

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре программной инженерии и вычислительной техники.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Киричек Руслан Валентинович**

Официальные оппоненты: **Кучерявый Евгений Андреевич**,  
доктор технических наук, доцент  
НИУ «Высшая школа экономики»,  
Высшая школа бизнеса, профессор

**Ковтуненко Алексей Сергеевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Уфимский государственный авиационный  
технический университет,  
кафедра информатики, доцент кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 24 ноября 2021 года в 16.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте [www.sut.ru](http://www.sut.ru).

Автореферат разослан 24 сентября 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 55.2.004.01,  
д-р техн. наук, доцент

М.А. Маколкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 (ПД) от устройств интернета вещей происходит через Интернет и предполагает возможность дистанционного мониторинга и управления устройствами в зависимости от выполняемых функций. При этом инфокоммуникационная инфраструктура, в том числе энергоэффективные сети дальнего радиуса действия (LPWAN – Low-Power Wide-Area Network), играет важную роль для обеспечения подключения устройств к сетям связи общего пользования. В рамках национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» в разделе «Построение узкополосных беспроводных сетей ИВ на территории Российской Федерации» особое внимание уделяется перспективам внедрения различных технологий для сетей LPWAN. В данной программе отмечено, что для развития цифровой экономики должны быть последовательно и повсеместно внедрены сети LPWAN во всех отраслях экономики с территориальным покрытием малых городов и поселков городского типа.

До 2012 года активное развитие получили технологии и протоколы беспроводных сенсорных сетей (БСС), такие как ZigBee, Z-Wave, 6LoWPAN и др., которые можно рассматривать как базовую сетевую инфраструктуру Интернета вещей. Персональные сети на базе данных протоколов и технологий активно используются в системах автоматизации, сигнализации, а также в промышленности для сбора данных с датчиков. Отличительная особенность данных сетей заключалась в низком энергопотреблении узлов и самоорганизации с использованием ячеистой топологии. С одной стороны, большинство существующих БСС имеет малое расстояние ПД, что приводит к необходимости увеличения числа узлов для покрытия большой территории. С другой стороны, сети LPWAN также обладают энергоэффективностью, но обеспечивают большую дальность связи, тем самым позволяя решить существующие недостатки с передачей данных на большие расстояния. Однако в настоящее время большинство сетей LPWAN 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.

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 тема и 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. Мутханни, А.А. Ateya, 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.

**Объектом исследования** является энергоэффективная ячеистая сеть дальнего радиуса действия. **Предметом исследования** являются методы маршрутизации.

**Цель 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 результатов исследования** 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 городов 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.

#### **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 апробация 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).

**Публикации 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.

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

**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.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 160 страницах, иллюстрирована 51 рисунком, 10 таблицами. Список литературы содержит 111 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, проанализировано состояние исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты диссертации, определена научная новизна и практическая ценность результатов, рассмотрена область их применения, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме работы.

**В первой главе** проанализированы беспроводные технологии ПД для приложений ИВ. В том числе рассмотрены перспективы развития энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия LPWAN, которые используются для обеспечения ПД от устройств ИВ на большие расстояния и при малом энергопотреблении. В рамках данной главы был проведен анализ развития БСС и рассмотрены ограничения энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия. Сделан вывод о необходимости реализации ячеистой топологии для эффективной ПД в умных городах в условиях плотной городской застройки. Сформулированы задачи по разработке моделей и методов маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия. Такая реализация позволит увеличить покрытие зоны обслуживания узлов в сети и надежность обмена данными для устройств ИВ.

