функции коммутатора, шлюза и периферийной платформы умного города, которые называются гетерогенными шлюзами (ГШ), определенными в рекомендациях ITU-T Q.4060 «Структура тестирования гетерогенных шлюзов Интернета вещей в лабораторной среде» [4] и Q.3055 «Протокол сигнализации для гетерогенных шлюзов Интернета вещей» [3]. ГШ можно использовать в гибридной сети только при наличии сетевого интерфейса, который поддерживает технологии передачи данных для этой сети и реализует все функции, типичные для концентратора, шлюза и пограничной платформы. Все описанные функции могут быть реализованы с помощью специального программного обеспечения, работающего на уровне служб и приложений операционной системы. На рисунке 2 показано, что традиционная иерархическая структура сети использует шлюзы и/или базовые станции и пограничные/туманные службы между сетью конечных устройств и облачными службами [94, 81]. Таким образом, пограничные сервисы могут быть интегрированы с использованием разнородных шлюзов.



Рисунок 2 – Иерархическая структура сети

По данным рисункам видно, что имеется два основных уровня для управления сетями датчиков и исполнительных механизмов, развернутых в умных городах. Облачные сервисы и пограничные/туманные сервисы предоставляются для обеспечения сбора и анализа данных от устройств ИВ.

3.2 Модель энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия

3.2.1 Технология передачи данных LoRa

Традиционно для приложений ИВ можно выделить две бизнес-модели: продажа оборудования и комплектующих для производства устройств ИВ; подписка на различные услуги, предоставляемые в рамках концепции ИВ [21].

Корпорация Semtech выпускает электронные компоненты, среди которых отдельное направление занимает производство и реализация чипсетов LoRa [7]. Приобретя радиомодули с поддержкой LoRa, можно создать фрагмент сети в нелицензируемом диапазоне частот для собственных нужд [49]. Однако если речь идет о сетях с большим числом подключаемых устройств ИВ, то целесообразно рассматривать класс глобальных вычислительных сетей, охватывающих большие территории и включающих большое число узлов.

В 2015 г. был создан альянс LoRa, специализирующийся на развитии протокола канального уровня LoRaWAN, в основе которого на физическом уровне используется технология модуляции LoRa. В существующих спецификациях данного протокола и соответствующих сетей описана поддержка топологии «звезда», что создает ряд недостатков, описанных выше. Ниже будут рассмотрены основные характеристики технологии, влияющие на ПД в сети LoRa.

Ключевыми параметрами, используемыми для конфигурирования радиомодуля LoRa, являются: модуляция, диапазон частот, ширина полосы пропускания (BW – bandwidth), коэффициент расширения спектра (SF – Spreading Factor), скорость кодирования (CR – Coding Rate) и мощность передачи [92]. На физическом уровне LoRa применяется метод модуляции CSS (Chirp Spread Spectrum), обеспечивающий увеличенный бюджет канала и лучшую устойчивость к помехам. LoRa использует ширину полосы 125, 250 и 500 кГц для передачи сигналов, которые делают LoRa устойчивой к шуму канала, длительной относительной частоте, эффектам Доплера и затуханию. Согласно спецификации, характеристики модуляции LoRa зависят от трех параметров.

Скорость кодирования (CR). Для повышения чувствительности приемника используют технику прямого исправления ошибок (FEC – forward error correction). Скорость кодирования обозначают как k/n , где k представляет полезную информацию, кодер генерирует n выходных битов, т.е. $n-k$ будут избыточными битами. Избыточность позволяет приемнику обнаруживать и исправлять частые ошибки в сообщениях, а также снижать скорость ПД. LoRa использует кодовые скорости 4/5, 4/6, 4/7 и 4/8 соответственно.

Коэффициент расширения спектра (SF). Для расширения передаваемых битов технология LoRa использует несколько коэффициентов распространения (от 7 до 12). Параметр SF определяет два значения: количество исходных битов, которые могут быть закодированы для одного символа; и каждый символ может содержать $2SF$ чипа (анг. chip). Чем больше коэффициент расширения спектра, тем меньше скорость ПД и наоборот. Каждый символ распространяется с помощью кода распространения длиной $2SF$ чипа, т.е. для расширения одного символа требуется $2SF$ чипа. Метод замены одного символа на несколько элементов информации показывает влияние коэффициента распространения на скорость ПД. Следовательно, если значение коэффициента распространения высокое, то скорость ПД уменьшается.

Ширина полосы пропускания (BW). Для конфигурации радиомодулей LoRa используют несколько вариативных параметров при настройке ширины полосы пропускания BW: 125, 250 и 500 кГц. Данные распространяются с частотой чипа,

равной пропускной способности в чипах на секунду (анг. chips/s). Таким образом, 125 кГц соответствует скорости чипа 125 килочипов в секунду.

Соотношение между SF, BW, CR определяет скорость ПД (DR – Data Rate):

$$DR = SF \frac{BW}{2^{SF}} CR, \text{ где } \begin{cases} SF = \{7, 8, 9, 10\}; \\ BW = \{125, 250, 500\}, \text{ кГц}; \\ CR = \{4/5, 4/6, 4/7, 4/8\}. \end{cases} \quad (1)$$

Большое значение BW увеличивает DR, но уменьшает чувствительность декодирования. Высокий SF увеличивает чувствительность декодирования, но уменьшает DR. Следовательно, с низким BW и высоким SF чувствительность декодирования и расстояние передачи возрастают, а DR снижается. В зависимости от требований для ПД конкретного приложения ИВ эта комбинация параметров может быть изменена.

В контексте умных устойчивых городов существуют приложения на основе этой технологии, например, для мониторинга наполняемости мусорных баков, качества питьевой воды, а также управления уличным освещением [5, 33, 71]. Кроме этого, в [75] предложены приложения для отслеживания и позиционирования объектов городской инфраструктуры на базе сетей LoRaWAN. Среди приложений можно выделить те, для которых задержка доставки данных является весьма критичным параметром, а также приложения, толерантные к сетевой задержке (например, показания приборов учета, которые надо доставить на сервер 1 раз в месяц).

3.2.2 Структура ячеистой сети LPWAN в рамках системы умных городов

Сети LPWAN состоят из следующих элементов [61]:

- конечные узлы (КУ) – низкопроизводительные вычислительные устройства, используемые для взаимодействия с подключенными к ним датчиками и/или исполнительными устройствами;

- концентраторы или маршрутизаторы – устройства, выполняющие роль маршрутизатора в данных сетях;
- шлюз – устройства, выполняющие прием и извлечение полезных данных из пакетов формата сети LPWAN и их дальнейшую инкапсуляцию, и отправку в целевую сеть (чаще всего сети Интернета).

В классическом виде данная сеть поддерживает звездную топологию, где множество КУ подключено к одному центральному устройству (ЦУ), выполняющему функции шлюза и концентратора. Группа ЦУ может быть объединена с помощью внешних сетевых технологий, например IP, в единую сеть, позволяющую им взаимодействовать друг с другом. Структура данной сети отображена на рисунке 3б.

Тем не менее уже существуют решения, поддерживающие ячеистую сетевую топологию, в рамках которой КУ могут взаимодействовать не только с концентратором/шлюзом, но и между собой. Также в рамках данного решения одна сеть LPWAN может включать в себя несколько концентраторов, выполняющих задачи маршрутизации данных от ближайших к себе узлов и взаимодействующих между собой с помощью протокола, используемого в данной локальной сети LPWAN. Тем не менее функция динамической ячеистой маршрутизации в сетях LPWAN носит экспериментальный характер вследствие высокого уровня требований к пропускной способности канала связи из-за большого объема передаваемого служебного трафика. Более часто встречаются системы LPWAN с заранее конфигурируемыми таблицами маршрутизации для каждого из КУ [62]. Данные таблицы могут быть сгенерированы как вручную разработчиками или администратором сети, так и единственным концентратором в локальной сети. Данная структура сети отображена на рисунке 3а.

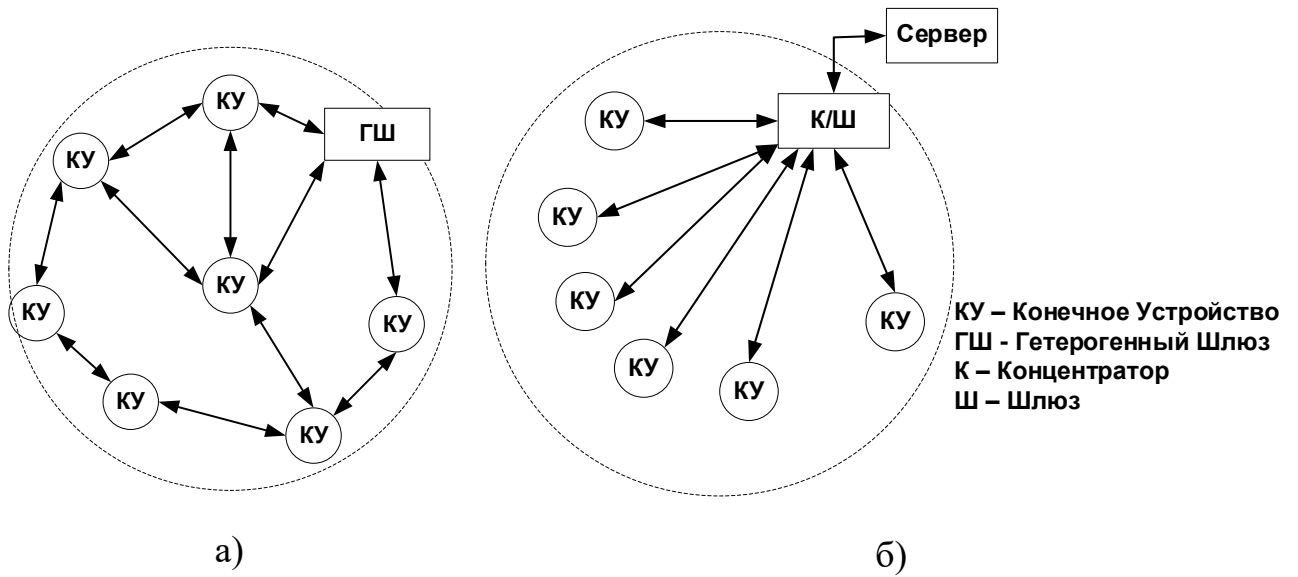


Рисунок 3 – Структура сети LPWAN для: а) звездной топологии; б) ячеистой топологии

На основе проведенного анализа ПАК либо самостоятельно принимает решение о дальнейшем функционировании системы УГ, либо если ситуация является достаточно критической передает информацию и рекомендацию по решению данной проблемы оператору системы УГ. Для передачи данных через сети оператора связи (ОС), предоставляющего инфраструктуру для системы УГ, применяются специальные устройства, выполняющие роль точки включения в сеть оператора связи. Структура функционирования сети LPWAN в рамках системы УГ изображена на рисунке 4.

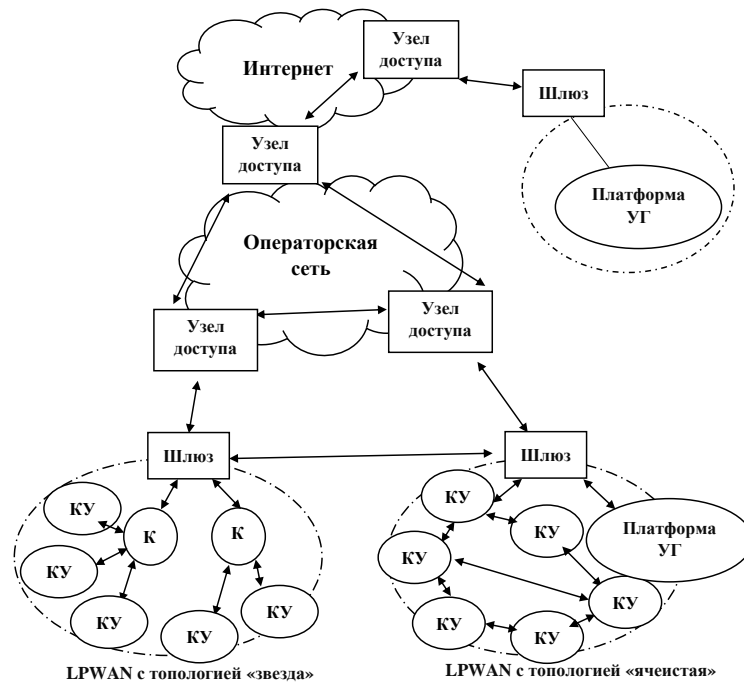


Рисунок 4 – Структура функционирования сети в рамках системы умных городов

Более того, структура сети может быть представлена в иерархическом виде, а также в соответствии с сетевой моделью OSI, как показано на рисунке 5.

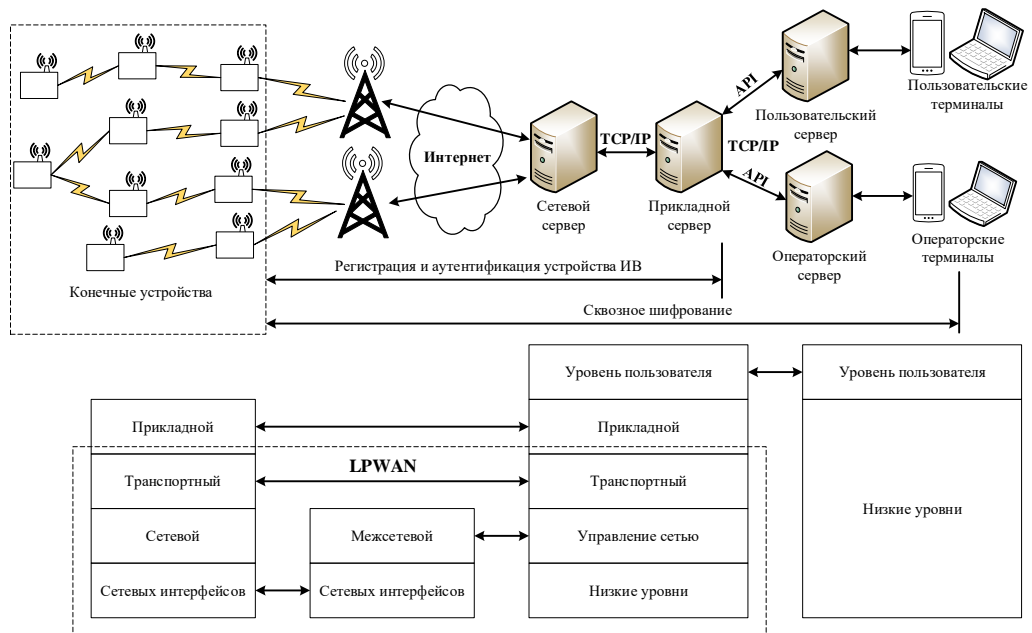


Рисунок 5 – Иерархическая архитектура энергоэффективной сети дальнего радиуса действия

Для упрощения структуры сети LPWAN и сокращения издержек на внедрение целого ряда предлагается реализовать устройство, объединяющее функции концентратора, шлюза и граничной платформы УГ, с помощью гетерогенных шлюзов ИВ, определенных в рекомендации МСЭ-Т Q.4060 «The structure of the testing of heterogeneous Internet of Things gateways in a laboratory environment» [4] и Q.3055 «Signalling protocol for heterogeneous Internet of Things gateways» [3]. Гетерогенный шлюз (ГШ) ИВ – это программно-аппаратный комплекс, выполняющий преобразование как протоколов физического, канального и сетевого уровня с помощью существующих сетевых интерфейсов, так и протоколов прикладного уровня и форматов полезных данных с помощью сематического шлюза ИВ [59, 60]. Сематический шлюз (СШ) – это программное обеспечение, функционирующее в рамках гетерогенного шлюза и выполняющее преобразование прикладных протоколов ИВ между собой и форматов полезных данных. ГШ включает в себя многозадачную ОС, которая имеет достаточно вычислительных ресурсов для работы систем виртуализации/эмуляции рабочего пространства пользователя (например, контейнеры в ОС, основанных в Linux). Несмотря на некоторое падение производительности ПО, используемого в средах виртуализации/эмуляции, в сравнении с запуском на основной ОС, данная структура позволяет динамически добавлять и проводить обновление новых приложений и услуг на данном устройстве.

ГШ может использоваться в сетях LPWAN только при условии наличия сетевого интерфейса, поддерживающего технологию сетевого обмена информацией и реализации всех функций, характерных для концентратора, шлюза и граничной платформы. Все описанные функции могут быть реализованы с помощью ПО, функционирующего в виртуальном рабочем пространстве пользователя. На рисунке 6 отображена структура сети LPWAN, включающая в себя гетерогенный шлюз для маршрутизации, граничной обработки и дальнейшей отправки в целевую сеть сетевых пакетов от устройств LPWAN.

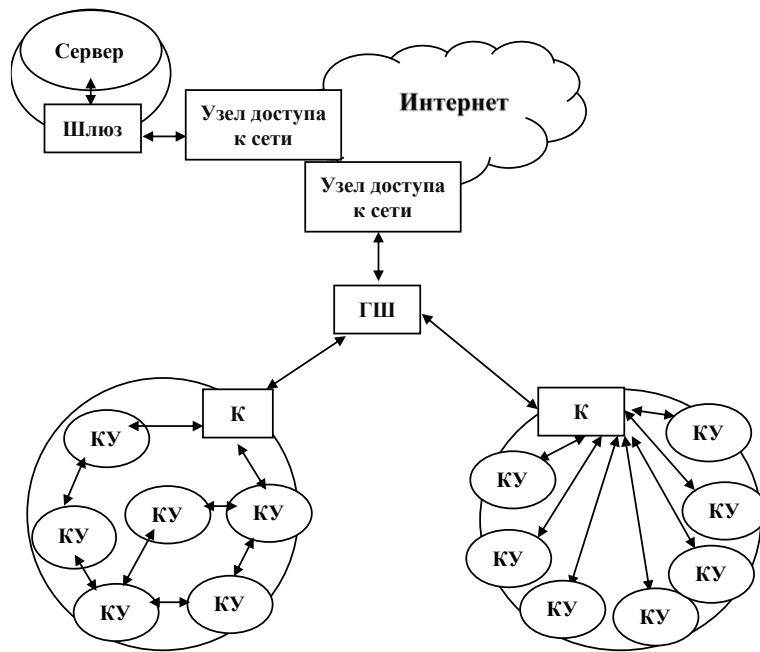


Рисунок 6 – Структура сети LPWAN с использованием ГШ

Таким образом, можно выделить несколько типов топологии сети, которые могут поддерживаться в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия [27, 28, 85].

Звездная топология. В данной топологии шлюз или базовая станция играет центральную роль для управления всей сетью. Как показано на рисунке 7, конечные устройства соединяются напрямую к шлюзу. Такая топология является классической для сетей LPWAN и неэффективна в умных городах.

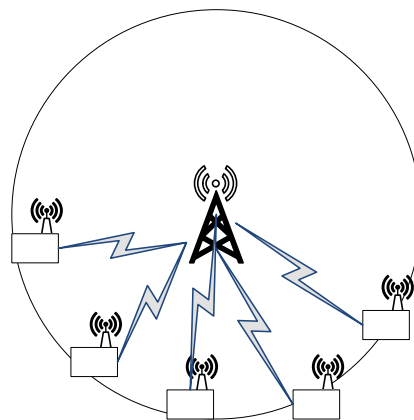


Рисунок 7 – Топология «звезда»

Ячеистая топология между шлюзами. Данная топология (рисунок 8) представляет ячеистое соединение между шлюзами для увеличения зоны покрытия. Шлюзы установлены в различных географических местах с учетом факторов, таких как плотность конечных узлов, топография и так далее. По крайней мере, один из шлюзов должен иметь доступ к сети Интернет, а остальные шлюзы будут использоваться в качестве ретрансляторов ячеистой сети для расширения зоны обслуживания.

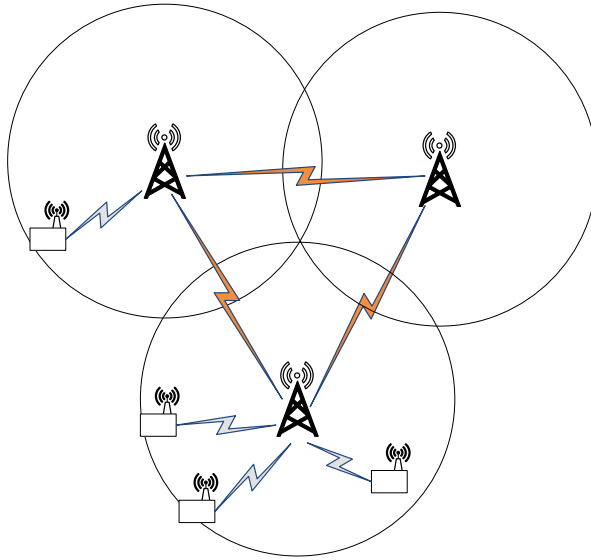


Рисунок 8 – Ячеистая сеть между шлюзами

Ячеистая топология между конечными узлами. Данная топология может применяться в том случае, когда конечные устройства находятся вне зоны обслуживания шлюза. Узлы могут становиться ретрансляторами для переадресации данных между узлами (рисунок 9).

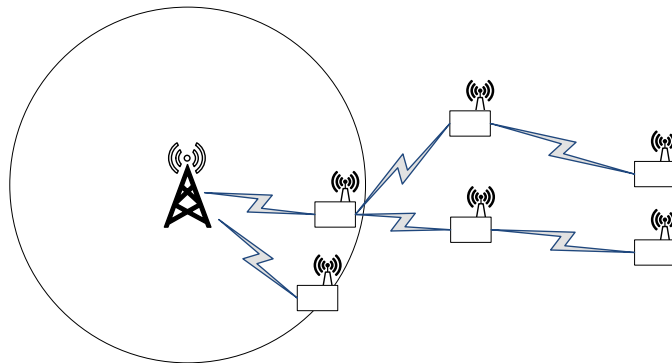


Рисунок 9 – Ячеистая сеть между конечными узлами

Комбинированная ячеистая топология между шлюзами и конечными узлами.

Данная топология используется для организации одновременного взаимодействия сетей шлюзов и также конечных узлов (рисунок 10).

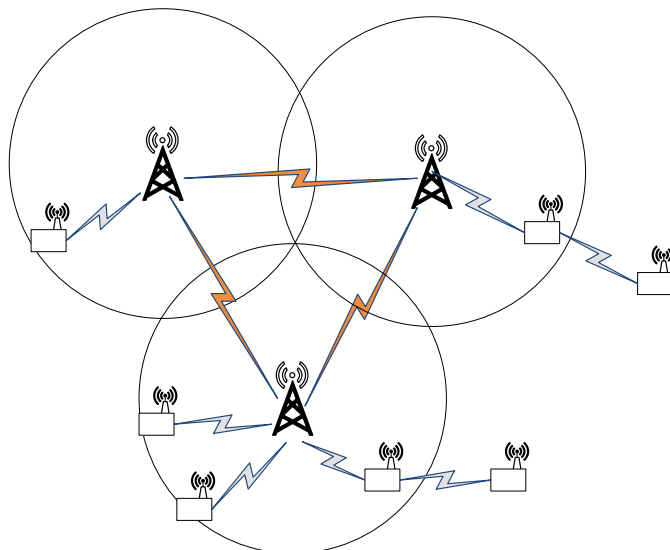


Рисунок 10 – Ячеистые сети между шлюзами и конечными узлами

3.2.3 Аналитические и имитационные модели

На основе предложенной структуры можно описать работу имитационной модели, которая может быть использована для исследования свойств работы предложенной сети согласно различным параметрам (например, время обслуживания сообщений, объем передаваемых полезных данных в единицу времени, энергопотребление устройств в сети и др.) и модели, с которой будет сопоставлена модель, включающая в себя гетерогенный шлюз [31]. На рисунке 11а представлена многозвенная передача между конечными узлами к гетерогенному шлюзу. Каждый узел рассматривается как система массового обслуживания. В этом случае ГШ используется для обслуживания ячеистых/многозвенных сетей. Кроме того, на рисунке 11б показана модель связи от конечных узлов через концентратор/шлюз к пограничному серверу. Эта модель представляет прямое соединение между конечными

узлами и концентратором/шлюзом в модели топологии «звезда». В этой традиционной структуре дополнительный сервер используется для обработки данных на границе.

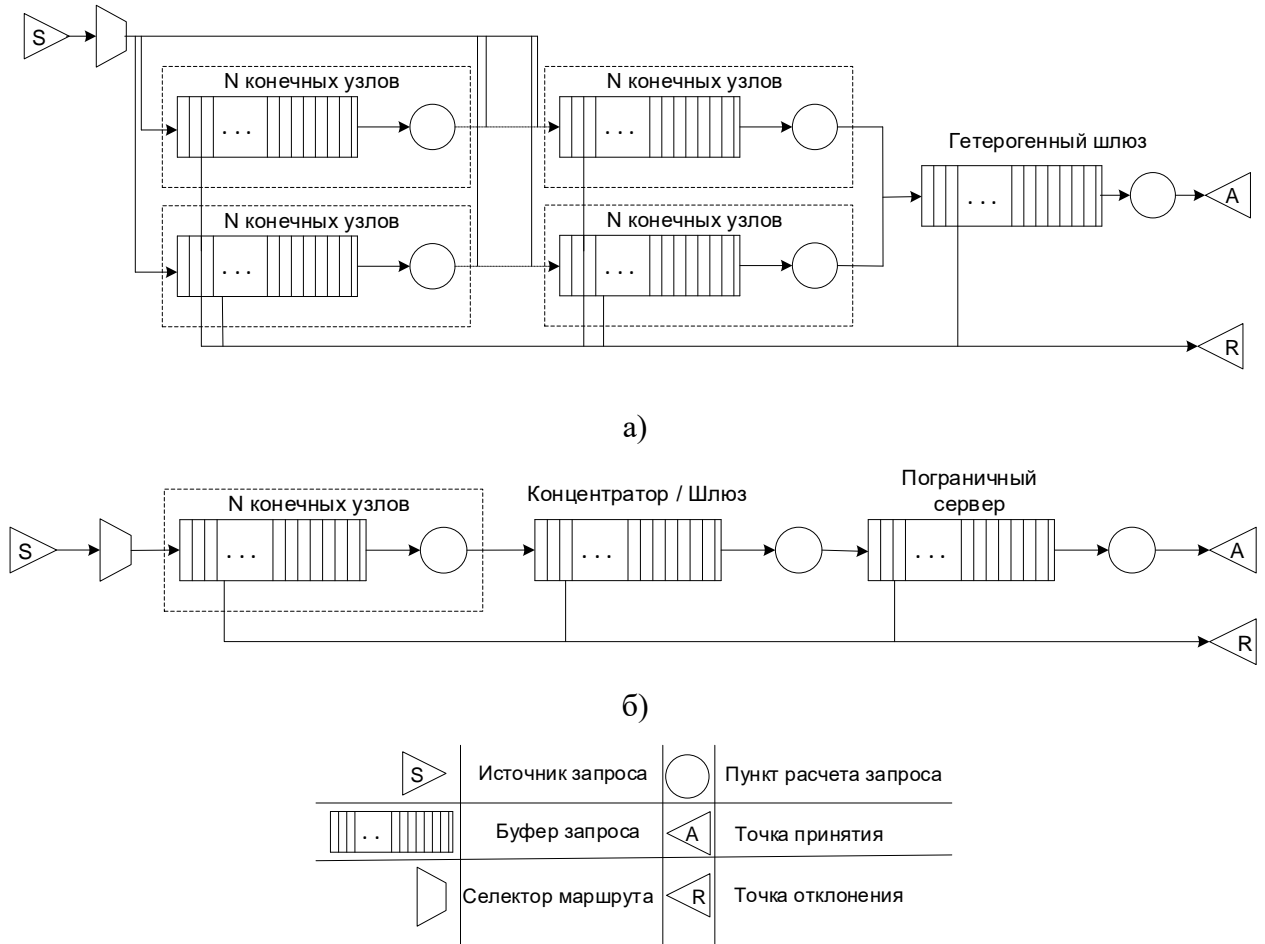
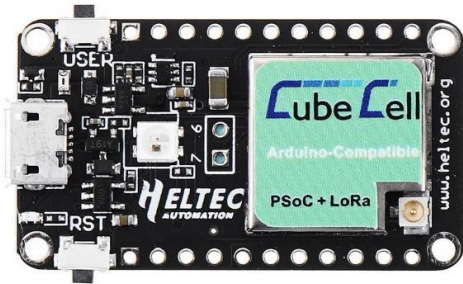


Рисунок 11– Структура имитационной модели сети: а) с ГШ; б) без ГШ

При разработке данной модели необходимо учитывать особенности функционирования устройств LPWAN. Для этой цели была разработана модельная сеть, состоящая из конечного узла LoRaWAN – CubeCell Dev-Board (рисунок 12а) и шлюза Dragino LG02 (рисунок 12б). С помощью данных устройств были измерены интенсивность поступления сообщений без применения программной задержки для оконечного устройства и интенсивность обслуживания сообщений на шлюзе. Конечные узлы непрерывно отправляют пакет данных размером 30 байт. Для трансиверов LoRa настроены следующие параметры:

- рабочая частота = 868 МГц;

- мощность передачи $P = 14$ дБм;
- ширина полосы пропускания $BW = 125$ кГц;
- коэффициент расширения спектра $SF = 10$;
- скорость кодирования $CR = 4/5$.