**Во второй главе** диссертационной работы проведен анализ существующих методов маршрутизации, проектирование и разработка которых всегда являются важной задачей в беспроводных ячеистых сетях. Как правило, маршрутизация базируется на определенных метриках, которые в целом связаны с производительностью сети, например, минимальное количество переходов, наличие ошибок в канале ПД, сетевые задержки в каналах связи и другие. Традиционно протоколы маршрутизации делятся на три типа в зависимости от информации о топологии сети, используемой для построения маршрутов: проактивный, реактивный и гибридный. По результатам анализа протоколов AODV, DSR, DSDV было отмечено, что для выбора оптимального маршрута используется метрика минимального количества ретрансляторов (промежуточных узлов). Таким образом, необходимо учитывать другие параметры качества обслуживания, такие как сетевая задержка и потери при передаче данных. Это особенно важно при рассмотрении сетей LPWAN, которые могут быть развернуты для приложений ИВ, 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 эффективной переадресации пакетов.

**Третья глава** посвящена разработке моделей и методов маршрутизации в энергоэффективных ячеистых сетях дальнего радиуса действия. В данной главе последовательно решаются задачи: от разработки моделей фрагмента энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия до разработки методов маршрутизации в данной сети.

Для разработки модели фрагмента сети LPWAN была выбрана технология LoRa, которая является одной из базовых технологий ПД в группе сетей LPWAN. При рассмотрении данной технологии выделены параметры, такие как коэффициент расширения спектра SF (Spreading Factor), ширина полосы пропускания BW (Bandwidth) и скорость кодирования CR (Coding Rate), которые являются основными факторами, определяющими скорость ПД и чувствительность приемника. Соотношение между SF, BW, CR изображено в формуле для определения скорости ПД (DR – Data Rate):

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

На основе технологии ПД LoRa предлагается разработка энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия. В **разделе 3.1** представлено описание гибридных ячеистых сетей как элемента сетевой инфраструктуры для устройств ИВ в умных городах. Архитектура предложенной сети изображена в иерархической структуре от конечных узлов к облачному серверу. Каждый уровень представляет свои функционалы и участие в сквозной системе ИВ, развернутой в умных городах. Исходя из этого в **разделе 3.2** предложена модель энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия на основе технологии ПД LoRa (рисунки 1–2).

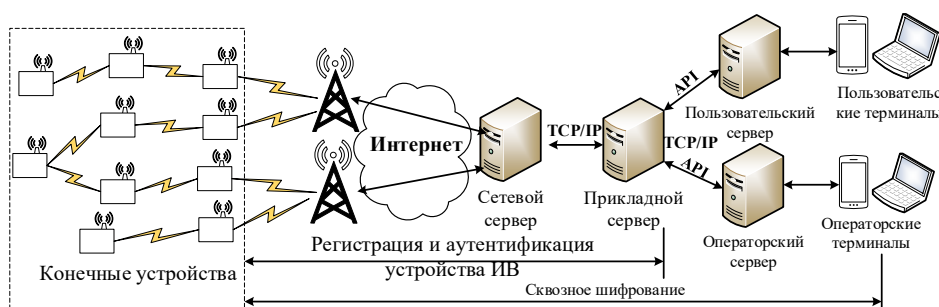


Рисунок 1 – Архитектура энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия

В классическом виде сети LPWAN состоят из следующих элементов: конечные узлы (КУ), концентраторы или маршрутизаторы, шлюз. В рамках поддержки ячеистой топологии КУ могут взаимодействовать не только с концентратором/шлюзом, но и между собой, также одна сеть LPWAN может включать в себя несколько концентраторов, выполняющих задачи локальной маршрутизации данных. Для упрощения структуры



LPWAN и сокращения издержек на внедрение целого ряда предлагается реализовать гетерогенные шлюзы ИВ, определенные в рекомендациях МСЭ-T Q.4060 и Q.3055.