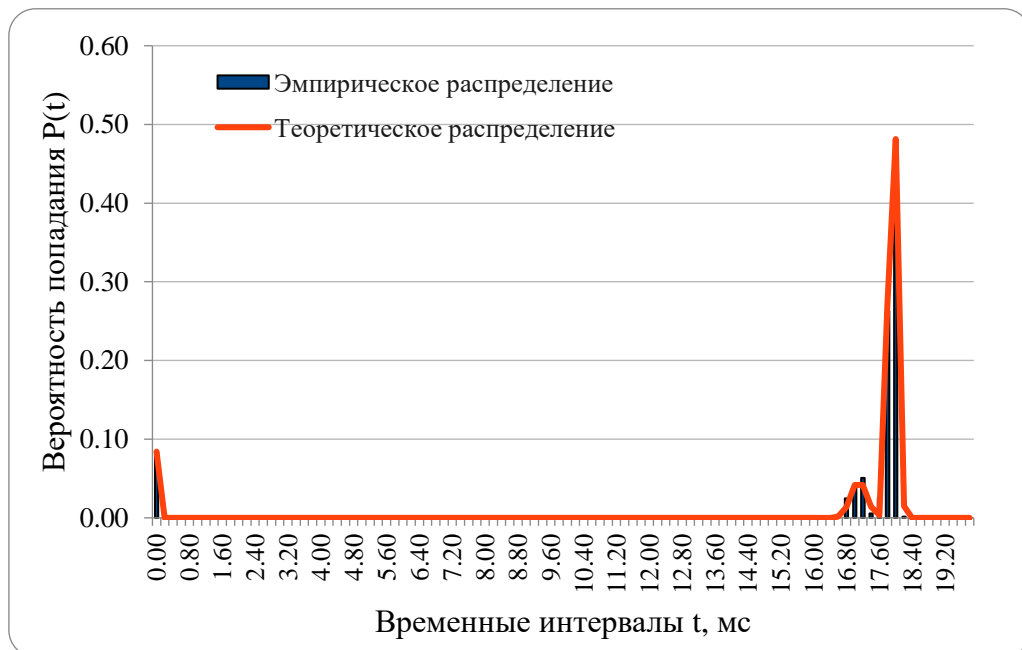
а)



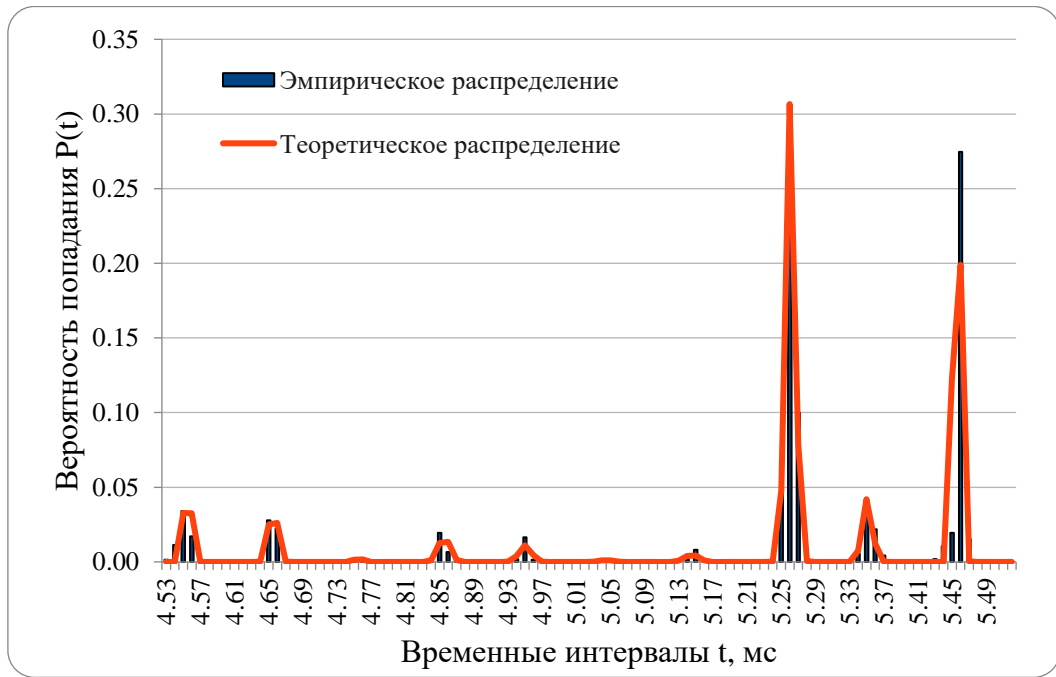
б)

Рисунок 12 – Используемое оборудование

В результате на основе метода наименьших квадратов, метода обобщенных приведенных градиентов, критерия согласия Колмогорова-Смирнова были получены аналитические модели, описывающие интенсивность поступления и обслуживания сообщений для устройств LoRaWAN. Графики, отображающие соотношение полученных аналитических моделей к исходным эмпирическим распределениям, отображены на рисунках 13а и 13б.



а)



б)

Рисунок 13 – Соотношение эмпирического распределения к теоретическому для:
 а) показателя задержек для сетевого интерфейса; б) интенсивности обслуживания сообщений

Таким образом, интенсивность обслуживания сообщений КУ (3) и сервером (5), а также показатели задержек на сетевом интерфейсе (2) и канале связи (4) можно описать с помощью следующих уравнений плотности вероятности:

$$f_a(x) = p_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 x} + p_2 \frac{\lambda_2^{a_2}}{\Gamma(a_2)} x e^{-\lambda_2 x} + p_3 \frac{\lambda_3^{a_3}}{\Gamma(a_3)} x e^{-\lambda_3 x} \quad (2)$$

$$f_c(x) = G_c(x, p_1, a_1, \lambda_1, c_1) + G_c(x, p_2, a_2, \lambda_2, c_2) + \dots + G_c(x, p_{10}, a_{10}, \lambda_{10}, c_{10}) \quad (3)$$

$$f_{cd}(x) = p \frac{\lambda}{\Gamma(a)} x e^{-\lambda x} \quad (4)$$

$$f_s(x) = p \lambda e^{\lambda x} \quad (5)$$

$$G_c(x, p, a, \lambda, c) = p \frac{\lambda^a}{\Gamma(a)} (x - c) e^{-\lambda(x-c)} \quad (6)$$

где

- $f_a(x)$ – плотность вероятности интенсивности поступления сообщений,
- $f_c(x)$ – интенсивность обслуживания сообщений,

- $G_c(x, p, a, \lambda, c)$ – смещенное гамма-распределение плотности вероятности,
- p_i – вероятность попадания в заданное распределение,
- a_i – коэффициент масштаба,
- λ_i – коэффициент масштаба,
- c_i – коэффициент смещения.

Данные аналитические модели в совокупности с полученными в ходе эксперимента вероятностными распределениями для интервалов времени между поступлениями сообщений, показателями задержек сетевого интерфейса LoRaWAN, временем обслуживания сообщений на КУ, показателями задержек на канале связи и времени обслуживания сообщений на сервере были использованы для моделирования сети из 1000 КУ LoRaWAN, согласно изображениям 11а для сети с применением ГШ и 11б для сети без применения ГШ. Вероятностные распределения, использованные в ходе имитационного моделирования с помощью библиотеки Python Ciw [86] представлены ниже:

1. Интервалы времени между поступлениями сообщений: детерминированное значение, 1 сообщение раз в 60 секунд.
2. Задержки на сетевом интерфейсе: $f_a(x)$, со следующими параметрами для формулы (2):
 - $p_1 = 0.116, \lambda_1 = 5988,$
 - $p_2 = 0.115, a_2 = 8899.84, \lambda_2 = 518135,$
 - $p_3 = 0.769, a_3 = 48643.63, \lambda_3 = 2695418.$
3. Время обслуживания сообщений на ОУ: $f_c(x)$, со следующими параметрами по формуле (4):
 - $p_{1..10} = [0.065, 0.052, 0.003, 0.028, 0.02, 0.002, 0.01, 0.434, 0.062, 0.434],$
 - $a_{1..10} = [298, 1288, 2317, 3288, 2041, 5208, 6221, 24551, 27478, 93005],$
 - $\lambda_{1..10} = [9900990, 9900990, 1.0e7, 1.0e7, 4761905, 1.0e7, 1.0e7, 33333333, 33333333, 1.0e8,$
 - $c_{1..10} = 4.52e^{-3}.$
4. Задержки на канале связи: $f_{cd}(x)$, со следующими параметрами по формуле (4):

– $p = 1.00, a = 22.73, \lambda = 25253$.

5. Время обслуживания сообщений на сервере: $f_s(x)$, со следующими параметрами по формуле (5):

– $p = 1.00, \lambda = 100.47$.

Данные результаты основаны на исследовании конечных узлов и устройств обработки для каждого типа сети, что объясняет некоторые различия в распределении вероятностей между узлами в этих моделях. Результаты моделирования с уровнем достоверности 95% представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты имитационного моделирования

Исследуемый параметр	Распределение	Среднее знач. (мс)
Модель без использования HG		
Интенсивность поступления сообщений	Exponential ($a = 16.57$)	61.850 ± 1.690
Время обслуживания сообщения в модели	Erlang ($a = 3, \lambda = 44.06$)	84.310 ± 1.690
Время обслуживания сообщения на шлюзе	Gamma ($a = 600, \lambda = 104\,769.80$)	5.710 ± 0.002
Время обслуживания сообщения на ES	Exponential ($a = 82$)	10.730 ± 0.060
Модель с использованием HG		
Интенсивность поступления сообщений	Exponential ($a = 13.78$)	61.62 ± 0.55
Время обслуживания сообщения в модели	Erlang ($a = 7, \lambda = 265.86$)	27.40 ± 0.07
Время обслуживания сообщения на HG	Erlang ($a = 4, \lambda = 307.61$)	15.52 ± 0.06

По результатам моделирования время обслуживания было сокращено в модели с использованием ГШ. Более того, время обслуживания уменьшилось и стало меньше суммы времени обслуживания на шлюзе и сервере. Кроме того, при экстренных случаях, когда каждый конечный узел отправляет сообщения, отправление должно быть намного более интенсивным, чем одно сообщение в секунду. Предполагается, что в этом случае топология сети с гетерогенным шлюзом не будет иметь существенных преимуществ, поскольку как в традиционной модели, так и в предлагаемой модели (с ГШ) самое узкое и критическое место будет иметь узел

предоставления доступа к внешней сети. Однако данная проблема может иметь неожиданные результаты на уровне канала радиосвязи и требует дальнейшего исследования.

3.3 Метод маршрутизации на основе оценки комплексного показателя качества соединения

3.3.1 Метод оценки комплексного показателя качества соединения

В энергоэффективной сети дальнего радиуса действия в частности и в беспроводных сенсорных сетях в целом выбор оптимальных путей маршрутизации всегда является сложной задачей из-за динамического поведения каналов [26]. Качество каналов связи должно быть обеспечено для критических промышленных приложений, поскольку к ним предъявляются более жесткие требования, чем к типовым приложениям Интернета вещей.

На распространение радиосигналов влияют многие факторы, такие как свойства среды передачи, что приводит к эффектам многолучевого распространения, шуму и помехам от одновременной передачи других технологий связи или электромагнитных источников, расположенных в непосредственной близости. В большинстве случаев существует несколько методов для оценки качества показателя соединения на основе параметра уровня канала передачи данных [67], оценки связи на основе параметра физического уровня [88] и комплексной оценки качества связи [43].

Метрики, используемые для оценки показателя качества соединения, имеют следующие аббревиатуры RSSI, LQI, SNR и PRR [91]. Однако показатель LQI во многом зависит от оборудования, и поэтому предлагается использовать RSSI, SNR

и PRR для оценки показателя качества соединения. Кроме того, можно использовать модели машинного обучения для обучения входных данных, собранных в ходе экспериментов в лаборатории, для оценки и классификации показателя качества соединения на различные группы [53]. Исходя из этого можно выбрать близкий к оптимальному доступный маршрут для задач маршрутизации в каждом конкретном сценарии.

А. Аппаратные методы оценки.

В зависимости от аппаратной реализации могут быть получены непосредственно с беспроводного трансивера без дополнительных вычислений следующие параметры, такие как RSSI, LQI, SNR. Эти параметры сохраняются в регистрах после получения пакета.

Индикатор уровня принимаемого сигнала. RSSI – это оценочная мера мощности, полученной одним радиочастотным устройством и другим радиочастотным устройством. На больших расстояниях передача сигнала становится слабее, что приводит к повышению вероятности потери пакетов, поскольку приемник не может правильно декодировать сигнал. Сигнал измеряется индикатором мощности принятого сигнала, который в большинстве случаев показывает, насколько хорошо конкретный канал радиосвязи может слышать удаленный беспроводной узел. В открытом космосе мощность принимаемого сигнала можно оценить с помощью следующего уравнения:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} + PL \quad (7)$$

где

- P_{rx} – ожидаемая принимаемая мощность или индикатор уровня принятого сигнала RSSI;
- P_{tx} – это мощность передачи;
- G_{tx} и G_{rx} – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;
- PL представляется как потери на трассе.

Мощность передачи уменьшается по мере увеличения расстояния между приемником и передатчиком. Следовательно, если полученное значение RSSI

меньше чувствительности приемника, сигнал может быть неправильно декодирован. Кроме того, мощность сигнала уменьшается из-за препятствий и окружающей среды.

Отношение сигнала к шуму. SNR относится к разнице уровней принимаемого сигнала.

$$\text{SNR(дБ)} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{сигнал}}}{P_{\text{шум}}} = P_{\text{сигнал}} \text{ (дБ)} - P_{\text{шум}} \text{ (дБ)} \quad (8)$$

Отношение сигнала к шуму определяет разницу в уровне между сигналом и шумом для данного уровня сигнала. Чем меньше шума генерирует приемник, тем лучше отношение сигнала к шуму.

Индикатор качества связи. LQI – это значение, используемое для быстрого определения, принадлежит ли линия связи к диапазону надежного приема. Например, этот индикатор реализован в некоторых трансиверах (CC2420), используемых в многозвенных сетях, таких как Zigbee, для оценки «стоимости» канала. Индикатор LQI описан в стандартах Zigbee и IEEE 802.15.4. После приема каждого пакета результат измерения LQI выражается в виде целого числа от 0 до 255. Минимальные и максимальные значения LQI соответствуют сигналам IEEE 802.15.4 самого низкого и самого высокого качества, обнаруживаемым приемником.

Однако эти значения можно получить только из успешно принятых пакетов. В случае потери пакета качество связи может быть завышено. Более того, результаты измерений нестабильны, следовательно, трудно оценить точное качество связи, если выполняется только одно измерение. Несмотря на быструю и дешевую аппаратную реализацию, эти методы позволяют получать ограниченную информацию о качестве каналов передачи данных. Таким образом, использование комбинации аппаратных и программных показателей повысит точность оценки качества связи.

В. Программные методы оценки.

Программная реализация позволяет оценить некоторые значения, такие как скорость приема пакетов (PRR) или коэффициент доставки пакетов (PDR), пропускная способность, ожидаемое количество передач.

В определенный период передачи PRR может быть получен либо прямым вычислением, либо приближением. PRR представляет собой отношение количества успешно принятых пакетов к общему количеству переданных пакетов. Поэтому считается, что размер окна выбирает n интервалов времени для вычисления PRR. В результате точная оценка может быть получена за короткое время с высоким или низким качеством связи. С другой стороны, для более точного получения PRR требуется больший размер окна.

Другой метод рассматривает количество ожидаемых передач как показатель для оценки качества линии связи. Это показывает, сколько передач требуется для успешной передачи пакета с учетом количества потерянных пакетов.

С. Экспериментальные измерения и предварительная обработка.

В экспериментальном измерении мы использовали 2 узла LoRa, включая узел-отправитель и узел-получатель. Были заданы следующие параметры на обоих узлах: частота = 868 МГц, ширина полосы пропускания $BW = 250$ кГц, мощность передачи = 5 дБм, коэффициент расширения спектра $SF = 7$, скорость кодирования $CR = 4/5$. Интервал между передачей пакетов задавался случайным образом в диапазоне 500, 2000 мс. Узел приемника зафиксирован и подключен к компьютеру для сохранения экспериментальных данных. С другой стороны, узел-отправитель перемещается далеко от узла-получателя с низкой скоростью, чтобы измерить мощность сигнала и изменения шума, связанные со скоростью приема пакетов. После проведения эксперимента было принято (захвачено) 2500 пакетов для дальнейшей предварительной обработки.

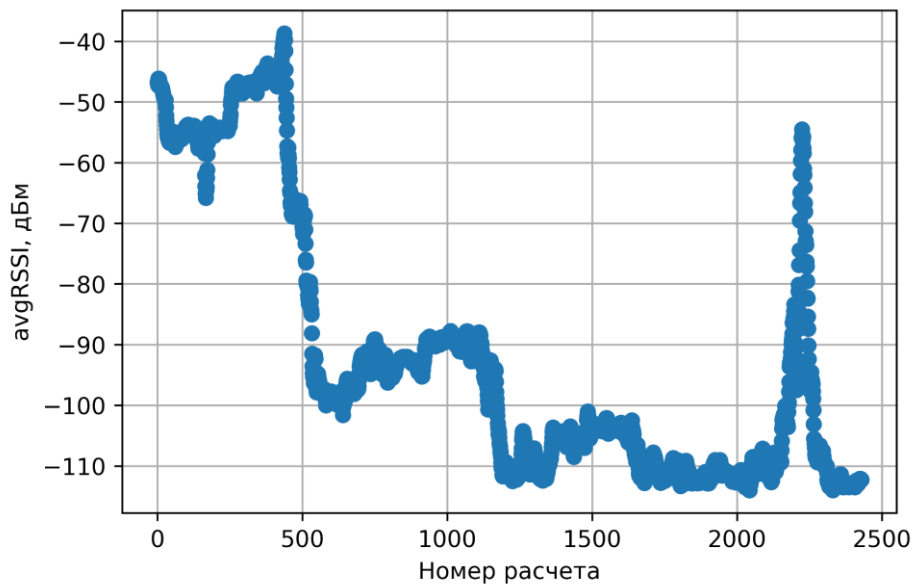
Для каждого полученного пакета анализировались значения RSSI и SNR от оборудования. Кроме того, фиксировался порядковый номер, индексированный по номеру пакета для вычисления PRR в пределах определенного размера окна. Как показано на рисунке 14, для примера предварительной обработки в пределах размера окна = 10, мы вычислили средние значения RSSI и SNR, а также PRR в соответствии с порядковым номером.

srcAddr	seqNum	payload	packetSize	RSSI	SNR
11	1	Hello world	16	-46	9.5
11	2	Hello world	16	-42	9.5
11	3	Hello world	16	-55	9.5
11	4	Hello world	16	-47	8.75
11	5	Hello world	16	-49	9.5
11	8	Hello world	16	-46	9
11	9	Hello world	16	-44	9.25
11	10	Hello world	17	-45	9.25
11	11	Hello world	17	-46	9
11	12	Hello world	17	-46	9.25

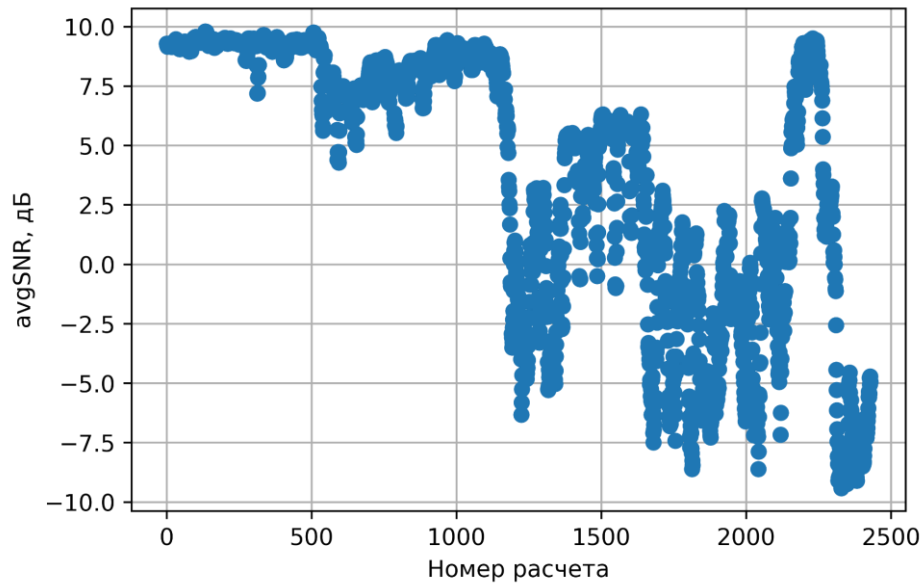
srcAddr	avgRSSI	SNR	PRR
11	-46.75	9.28125	0.8
11	-46.75	9.21875	0.8

Рисунок 14 – Предварительная обработка данных с размером окна = 10

На основе анализа данных предполагалось использовать средние значения RSSI и SNR, которые могут помочь оценить уровень качества связи. Как показано на рисунке 15а, значения RSSI варьируются от -120 до -40 дБм и могут быть разделены на четыре группы. С другой стороны, значения SNR также изменяются от -10 до 10 дБ (рисунок 15б). Таким образом, примерно из данного диапазона выделены четыре уровня, которые будем рассматривать как уровни качества связи.



а) Расчет RSSI



б) Расчет SNR

Рисунок 15 – Предварительно обработанные значения RSSI и SNR

Рассмотрим четыре уровня оценки качества связи, как показано в таблице 3. Для обозначения уровня качества связи использовалась скорость приема пакетов [20].

Таблица 3 – Диапазон классификации оценки качества соединения канала LoRa

Оценка качества соединения	PRR
Отлично	$PRR \geq 0.9$
Хорошо	$0.75 \leq PRR < 0.9$
Средний	$0.45 \leq PRR < 0.75$
Плохо	$PRR < 0.45$

Чтобы уменьшить влияние диапазона и ошибки модели, $avgRSSI$ и $avgSNR$ нормализованы так, чтобы данные находились между 0 и 1. Процесс нормализации соответствует уравнению (9) следующим образом:

$$\begin{aligned}
 avgRSSI^* &= \frac{avgRSSI - \min(avgRSSI)}{\max(avgRSSI) - \min(avgRSSI)} \\
 avgSMR^* &= \frac{avgSNR - \min(avgSNR)}{\max(avgSNR) - \min(avgSNR)}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где avgRSSI^* и avgSNR^* – нормализованные данные, которые используются в модели машинного обучения.

После проведения анализа и предобработки данных оказалось, что полученные данные распределены в виде нелинейных разделяемых данных. Таким образом, среди известных методов машинного обучения был выбран метод опорных векторов для обучения модели оценки комплексного показателя качества соединения.

D. Метод опорных векторов.

Метод опорных векторов (SVM – Support Vector Machine) – это относительно простой алгоритм машинного обучения с учителем, используемый для классификации и/или регрессии. Он наиболее предпочтителен для задачи классификации, но иногда также очень полезен для регрессии. По сути, метод SVM находит гиперплоскость, которая создает границу между типами данных [95].

Далее представлен ядерный метод опорных векторов для нелинейных разделяемых данных. В наборе данных есть некоторые нелинейные разделяемые данные в одном измерении. Следовательно, можно преобразовать эти данные в двухмерные, и данные станут линейно разделенными в двухмерном измерении.

Ядро – это не что иное, как мера подобия между точками данных. Функция ядра по методу SVM показывает с учетом двух точек данных в исходном пространстве функций сходство между точками во вновь преобразованном пространстве функций.

Плюсы ядерного метода SVM:

- метод очень хорошо работает с рядом наборов данных;
- метод универсальный: могут быть указаны различные функции ядра или пользовательские ядра, а также могут быть определены для определенных типов данных;
- метод хорошо работает как с данными с высокой, так и низкой размерностью.

Метод SVM используется для вычисления наилучшей гиперплоскости, разделяющей два разных класса. Изначально SVM была разработана для линейной классификации, но теперь может использоваться для задач нелинейной классификации путем применения ядра. В исследовании был реализован нелинейный метод SVM с RBF (Radial Basis Function – радиальная базисная функция) в качестве функции ядра, поскольку ее можно в целом использовать для всех типов данных.

Самым популярным ядром RBF является функция Gaussian Radial Basis. Математически: $k(x_i, x_j) = \exp(-\delta \|x_i - x_j\|^2)$, где δ контролирует влияние новых образцов на границу принятия решения. Чем выше значение δ , тем больше влияние функций на границу решения.

Е. Модель LQE на основе SVM.

Оценка показателя качества соединения преобразуется в задачу классификации нескольких классов, которую можно решить с помощью моделей обучения с учителем. Метод опорных векторов (SVM) [95] известен как одна из эффективных моделей обучения с учителем для решения мультиклассовой классификации. В проведенном исследовании предлагается использовать SVM для обучения собранных данных и прогнозирования уровня показателя качества соединения. На рисунке 16 представлена структура модели SVM с использованием трех параметров (avgRSSI, avgSNR, PRR) в качестве входных данных и гауссовского ядра для обучения. Был использован язык программирования Python и библиотека scikit-learn [99] для обучения и оценки предложенной модели. Набор данных был разделен на 10% для обучения и 90% для тестирования. Было проведено 50 испытаний обучения, чтобы получить среднюю точность предложенной модели. Полученные результаты представлены в таблице 4.

По результатам обучения модель SVM демонстрирует высокую точность прогноза со средним значением = 95%. Таким образом, используя три параметра, такие как RSSI, SNR, PRR, показатель качества соединения LoRa можно точно оценить после 10 пробных пакетов, даже если размер нашего набора данных недостаточно велик для обучения, что обычно характерно для задач машинного обучения.

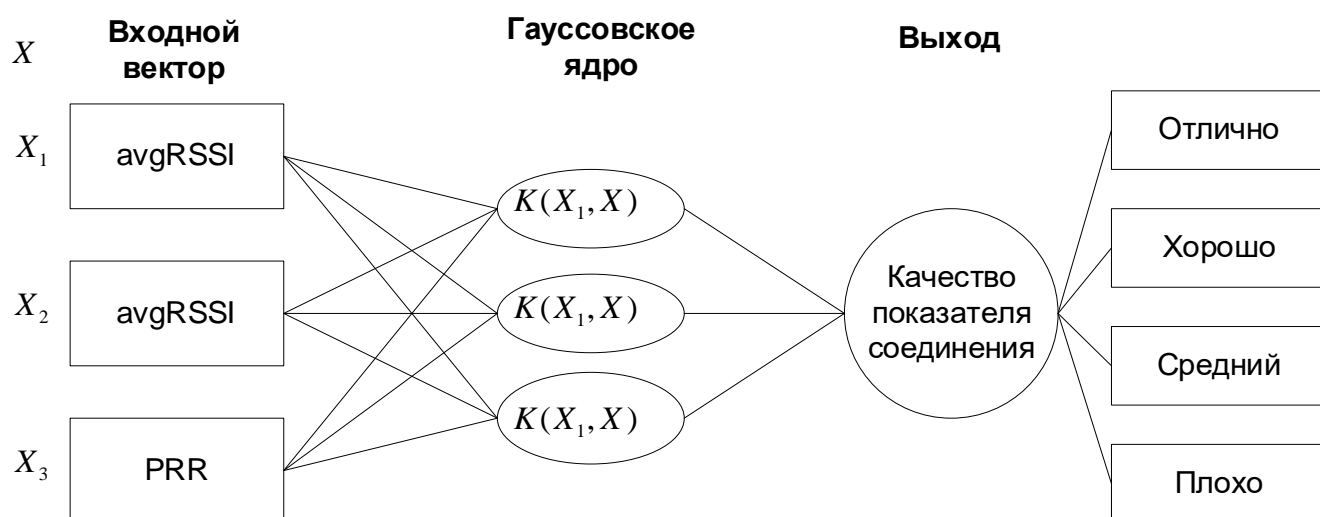


Рисунок 16 – Модель LQE на основе SVM

Таблица 4 – Производительность модели оценки качества связи на основе SVM

Оценка	Точность	Полнота	F-мера
Отлично	0,96	1,00	0,98
Хорошо	0,93	0,93	0,93
Средний	0,98	0,92	0,95
Плохо	1,00	0,87	0,93
Общая точность		95%	

Также следует отметить, что была рассмотрена передача только в одном направлении (восходящий канал). Таким образом, уровень показателя качества соединения можно использовать для поиска надежного маршрута восходящего канала в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия LoRa.

3.3.2 Метод поиска маршрута

А. Представление сети в виде графа.

В рассматриваемой модели ячеистой топологии сеть может быть представлена в виде связного графа. Например, на рисунке 17 сеть включает в себя различные типы устройств (оконечные устройства, маршрутизаторы, шлюзы), связанные в графе. Узел может быть либо конечным устройством, либо транзитным устройством (маршрутизатор). Данные, полученные транзитным узлом, будут переданы следующему узлу в соответствии с оптимальным маршрутом к месту назначения.

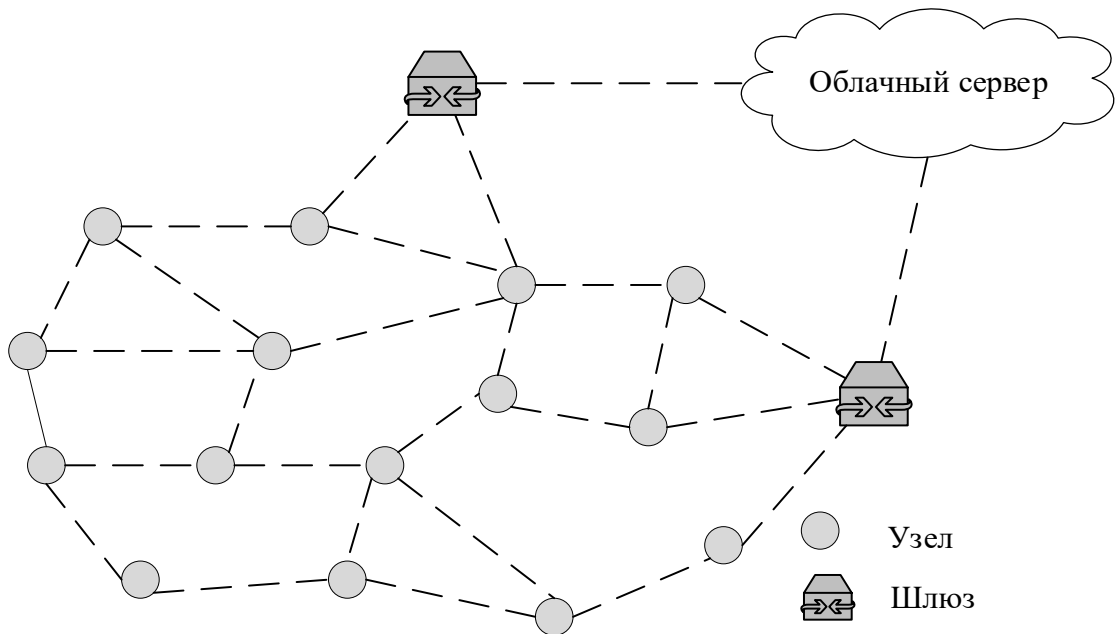


Рисунок 17 – Модель сети

Как показано на рисунке 17, модель ячеистой сети может быть описана в виде графа $G(V, E)$ с множествами вершин V и ребер E . Множество вершин $V = \{v_i\}$, $i = 1 \dots n$ представляет набор узлов в сети, множество ребер $E = \{e_{ij}\}$, $i, j = 1 \dots n$, – набор каналов связи между узлами в сети. Каждый узел имеет максимальный радиус действия R , в пределах которого узлы могут связываться с другими узлами. Если координаты узла описываются как (x_i, y_i, z_i) , расстояние между двумя узлами i и j вычисляется по формуле:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (10)$$

Следовательно, связь между двумя узлами существует, если расстояние между ними не больше R , т.е. $d_{ij} \leq R$; $\exists e_{ij}$ и $E = \{e_{ij}\}$, где $i, j = 1 \dots n$

Каждое ребро между вершинами взвешивается набором значений оценки комплексного качества показателя соединения $C = \{c_{ij}\}$, где $i, j = 1 \dots n$, которые вычисляются методом, предложенным в предыдущем разделе. Набор значений $\{c_{ij}\} = \{2, 3, 4, 5\}$ соответствует оценкам комплексного качества показателя соединения «плохо», «средний», «хорошо» и «отлично».

В. Выбор маршрута основан на качестве соединения.

Маршрут рассчитывается таким образом, чтобы найти оптимальный маршрут с высоким качеством канала связи до пункта назначения. Для оценки качества соединения между приемником и передатчиком используется предлагаемый метод оценки комплексного качества показателя соединения (LQE – Link Quality Estimation). Используя оценки LQE, качество показателя соединения между двумя узлами можно представить в виде зависимой функции от LQE:

$$c_{ij} = f(LQE) \quad (11)$$

где $LQE = f(RSSI, SNR, PRR)$ получена методом опорных векторов, предложенным в предыдущем подразделе.

Значение $c_{ij} = 2$ означает, что имеется неустойчивое прямое соединение между узлами i и j или прямого соединения между ними нет, т.е. узлы могут обмениваться данными только через транзитные узлы. Матрица $C = \{c_{ij}\}$, где $i, j = 1 \dots n, s$ содержит значения оценки комплексного качества показателя соединения между узлами в сети (вес ребер графа):

$$C = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,n} & c_{1,s} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,n} & c_{2,s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_{n,1} & c_{n,2} & \dots & c_{n,n} & c_{n,s} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Предлагается, что в графе G имеется множество возможных маршрутов $\Omega = P_{i,s} = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ между узлом i и узлом приемника s . Таким образом, суммарная оценка соединения для маршрута от узла i к узлу приемника (шлюз) определяется как

$$w_{i,s} = \sum_{j=1}^{|P_{i,s}|-1} c_{i,j+1} \quad (13)$$

Оптимальным маршрутом от узла i к узлу приемника является решение задачи максимизации:

$$\text{Route}_{i,s} = \arg \max_{P_{i,s} \in \Omega} (w_{i,s}) \quad (14)$$

3.3.3 Моделирование и результаты

А. Разработка модели в OMNET++.

Для оценки исследуемых характеристик энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия авторами был разработан программный модуль LoRa на основе фреймворков inet версии 4.2 в пакете имитационного моделирования OMNET++ версии 5.5.1 [45, 72, 98]. Поскольку библиотека и фреймворк OMNET++ созданы по модульным и компонентно-ориентированным принципам, узел LoRa состоит из модульных компонентов. На рисунке 18 изображены основные компоненты интерфейса LoRa для программного модуля LoRa.

В энергоэффективной сети дальнего радиуса действия LoRa параметры конфигурации радиосвязи, такие как рабочая частота, SF, BW, CR и мощность передачи, влияют на дальность связи и точность приема. Если мощность принятого сигнала превышает чувствительность приемника, можно сказать, что передача прошла успешно. Мощность передачи уменьшается по мере распространения по воздуху к получателю.

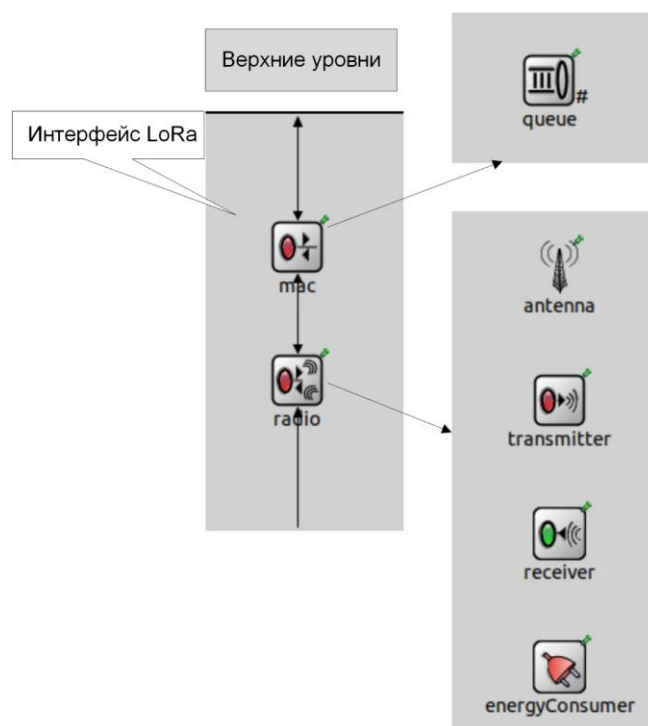


Рисунок 18 – Сетевой узел в OMNET++

Таким образом, принимаемая мощность зависит от мощности передачи и потерь из-за затухания сигнала. Как известно в области беспроводной связи, модель потерь на трассе с логарифмическим расстоянием использовалась как в помещении, так и в открытом пространстве. Потери на трассе зависят от логарифмического расстояния в соответствии со следующим уравнением:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\gamma \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma \quad (15)$$

где

- $PL(d_0)$ – средние потери на трассе на опорном расстоянии d_0 ;
- γ – показатель потерь на трассе;
- d – расстояние между приемником и передатчиком;
- X_σ – случайное значение в распределении Гаусса с нулевым средним

и стандартным отклонением σ .

При этом рассматривается применение технологии LoRa в городской среде при плотной городской застройке, которая является основным препятствием для распространения сигнала. На основе исследований, проведенных в [36], параметры

распространения с потерями на трассе устанавливаются для имитационной модели в городской среде с $d_0 = 40$, $PL(d_0) = 127,51$, $\gamma = 2,08$, $\sigma = 3,57$.

Узел LoRa состоит из модулей, моделирующих радио и протоколы верхнего уровня. В радиомодуле LoRa можно настроить параметры радиосвязи, соответствующие нашей модели оборудования. Другие параметры, такие как коэффициент расширения спектра и скорость кодирования, настраиваются для узла LoRa в дополнение к обычным конфигурациям. В этом случае для имитационной модели используются параметры радио, взятые из таблицы данных чипсета LoRa SX127x [93, 101].

Приемный узел (шлюз) расположен в центре сети. Расположение конечных узлов генерируется случайным образом в диапазоне размеров моделирования поля.

Длина полезной нагрузки генерируется случайным образом из конечных узлов в интервале от 20 до 150 байтов. Согласно экспоненциальному распределению, интервалы между отправленными сообщениями являются случайными величинами со средним значением, равным 120 секундам. В каждом эксперименте проанализированы задержка доставки и коэффициент доставки пакетов.

При разработке программной реализации интерфейса LoRa учитывались такие базовые параметры функционирования, как SF, BW, CR и модуляция. Интерфейс LoRa взаимодействует с сетевым уровнем для маршрутизации пакетов, с транспортным и прикладным уровнем. Кроме этого, введен дополнительный программный модуль LoRa Medium для моделирования среды ПД и потери распространения сигналов LoRa. Параметры моделирования в OMNET++ представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры моделирования

Модуль	Параметр	Значение	Единица
LoRa Radio	Ширина полосы пропускания (BW)	{ 125, 250 }	кГц
	Коэффициент расширения спектра (SF)	{ 7, 8, 9, 10 }	

Продолжение таблицы 5.

Модуль	Параметр	Значение	Единица
LoRa Radio	Скорость кодирования (CR)	4/5	
	Рабочая частота	868	МГц
	Мощность передачи	14	дБм
	Усиление антенны	3	дБи
LoRa Medium	Модель потери распространения	$PL(d_0) = 127,51$	дБ
		$d_0 = 40,$	м
		$\gamma = 2,08$	
		$\sigma = 3,57$	
	Модель распространения	постоянная скорость	
	Фоновый шум	-96,616	дБм
Прикладное сообщение	Размер	40	байт
	Интервал времени между пакетами	Exponential (120)	
Другие	Количество узлов в сети	{ 10, 20, 40, 100 }	
	Размер поля	2000 x 2000	м ²
	Время моделирования	2000	с

Узлы на плоскости располагаются согласно равномерному распределению. Как показано на рисунке 19, 100 узлов находятся на поле размером 2000 x 2000 м², целевой узел – в центре поля с координатами (1000, 1000).

Б. Результаты моделирования.

Среднее время доставки. Каждый узел рассматривается как СМО. В соответствии с задержкой ПД между двумя узлами, описанной в [92, 101], время задержки передачи кадра данных размером 80 байт вычисляется при изменении ин-

тенсивности системной загрузки. Результаты расчета для конфигурации узла с параметрами $SF=\{7, 8, 9, 10\}$, $BW=\{125, 250\}$ кГц и влияние интенсивности системной загрузки на задержку доставки кадра данных показаны на рисунке 20.

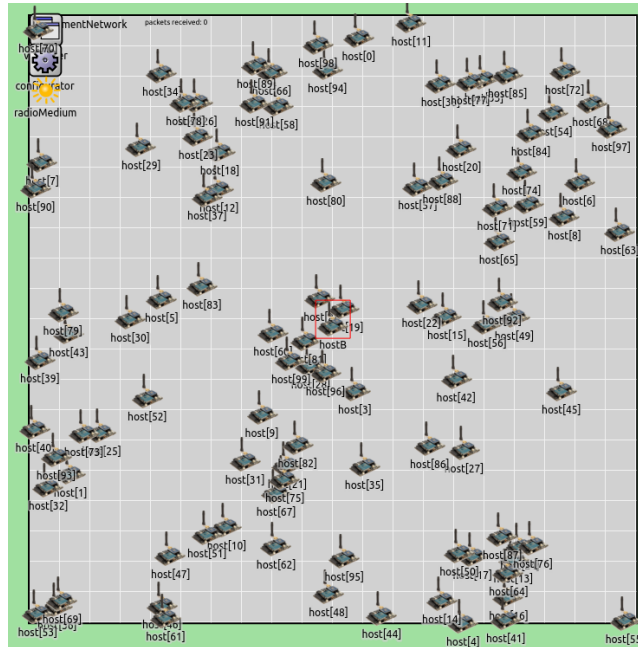


Рисунок 19 – Представление модели сети в OMNET++ для проведения компьютерных экспериментов

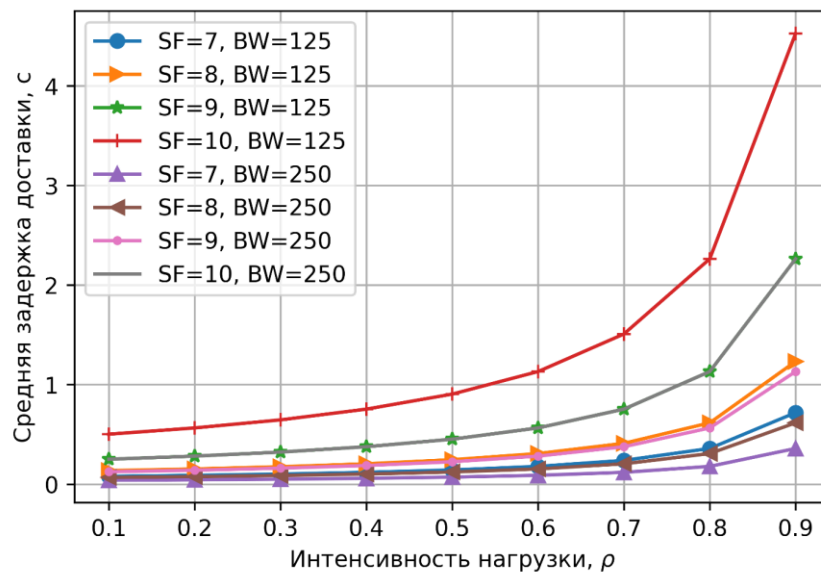


Рисунок 20 – Влияние системной загрузки на задержку доставки кадра данных

В модели ячеистой топологии узел принимает и передает пакеты следующему узлу. Следовательно, количество транзитных узлов, через которые проходят пакеты, влияет на время доставки к целевому узлу. На рисунке 21 представлена зависимость задержки доставки от количества транзитных узлов при интенсивности системной загрузки, равной 0.4, и размере кадра данных 80 байт.

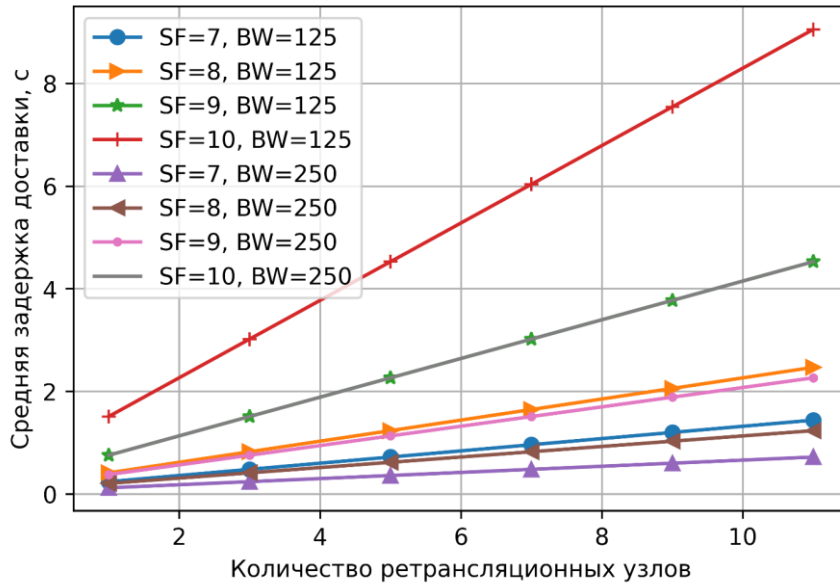


Рисунок 21 – Зависимость задержки доставки от количества транзитных узлов

При сравнении параметров коэффициента распространения SF и ширины полосы пропускания в сети со 100 узлами наблюдается разное распределение задержек доставки от сенсорных узлов к целевому узлу. На рисунках 22 и 23 показаны распределения времени доставки в сети со 100 узлами, которым заданы параметры $SF=\{7, 8, 9, 10\}$ и $BW=\{125, 250\}$ кГц. Распределение времени доставки также наблюдается при различных масштабах сети с разным количеством узлов. Рисунок 24 показывает распределение задержек для 100 и 40 узлов в сети при одинаковых конфигурационных параметрах.

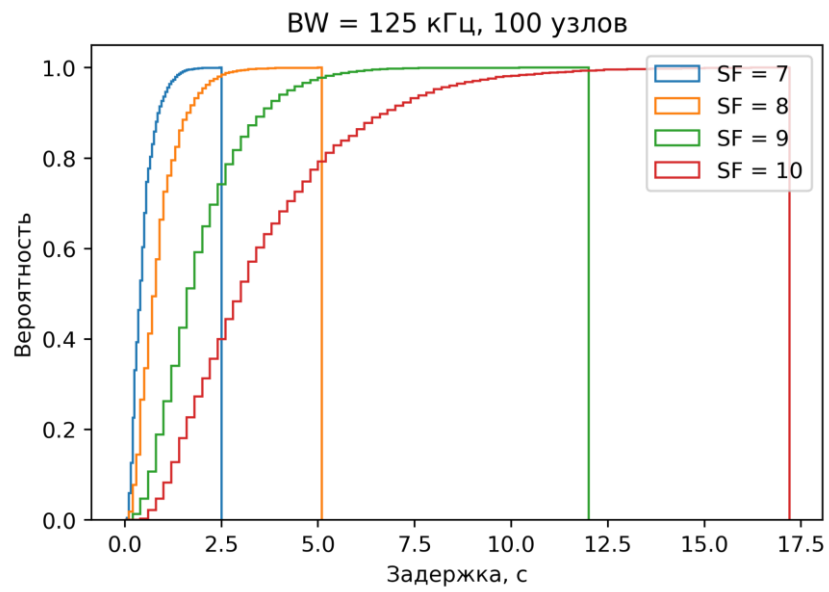
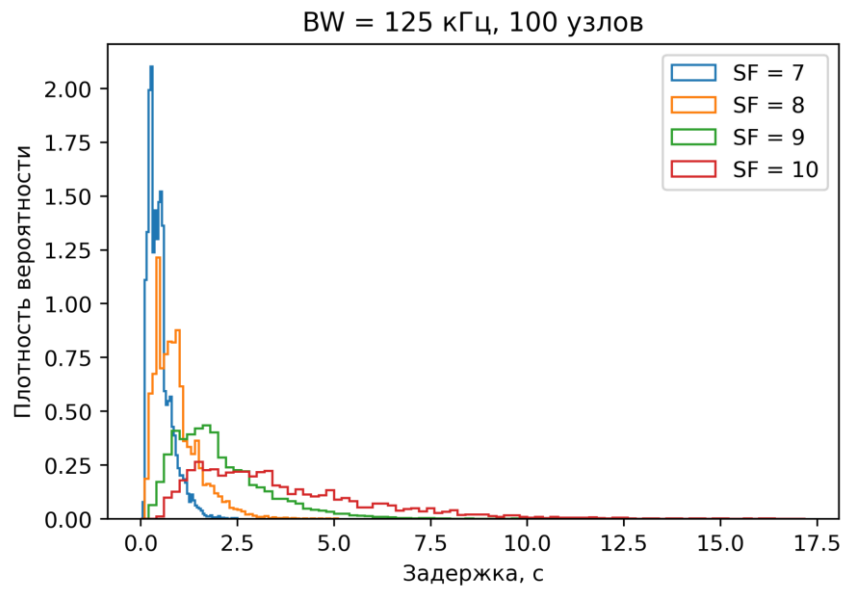


Рисунок 22 – Распределение задержки при различных SF и BW=125 кГц

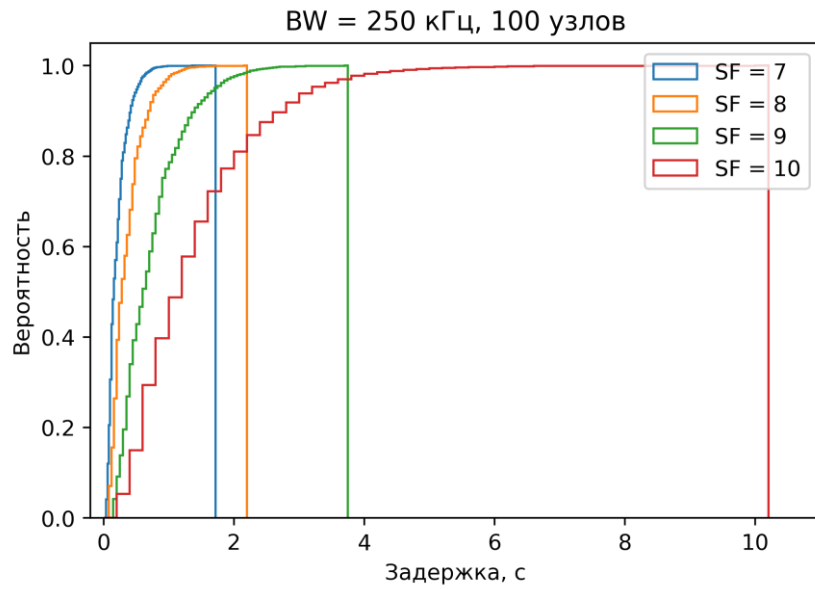
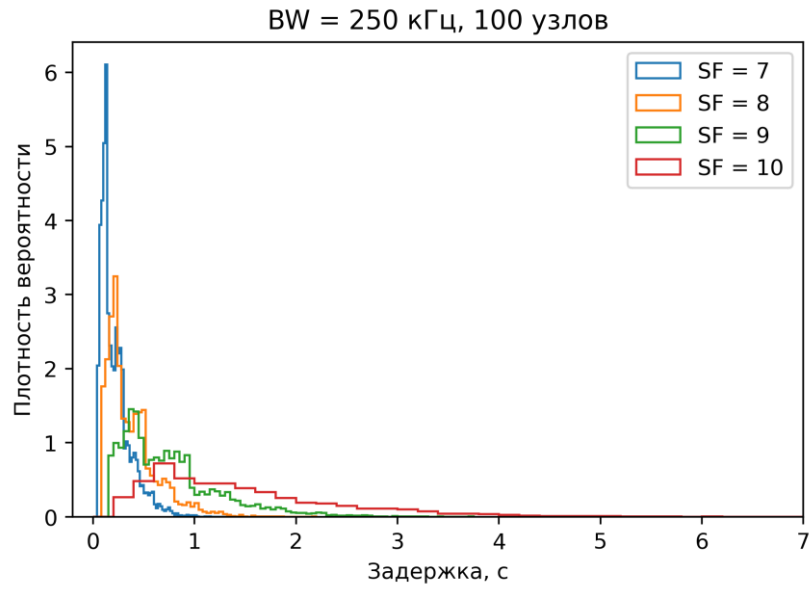


Рисунок 23 – Распределение задержки при различных SF и BW=250 кГц

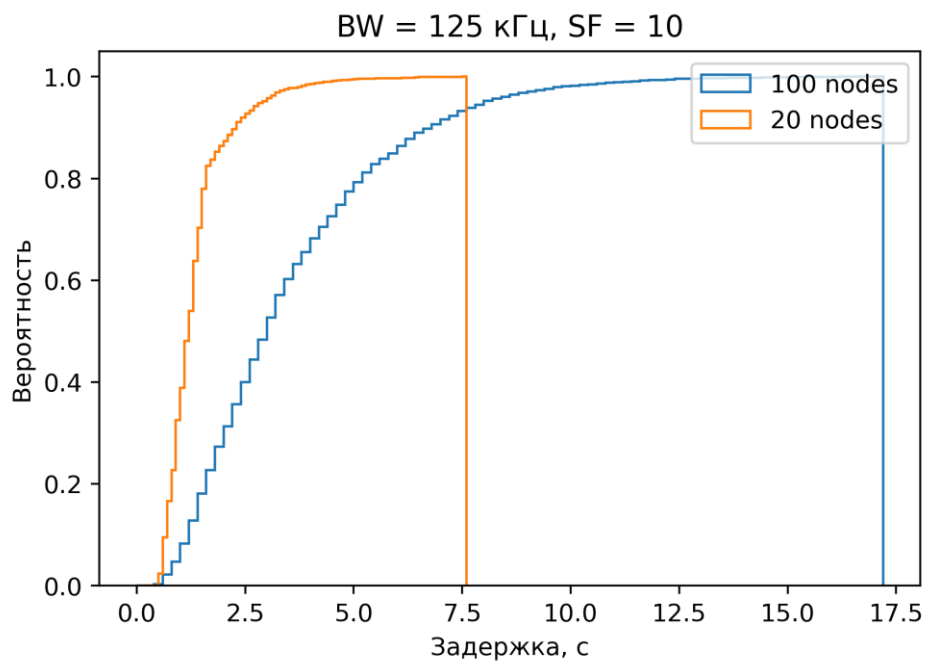
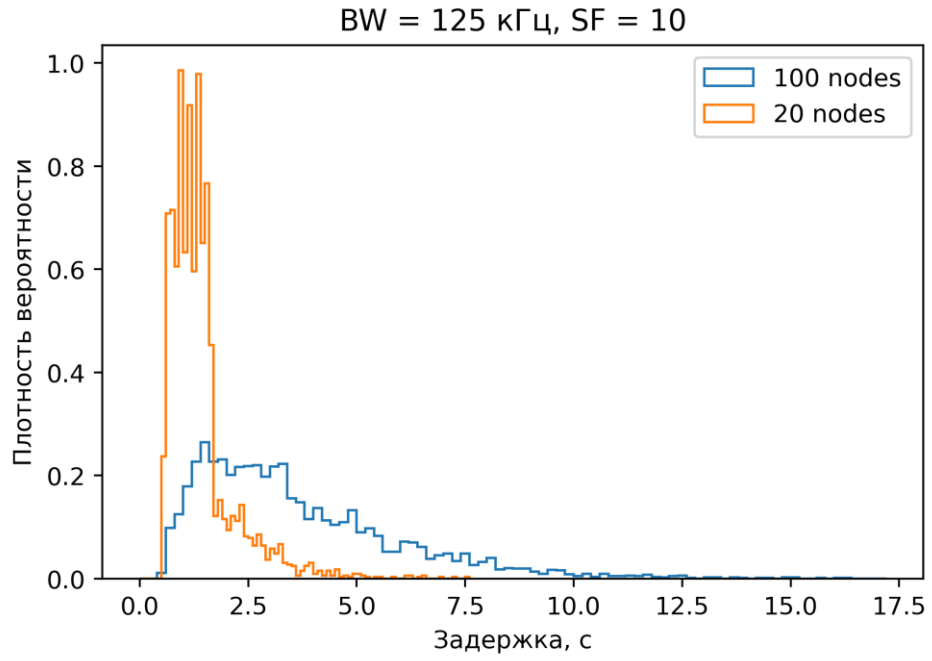
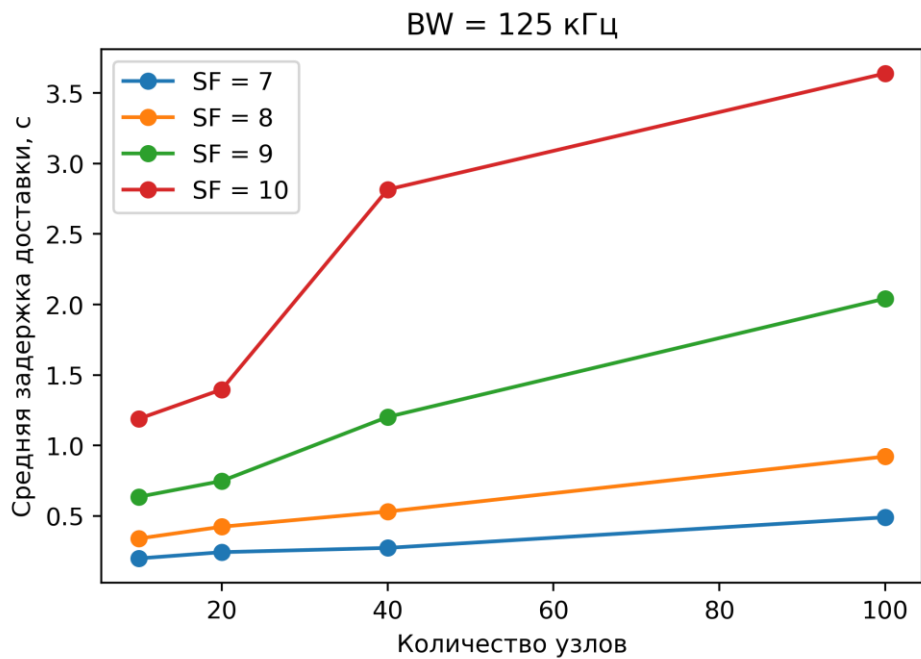
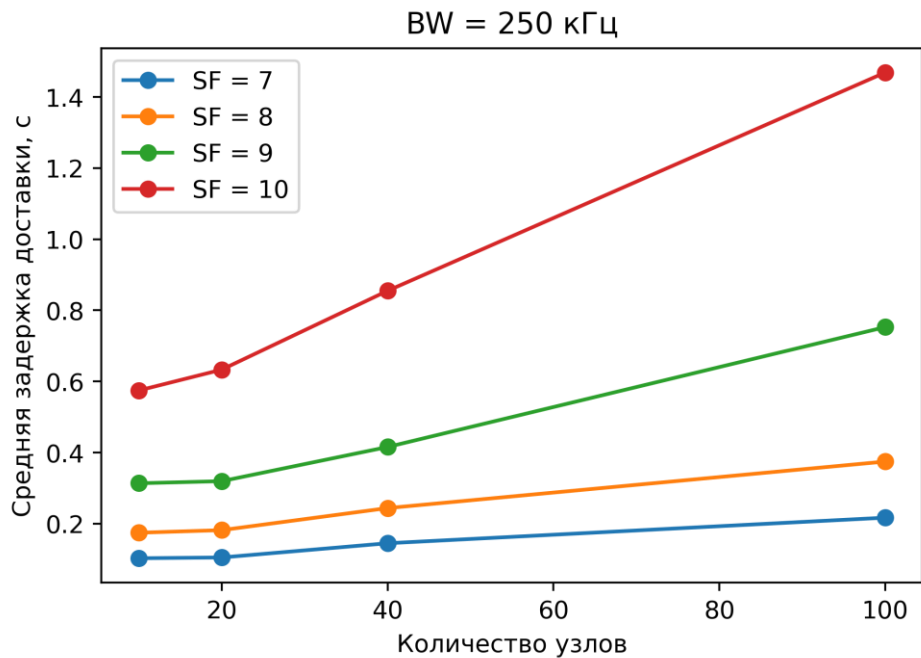


Рисунок 24 – Распределение задержек при различном количестве узлов в сети

На рисунке 25 представлена зависимость средней задержки доставки пакетов от количества узлов.