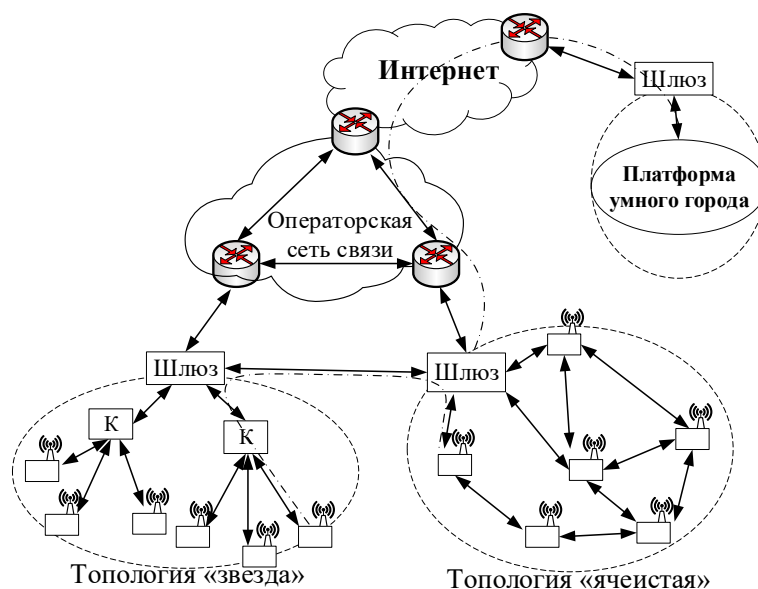


Рисунок 2 – Структура функционирования сети в рамках системы умных городов

На основе предложенной структуры разработана модель, используемая для исследования свойств работы предложенной модели фрагмента сети согласно различным параметрам. На рисунке 3 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.

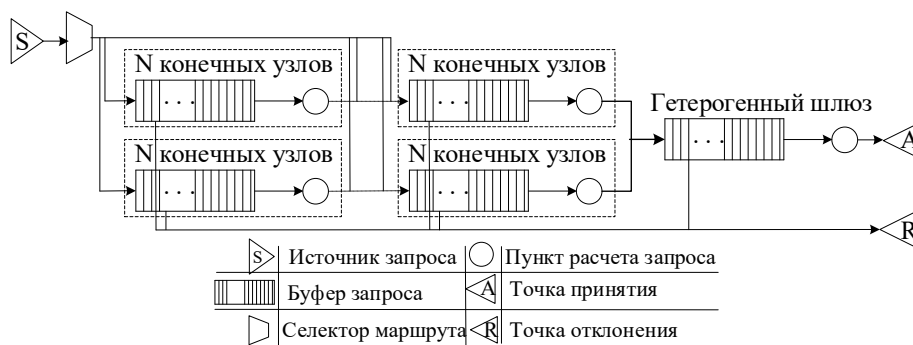


Рисунок 3 – Структура имитационной модели сети с ГШ

При разработке данной модели необходимо учитывать особенности функционирования устройств LPWAN. В результате экспериментов с модельной сетью (KY CubeCell Dev-Board и шлюз Dragino LG02) на основе метода наименьших квадратов, метода обобщенных приведенных градиентов, критерия согласия Колмогорова-Смирнова были получены аналитические модели, описывающие интенсивность поступления и обслуживания сообщений для данных устройств. Графики, отображающие соотношение

полученных аналитических моделей к исходным эмпирическим распределениям, отображены на рисунках 4а и 4б.