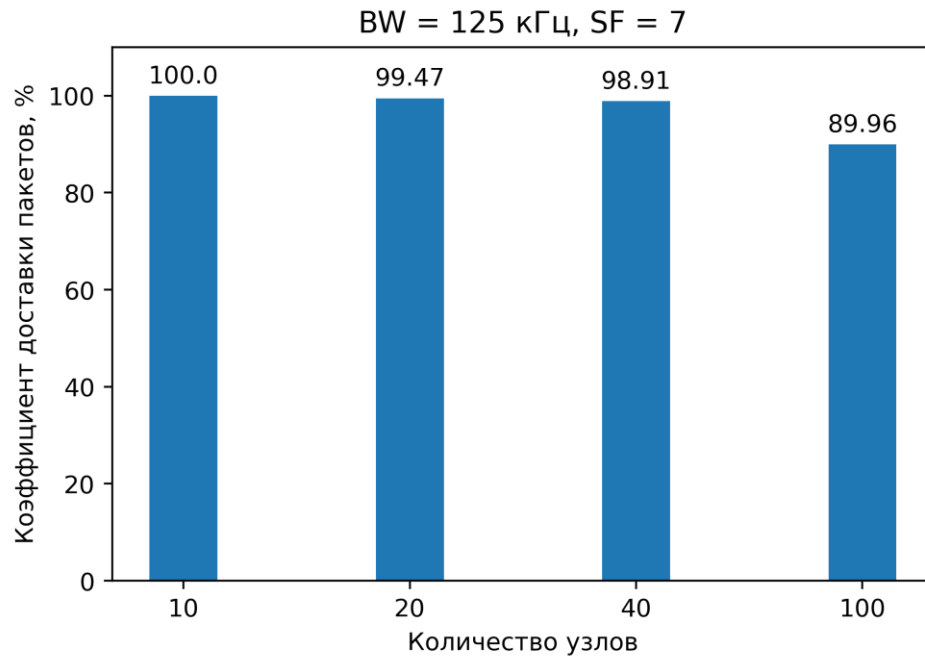
а)



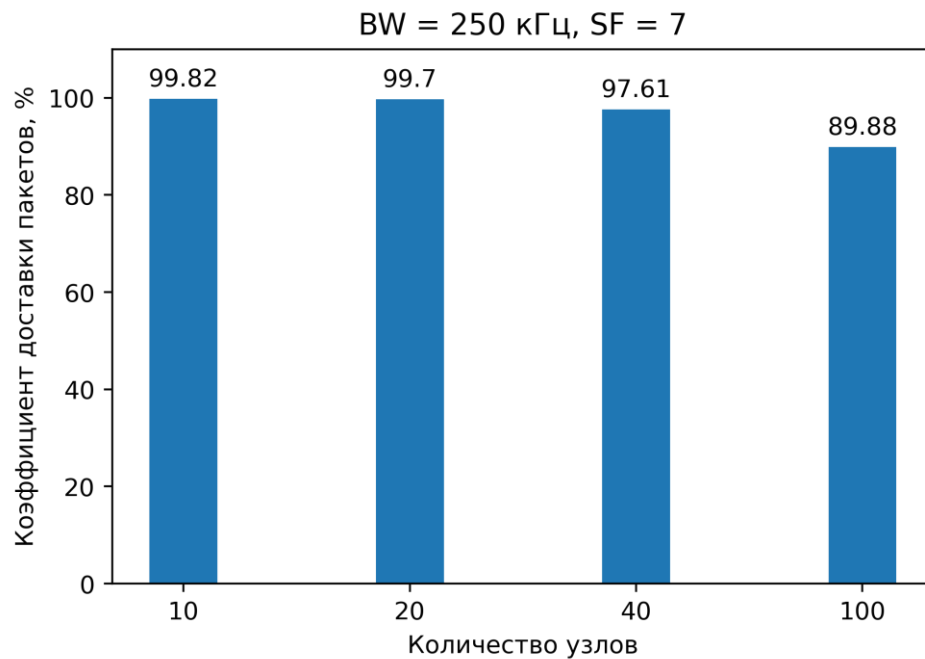
б)

Рисунок 25 – Средняя задержка доставки пакетов

Коэффициент доставки пакетов. С увеличением количества узлов сети коэффициент доставки пакетов будет показывать, сколько процентов генерируемых пакетов получил целевой узел. Для двух рассмотренных случаев коэффициент доставки пакетов представлен на рисунке 26.



а)



б)

Рисунок 26 – Коэффициент доставки пакетов: а) BW=125 кГц; б) BW=250 кГц

В. Анализ результатов имитационного моделирования.

Как показано выше, при увеличении системной загрузки время доставки данных возрастает. Согласно гистограммам на рисунках 22 и 23, малое значение параметра SF и широкая ширина полосы пропускания обеспечивают низкую задержку доставки. При параметрах SF=10 и BW=125 кГц время доставки значительно увеличивается – до 2000 мс, т.е. задержка через транзитные узлы с такими параметрами радиомодулей тоже будет высокой и может составлять единицы и десятки секунд. Это можно увидеть на рисунке 20, иллюстрирующем передачу пакетов через несколько транзитных узлов к узлу-получателю.

При использовании полосы пропускания 125 кГц с коэффициентами SF={9, 10} задержка возрастает до десятков секунд при прохождении через 10 транзитных узлов. В зависимости от приложения ИВ параметры SF и BW могут быть подобраны соответствующим образом. С другой стороны, использование более широкой полосы (BW=250 кГц) обеспечивает небольшое время доставки, хотя ПД осуществляется через несколько транзитных узлов. Это значение может быть задано для некоторых приложений, когда нет необходимости в малой задержке, или в случае редкого опроса датчиков. Таким образом, применение технологии LoRa может увеличить задержку передачи, однако дальность передачи и малое потребление энергии являются основными преимуществами для приложений ИВ.

Согласно гистограммам распределения задержек на рисунках 22 и 23, требуется большее время доставки данных с большим коэффициентом расширения спектра, узкой шириной полосы пропускания и большим количеством узлов сети. Коэффициент расширения спектра SF представляется количеством кодируемых чипов, поэтому высокое число SF требует большего времени передачи.

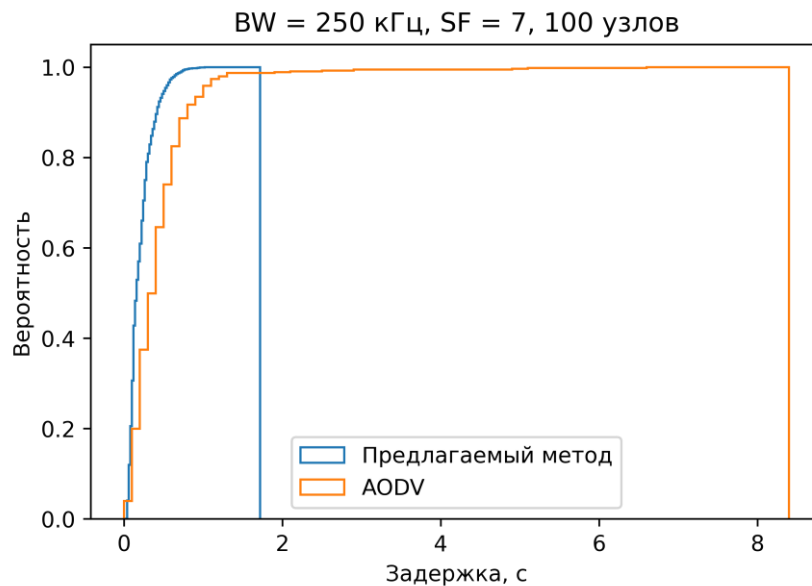
При увеличении количества узлов в сети также возрастает количество генерируемых пакетов. Следовательно, задержки доставки данных и вероятности потери пакетов также возрастают (см. рисунок 24). Количество узлов сети также влияет на процент доставленных пакетов к целевому узлу. На рисунке 26 показано, что процент доставки пакетов с использованием BW=125 кГц больше, чем с BW=250

кГц. Можно полагать, что с увеличением количества узлов в сети коэффициент доставки пакетов уменьшается, при этом ширина полосы пропускания ($BW=125$ кГц) определяет высокую чувствительность приемника.

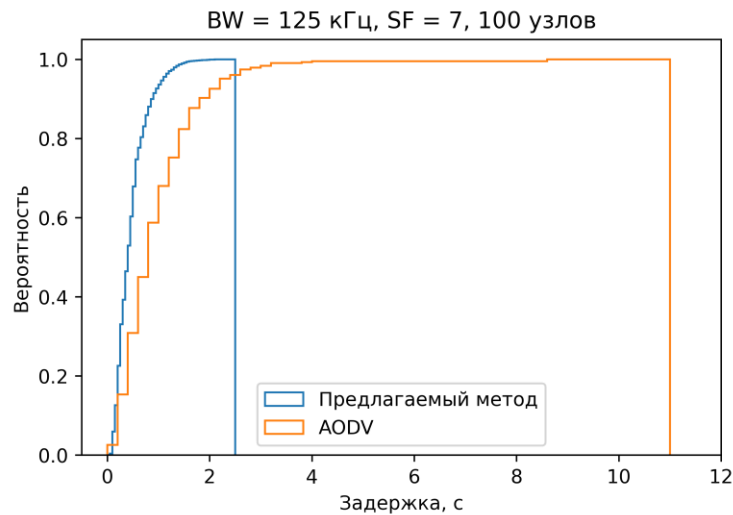
3.3.4 Результаты сравнения с протоколом AODV

При одинаковых условиях моделирования было проведено сравнение предлагаемого метода маршрутизации с более известным протоколом динамической векторной дистанционной маршрутизации по требованию AODV.

Сравнение распределения задержки представлено на рисунке 27.



а) Вероятность распределения задержки при $BW=250$ кГц



б) Вероятность распределения задержки при BW=250 кГц

Рисунок 27 – Сравнение задержки с протоколом AODV

С использованием предлагаемого метода маршрутизации задержка доставки намного меньше, чем при использовании протокола AODV.

Кроме того, целесообразно оценить среднюю задержку и коэффициент доставки пакетов с разным количеством узлов. Результаты моделирования при настройке BW=125 кГц и SF=7 показаны на рисунке 28. Рисунок 28 показывает средние задержки в двух случаях при увеличении количества узлов в сети. По данным графика видно, что средняя задержка доставки с использованием предлагаемого метода оказывается меньше по сравнению с протоколом AODV.

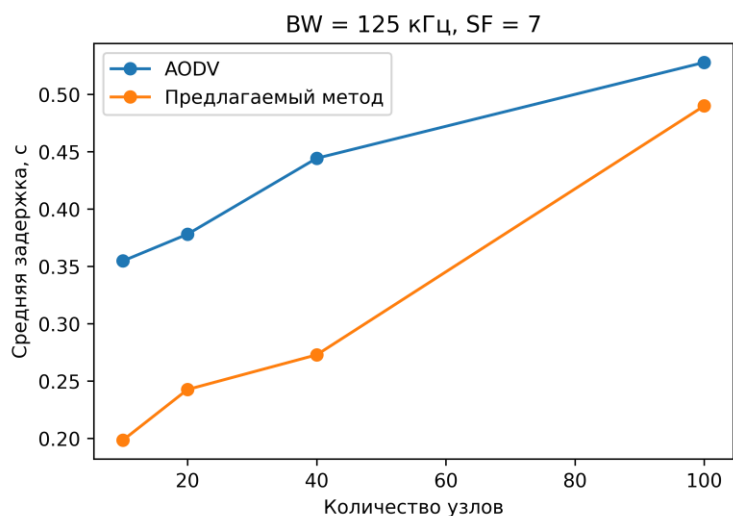


Рисунок 28 – Сравнение средней задержки доставки с протоколом AODV

Более того, предлагаемый метод также показывает больший процент доставленных пакетов (рисунок 29).

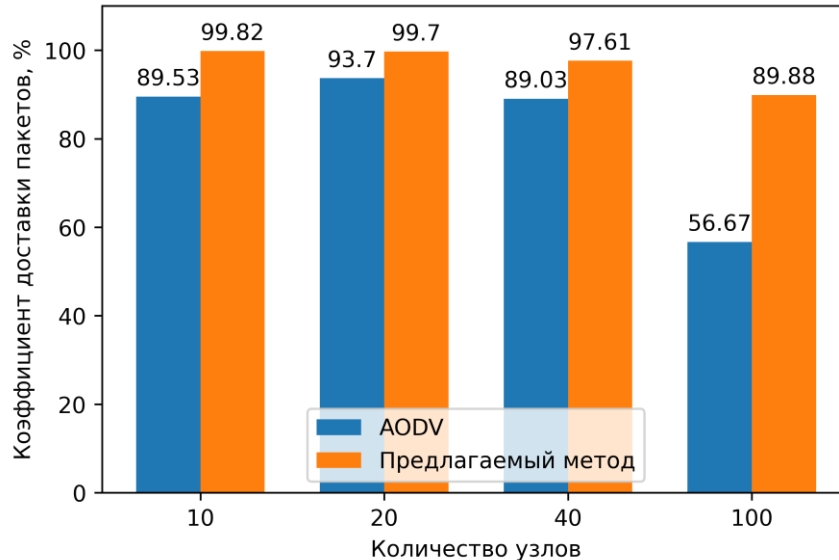


Рисунок 29 – Сравнение коэффициента доставки пакетов с протоколом AODV

3.4 Метод маршрутизации на основе машинного обучения с подкреплением

3.4.1 Подход машинного обучения к маршрутизации

В последние годы развитие концепции Интернета вещей привело к увеличению общего объема передаваемых данных в сетях связи [2, 84]. Появление множества приложений ИВ, начиная от умных гаджетов до приложений «умный дом» и «умный город», собирающих и передающих большие данные на облачные сервера, приводит к возрастанию нагрузки на традиционные сети связи общего пользования

[12]. В большинстве сетей ИВ узлы могут соединяться между собой на базе много-скачковой или ячеистой топологии для передачи данных (ПД) к узлу назначения [7, 15, 30]. Однако для работы с вновь создаваемыми сетями особенно важно разработать эффективный метод маршрутизации [51, 80, 86].

Традиционные алгоритмы статистической и динамической маршрутизации трудно применить к крупномасштабной сети с неопределенной интенсивностью нагрузки. Несмотря на то, что таблица маршрутизации может быть автоматически обновлена в соответствии с текущей сетевой средой, одним из требований остается предоставление глобальной информации о сети, что ведет к увеличению интенсивности нагрузки на сеть.

Ячеистые сети городского масштаба (рисунок 30) предоставляют подключение и обмен данными устройствам ИВ, находящимся далеко от шлюза. Такая топология наиболее подходит для инфраструктуры «умных устойчивых городов» ввиду высокой надежности и сходимости сети в случае отказов части узлов. При использовании ячеистой топологии данные могут быть переданы через несколько узлов, чтобы достигнуть узла-получателя [15, 30, 58]. Ячеистые роутеры имеют функционал маршрутизации, что требует применения эффективных механизмов обслуживания трафика. Большинство эволюционных алгоритмов маршрутизации используется для поиска маршрутов по заданным метрикам с целевой функцией. Метриками могут быть количество промежуточных узлов, задержка, процент потери пакетов, пропускная способность и др.

Необходимо отметить, что существует сложность в решении задачи многокритериальной оптимизации. В последние годы технологии искусственного интеллекта достигли значительного развития применительно к задачам многих областей жизнедеятельности, в том числе с алгоритмами маршрутизации, позволяя повысить эффективность поиска решения таких задач [100]. Методы машинного обучения могут быть использованы для решения многоцелевых задач, возникающих при недостатках эволюционных алгоритмов [9, 108].

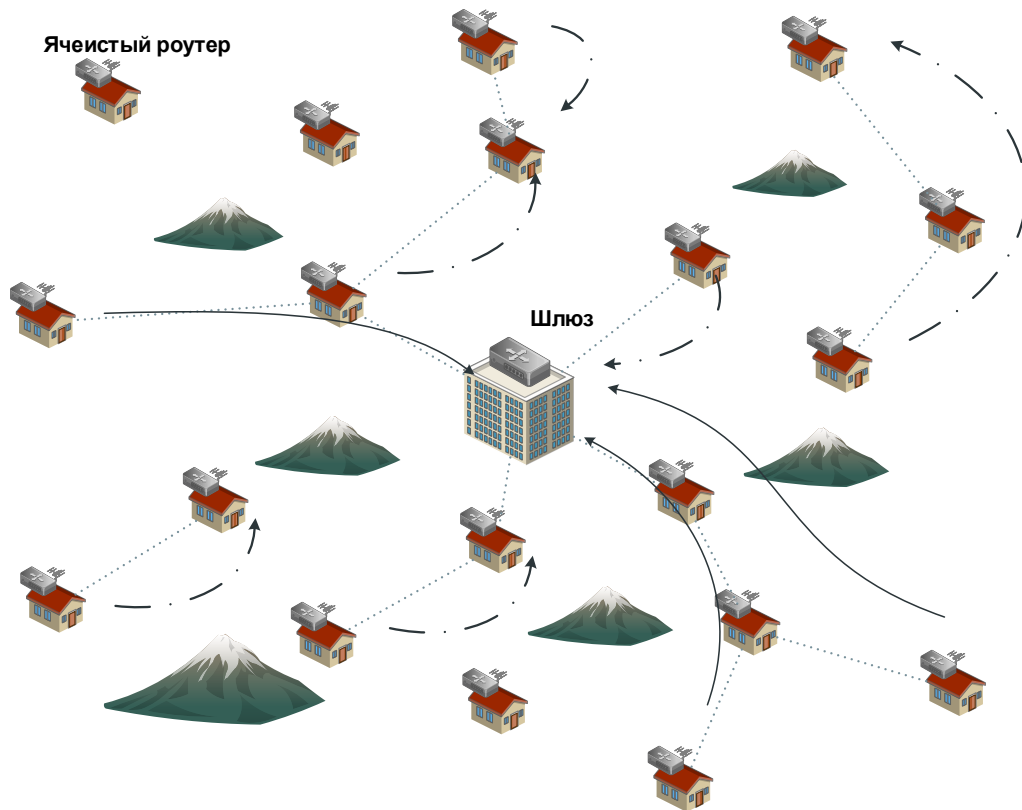


Рисунок 30 – Ячеистая сеть

Маршрутизация представляет собой задачу выбора оптимального (по многим критериям) маршрута среди множества возможных для переадресации данных от источника к месту назначения. Иными словами, необходимо выбрать самый подходящий соседний узел для ПД к узлу-получателю. Одна из целей маршрутизации – выбор последующего узла для передачи, минимальные задержка доставки и вероятность потери пакетов. Многие существующие динамические методы маршрутизации используют глобальную информацию о сети, что приводит к увеличению количества служебных пакетов и нагрузки на сеть связи.

Проблему можно решить с помощью машинного обучения с подкреплением [48, 106], которое может не зависеть от знания глобальной информации. В процессе обучения оптимальную стратегию действий можно определить путем вычисления целевой функции или награды для каждого возможного маршрута в сети. При этом имеется только информация о текущем состоянии и последующая информация после ПД на следующий маршрут.

3.4.2 Машинное обучение с подкреплением

Машинное обучение с подкреплением – это один из типов машинного обучения, при котором испытываемая система (агент) обучается, взаимодействуя с некоторой средой. Откликом среды на принятые решения являются сигналы подкрепления, поэтому такое обучение является частным случаем обучения с учителем, но учителем является среда или ее модель [48].

Метод построен на основе принципа Марковского процесса принятия решений: наблюдаются исследуемый агент, его среда и состояния, возможные действия и величина награды. Все возможные решения и все, что может повлиять на решение агента (его среда), рассматривается агентом. Допустим, что в произвольный момент времени агент находится в состоянии $S(t)$. Действия $A(t)$, выполняемые агентом, переводят его в следующее состояние $S(t+1)$ и воздействуют на среду, которая обеспечивает определенное вознаграждение $R(t)$. Величина награды может быть как отрицательной, так и положительной. Процесс обучения повторяется для максимизации общей стоимости вознаграждения.

Основная идея данного метода обучения заключается в том, что все возможные воздействия имитируются и предполагают обратный отклик с соответствующей наградой для достижения долгосрочных результатов. Процесс поиска методом проб и ошибок с вознаграждением является важнейшей особенностью обучения с подкреплением.

3.4.3 Метод обучения выбора маршрута

Узел сети представляет собой обучаемого агента, который осуществляет действия для дальнейшего выбора последующего узла-маршрутизатора. Как показано

на рисунке 31, процесс маршрутизации изменяется на базе обучения и обновляется после каждой интеграции. По каждому из маршрутов агент получает обратную связь, например, задержку доставки и процент потери пакетов. Эти данные используются для награды действия агента при определенном его состоянии. Выбор маршрута в данном случае понимается как выбор соседнего узла для переадресации пакетов. В этом случае интеллектуальный агент, который может наблюдать за сетевой средой и предпринимать действия для маршрутизации пакетов, обучает с помощью ряда факторов [24].

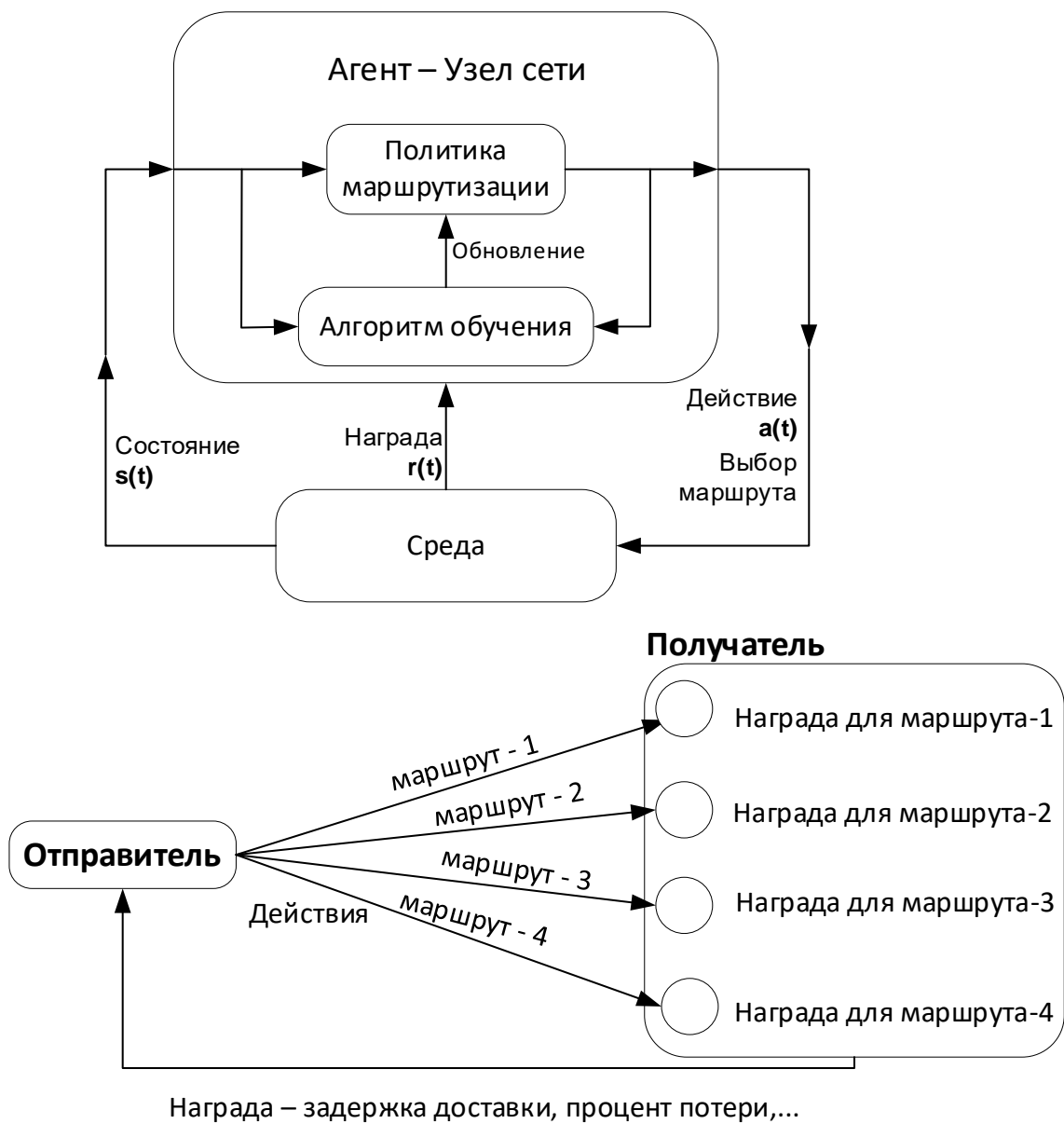


Рисунок 31 – Обучение с подкреплением

А. Состояние

В момент времени t узел-отправитель, передающий пакет данных к узлу назначения d , может быть представлен в качестве состояние $s_d(t)$. Один узел может передавать данные ко многим узлам назначения, поэтому рассматриваем состояние $s_d(t)$ для выбора маршрута к узлу-получателю d . Кроме этого, учитываем остаточный размер буферов передающего узла и соседних узлов при моделировании системы массового обслуживания (СМО) в пакете Anylogic.

В. Действие

Существует набор маршрутов $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots\}$, по которым можно передавать данные к узлу-получателю. В качестве действия $A(t)$ рассматриваем номера маршрута p_i , выбираемого для передачи к узлу назначения d .

С. Вознаграждение

В соответствии с каждым действием агент получает награду. Определение информации о вознаграждении $R(t)$ является целью обучения, т.е. что и по каким показателем агент хочет получить. Для обеспечения минимальной задержки доставки и потери пакетов к узлу-получателю будем рассматривать информацию о задержке доставки \bar{T} и потери L для вознаграждения действия $r(t) = \bar{T} + L$.

После получения всей информации о состоянии, действии и вознаграждении алгоритм обучения определяет значение функции Q -обучения [5, 75]. Полученное значение показывает, насколько хорошее или плохое состояние, и обновляется после каждой итерации. Таким образом, значение функции $Q_d(s, p)$ определяет значение, при котором текущее состояние S узла-отправителя выбирает действия по маршруту p для ПД к узлу-получателю d . Обновление функции Q -обучения использует старое и текущее значения:

$$Q_d(s, p) \leftarrow Q_d(s, p) + \alpha \left(\bar{T} + L + \gamma \min_{p'} Q_d(s', p') - Q_d(s, p) \right), \quad (16)$$

где $r(t) = \bar{T} + L$ – награда, полученная при переходе от выбора одного маршрута в другой; $0 < \alpha \leq 1$ – скорость обучения.

По алгоритму Q-обучения ошибка вычисляется по каждому маршруту в каждый момент времени t и используется для определения оптимального действия в следующем состоянии $(t+1)$. Чем меньше задержка доставки и потери, тем лучше маршрут (действие), поэтому используется минимальная функция в уравнении (16).

Алгоритм RF-маршрутизации:

Инициализация.

Вход: $\forall d \in S, p \in A, Q_d(s, p)$.

Выход: политика маршрутизации.

1. Найти все возможные маршруты к узлу назначения d : $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots\}$.
2. Повторить (для каждого эпизода).
3. Инициализация состояния S_d .
4. Повторить (для каждого маршрута).
5. Использование политики из Q для выбора действия p .
6. Выбор одного из действий P , наблюдать \bar{T}, L .
7. $Q_d(s, p) \leftarrow Q_d(s, p) + \alpha \left(\bar{T} + L + \gamma \min_{p'} Q_d(s', p') - Q_d(s, p) \right)$
8. До того, как s последний.
9. Возвращается политика действия.

3.4.4 Моделирование и результаты

Было проведено моделирование передачи заявок через несколько возможных маршрутов, в которых точка принятия решения воспринималась как место для обучения с подкреплением. При рассмотрении каждого узла и возможного маршрута в качестве СМО можем имитировать систему ПД от источника к приемнику по

всем возможным маршрутам и получить обратную связь о системе. Данные обратной связи и текущего состояния системы могут быть использованы для обучения с подкреплением.

Сегодня в основном распространены три типа имитационного моделирования: системная динамика, дискретно-событийное и агентно-ориентированное моделирование. Поскольку обучение с подкреплением основано на принципе Марковского процесса принятия решений, то любая имитационная модель с этим принципом может быть использована для обучения агента. В проведенном исследовании рассмотрено моделирование фрагмента сети ПД как СМО с действием выбора маршрута, по которому передаются заявки. В процессе обучения происходит адаптация алгоритма маршрутизации при варьировании параметров системы до минимизации сетевой задержки при доставке пакетов.

Система массового обслуживания. Рассматривается многоскачковая сеть как многофазная СМО. Как показано на рисунке 32, существует два возможных маршрута для передачи заявок от источника к приемнику. Источник генерирует пакеты с интервалом между заявками интенсивностью λ , а время обслуживания с интенсивностью μ на каждом узле СМО. На схеме ниже показана модель обслуживания M/M/1, т.е. интервал времени между заявками случаен и имеет распределение по экспоненциальному закону с интенсивностью λ . Время обслуживания также является случайным с экспоненциальным распределением и интенсивностью μ . Таким образом, чтобы минимизировать среднее время доставки \bar{T} между источником и приемником, задачу маршрутизации надо решать в точке выбора маршрута. Выбор того или иного маршрута определяется на базе обучения с учетом изменения интенсивности поступления заявок.

Моделирование СМО в пакете Anylogic. Имитационная модель (рисунок 33) создана с помощью пакета Anylogic Professional 8.7.3 пробной версии (<https://www.anylogic.com>) [108]. В модели были настроены единицы модельного времени в секундах, а интервал между прибытиями заявок и задержка обслуживания – в минутах по экспоненциальному закону распределения с параметрами

($\lambda, \mu, \mu_1, \mu_2, \mu_3$). Действия маршрутизации для выбора первого или второго маршрута заявки осуществляются в блоке *selectOutput*. Номер *routeNumber*, используемый для логики выбора маршрута, является выходом модели обучения с подкреплением. Данные имитационной системы наблюдаются и поданы на вход модели обучения. Среднее время доставки *divt* и количество потери *lossCount* рассматриваются как награда в процессе обучения при получении минимальных задержек доставки и процентов потерь.

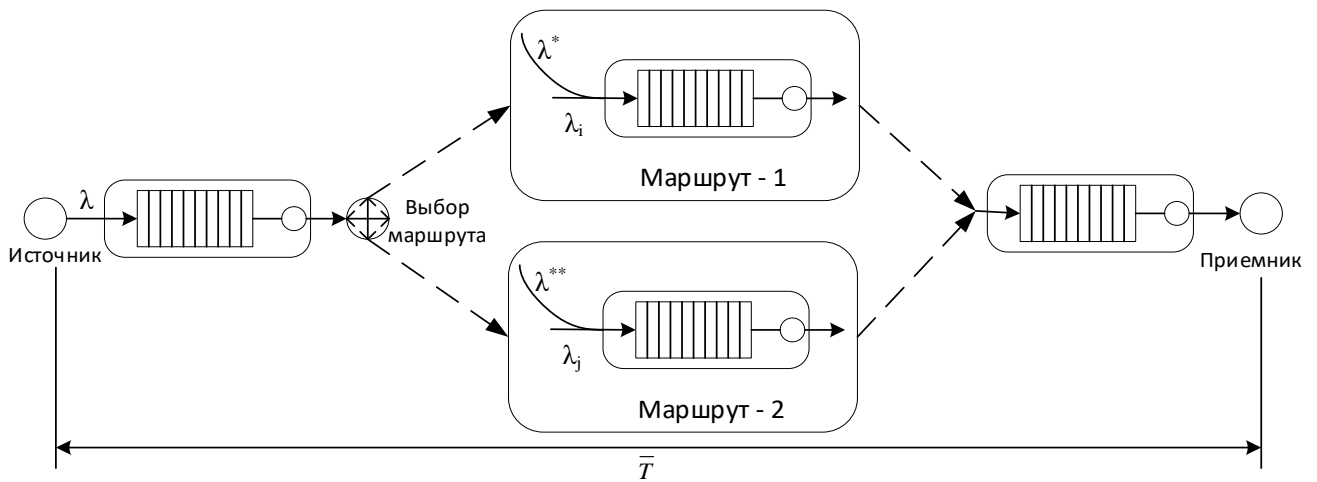


Рисунок 32 – Представление маршрута передачи данных как СМО

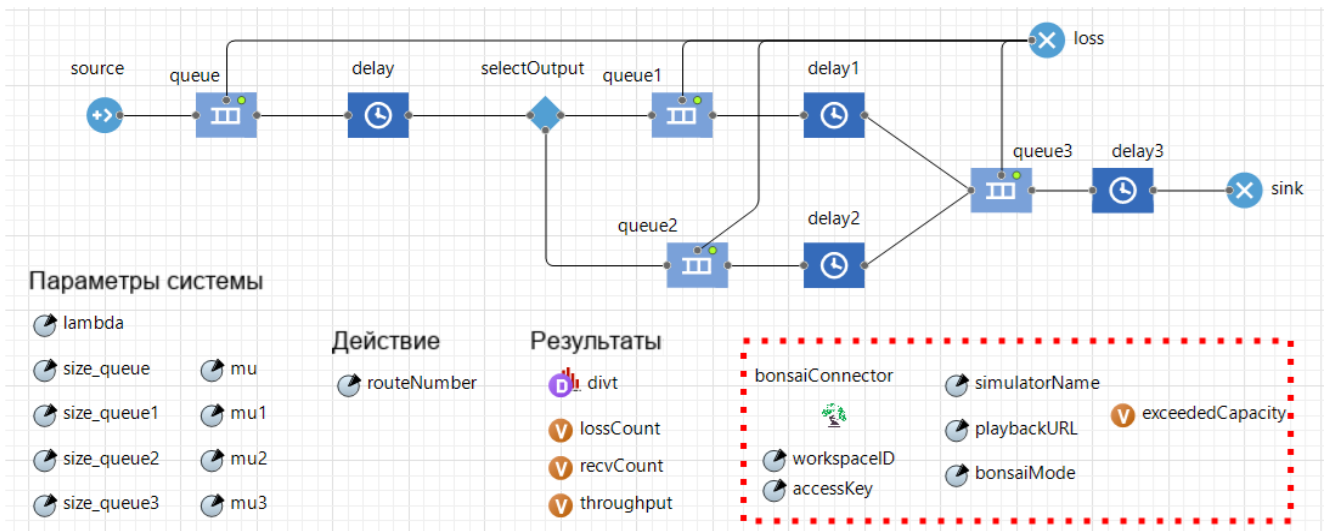


Рисунок 33– Имитационная модель фрагмента сети в пакете Anylogic

Обучение с подкреплением на платформе Microsoft Bonsai (<https://bons.ai>).

Имитационная модель, созданная в пакете Anylogic, обучалась с помощью платформы MS Bonsai. Согласно схеме обучения для симулятора (рисунок 34), имитационная модель обучения с подкреплением сама по себе действует как оптимизатор `optimize`, который использует различные входные параметры для наблюдения за результатом изменения выходных показателей симулятора `Simulator`. Таким образом, действия на выходе блока `optimize` подаются на вход блока `Simulator`, который имитирует процесс ПД между двумя узлами. После выполнения данного действия состояние системы изменяется, что можно заметить на выходе блока `Simulator` и при последующей передаче результатов на вход блока `optimize` для обучения. Функция вычисления награды `Reward` в блоке вычитает среднюю задержку доставки, и количество потерь под каждым действием в момент подачи заявки подается на вход блока `selectOutput`.

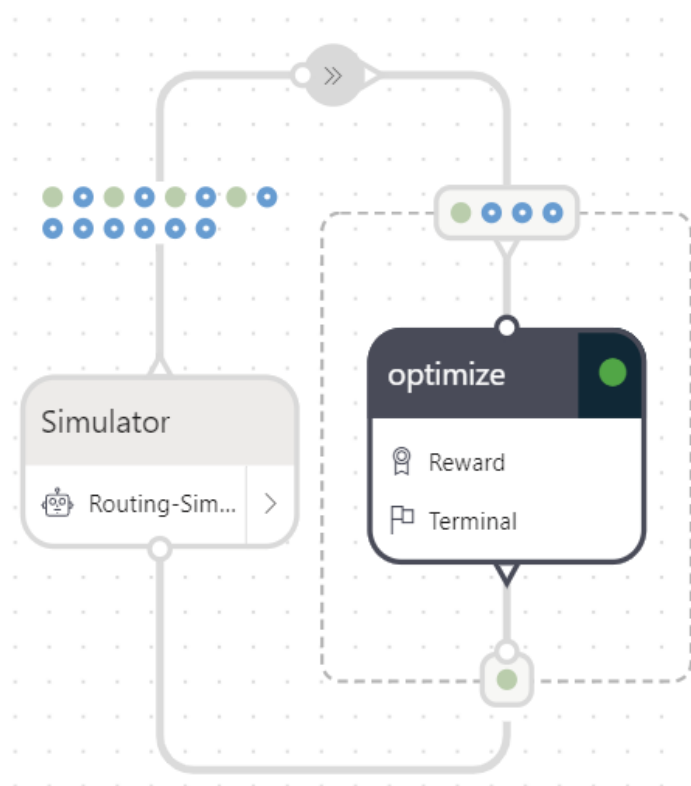


Рисунок 34 – Схема обучения Bonsai для симулятора

Результаты обучения и моделирования. После завершения процесса обучения модель можно экспортировать из платформы *Bonsai* и использовать в качестве программного интерфейса приложения. Принятие решения о выборе маршрута запрашивается из обученной модели, когда заявка уходит на выход блока *delay*. В ходе исследований была проведена серия компьютерных экспериментов, выявившая, что при изменении интенсивности прибытия λ меняется интенсивность нагрузки ρ в сети.

В результате экспериментов среднее время доставки сравнивалось для двух моделей с обучаемой маршрутизацией и случайной маршрутизацией. Данные задержки доставки пакетов в зависимости от увеличения интенсивности поступления заявок представлены на рисунке 35.

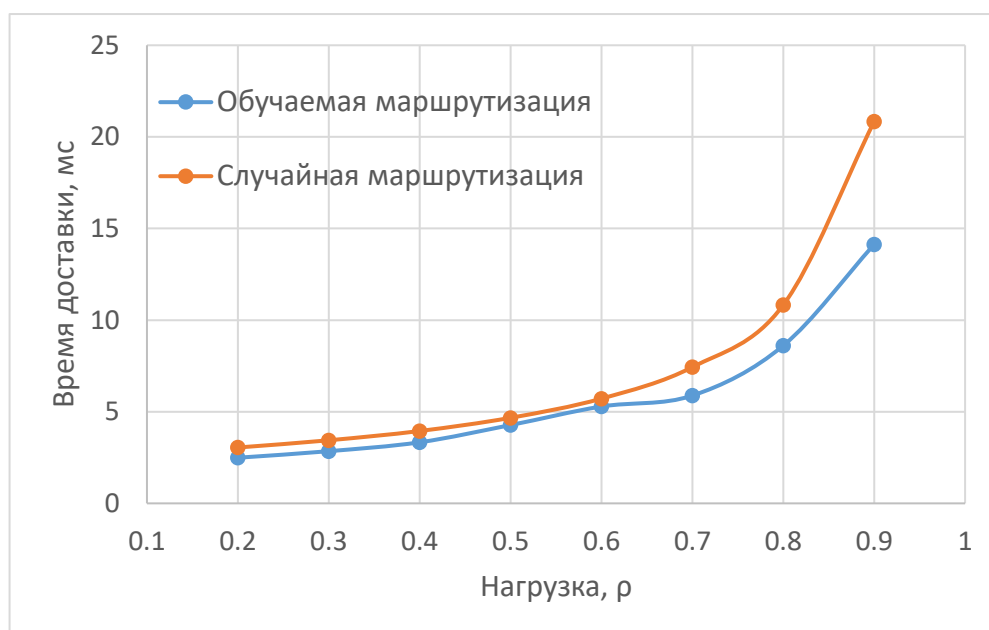


Рисунок 35 – Среднее время доставки пакетов

По графикам на рисунке 35 видно, что у обучаемой модели среднее время доставки меньше, чем у модели со случайным выбором маршрута в точке принятия решения. Это особенно актуально при большой нагрузке в высокоплотных сетях, поскольку позволяет уменьшить задержку доставки пакетов при использовании обучаемой маршрутизации.

Результаты моделирования показали, что задержка доставки пакетов после обучения оказалась меньше, чем задержка с традиционными методами маршрутизации. При рассмотрении модели СМО М/М/1 для генерации интервалов между заявками и временем обслуживания заявок, а также при изучении поведения системы на каждом шаге выполнения предложенного алгоритма RF-маршрутизации выявлены особенности, влияющие на среднее время доставки пакетов и вероятность отказа обслуживания.

3.5 Выводы по главе

1. В связи с развитием приложений «умный дом», «умный город» предложенная модель энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия позволяет обеспечить подключение датчиков и исполнительных устройств к сети связи общего пользования. Была представлена концепция гибридной беспроводной ячеистой сети с учетом рассмотрения технологии передачи данных с большой дальностью и малой мощностью (LoRa – одна из перспективных технологии ПД для данных целей). Использование ячеистой топологии для организации энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия позволяет обеспечить большой радиус покрытия и обмен данными с другими технологиями передачи данных малого радиуса действия, такими как Wi-Fi или BLE.

2. В предложенной модели энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса учитывается структура сети с использованием гетерогенных шлюзов, которая позволяет обеспечить взаимодействие с другими сетями связи в умных городах.

3. Одной из важнейших задач обеспечения эффективной передачи данных в ячеистой сети является выбор надежных маршрутов для перенаправления пакетов. Разработанный метод оценки комплексного показателя качества соединения с использованием набора данных, таких как индикатор уровня принятого сигнала RSSI,

отношение сигнала к шуму SNR принятых пакетов и скорость прием пакетов PRR, позволяет предложить классификацию уровней показателя качества соединения на основе технологий машинного обучения (метод опорных векторов SVM). По результатам экспериментов предлагаемый метод показывает высокую точность (среднее значение = 95%).

4. На основе оценки комплексного показателя соединения разработанный метод маршрутизации позволяет организовать надежные энергоэффективные ячеистые сети дальнего радиуса действия с использованием технологии передачи данных LoRa. Результаты компьютерного моделирования показали влияние параметров узлов сети LoRa на распределение задержек и коэффициент доставки пакетов. Данные результаты можно использовать для развертывания различных приложений ИВ в зависимости от параметров настройки узлов сети LoRa. По результатам сравнения с известным протоколом маршрутизации AODV предлагаемый метод показал меньшую сетевую задержку и больший процент доставки пакетов.

5. Кроме того, для устройств с возможностью питания от внешнего источника был предложен метод маршрутизации на основе машинного обучения с подкреплением, который показывает эффективность в уменьшении задержки доставки при увеличении интенсивности нагрузки. По результатам моделирования показано, что предлагаемый метод обеспечивает задержку меньше 25% по сравнению со случайной маршрутизацией.

ГЛАВА 4. МЕТОД ПЕРЕДАЧИ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ЯЧЕИСТОЙ СЕТИ ДАЛЬНОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ

4.1 Описание фрагмента энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия для передачи мультимедийного трафика

Традиционно персональные сети и энергоэффективные сети дальнего радиуса действия ориентированы на передачу данных от устройств Интернета вещей. Технологии, входящие в эти разновидности сетей, используются в устройствах сбора данных телеметрии, температуры окружающей среды и других параметров [13, 56]. Отправка данных с устройств достаточно редкая, а большую часть времени устройство, как правило, находится в режиме «сна», за счет чего удается сохранить заряд батареи питания длительное время. Основным преимуществом персональных сетей является самоорганизация за счет применения ячеистой топологии и возможность передачи данных на большие расстояния в сетях LPWAN [30, 82]. Также для обоих типов сетей характерно низкое энергопотребление. На стыке преимуществ двух типов сетей была предложена новая услуга, которая дополняет функционал этих сетей, а именно возможность передачи мультимедийного трафика (изображений и голоса) через фрагмент энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия [25, 52, 55]. В работах [52, 55] было проведено исследование возможности передачи мультимедийных данных между двумя устройствами на базе фрагмента сети Zigbee и LoRa по прозрачному каналу. Однако в предлагаемом ниже эксперименте в сети LoRa используется ячеистая топология (характерная для персональных сетей) для передачи изображений с различным разрешением.

На рисунке 36 изображен фрагмент сети LoRa с ячеистой топологией для передачи изображения через промежуточные узлы.

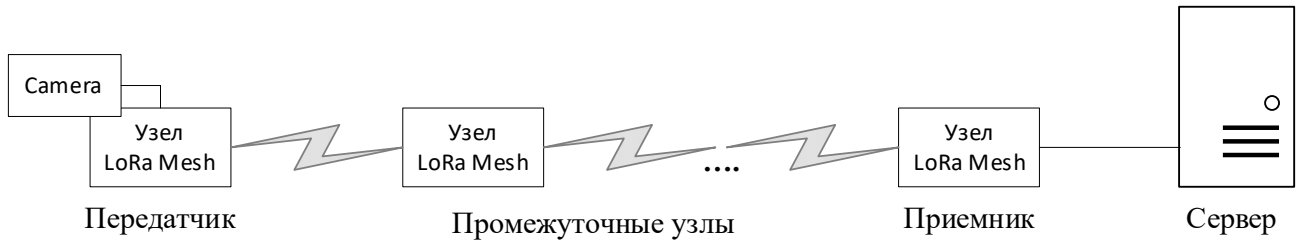


Рисунок 36 – Фрагмент сети LoRa с ячеистой топологией для передачи изображения через промежуточные узлы

В представленном на рисунке 36 фрагменте сети LoRa будет передаваться изображение с различным разрешением и условным уровнем качества изображения (задается в программном обеспечении отладочной платы с камерой), а также будет оцениваться качество принимаемого изображения. Кроме того, будет учитываться время обслуживания пакетов при прохождении через промежуточные узлы. Модель обслуживания трафика в виде СМО представлена на рисунке 37.

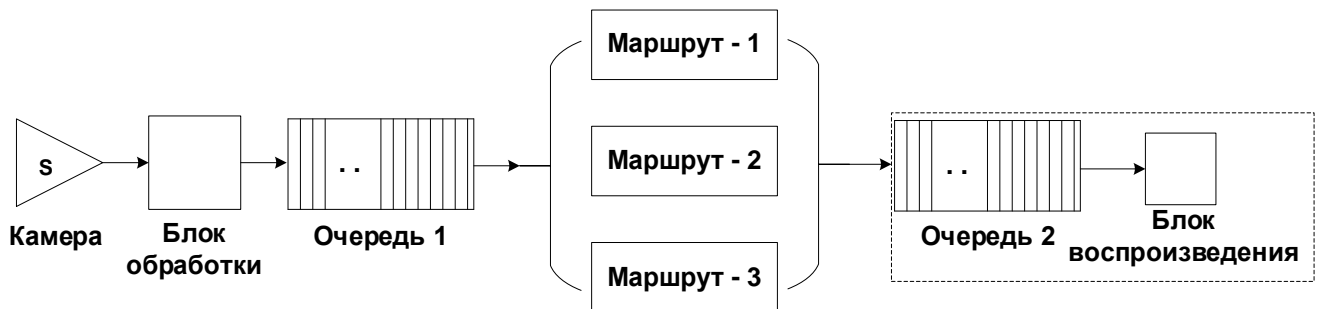


Рисунок 37 – Представление модели обслуживания трафика через сеть в виде СМО

Так как, согласно спецификации LoRa, ограничен размер передаваемого кадра до 255 байт, изображение разделяется на несколько фрагментов и последовательно передается через сеть. Структура пакета передаваемого изображения представлена на рисунке 38. Каждое изображение имеет свой идентификатор и каждому фрагменту присвоен номер порядка фрагментации. На данном рисунке представлен формат команды с N байтами полезной нагрузки для передачи одного фрагмента изображения.

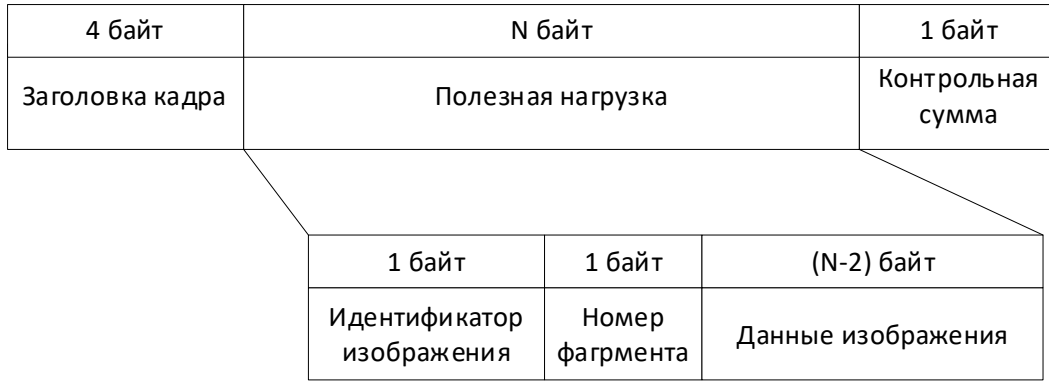


Рисунок 38 – Структура пакета передаваемого изображения

Узел-отправитель с камерой делает снимок изображения после получения запроса от сервера. Рисунок 39 показывает сеанс передачи целого изображения. Таким образом, пользователь может отправить команду узлу-отправителю для запроса изображения через сервер.

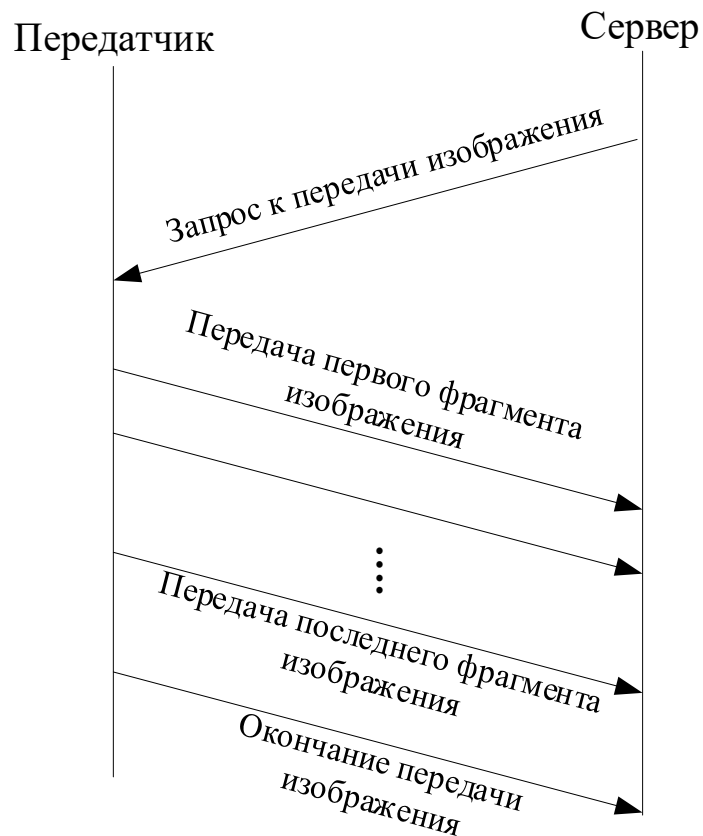


Рисунок 39 – Структура сеанса передачи изображения между узлом-отправителем и сервером

4.2 Экспериментальное исследование

4.2.1 Описание экспериментальной установки

Серия испытаний была проведена на базе распределенной лаборатории ПАО «Ростелеком». Схема тестовой зоны изображена на рисунке 40, согласно которому трафик передачи изображения проходит от узла-отправителя ESP32-CAM к виртуальному серверу (брокер MQTT), потом от сервера к ноутбуку LABS-PC4 для оценки качества полученных изображений.

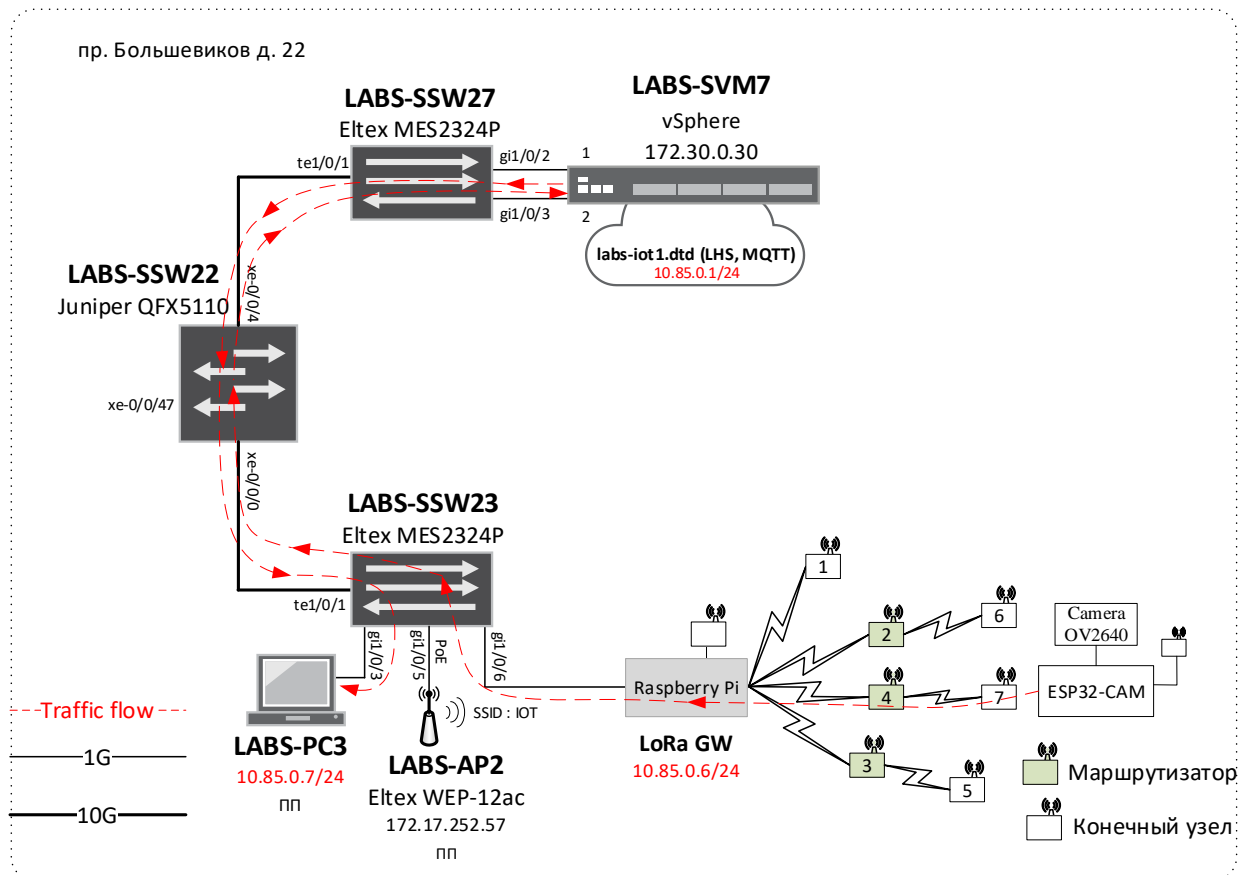


Рисунок 40 – Схема тестовой зоны

Список оборудования, используемого при проведении экспериментов, представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Состав оборудования для проведения эксперимента

Наименование	ПО, версия	Назначение
LABS-SVM7	vSphere 6.7	Сервер виртуальных машин
LABS-PC4	Window 10	Ноутбук для получения передаваемых изображений и обновления прошивки для передатчика
mqtt_gateway.py	0.1	Скрипт для шлюза
mqtt_sub.py	0.1	Скрипт клиента для получения изображений
Шлюз LoRa	Raspbian OS	Обмен данными между сетям IP и LoRa
6 узлов LoRa		Ретрансляция пакетов
ESP32-CAM	0.1	Захват и передача изображений
PuTTY	0.74	Подключение к LoRa GW (шлюзу LoRa) для конфигурирования

Для проведения экспериментов были использованы радиомодули YL-800N. Отладочная плата ESP32-Camera с камерой OV2640 использовалась для съемки изображений и передачи их через ячеистую сеть LoRa Mesh на удаленный сервер. Схема экспериментальной сети с несколькими промежуточными узлами между передатчиком (ESP32-Camera) и приемником (шлюз LoRa к серверу) приведена на рисунке 36. Плата ESP32-Camera соединяется с модулем YL-800N через последовательный порт (UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) для ПД через ячеистую сеть. По программному интерфейсу приложения плата ESP32-Camera формулирует команду и передает ее модулю YL-800N через порт UART.