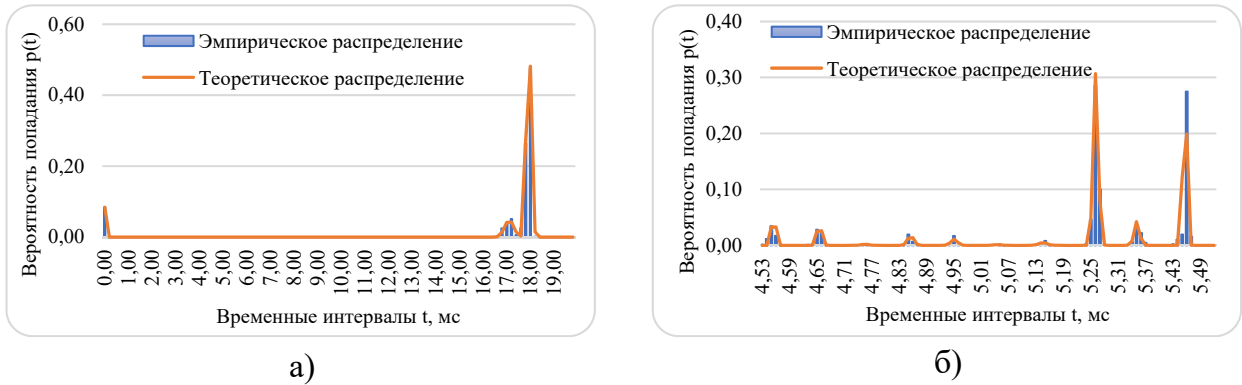


Рисунок 4 – Соотношение эмпирического распределения к теоретическому для:

- 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,  $a_i, \lambda_i, c_i$  – коэффициенты масштаба.

По результатам имитационного моделирования было получено время обслуживания запросов от устройств ИВ, которое меньше в модели с использованием ГШ.

**В разделе 3.3** предложен метод маршрутизации на основе оценки комплексного показателя качества соединения.

По результатам анализа аппаратных и программных методов были выбраны три метрики, такие как индикатор уровня принимаемого сигнала RSSI (Received Signal Strength Indicator), отношение сигнала к шуму SNR (Signal-Noise Ratio), скорость приема пакетов PRR (Packet Reception Rate), для модели оценки комплексного показателя

качества соединения. Предложенная модель оценки обучается с экспериментальным набором данных на основе метода опорных векторов SVM (Support Vector Machine). С размером окна  $w = 10$  был подготовлен входной набор данных, который разделяется на 10% для обучения и 90% для тестирования при использовании языка программирования *Python* и библиотеки *scikit-learn*. На рисунке 5 представлена модель со входным вектором  $x = [avgRSSI, avgSNR, PRR]$  и гауссовским ядром  $K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2)$ . После 50 прогонов модели с целью обучения была получена высокая точность прогноза со средним значением точности 95%. Таким образом, используя три параметра, такие как RSSI, SNR, PRR, можно точно оценить показатель качества соединения LoRa после 10 пробных пакетов, даже если размер набора данных недостаточно велик для обучения, что обычно характерно для задач машинного обучения.

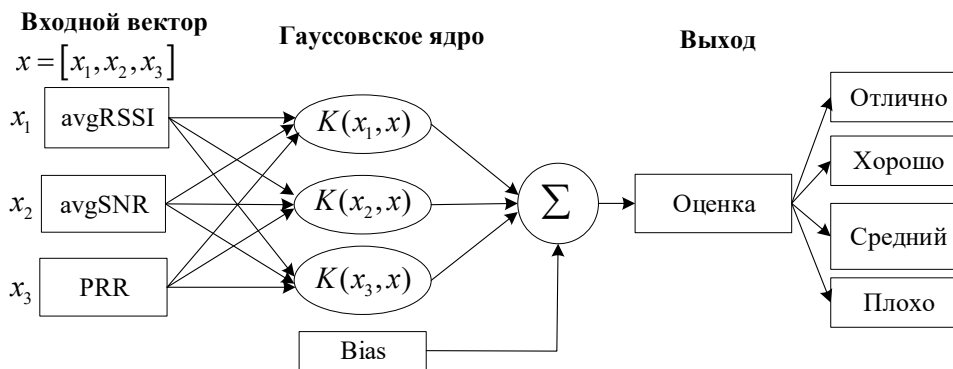


Рисунок 5 – Модель оценки комплексного показателя качества соединения на основе SVM

Для поиска маршрута ячеистая топология представлена 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:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}. \quad (7)$$

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 предложенным методом. Набор значений  $\{c_{ij}\} = \{2, 3, 4, 5\}$  соответствует оценкам комплексного показателя качества соединения «плохо», «средний», «хорошо» и «отлично».

Маршрут рассчитывается таким образом, чтобы найти каналы связи с высоким качеством соединения до пункта назначения. Для оценки качества соединения между

приемником и передатчиком используется предлагаемый метод оценки комплексного показателя качества соединения (LQE – Link Quality Estimation). Используя оценки LQE, показатель качества соединения между двумя узлами можно представить в виде зависимой функции от LQE:

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

где  $f(LQE) = f(RSSI, SNR, PRR)$  получена с использованием модели оценки комплексного показателя качества соединения на основе SVM.

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 промежуточные узлы. Матрица  $\mathbf{C} = \{c_{ij}\}$ , где  $i, j = 1 \dots n$ ,  $s$  содержит значения оценки комплексного качества показателя соединения между узлами в сети (вес ребер графа):

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

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 (шлюзу) определяется как:

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

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

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

По результатам компьютерного моделирования, проведенного с помощью разработанной имитационной модели на основе фреймворков *inet* версии 4.2 и *OMNET++* версии 5.5.1, были получены оценки задержки и коэффициенты доставки пакетов с различными параметрами настройки модуля LoRa. Согласно гистограммам распределения задержек (рисунки 6 и 7), 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 больше времени для передачи. Также при узкой BW задержка передачи будет больше при настройке широкой BW. Это сопоставимо с характеристикой технологии ПД LoRa, согласно формуле (1).

Кроме того, количество узлов сети также влияет на процент доставленных пакетов к целевому узлу. На рисунке 8 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.

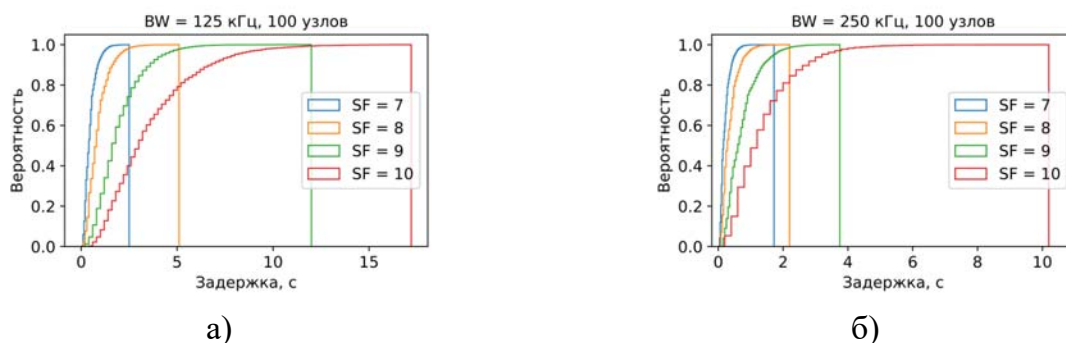


Рисунок 6 – Распределение задержки при различных SF: а)  $BW=125$  кГц; б)  $BW=250$  кГц