Кроме того, также измеряется энергопотребление передатчика ESP32-CAM во время проведения испытаний. Схема стенда измерения энергопотребления представлена на рисунке 41. Используемое в данной схеме оборудование перечислено в таблице 7.

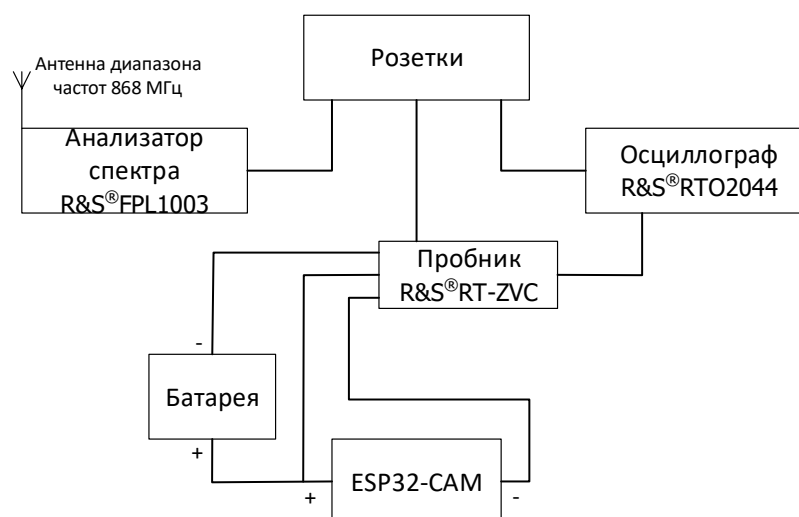


Рисунок 41 – Схема измерения энергопотребления

Таблица 7 – Состав оборудования измерения энергопотребления

Наименование	Назначение
Многоканальный пробник мощности Rohde & Schwarz RT-ZVC	Измерение одновременно напряжения и силы тока
Цифровой осциллограф Rohde & Schwarz RTO2044	Осциллограф для измерения напряжения и силы тока, обработки и записи результатов
Анализатор спектра Rohde & Schwarz FPL1003	Анализ спектра сигналов для исследования частотного диапазона LoRa
Антенна диапазона частот 868 МГц	Прием сигналов LoRa

Размер зафиксированного изображения больше допустимого размера передаваемых пакетов по сети LoRa, поэтому в ходе эксперимента изображение разбивается на фрагменты по 100 байт (структура пакета согласно рисунку 38).

Устройство передает изображение по запросу сервера (рисунок 40). Сервер передает узлу с камерой команду для запроса передачи изображения. После получения команды плата ESP32-Camera делает фотографию, которая временно сохра-

няется в виде массива байтов. Каждые 100 байт используются для отправки фрагмента изображения. Кроме того, собираемые на сервере изображения обрабатываются для распознавания объектов или текста, присутствующих на изображениях.

Согласно спецификации технологии LoRa можно варьировать параметры конфигурации. В нашем эксперименте параметры, представленные в таблице 8, соответствуют скорости ПД – приблизительно 10.93 кбит/с. При таких параметрах у каждого узла может быть чувствительность приема до -122 дБм.

Таблица 8 – Параметры конфигурации узлов в сети LoRa

Параметры	Значение
Рабочая частота, МГц	868
Мощность передачи, дБм	16
Полоса пропускания (BW), кГц	250
Коэффициент расширения спектра (SF)	7
Скорость кодирования (CR)	4/5

Структурная схема узла передатчика с поддержкой передачи изображения по ячеистой сети LoRa представлена на рисунке 42. В состав устройства входят следующие основные компоненты: плата ESP32-S, камера OV2640, модуль YL-800N, адаптер зарядки для аккумулятора и аккумулятор.

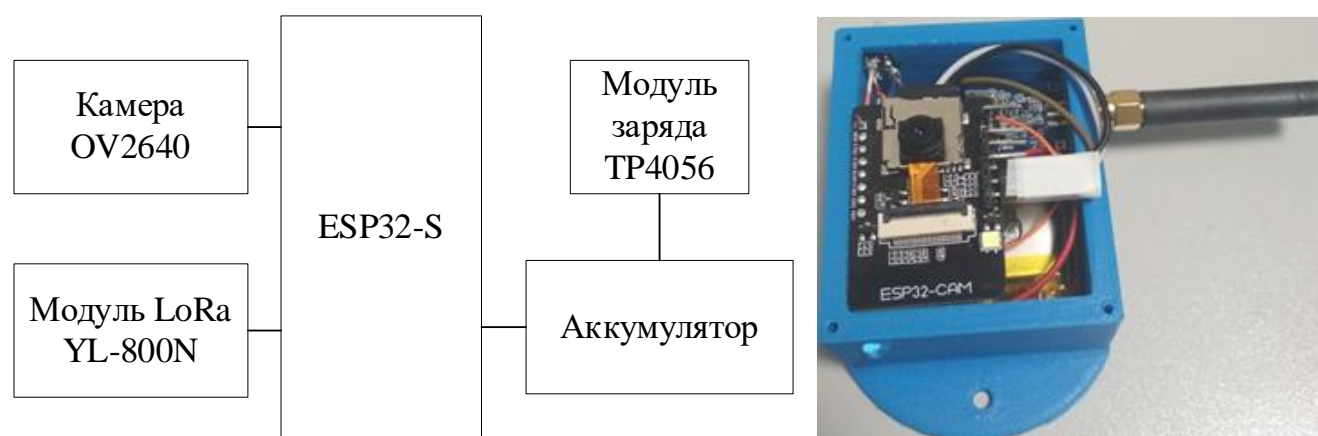


Рисунок 42 – Основные компоненты узла передатчика

Структурная схема узла-ретранслятора, представленная на рисунке 43, имеет функцию переадресации пакетов между узлами-соседями.

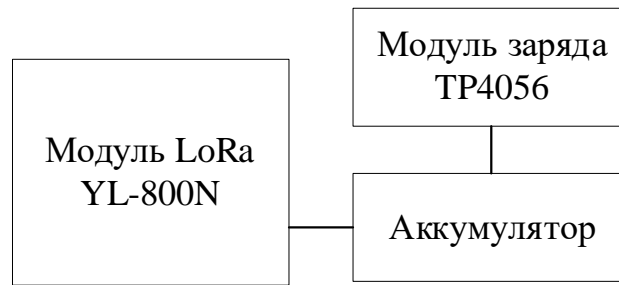


Рисунок 43 – Основные компоненты ретрансляционного узла

В качестве узла с поддержкой LoRa и доступа к сети Интернет использовался шлюз, который принимает и прозрачно передает полученные пакеты к удаленному серверу.

В настройках камеры OV2640 можно выбирать разные разрешения и уровни качества изображения JPEG. В ходе эксперимента камеру располагали на расстоянии 30 см от объекта съемки. По программному интерфейсу приложения для камеры можно выбирать разрешение изображения (240x240, 320x240, 480x320, 800x600 и др.) и уровня качества изображения. В соответствии программного интерфейса для использования отладочной платы ESP32-CAM можно выбрать условный уровень качества изображения JPEG от 0 до 63, где меньшее число означает более высокое качество изображения.

Эксперименты проводили на базе Научно-исследовательской и испытательной лаборатории инновационных инфокоммуникаций ПАО «Ростелеком», открытой при поддержке МСЭ в СПбГУТ им. проф. Бонч-Бруевича. Схема размещения узлов представлена на рисунке 44. В ходе эксперимента варьировались параметры разрешения изображений (240x240, 320x240, 480x320, 800x600) и уровень качества изображения (10, 30 и 60). По каждому из экспериментов были зафиксированы размер отправленного изображения и соответствующее количество пакетов. На стороне удаленного сервера полученные фрагменты объединялись в файл изображения и анализировались.

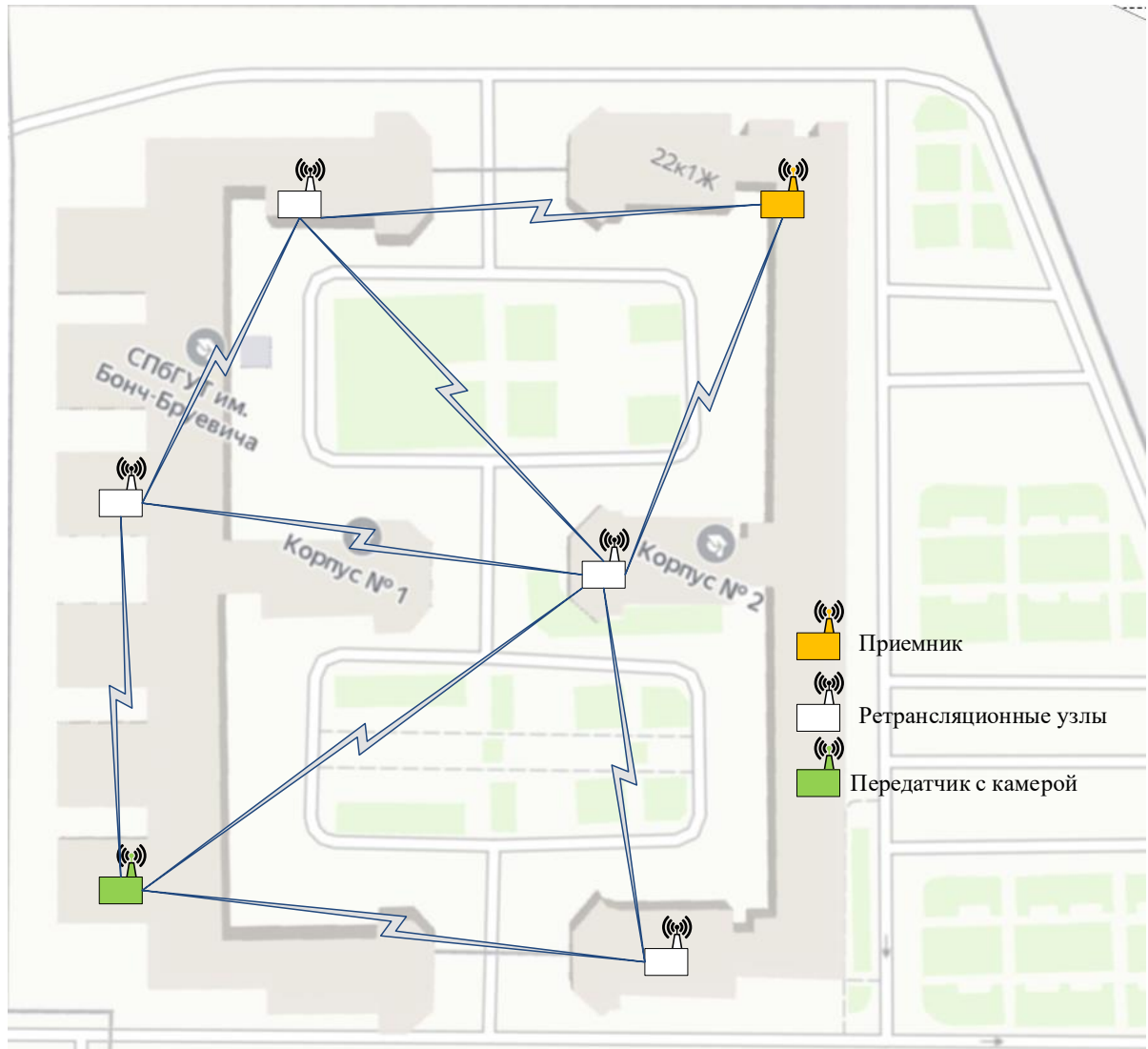


Рисунок 44 – Схема размещения узлов в ходе проведения эксперимента

4.2.2 Результаты экспериментального исследования

В таблице 9 представлены параметры изображения в байтах и соответствующее количество пакетов передачи изображения с различными разрешениями и уровнями качества изображения JPEG. Полученные изображения были обработаны

для последующего распознавания объектов или текста, присутствующих на изображениях. Примером такой задачи может быть распознавание числовых значений механического счетчика показаний воды или газа.

Как видно из полученных результатов, размер изображения увеличивается с возрастанием параметров разрешения и уменьшается со снижением качества изображения. Кроме того, размер изображения, захваченного камерой, также зависит от уровня освещенности и цвета снимаемого объекта. Результаты экспериментов показывают большую разницу по качеству изображения при изменении условных уровней качества изображения 10 и 60. Соответственно, количество пакетов при фрагментации изображения по 100 байтам получено с разными параметрами камеры (рисунки 45, 46 и 47). Для передачи изображения с разрешением 240x240 и уровнем качества изображения 30 требовалось более 30 пакетов.




Таблица 9 – Параметры изображения при передаче через фрагмент сети

Тип изоб.	Среднее кол-во пакетов	Пример полученного изображения
240x240 _10	52	

Продолжение таблицы 9.

Тип изоб.	Среднее кол-во пакетов	Пример полученного изображения
240x240 _30	32	
240x240 _60	25	
320x240 _10	87	

Продолжение таблицы 9.

Тип изоб.	Среднее кол-во пакетов	Пример полученного изображения
320x240 _30	47	
320x240 _60	34	
420x320 _10	123	

Продолжение таблицы 9.

Тип изоб.	Среднее кол-во пакетов	Пример полученного изображения
420x320 _30	58	
420x320 _60	47	

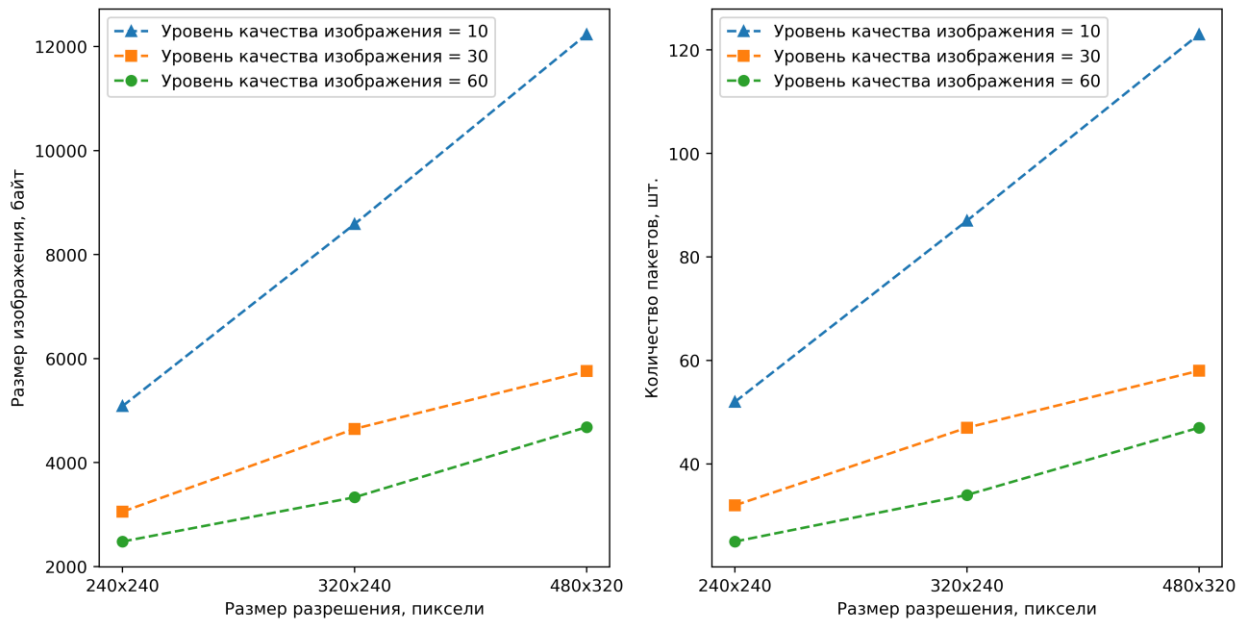


Рисунок 45 – Зависимость размера изображения (байт) и количества пакетов от разрешения изображения при различных уровнях качества изображения

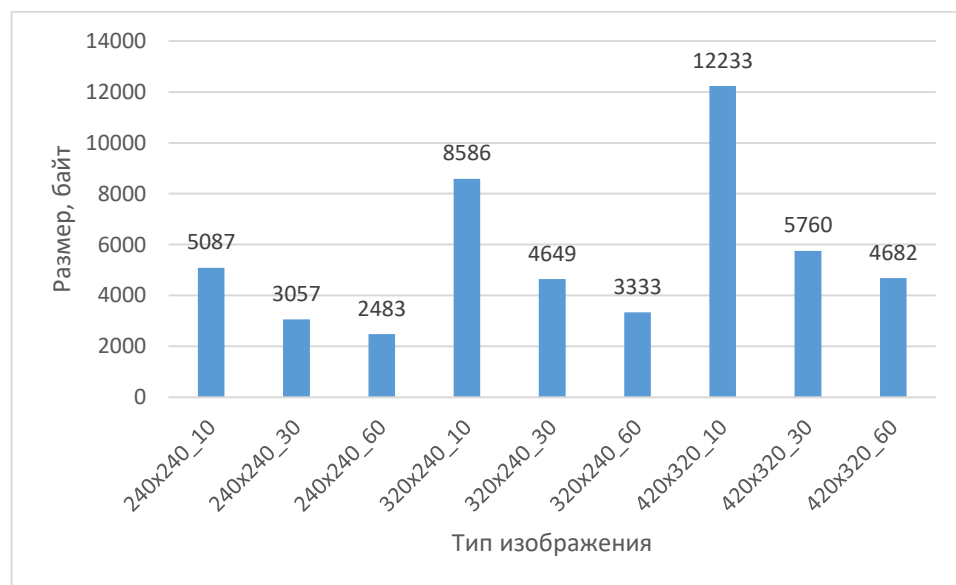


Рисунок 46 – Средний размер изображения (байт) с различным разрешением и уровнем качества изображения

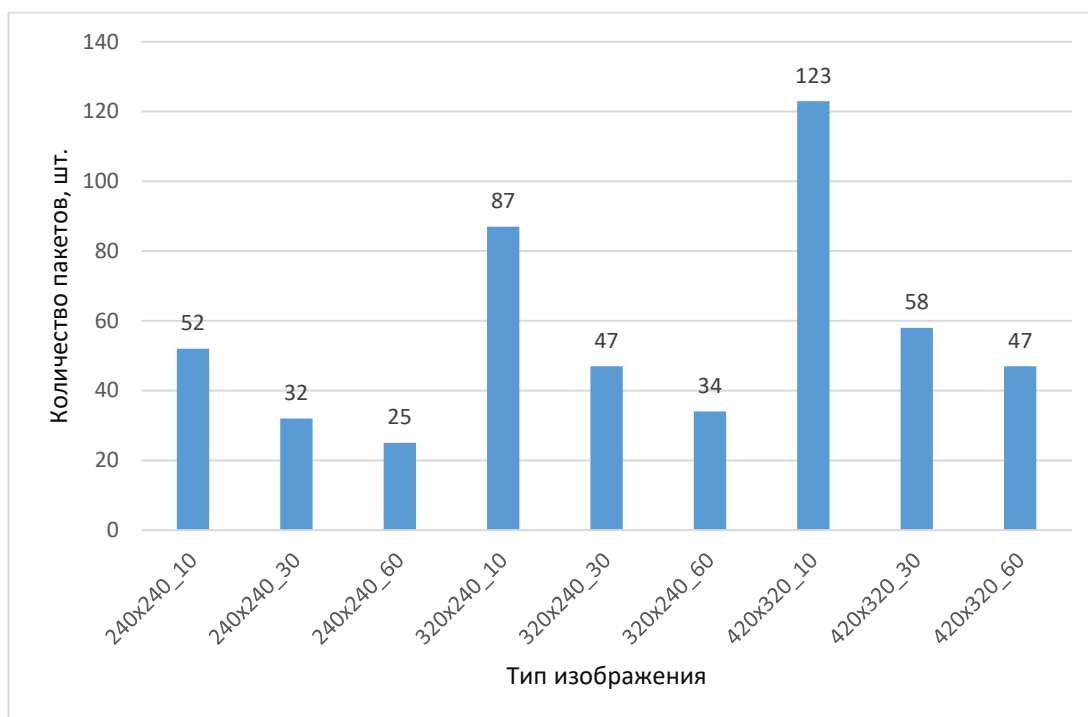


Рисунок 47 – Количество пакетов для передачи изображения с различным разрешением и уровнем качества изображения

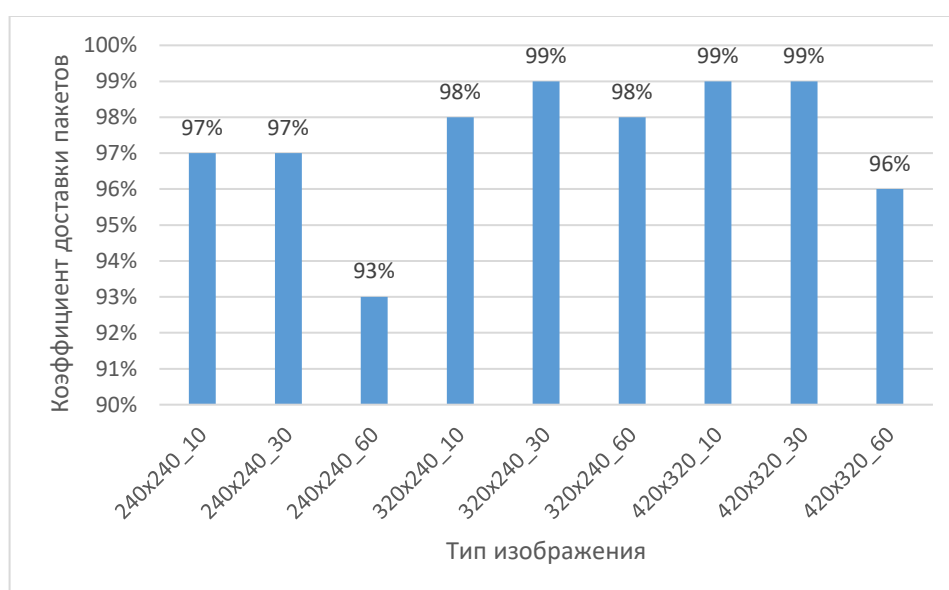


Рисунок 48 – Коэффициент доставки пакетов по результатам передачи 10 изображений каждого типа

Для распознавания объектов или текста на снимаемом изображении часто применяется предобработка для преобразования изображения в «черно-белой» градации цвета. Для исследования качества принимаемого изображения с текстом был

проведен эксперимент с захватом другого изображения, а данные от узла-отправителя также были переданы и обработаны на стороне сервера (рисунок 49). На изображении с большим разрешением легче распознавать объекты или текст. На рисунке 49 текст «Development Tools» и изображение были успешно распознаны с помощью несколько бесплатных доступных OCR-сервисов.



а)



б)



в)

Рисунок 49 – Изображения после предобработки на стороне сервера: а) размер разрешения 240x240, уровень качества изображения 30; б) 320x240 и 30; в) 480x320 и 30

Из рисунка видно, что изображение с размером разрешения 480x320 при условном уровне качества изображения 30 дает самый точный результат распознавания текста, т.е. может использоваться для съемки изображений с целью последующего распознавания деталей картинки с помощью программно-оптических систем.

Из экспериментов также следует, что использование изображения JPEG не лишено недостатков:

- если отсутствует/теряется заголовок JPEG, то файл изображения не может быть восстановлен в читаемый файл;
- при возникновении ошибки в несколько пикселей качество изображения может значительно ухудшиться, или на приемной стороне получится нечитаемое изображение.

Результаты измерения энергопотребления передатчика представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Среднее энергопотребление для различных типов изображения

Тип изображения	Среднее энергопотребление для передачи одного пакета (мкАч)	Среднее количество пакетов для одного изображения (шт.)	Среднее энергопотребление для передачи одного изображения (мАч)
240x240_10	43.70	52	2.27
240x240_30	44.85	32	1.44
240x240_60	42.95	25	1.07
320x240_10	43.36	87	3.77
320x240_30	43.85	47	2.06
320x240_60	43.04	34	1.46
420x320_10	43.19	123	5.31
420x320_30	42.85	58	2.49
420x320_60	43.04	47	2.02

По полученным данным, на рисунках 50 и 51 изображены результаты измерения энергопотребления во время испытания передачи изображений каждого типа.

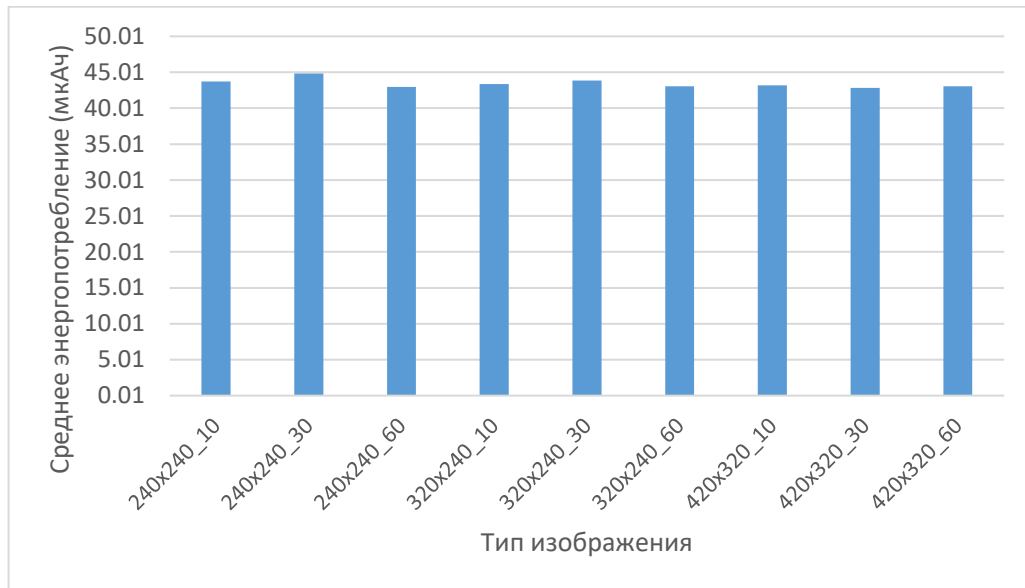


Рисунок 50 – Энергопотребление при передаче одного пакета (включается время ожидания до следующего пакета)

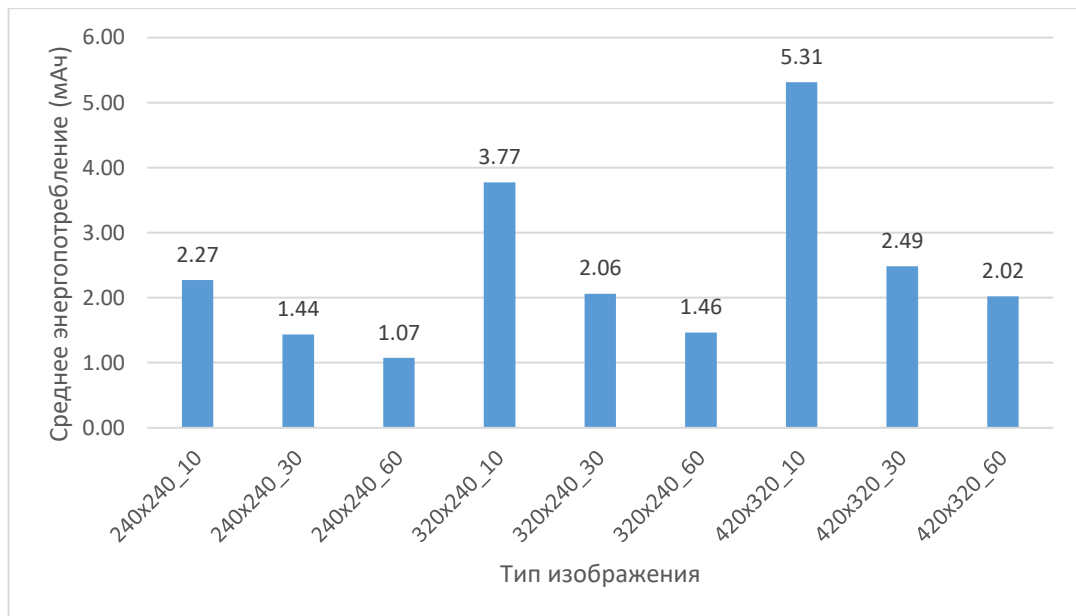


Рисунок 51 – Энергопотребление при передаче изображения по различным типам

Среднее энергопотребление для передачи одного пакета примерно одинаковое во всех случаях (42–45 мкАч).

Среднее энергопотребление для передачи одного изображения варьируется в зависимости от необходимого количества пакетов для передачи этого изображения.

При использовании батареи емкостью 1200 мАч (теоретическая емкость = 1080 мАч) можно передавать приблизительно 500 изображений с разрешением 480x320 и уровнем качества изображения 30.

4.3 Выводы по главе

1. Беспроводные сенсорные сети и энергоэффективные сети дальнего радиуса действия традиционно используются для сбора данных с датчиков и отправки команд на исполнительные устройства. Передача мультимедийного трафика для таких сетей является нетривиальной задачей, которая не была ранее исследована. Предложенный метод передачи мультимедийных данных, в частности изображений, через энергоэффективную ячеистую сеть дальнего радиуса действия на основе технологии ПД LoRa может предоставлять дополнительные сервисы, которые ранее были характерны исключительно для широкополосных технологий передачи данных.

2. Результаты проведения серии испытаний по передаче изображений через фрагмент энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия LoRa Mesh показали возможность передачи различных типов изображения. В результате экспериментов было определено количество пакетов, которые необходимо для передачи каждого типа изображения с соответствующим разрешением и уровнями качества.

3. При использовании отладочной платы ESP32-CAM с заданными параметрами, такими как размер разрешения 480x320 и уровень качества изображения 30, качество полученных изображений приемлемо для распознавания с помощью па-

кетов оптического распознавания символов. Таким образом, можно констатировать, что передача изображений на базе сети LoRa Mesh возможна, если не учитывать сетевую задержку, которая возрастает при увеличении количества узлов-ретрансляторов.

4. В ходе экспериментов были получены средние значения энергопотребления узла-отправителя изображений. При использовании батареи емкостью 1200 мАч (теоретическая емкость = $1200 \times 90\% = 1080$ мАч) можно передавать приблизительно 500 изображений с разрешением 480x320 и уровнем качества 30. Таким образом, возможно планировать время замены элементов питания на узлах с камерой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, заключается в следующем:

1. Проведен анализ энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия. На основе анализа развития беспроводных сенсорных сетей и ограничения энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия был сделан вывод о необходимости реализации ячеистой топологии для эффективной передачи данных в умных городах в условиях плотной городской застройки. Такая реализация позволит увеличить радиус зоны обслуживания узлов в сети и надежность обмена данными для устройств Интернета вещей. Таким образом, были поставлены задачи, которые необходимо решить в рамках диссертационной работы, среди которых основной является разработка моделей и методов маршрутизации для энергоэффективных ячеистых сетей дальнего радиуса действия, а также разработка метода передачи изображений на базе такой сети.

2. Проведен анализ беспроводных ячеистых сетей и протоколов маршрутизации для них. На основе анализа методов маршрутизации в беспроводных ячеистых сетях, которые являются основополагающими и сложными задачами для обеспечения гарантированной передачи данных от узла отправителя к узлу получателя с минимальным временем сходимости сети в случае разрыва того или иного маршрута. Метрика маршрутизации является элементом для оптимизации построения маршрута в беспроводной ячеистой сети. При рассмотрении различных типов маршрутизации, а также описании различных способов выбора маршрута в зависимости от соответствующей метрики.

Проанализировав международные научные публикации сделан вывод, что построение маршрутов может быть проактивным или реактивным, что соответствует типам протокола маршрутизации. По результатам анализа показано,

что проактивные протоколы для построения таблицы маршрутизации должны собрать всю информацию о состоянии маршрутов в сети для нахождения маршрутов между узлами, в то время как реактивные протоколы маршрутизации для нахождения маршрутов осуществляют опрос соседних узлов в случае необходимости. Для выбора оптимального маршрута используется метрика минимального количества ретрансляторов (промежуточных узлов). Кроме того, необходимо учитывать другие параметры качества обслуживания, такие как сетевая задержка и потери при передаче данных. Это особенно важно при рассмотрении энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия, которые могут быть развернуты для приложений Интернета вещей, в том числе в умных городах с плотной застройкой и сложной помеховой обстановкой. Учитывая эти ограничения, для энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия с топологией «звезда» целесообразно рассмотреть возможность использования альтернативных способов маршрутизации для организации взаимодействия узлов с заданным качеством обслуживания.

3. Разработана модель фрагмента энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия с учетом особенностей инфраструктуры умных городов. В связи с развитием приложений «умный дом», «умный город» предложенная модель энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия позволяет обеспечить подключение датчиков и исполнительных устройств к сети связи общего пользования. Была представлена концепция гибридной беспроводной ячеистой сети с учетом рассмотрения технологии передачи данных с большой дальностью и малой мощностью (LoRa – одна из перспективных технологии ПД для данных целей). Использование ячеистой топологии для организации энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия позволяет обеспечить большой радиус покрытия и обмен данными с другими технологиями передачи данных малого радиуса действия, такими как Wi-Fi или BLE. В предложенной модели энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса учитывается структура сети с использованием гетерогенных шлюзов, которая позволяет обеспечить взаимодействие с другими сетями связи в умных городах.

4. Разработаны методы маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия на основе оценки комплексного показателя качества соединения и машинного обучения с подкреплением. Одной из важнейших задач обеспечения эффективной передачи данных в ячеистой сети является выбор надежных маршрутов для перенаправления пакетов. Разработанный метод оценки комплексного показателя качества соединения с использованием набора данных, таких как индикатор уровня принятого сигнала RSSI, отношение сигнала к шуму SNR принятых пакетов и скорость прием пакетов PRR, позволяет предложить классификацию уровней показателя качества соединения на основе технологий машинного обучения (метод опорных векторов SVM). По результатам экспериментов предлагаемый метод показывает высокую точность (среднее значение = 95%).

На основе оценки комплексного показателя качества соединения разработанный метод маршрутизации позволяет организовать надежные энергоэффективные ячеистые сети дальнего радиуса действия с использованием технологии передачи данных LoRa. Результаты компьютерного моделирования показали влияние параметров узлов сети LoRa на распределение задержек и коэффициент доставки пакетов. Данные результаты можно использовать для развертывания различных приложений ИВ в зависимости от параметров настройки узлов сети LoRa. По результатам сравнения с известным протоколом маршрутизации AODV предлагаемый метод показал меньшую сетевую задержку и больший процент доставки пакетов.

Кроме того, для устройств с возможностью питания от внешнего источника был предложен метод маршрутизации на основе машинного обучения с подкреплением, который показывает эффективность в уменьшении задержки доставки при увеличении интенсивности нагрузки. По результатам моделирования показано, что предлагаемый метод обеспечивает задержку меньше 25% по сравнению со случайной маршрутизацией.

5. Разработан метод передачи мультимедийного трафика в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия. Беспроводные

сенсорные сети и энергоэффективные сети дальнего радиуса действия традиционно используются для сбора данных с датчиков и отправки команд на исполнительные устройства. Передача мультимедийного трафика для таких сетей является нетривиальной задачей, которая не была ранее исследована. Предложенный метод передачи мультимедийных данных, в частности изображений, через энергоэффективную ячеистую сеть дальнего радиуса действия на основе технологии ПД LoRa может предоставлять дополнительные сервисы, которые ранее были характерны исключительно для широкополосных технологий передачи данных.

Результаты проведения серии испытаний по передаче изображений через фрагмент энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия LoRa Mesh показали возможность передачи различных типов изображения. В результате экспериментов было определено количество пакетов, которые необходимо для передачи каждого типа изображения с соответствующим разрешением и условным уровнем качества изображения JPEG.

При использовании отладочной платы ESP32-CAM с заданными параметрами, такими как размер разрешения 480x320 и уровень качества изображения 30, качество полученных изображений приемлемо для распознавания с помощью пакетов оптического распознавания символов. Таким образом, можно констатировать, что передача изображений на базе сети LoRa Mesh возможна, если не учитывать сетевую задержку, которая возрастает при увеличении количества узлов-ретрансляторов.

В ходе экспериментов были получены средние значения энергопотребления узла-отправителя изображений. При использовании батареи емкостью 1200 мАч (теоретическая емкость = $1200 \times 90\% = 1080$ мАч) можно передавать приблизительно 500 изображений с разрешением 480x320 и условным уровнем качества изображения 30. Таким образом, возможно планировать время замены элементов питания на узлах с камерой.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

LPWAN – Low-Power Wide-Area Network
RSSI – Received Signal Strength Indicator
SNR – Signal-Noise Ratio
PRR – Packet Reception Rate
LoRa – Long-Range
BW – Bandwidth
SF – Spreading Factor
CR – Coding Rate
UNB – Ultra Narrow Band
RPMA – Random Phase Multiple Access
AODV – Ad hoc On-Demand Distance
DSR – Dynamic Source Routing
DSDV – Destination-Sequenced Distance Vector
OLSR – Optimized Link State Routing
CSS – Chirp Spread Spectrum
HWMP – Hybrid Wireless Mesh Protocol
GSM – Global System for Mobile Communications
LTE – Long Term Evolution
RFID – Radio-frequency identification
UWB – Ultra-Wide Band
WMN – Wireless Mesh Network
WMSN – Wireless Mesh Sensor Network
WPAN – Wireless Personal Area Network
IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
КУ – Конечное Устройство
ГШ – Гетерогенный Шлюз

УГ – Умный Город

ИВ – Интернет Вещей

СМО – Система Массового Обслуживания

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 802.11s-2011 - IEEE Standard for Information Technology--Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 10: Mesh Networking [текст]. — IEEE, 2011. — URL: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2011.6018236>.
2. ITU-T. Recommendation Y.4903/L.1603 (10/16) [электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4903-201610-I/en>
3. Q.3055 signalling protocol for heterogeneous internet of things gateways [электронный ресурс]. — ITU-T, 2019. — URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Q.3055-201912-I>
4. Q.4060 the structure of the testing of heterogeneous internet of things gateways in a laboratory environment [электронный ресурс]. — ITU-T, 2019. — URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Q.4060-201810-I>
5. Smart Sustainable Cities [электронный ресурс]. — ITU-T. — URL: <https://www.itu.int/en/ITU-T/ssc/Pages/default.aspx>
6. Бегишев, В. О. Стратегии распределения радиоресурсов в гетерогенных сетях с трафиком Narrow-Band IoT // В. О. Бегишев, А. К. Самуйлов, Д. А. Молчанов, К. Е. Самуйлов. Системы и средства информ. — 2017, — Т. 27, № 4. — С. 64–79.
7. Беспроводные сенсорные сети : учебное пособие [текст] / Б. Я. Лихтциндер [и др.]. — Москва : Горячая линия-Телеком, 2020. — 236 с.
8. Бородин, А. С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А. С. Бородин, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2017, № 5. — С. 45.
9. Бородин, А.С. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений / А.С. Бородин, А.Н. Волков, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2021. — № 1. — С. 17–22.

10. Боронин, П. Н. Интернет вещей как новая концепция развития сетей связи / П. Н. Боронин, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2014, — Т. 2, № 3. — С. 7–29.
11. Борщев, А. Имитационные модели как виртуальная среда для обучения и тестирования искусственного интеллекта для бизнес-приложений [электронный ресурс] / А. Борщев, А. Махдави, А. Жеребцов // ИММОД-2019. — URL: <https://www.anylogic.de/upload/iblock/d04/d04e706c561eb4ebd7c2810acab8eb7c.pdf>
12. Гольдштейн, Б. С. Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. — СПб. : БХВ, 2013. — 160 с.
13. Динь, Ч. З. Экспериментальное исследование передачи мультимедиа контента для приложений дополненной реальности на базе беспроводной сенсорной сети / Ч.З. Динь, Р.В. Киричек, А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина // Труды учебных заведений связи. — 2019. — Т. 5, № 2. — С. 76–87.
14. Кумаритова, Д. Л. Обзор и сравнительный анализ технологий LPWANсетей [текст] / Д. Л. Кумаритова, Р. В. Киричек // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2016. — Т. 4, по 4. — С. 33–48.
15. Кучерявый А.Е. Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. — СПб.: Изд-во «Любавич», 2011. — 310 с.
16. Кучерявый, А. Е. Интернет навыков / А.Е. Кучерявый, Е. А. Кучерявый, Р. В. Киричек, А. С. Бородин, М. А. Маколкина, А. И. Выборнова, В. Д. Фам, А. А. Ястребова // Электросвязь. — 2018. — № 1. — С. 29–32.
17. Кучерявый, А. Е. Самоорганизующиеся сети и новые услуги / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2009. — № 1. — С. 19–23.
18. Кучерявый, А. Е. Сети связи 2030 / А. Е. Кучерявый, А. С. Бородин, Р. В. Киричек // Электросвязь. — 2018. — № 11. — С. 52–56.
19. Кучерявый, А.Е. Интернет вещей / А.Е. Кучерявый // Электросвязь. — 2013. — № 1. — С. 21.
20. Кучерявый, Е. А. Интернет Нановещей и наносети / Е. А. Кучерявый, С. Баласупраммян // Электросвязь. — 2014. — № 4. — С. 24–26.

21. Ли, П. Архитектура интернета вещей / Перри Ли. — М.: «ДМК-Пресс», 2019. — 454 с.
22. Росляков А.В. Интернет вещей / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков, М.Ю. Самсонов; под ред. А.В. Рослякова. — Самара: ПГУТИ, ООО «Издательство Ас Гард», 2014. — 340 с.
23. Сравнение технологий «СТРИЖ» и LoRa [электронный ресурс]. — 2021. — Режим доступа: <http://www.strij.tech>
24. Фам В. Д. Исследование методов маршрутизации в беспроводных ячеистых сетях городского масштаба на основе обучения с подкреплением / В. Д. Фам, Р. В. Киричек, А. С. Бородин // Труды Научно-исследовательского института радио. — 2021. — № 2. — С. 2–15.
25. Фам В. Д. Метод передачи изображений в энергоэффективной сети дальнего радиуса действия с ячеистой топологией / В. Д. Фам, В. С. Кисель, Р. В. Киричек, А. О. Овчинников, А. С. Бородин // Труды Научно-исследовательского института радио. — 2021. — № 1. — С. 2–15.
26. Фам, В. Д. Анализ алгоритмов маршрутизации для узкополосных сетей дальнего радиуса действия с поддержкой самоорганизации / В. Д. Фам, Р. В. Киричек // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. — 2021. — С. 159–161.
27. Фам, В. Д. Исследование использования протокола AODV в ячеистой сети LoRa / В. Д. Фам, Т. Д. Ле, Р. В. Киричек // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (dscn-2020). — Москва: ИПУ РАН, 2020. — С. 490–498.
28. Фам, В. Д. Исследование протоколов маршрутизации для ячеистой сети дальнего радиуса действия / В. Д. Фам, Т. Д. Ле, Р. В. Киричек // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (dscn-2020). — Москва: ИПУ РАН, 2020. — С. 474–481.
29. Фам, В. Д. Метод организации многоскачковой сети LoRa для сбора данных и управления устройствами Интернета вещей в умных устойчивых городах / В.Д. Фам, Р.В. Киричек // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. — 2020. — № 1. — С. 159–161.

- 30.** Фам, В. Д. Модель энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия / В. Д. Фам, Д. А. Галлямов, О. И. Ворожейкина, Р. В. Киричек // Электросвязь. — 2020. — № 5. — С. 33-40.
- 31.** Фам, В. Д. Применение гетерогенных шлюзов в ячеистых сетях LPWAN / В. А. Кулик, В. Д. Фам, Р. В. Киричек // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (dcsn-2020). — Москва: ИПУ РАН, 2020. — С. 466–473.
- 32.** Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневецкий [и др.]. — М.: Техносфера, 2005. — 592 с.
- 33.** Addabbo, T. A lora-based iot sensor node for waste management based on a customized ultrasonic transceiver / T. Addabbo, A. Fort, A. Mecocci et al. // 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). — IEEE, 2019. — Pp. 1–6.
- 34.** Akyildiz, I. F. Wireless Mesh Networks / I. F. Akyildiz and X. Wang. — Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2009. — 308 с.
- 35.** Al-gaashani, M. Intelligent System Architecture for Smart City and its Applications Based Edge Computing / M. Al-gaashani, M.S.A. Muthanna, K. Abdukodir, A. Muthanna, R. Kirichek // 2020 12th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE, 2020. — Pp. 269–274.
- 36.** Bor, M. Do LoRa low-power wide-area networks scale? / M. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. M. Alonso // Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. — 2016. — Pp. 59–67.
- 37.** Bouhorma, M. Performance comparison of ad-hoc routing protocols AODV and DSR / M. Bouhorma, H. Bentaouit, A. Boudhir // 2009 International Conference on Multimedia Computing and Systems. — IEEE, 2009. — Pp. 511–514.
- 38.** Chandra, A. Qualitative analysis of hybrid routing protocols against network layer attacks in MANET / A. Chandra, S. Thakur // Apoorva Chandra et al, International Journal of Computer Science and Mobile Computing. — 2015. — Vol. 4, no. 6. — Pp. 538–543.

- 39.** Ergen, S.C. ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary / S.C. Ergen // UC Berkeley, September. — 2004. — Т. 10, № 17. — С. 11.
- 40.** Ferreira, C. M. S. Low-Energy Smart Cities Network with LoRa and Bluetooth / C. M. S. Ferreira, R. A. R. Oliveira, J. S. Silva // 2019 7th IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering (MobileCloud). — IEEE, 2019. — Pp. 24–29.
- 41.** Ferreiro-Lage, J. A. Analysis of unicast routing protocols for vanets / J. A. Ferreiro-Lage, C. P. Gestoso, O. Rubiñ os, F. A. Agelet // 2009 Fifth International Conference on Networking and Services. — IEEE, 2009. — Pp. 518– 521.
- 42.** Flore, D. Evolution of LTE in Release 13 [электронный ресурс] / D. Flore. — 2015. — Режим доступа: <https://www.3gpp.org/release-13>.
- 43.** Guo, Z.Q. Fuzzy logic based multidimensional link quality estimation for multi-hop wireless sensor networks / Z.Q. Guo, Q. Wang, M. H. Li, J. He // IEEE Sensors Journal. — 2013. — Vol. 13, no. 10. — Pp. 3605–3615.
- 44.** Haerri, J. Performance comparison of aodv and olsr in vanet surban environments under realistic mobility patterns / J. Haerri, F. Filali, C. Bonnet // 2006 the 5th IFIP mediterranean ad-hoc networking workshop. — Pp. 14–17.
- 45.** INET Framework [электронный ресурс]. — URL: <https://inet.omnetpp.org/>
- 46.** Johnson, D. B. DSR: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks / D. B. Johnson, D. A. Maltz and Y. C. Hu // Ad hoc networking. — 2001. — Vol. 5, no. 1. — Pp. 139–172.
- 47.** Kanakaris, V. Ad-hoc networks energy consumption: A review of the ad hoc routing protocols / V. Kanakaris, D. Ndzi and D. Azzi // Journal of Engineering Science and Technology Review (JESTR). — Kavala Institute of Technology, 2010. — Vol. 3, no. 1. — Pp.162–167.
- 48.** Karunaratne, S. An overview of machine learning approaches in wireless mesh networks / S. Karunaratne, H. Gacanin // IEEE Communications Magazine. — 2019. — Vol. 57, no. 4. — Pp. 102–108.

- 49.** Khakimov, A. Energy-Aware Algorithm for LoRa Technology: Prototype Implementation / A. Khakimov, M.S.A. Muthanna, P. Mikhail, I. Ibodullokhodzha, A. Muthanna, K. Samouylov // In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2020, ruSMART 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12525. — Springer, 2020. — Pp. 11–20.
- 50.** Kim, H.S. Thread/OpenThread: A compromise in low-power wireless multihop network architecture for the Internet OF Things / H.S. Kim, S. Kumar, D.E. Culler // IEEE Communications Magazine. — 2019. — Т. 57. — № 7. — С. 55–61.
- 51.** Kirichek, R. Analytic Model of a Mesh Topology based on LoRa Technology / R. Kirichek [и др.] // 2020 22th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT). — IEEE, 2020. — С. 251–255.
- 52.** Kirichek, R. Estimation quality parameters of transferring image and voice data over ZigBee in transparent mode / R. Kirichek, M. Makolkina, J. Sene, V. Takhtuev // Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2015. Communications in Computer and Information Science. — 2020. — Vol. 601. — Pp. 260–267.
- 53.** Kirichek, R. Internet of things laboratory test bed / R. Kirichek, A. Koucheryavy // Wireless Communications, Networking and Applications. — Springer, 2015. — Pp. 485–494.
- 54.** Kirichek, R. Model networks for internet of things and SDN / R. Kirichek, A. Vladyko, M Zakharov, A. Koucheryavy // 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). — IEEE, 2016. — Pp. 76–79.
- 55.** Kirichek, R. Transfer of multimedia data via LoRa / R. Kirichek, V.D. Pham, A. Kolechkin et al. // Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems. ruSMART 2017, NsCC 2017, NEW2AN 2017. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, 2017. — Vol. 10531. — Pp. 708–720.
- 56.** Kirichek, R. Long-Range Data Transmission on Flying Ubiquitous Sensor Networks (FUSN) by Using LPWAN Protocols [текст] / R. Kirichek, V. Kulik // Communications in Computer and Information Science. — Springer International Publishing, 2016. — С. 442–453.

- 57.** Koucheryavy, A. State of the art and research challenges for public flying ubiquitous sensor networks / A. Koucheryavy, A. Vladyko, R. Kirichek // *Lecture Notes in Computer Science*. — Springer International Publishing, 2015. — Pp. 299–308.
- 58.** Koucheryavy, A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks / A. Koucheryavy, A. Salim // *2009 11th International Conference on Advanced Communication Technology*. — IEEE, 2009. — Vol. 3. — Pp. 2141–2146.
- 59.** Kulik, V. A. The heterogeneous gateways in the Industrial Internet of Things / V. A. Kulik, R. V. Kirichek // *2018 10th International congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT)*. — IEEE, 2018. — Pp. 1–5.
- 60.** Kulik, V. Industrial Internet of Things classification and analysis performed on a model network / V. Kulik, R. Kirichek, A. Sotnikov // *Lecture Notes in Computer Science*. — Springer International Publishing, 2019. — Pp. 548–561.
- 61.** Kulik, V. Methods and Models for Using Heterogeneous Gateways in the Mesh LPWANs / V. Kulik, V.D. Pham, R. Kirichek // In: Vishnevskiy V. M., Samouylov K. E., Kozyrev D. V. (eds) *Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science*, vol 12563. — Springer, 2020. — Pp. 137–148.
- 62.** Kulik, V. Models and methods of usage of the heterogeneous gateways in the mesh LPWAN networks / V. A. Kulik, V. D. Pham, R. V. Kirichek // *Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (dccn-2020)*. — Москва: ИПУ РАН, 2020. — С. 458–465.
- 63.** Kumar, J. Comparative performance analysis of aodv, dsr, dymo, olsr and zrp routing protocols in manet using varying pause time / J. Kumar // *International Journal of Computer Communications and Networks (IJCCN)*. — 2012. — Vol. 3, № 1. — Pp. 43–51.
- 64.** Kurkowski, S., Navidi, W. and Camp, T. Discovering Variables that Affect MANET Protocol Performance / S. Kurkowski, W. Navidi, T. Camp // *2007 IEEE GLOBECOM 2007-IEEE Global Telecommunications Conference*. — IEEE, 2007. — Pp. 1237–1242.

- 65.** LoRaWAN Specification V. 1.0.2 / LoRa Alliance, Inc. — 70 c.
- 66.** Lundell, D. A routing protocol for lora mesh networks / D. Lundell, A. Hedberg, C. Nyberg, E. Fitzgerald // 2018 19th International Symposium on “A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks”(WoWMoM). — IEEE, 2018. — Pp. 14–19.
- 67.** Luo, J. A new link quality estimation mechanism based on LQI in WSN / J. Luo, L. Yu, D. Zhang, Z. Xia, W. Chen // Information Technology Journal. — 2013. — Vol. 12, no. 8. — Pp. 1626
- 68.** Makodia, B. Implementing and analyzing routing protocols for self-organized vehicular adhoc network / B. Makodia, T. Patel, K. Parmar, S. Hadia, A. Shah // 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE). — IEEE, 2013. — Pp. 1–6.
- 69.** Makolkina, M. Transmission of augmented reality contents based on ble 5.0 mesh network / M. Makolkina, V. D. Pham, T. D. Dinh et al. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2018, ruSMART 2018. Lecture Notes in Computer Science. — Springer, 2018. — Vol. 11118. — Pp. 394–404.
- 70.** Muthanna, M.S.A. Toward an Ultra-low Latency and Energy Efficient LoRaWAN / M.S.A. Muthanna, P. Wang, M. Wei, A.A. Ateya, A. Muthanna // In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019, ruSMART 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11660. — Springer, 2019. — Pp. 233–242.
- 71.** Ngom, B. Lora-based measurement station for water quality monitoring: Case of botanical garden pool / B. Ngom, M. Diallo, B. Gueye, N. Marilleau // 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). — IEEE, 2019. — Pp. 1–4.
- 72.** OMNeT++ Framework. [электронный ресурс]. — URL: <https://omnetpp.org/>
- 73.** Palmer, G. Ciw: An open-source discrete event simulation library / G. Palmer, V. Knight, P. Harper, A. Hawa // Journal of Simulation. — 2018. — Pp. 68–82.

- 74.** Pandey, K. A comprehensive performance analysis of proactive, re-active and hybrid manets routing protocols / K. Pandey, A. Swaroop // arXiv preprint arXiv:1112.5703. — 2011.
- 75.** Panicker, J.G. A lora wireless mesh network for wide-area animal tracking / J. G. Panicker, M. Azman, R. Kashyap // 2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). — IEEE, 2019. — Pp. 1–5.
- 76.** Pasqua, E. LPWAN technologies: How cellular MNOs are placing their bets [электронный ресурс] / E. Pasqua. — 2018. — Режим доступа: <https://iot-analytics.com/lpwan-technologies-cellular-mnos/>
- 77.** Perkins, C. E. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers / C. E. Perkins, P. Bhagwat // ACM SIGCOMM computer communication review. — 1994. — Vol. 24, № 4. — Pp. 234–244.
- 78.** Pham, V. D. A Hybrid Wireless Mesh Network for Sensor and Actuator Management in Smart Sustainable Cities / V.D. Pham, A. Ovchinnikov, A. Zadorozhnaya, R. Kirichek, L. Myrova // The 4th International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS). — 2020. — Pp. 1–4.
- 79.** Pham, V. D. A study of using AODV protocol in LoRa Mesh network / V. D. Pham, T. D. Le, R. V. Kirichek // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (dccn-2020). — Москва: ИПУ РАН, 2020. — С. 499–506.
- 80.** Pham, V. D. Method for Organizing Mesh Topology based on LoRa Technology / V.D. Pham, T.D. Dinh, R. Kirichek // 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE, 2018. — С. 1–6.
- 81.** Pham, V. D. Minimizing the IoT System Delay with the Edge Gateways / V. D. Pham, T. Hoang, R. Kirichek, M. Makolkina, A. Koucheryavy // Vishnevskiy V., Samouylov K., Kozyrev D. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11965. — Springer International Publishing, 2019. — Pp. 495–507.

82. Pham, V. D. Research on Using the AODV Protocol for a LoRa Mesh Network / V. D. Pham, D. T. Le, R. Kirichek, A. Shestakov // In: Vishnevskiy V.M., Samouylov K.E., Kozyrev D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12563. — Springer, 2020. — Pp. 149–160.

83. Pham, V. D. SDN-assisted Unmanned Aerial System for Monitoring Sensor Data / V.D. Pham, V. Vishnevsky, R. Kirichek, V. Elagin, A. Vladyko, A. Shestakov // In 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE, 2020. — Pp. 313–317.

84. Pham, V.D. Applying the Concept of Software-Defined Networking in Wireless Mesh Network / E. Kuznetsova, Y. Avakyan, V. D. Pham, R. Kirichek // In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2020, ruSMART 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12526. — Springer, 2020. — Pp. 28–38.

85. Pham, V.D. Evaluation of A Mesh Network based on LoRa Technology / V. D. Pham, V. Kisel, R. Kirichek, A. Koucheryavy, A. Shestakov // In 23rd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT, IEEE). Transactions on Advanced Communications Technology (ICACT-TACT Journal). — 2021. — Vol. 9. — Issue. 2. — Pp. 1280–1285.

86. Pham, V.D. Evaluation of Routing Protocols for Multi-hop Communication in LPWAN / V.D. Pham, D.T. Le, R. Kirichek // Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2020, ruSMART 2020. Lecture Notes in Computer Science. — 2020. — Vol. 12525. — Pp. 255–266.

87. Poluektov, D. On the performance of lorawan in smart city: End-device design and communication coverage / D. Poluektov, M. Polovov, P. Kharin, K. Zeman, P. Masek, I. Gudkova, J. Hosek, K. Samouylov // In Vishnevskiy V., Samouylov K., Kozyrev D. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11965. — Springer, 2019. — Pp. 15–29.

88. Proskochylo, A. Overview of wireless technologies for organizing sensor networks / A. Proskochylo, A. Vorobyov, M. Zriakhov, A. Kravchuk, A. Akulynichev,

V. Lukin // 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Information Science and Technology (PIC S&T). — IEEE, 2015. — Pp. 39–41.

89. Ramesh, V. Performance comparison and analysis of DSDV and AODV for MANET / V. Ramesh, Dr. P. Subbaiah, N. Koteswar Rao and M. Janardhana Raju // International Journal on Computer Science and Engineering. — Citeseer, 2010. — Vol. 2, no. 2. — Pp. 183–188.

90. Samouylov, K. Institutional support of a smart city / K. Samouylov, E. Popov, K. Semyachkov // Montenegrin Journal of Economics. — 2019. — Vol. 4. — Iss. 15. — P. 87–98.

91. Sanchez-Iborra, R. State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services / R. Sanchez-Iborra, M. D. Cano // Sensors. — 2016. — май. — Т. 16, № 5. — С. 708.

92. Semtech Corporation. SX1272/3/6/7/8 LoRa Modem Design Guide AN1200.13 / Semtech Corporation. — July 2013. — 9 с.

93. Semtech Corporation. Sx1276/77/78/79 datasheet, rev. 5. / Semtech Corporation. — 2016. — 133 с. — URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf>.

94. Sharofidinov, F. Agriculture Management Based on LoRa Edge Computing System / F. Sharofidino, M. S. A. Muthanna, V. D. Pham, A. Khakimov, A. Muthanna, K. Samouylov // Vishnevskiy V.M., Samouylov K.E., Kozyrev D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2020). Lecture Notes in Computer Science, vol 12563. — Springer, 2020. — Pp. 113–125.

95. Shu, J. Research on link quality estimation mechanism for wireless sensor networks based on support vector machine / J. Shu, S. Liu, L. Liu, L. Zhan, G. Hu // Chinese Journal of Electronics. — 2017. — Vol. 26, no. 2. — Pp. 377–384.

96. Sigfox. Sigfox technical overview. — Sigfox, 2018. — 26 с.

97. Singh, P.K. Simulation based analysis of adhoc routing protocol in urban and highway scenario of vanet / P.K. Singh, K. Lego, T. Tuithung // International Journal of Computer Applications. — 2011. — Vol. 12, № 10. — Pp. 42–49.

- 98.** Slabicki, M. Adaptive configuration of LoRa networks for dense IoT deployments / M. Slabicki, G. Premsankar, M.D. Francesco // NOMS 2018-2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. — IEEE, 2018. — Pp. 1–9.
- 99.** Sun, P. Study on measurement of link communication quality in wireless sensor networks / P. Sun, H. Zhao, D. Luo. X.y. Zhang, J. Zhu // Journal-China Institute of Communications. — 2007. — Vol. 28, no. 10. — Pp. 14.
- 100.** Sutton, R. S. Reinforcement learning: An introduction / R.S. Sutton, A.G. Barto. — MIT press, 2018. — 526 c.
- 101.** Sx1276/77/78/79 datasheet, rev. 6. — Semtech Corporation, 2019. — 132 c.
- 102.** SX1276/77/78/79 LoRa modules datasheet. — Semtech Corporation, 2019. —132 c.
- 103.** Talooki, V. N. Quality of Service for Flat Routing Protocols in Mobile Adhoc Network / V. N. Talooki, and J. Rodriguez // 2009 Proceedings of the 5th International ICST Mobile Multimedia Communications Conference. — Pp. 1–5.
- 104.** Talooki, V.N. Performance comparison of routing protocols for mobile ad hoc networks / V. N. Talooki, K. Ziarati // 2006 Asia-Pacific Conference on Communications. — IEEE, 2006. — Pp. 1–5.
- 105.** Unwala, I. IoT Protocols: Z-Wave and Thread / I. Unwala, J. Lu // International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering (IJFRSCE). — 2017. — т. 3, № 11. — С. 355–359.
- 106.** Valadarsky, A. A machine learning approach to routing / A. Valadarsky, M. Schapira, D. Shahaf, A. Tamar // arXiv preprint arXiv:1708.03074. — 2017. — 8 c.
- 107.** Volkov, A. Interaction of the IoT Traffic Generated by a Smart City Segment with SDN Core Network / A. Volkov, A. Khakimov, A. Muthanna, R. Kirichek, A. Vladiko, A. Koucheryavy // In: Koucheryavy Y., Mamas L., Matta I., Ometov A., Papadimitriou P. (eds) Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2017). Lecture Notes in Computer Science, vol 10372. — Springer, 2017. — Pp. 115–126.
- 108.** Watkins, C. J. Q-learning / C. J. Watkins, P. Dayan // Machine learning. — Springer, 1992. — Vol. 8, no. 3-4. — Pp. 279–292.

109. Weightless [электронный ресурс]. — URL: <http://www.weightless.org/>
110. Woolley, M. Bluetooth 5 Go Faster. Go Further [электронный ресурс] / M. Woolley, S. Schmidt // Bluetooth SIG. — URL: https://www.bluetooth.com/wp-content/uploads/2019/03/Bluetooth_5-FINAL.pdf.
111. Yastrebova, A. Future networks 2030: Architecture & requirements / A. Yastrebova, R. Kirichek, Y. Koucheryavy, A. Borodin, A. Koucheryavy // 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE, 2018. — Pp. 1–8.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ЛИСТИНГИ ПРОГРАММЫ

Листинг А.1 Листинг для обработки данных

```

import csv
import sys

class OriginalData:
    def __init__(self, srcAddr, seqNum, payload, packetSize, RSSI, SNR):
        self.srcAddr = srcAddr
        self.seqNum = seqNum
        self.payload = payload
        self.packetSize = packetSize
        self.RSSI = RSSI
        self.SNR = SNR
    def __str__(self):
        return str(self.srcAddr) + ", " + str(self.seqNum) + ", " \
            + str(self.payload) + ", " + str(self.packetSize) + ", " \
            + str(self.RSSI) + ", " + str(self.SNR)

class NewData:
    def __init__(self, avgRSSI, avgSNR, PRR, label):
        self.avgRSSI = avgRSSI
        self.avgSNR = avgSNR
        self.PRR = PRR
        self.label = label
    def __str__(self):
        return str(self.avgRSSI) + ", " + str(self.avgSNR) + ", " + str(self.PRR) + ", " \
            + str(self.label)

def cal(lst, currIndex, numOfPackage = 10):
    seqNumFirst = int(lst[currIndex].seqNum)
    seqNumLast = seqNumFirst + numOfPackage - 1
    newIndex = 0
    n = len(lst)
    for i in range(currIndex + 1, n):
        if int(lst[i].seqNum) >= seqNumLast:
            newIndex = i
            break

    numReceivePackage = newIndex - currIndex + 1

```

```

sum1 = 0.0
sum2 = 0.0

for i in range(currIndex, newIndex + 1):
    sum1 += float(lst[i].RSSI)
    sum2 += float(lst[i].SNR)

avgRSSI = sum1 * 1.0 / numReceivePackage
avgSNR = sum2 * 1.0 / numReceivePackage
PRR = numReceivePackage * 1.0 / numOfPackage

avgRSSI = str(round(avgRSSI, 2))
avgSNR = str(round(avgSNR, 2))
PRR = float(round(PRR, 2))
label = "good"
if PRR >= 0.8:
    label = "good"
elif PRR > 0.5:
    label = "common"
else:
    label = "bad"

o = NewData(avgRSSI, avgSNR, PRR, label)
return o

def process(path = 'putty_log.csv', srcAddr = 11, numOfPackage = 10, skip = 1):
    lst = []
    with open(path) as csv_file:
        csv_reader = csv.reader(csv_file, delimiter=',')
        isHeader = True
        for row in csv_reader:
            if isHeader == True:
                isHeader = False
                continue
            if srcAddr != None:
                if str(row[0]) == str(srcAddr):
                    lst.append(OriginalData(row[0], row[1], row[2], row[3],
row[4], row[5]))
            else:
                lst.append(OriginalData(row[0], row[1], row[2], row[3],
row[4], row[5]))

    endValue = int(lst[len(lst) - 1].seqNum)
    lst_new = []

```

```

i = 0
while True:
    if i >= len(lst):
        break
    if(int(lst[i].seqNum) <= endValue + 1 - numOfPackage):
        o = cal(lst, i)
        lst_new.append(o)
    i += skip

#debug
data_out = "data_" + str(numOfPackage) + "_" + str(skip) + ".csv"
with open(data_out, mode='w') as csv_file:
    fieldnames = ['avgRSSI', 'avgSNR', 'PRR','label']
    writer = csv.DictWriter(csv_file, fieldnames=fieldnames)
    writer.writeheader()
    for i in range(len(lst_new)):
        writer.writerow({'avgRSSI': lst_new[i].avgRSSI, 'avgSNR':
lst_new[i].avgSNR, 'PRR': lst_new[i].PRR,
                        'label': lst_new[i].label})

if __name__ == '__main__':
    path = 'putty_log.csv'
    try:
        srcAddr = int(sys.argv[1])
        numOfPackage = int(sys.argv[2])
        skip = int(sys.argv[3])
        process(path, srcAddr, numOfPackage, skip)
    except IndexError: sys.exit('error')

from sklearn.svm import SVC
svclassifier = SVC(kernel='rbf')
svclassifier.fit(X_train, y_train)

y_pred = svclassifier.predict(X_test)

from sklearn.metrics import classification_report, confusion_matrix
print(confusion_matrix(y_test, y_pred))
print(classification_report(y_test, y_pred))

```

Листинг А.2 Листинг для ESP32-CAM

```
#include "freertos/FreeRTOS.h"
#include "freertos/task.h"
#include "esp_system.h"
#include "esp_log.h"
#include "driver/uart.h"
#include "string.h"
#include "driver/gpio.h"
#include "esp_camera.h"
#include <stdio.h>
#include <sys/unistd.h>
#include <sys/stat.h>
#include "esp_err.h"
#include "esp_vfs_fat.h"
#include "driver/sdmmc_host.h"
#include "driver/sdspi_host.h"
#include "sdmmc_cmd.h"

//ESP32Cam (AiThinker) PIN Map
#define CAM_PIN_PWDN 32
#define CAM_PIN_RESET -1
#define CAM_PIN_XCLK 0
#define CAM_PIN_SIOD 26
#define CAM_PIN_SIOC 27
#define CAM_PIN_D7 35
#define CAM_PIN_D6 34
#define CAM_PIN_D5 39
#define CAM_PIN_D4 36
#define CAM_PIN_D3 21
#define CAM_PIN_D2 19
```

```
#define CAM_PIN_D1 18
#define CAM_PIN_D0 5
#define CAM_PIN_VSYNC 25
#define CAM_PIN_HREF 23
#define CAM_PIN_PCLK 22

static camera_config_t camera_config = {
    .pin_pwdn = CAM_PIN_PWDN,
    .pin_reset = CAM_PIN_RESET,
    .pin_xclk = CAM_PIN_XCLK,
    .pin_sscb_sda = CAM_PIN_SIOD,
    .pin_sscb_scl = CAM_PIN_SIOC,

    .pin_d7 = CAM_PIN_D7,
    .pin_d6 = CAM_PIN_D6,
    .pin_d5 = CAM_PIN_D5,
    .pin_d4 = CAM_PIN_D4,
    .pin_d3 = CAM_PIN_D3,
    .pin_d2 = CAM_PIN_D2,
    .pin_d1 = CAM_PIN_D1,
    .pin_d0 = CAM_PIN_D0,
    .pin_vsync = CAM_PIN_VSYNC,
    .pin_href = CAM_PIN_HREF,
    .pin_pclk = CAM_PIN_PCLK,

    //XCLK 20MHz or 10MHz for OV2640 double FPS (Experimental)
    .xclk_freq_hz = 20000000,
    .ledc_timer = LEDC_TIMER_0,
    .ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0,
```

```
.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG,

.frame_size = FRAMESIZE_SVGA

.jpeg_quality = 60, //0-63 lower number means higher quality
.fb_count = 1
};

esp_err_t init_flash_card(uint8_t * buf, size_t len, int count){
    sdmmc_host_t host = SDMMC_HOST_DEFAULT();

    sdmmc_slot_config_t slot_config = SDMMC_SLOT_CONFIG_DEFAULT();

    slot_config.width = 1;

    gpio_set_pull_mode(15, GPIO_PULLUP_ONLY);
    gpio_set_pull_mode(2, GPIO_PULLUP_ONLY);
    gpio_set_pull_mode(13, GPIO_PULLUP_ONLY);

    esp_vfs_fat_sdmmc_mount_config_t mount_config = {
        .format_if_mount_failed = false,
        .max_files = 5,
        .allocation_unit_size = 16 * 1024
    };

    sdmmc_card_t* card;
    esp_err_t ret = esp_vfs_fat_sdmmc_mount("/sdcard", &host, &slot_config,
&mount_config, &card);

    if (ret != ESP_OK) {
```



```
    return;
}

char str1[14] = "/sdcard/image";
char str2[30];
char str3[5] = ".jpg";

sprintf(str2, "%d", count);
/* concatenates str1 and str2 */
strcat( str1, str2);
/* concatenates str1 and str3 */
strcat( str1, str3);

FILE* f = fopen(&str1[0], "wb");
if (f == NULL) {
    return;
}
fwrite(buf, sizeof(uint8_t), len, f);
fclose(f);

esp_vfs_fat_sdmmc_unmount();
}

esp_err_t init_camera(){
    //power up the camera if PWDN pin is defined
    if(CAM_PIN_PWDN != -1){
        gpio_set_direction(GPIO_NUM_32, GPIO_MODE_OUTPUT);
        gpio_set_direction(GPIO_NUM_4, GPIO_MODE_OUTPUT);
        gpio_set_level(GPIO_NUM_32, 0);
        gpio_set_level(GPIO_NUM_4, 0);
    }
}
```

```
}

//initialize the camera
esp_err_t err = esp_camera_init(&camera_config);
if (err != ESP_OK) {
    //ESP_LOGE(TAG, "Camera Init Failed");
    return err;
}

return ESP_OK;
}

esp_err_t camera_capture(){
    //acquire a frame
    camera_fb_t * fb = esp_camera_fb_get();
    if (!fb) {
        //ESP_LOGE(TAG, "Camera Capture Failed");
        return ESP_FAIL;
    }
    //return the frame buffer back to the driver for reuse
    esp_camera_fb_return(fb);
    return ESP_OK;
}

static const int RX_BUF_SIZE = 1024;

#define TXD_PIN (GPIO_NUM_1)
#define RXD_PIN (GPIO_NUM_3)

void init(void) {
```

```

const uart_config_t uart_config = {
    .baud_rate = 9600,
    .data_bits = UART_DATA_8_BITS,
    .parity = UART_PARITY_EVEN,
    .stop_bits = UART_STOP_BITS_1,
    .flow_ctrl = UART_HW_FLOWCTRL_DISABLE,
    .source_clk = UART_SCLK_APB,
};
uart_driver_install(UART_NUM_0, RX_BUF_SIZE * 2, 0, 0, NULL, 0);
uart_param_config(UART_NUM_0, &uart_config);
uart_set_pin(UART_NUM_0, TXD_PIN, RXD_PIN, UART_PIN_NO_CHANGE,
UART_PIN_NO_CHANGE);
}

```

```

int sendGeneralFrame(uint8_t frameType, int8_t cmdType, uint8_t frameLoadLen,
uint8_t* frameLoad)
{
    uint8_t checksum = 0;
    checksum ^= frameType;
    checksum ^= 0; // frameNum which is unused and always 0
    checksum ^= cmdType;
    checksum ^= frameLoadLen;

    uint8_t *frameByte = (uint8_t *) malloc((uint8_t) frameLoadLen + 5);
    frameByte[0] = frameType;
    frameByte[1] = (uint8_t) 0; // Frame Number = 0 by default.
    frameByte[2] = cmdType;
    frameByte[3] = frameLoadLen;
    memcpy(frameByte + sizeof(uint8_t) * 4, frameLoad, frameLoadLen);
}

```

```

for (size_t i = 0; i < frameLoadLen; i++)
{
    checksum ^= frameLoad[i];
}
frameByte[(uint8_t) frameLoadLen + 5 - 1] = checksum;
uart_write_bytes(UART_NUM_0, (const char *) frameByte, (uint8_t) frameLoadLen
+ 5);

free(frameByte);
return 1;
}

int sendAppDataRequest( uint16_t target, uint8_t dataLen, uint8_t* data)
{
    // We add 7 bytes to the head of data for this payload
    uint8_t frameLoadLen = 6 + dataLen;
    uint8_t* frameLoad = (uint8_t *) malloc(sizeof(uint8_t) * frameLoadLen);
    // target address as big endian short
    frameLoad[0] = (uint8_t) ((target >> 8) & 0xFF);
    frameLoad[1] = (uint8_t) (target & 0xFF);
    // ACK request == 1 -> require acknowledgement of recv
    frameLoad[2] = (uint8_t) 0;
    // Send radius: which defaults to max of 7 hops, we can use that
    frameLoad[3] = (uint8_t) 7;
    // Discovery routing params == 1 -> automatic routing
    frameLoad[4] = (uint8_t) 1;
    // Data length
    frameLoad[5] = dataLen;
    // Data from index 7 to the end should be the data
    memcpy(frameLoad + (sizeof(uint8_t) * 6), data, dataLen);
}

```

```

// frameType = 0x05, cmdType = 0x01 for sendData
sendGeneralFrame(0x05, 0x01, frameLoadLen, frameLoad);
free(frameLoad);

return 1;
}

void sendImage(int count)
{
    //acquire a frame
    gpio_set_level(GPIO_NUM_4, 1);
    vTaskDelay(50 / portTICK_PERIOD_MS);

    camera_fb_t * fb = esp_camera_fb_get();

    vTaskDelay(50 / portTICK_PERIOD_MS);
    gpio_set_level(GPIO_NUM_4, 0);

    if (!fb) {
        uint8_t *nextACK = (uint8_t *) malloc(1);
        nextACK[0] = 0x31;
        uart_write_bytes(UART_NUM_0, (char *) nextACK, 1);
        free(nextACK);
        //ESP_LOGE(TAG, "Camera Capture Failed");
        return ESP_FAIL;
    }

    init_flash_card(fb->buf, fb->len, count);
    vTaskDelay(1000 / portTICK_PERIOD_MS);
    size_t imageDataLen = fb->len; // imageDataLen - Image Size in Byte

```

```

size_t numOfFragment = 0;    // Number of Fragments
size_t fragmentSize = 100;  // each fragment has 100 Bytes.
size_t imageID = 0;

if (imageDataLen % fragmentSize == 0)
    numOfFragment = imageDataLen / fragmentSize;
else
    numOfFragment = imageDataLen / fragmentSize + 1;

for (size_t i = 0; i < numOfFragment; i++) {
    // Sending each fragment
    if (i == numOfFragment - 1)
        fragmentSize = imageDataLen - (numOfFragment-1)*100;

    uint8_t* data = malloc(sizeof(uint8_t) * (fragmentSize + 2));
    data[0] = (uint8_t) imageID;    // Image ID
    data[1] = (uint8_t) i;    // Sequence Number
    for (size_t j = 0; j < fragmentSize; j++) {
        *(data+j+2) = *(fb->buf + j + i*100);
    }
    sendAppDataRequest(0x0000, fragmentSize + 2, data);
    free(data);
    vTaskDelay(1500 / portTICK_PERIOD_MS);

}

//return the frame buffer back to the driver for reuse
esp_camera_fb_return(fb);

}

```

```

static void tx_task(void *arg)
{
    int count = 1;
    while (1) {
        sendImage(count);
        count++;
        vTaskDelay(60000 / portTICK_PERIOD_MS);
    }
}

void app_main(void)
{
    init_camera();
    init();
    vTaskDelay(1000 / portTICK_PERIOD_MS);
    xTaskCreate(tx_task, "uart_tx_task", 1024*2, NULL, configMAX_PRIORITIES-1,
    NULL);
}

```

Листинг А.3 Листинг для шлюза Raspberry Pi

```

import paho.mqtt.client as mqtt
import serial
import time

port = serial.Serial(
    port='COM3',\
    baudrate=9600,\
    parity=serial.PARITY_NONE,\
    stopbits=serial.STOPBITS_ONE,\
    bytesize=serial.EIGHTBITS,\

```

```
    timeout=1)
print("Connected to: " + port.port)

broker = 'x.x.x.x'
username = 'username'
password = 'password'
image_topic = 'image'

# The callback for when the client receives a CONNACK response from the server.
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    print("Connected with result code "+str(rc))

# The callback for when a PUBLISH message is received from the server.
def on_message(client, userdata, msg):
    print(msg.topic+" "+str(msg.payload))

# The callback for when a message is published
def on_publish(client, userdata, mid):
    print("mid: " + str(mid))
    pass

client = mqtt.Client()
client.on_connect = on_connect
client.on_message = on_message
client.on_publish = on_publish

client.username_pw_set(username=username,password=password)

client.connect(broker, 1883, keepalive=120)
```



```

portBuffer = bytearray()
while True:
    try:
        while port.inWaiting() > 0:
            try:
                readByte = port.read()
                portBuffer += readByte
            except KeyboardInterrupt:
                break
        if len(portBuffer) > 0:
            client.publish(image_topic, payload=portBuffer, qos=0, retain=False)
            time.sleep(1)
            portBuffer = bytearray()

    except KeyboardInterrupt:
        print("An exception")
        print("Good bye")
        break

```

Листинг А.4 Листинг для подписки получения изображений от MQTT-брокера

```

import paho.mqtt.client as mqtt
from os.path import join, dirname, realpath
import os
from queue import Queue
import threading
import time

```

```
q=Queue()
```

```
broker = '91.238.230.96'
```

```
username = 'mqttmasteruser'
```

```
password = '3mERrV0z7rzUqWVgWIISSsQxjl'
```

```
image_topic = 'image'
```

```
count = 0
```

```
logFilePath = 'images/240x240_10/240x240_10_log.txt'
```

```
savePath = 'images/240x240_10/image'
```

```
# The callback for when the client receives a CONNACK response from the server.
```

```
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
```

```
    print("Connected with result code "+str(rc))
```

```
    # Subscribing in on_connect() means that if we lose the connection and
```

```
    # reconnect then subscriptions will be renewed.
```

```
    client.subscribe(image_topic)
```

```
# The callback for when a message is received from the Subscribed topic.
```

```
def on_message(client, userdata, msg):
```

```
    #print(msg.topic + " ")
```

```
    #print(msg.payload)
```

```
    q.put(msg.payload)
```

```
client = mqtt.Client()
```

```
client.username_pw_set(username=username,password=password)
```

```
client.connect(broker, 1883, 60)
```

```
client.on_connect = on_connect
```

```
def subscribing():
    client.on_message = on_message
    client.loop_forever()

def msgHandler():
    portBuffer = b''
    recvTime = 0
    count = 0
    while True:
        time.sleep(1)
        while not q.empty():
            msg = q.get()
            if msg is None:
                print("continue")
                break
            print("Msg from Queue:")
            print(msg)
            portBuffer += msg
            recvTime = time.time()

        if (time.time() - recvTime > 20) and len(portBuffer) != 0:
            print("Новое изображение было получено!\n")
            imageBuffer = []
            count += 1
            imagePath = (savePath + str(count) + '.jpg')
            f = open(imagePath, "wb")

            #print('Len portBuffer = ', len(portBuffer))
            #print(portBuffer[0] == 5)
            #print(type(portBuffer[0]), portBuffer[1], portBuffer[2], portBuffer[3])
```

```

numPck = 0 # counting number of received packets.
imgSize = 0 # counting size of image
firstSeq = 0
for i in range(0, len(portBuffer)):
    if i < len(portBuffer) - 5:
        if portBuffer[i] == 5 and portBuffer[i+1] == 0 and portBuffer[i+2] ==
130:
            print("Writing.....\n")
            numPck += 1
            for j in range(0, portBuffer[i+7] - 2):
                imageBuffer.append(portBuffer[i+10+j])
                f.write(portBuffer[i+10+j].to_bytes(1, 'big'))
                imgSize += 1
            f.close()

logfile = open(logFilePath, 'a')
# Write to file: count, imgSize, numPck
logfile.write(str(count) + "," + str(imgSize) + "," + str(numPck) + "\n")
logfile.close()

print("Received image!")
portBuffer = b"

sub = threading.Thread(target=subscribing)
handle = threading.Thread(target=msgHandler)
sub.start()
handle.start()

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ВНЕДРЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



Публичное акционерное общество «Ростелеком»

ул. Гончарная, д. 30
г. Москва, Россия, 115172
тел.: +7 (499) 999-80-22, +7 (499) 999-82-83
факс: +7 (499) 999-82-22
e-mail: rostelecom@rt.ru, web: www.rt.ru

АКТ
7609/21 № 01/13/161/21
г. Москва

УТВЕРЖДАЮ



Президент

М.Э. Осеевский

«16» июля 2021 года

О внедрении результатов диссертационной работы Фам Ван Дай «Разработка моделей и методов маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия»

Основание: в соответствии с Планом работы научно-исследовательской и испытательной лаборатории инновационных инфокоммуникаций ПАО «Ростелеком», Программой-методикой и протоколом испытания настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Фам Ван Дай, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, обладают актуальностью, представляют практический интерес и были внедрены в текущих проектах ПАО «Ростелеком».

На базе Научно-исследовательской и испытательной лаборатории и инновационных инфокоммуникаций ПАО «Ростелеком» совместно с СПбГУТ и Международным союзом электросвязи было проведено комплексное тестирование метода передачи изображений через ячеистую сеть LoRa Mesh и энергопотребления узлов ячеистой сети дальнего радиуса действия.

Результаты испытаний позволяют:

- более широко раскрыть особенности внедрения и обеспечения функционирования энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия в текущих и перспективных проектах ПАО «Ростелеком»;
- учитывать энергопотребление узлов ячеистой сети дальнего радиуса действия при передаче изображений с различными параметрами;
- на базе Научно-исследовательской и испытательной лаборатории инновационных инфокоммуникаций ПАО «Ростелеком» развернуть полнофункциональный фрагмент энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия для комплексного тестирования возможных приложений и услуг.

Использование указанных результатов позволяет:

- сформировать требования для сетей связи Интернета Вещей при использовании в них различных технологий энергоэффективных ячеистых сетей дальнего радиуса действия;
- повысить качество предоставляемых услуг в сетях связи в ПАО «Ростелеком»;
- сократить затраты на проведение натурных испытаний.

Председатель комиссии:

Руководитель
Представительства ПАО «Ростелеком»
в Международном союзе электросвязи



А.С. Бородин

Члены комиссии:

Начальник отдела международных связей
Департамента международного сотрудничества -
Заместитель Председателя 20-й Исследовательской комиссии
«Интернет вещей, умные города и поселения»
Сектора стандартизации электросвязи
Международного союза электросвязи



О.В. Миронников

Главный специалист
Проектного офиса «Индустриальный интернет»,
Эксперт SC41 JTC1 ISO/IEC



Ю.С. Наливайко

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И
МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232
Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159
E-mail: rector@sut.ru
ИНН 7808004760 КПП 784001001
ОГРН 1027809197635 ОКТМО 40909000

09.07.2021 № 13189/54
на № _____ от _____

Утверждаю

Проректор по научной работе
Истаков А.В.



Акт

о внедрении научных результатов, полученных Фам Ван Дай
в диссертационной работе «Разработка моделей и методов маршрутизации в
энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия»

Комиссия в составе декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем Д.В. Окуневой, профессора кафедры сетей связи и передачи данных М.А. Маколкиной и заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных О.И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Фам Ван Дай, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Сверхплотные сети» (Рабочая Программа № 18.05/1502-Д, утверждена Первым проректором-проректором по учебной работе Г.М. Машковым 05.07.2018), раздел Программы:
- Ad Нос или самоорганизующиеся сети. Приложения самоорганизующихся сетей. Всепроникающие сенсорные сети как технологическая основа внедрения концепции Интернета Вещей. Кластеризация сенсорных сетей и основные методы кластеризации, включая биоподобные алгоритмы.
2. При чтении лекций и проведении практических занятий по курсу Искусственный интеллект в сетях связи (Рабочая Программа № 20.05/54-Д,

утверждена Первым проректором-проректором по учебной работе Г.М. Машковым 30.06.2020), раздел Программы:

- Принципы и виды машинного обучения и использование искусственного интеллекта в телекоммуникационной области.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Фам Ван Дай в диссертационной работе:

- Метод оценки комплексного качества показателя соединения на основе техники машинного обучения;
- Методы маршрутизации на основе оценки комплексного качества показателя соединения и машинного обучения с подкреплением;
- Метод передачи мультимедиа трафика в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия.

Декан факультета ИКСС



Д.В. Окунева

Профессор кафедры ССиПД



М.А. Маколкина

Зав. лабораторией кафедры ССиПД



О.И. Ворожейкина