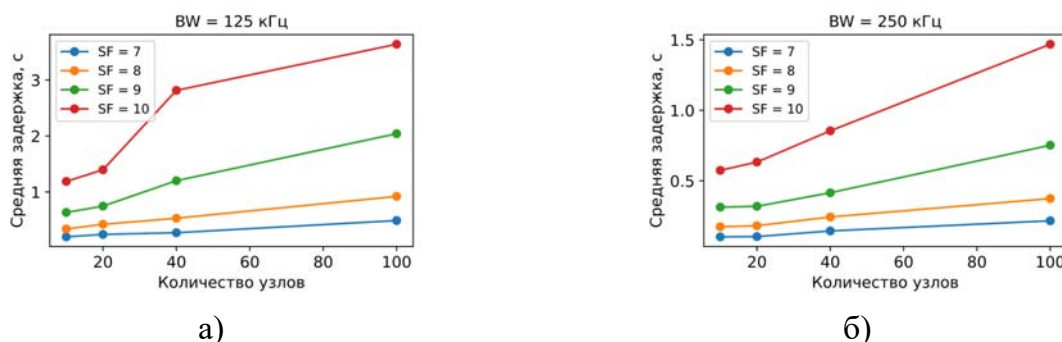


Рисунок 7 – Средняя задержка от количества узлов: а)  $BW=125$  кГц; б)  $BW=250$  кГц

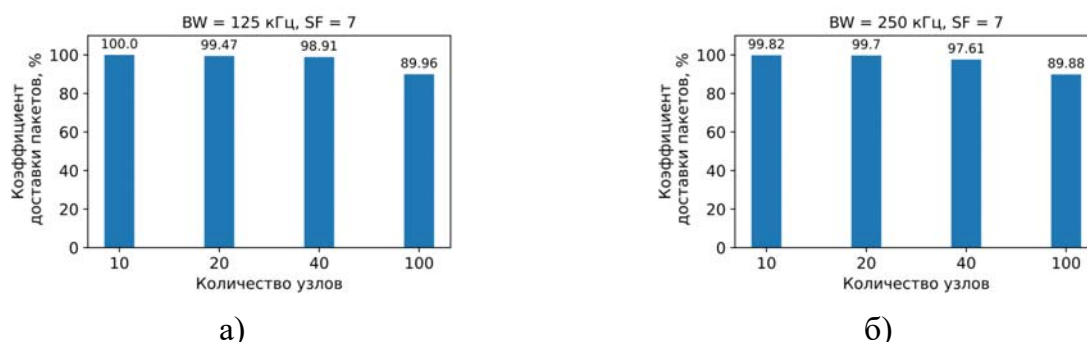


Рисунок 8 – Коэффициент доставки пакетов: а)  $BW=125$  кГц; б)  $BW=250$  кГц

При одинаковых условиях моделирования было проведено сравнение предлагаемого метода маршрутизации с более известным протоколом динамической векторной дистанционной маршрутизации по требованию AODV. По полученным результатам с использованием предлагаемого метода маршрутизации задержка доставки намного меньше, чем при использовании протокола AODV (рисунок 9).

Кроме того, целесообразно оценить среднюю задержку и коэффициент доставки пакетов с разным количеством узлов (рисунки 10–11). По данным графика видно, что средняя задержка доставки с использованием предлагаемого метода оказывается меньше по сравнению с протоколом AODV. Более того, предлагаемый метод также показывает больший процент доставленных пакетов.

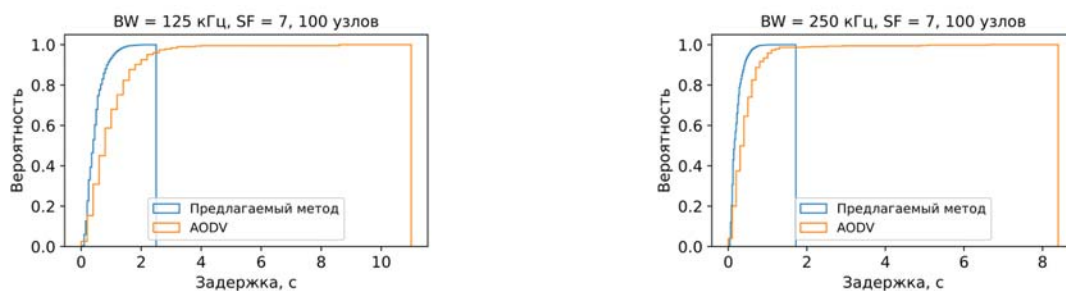


Рисунок 9 – Сравнение задержки с протоколом AODV:

а) BW = 125 кГц; б) BW = 250 кГц

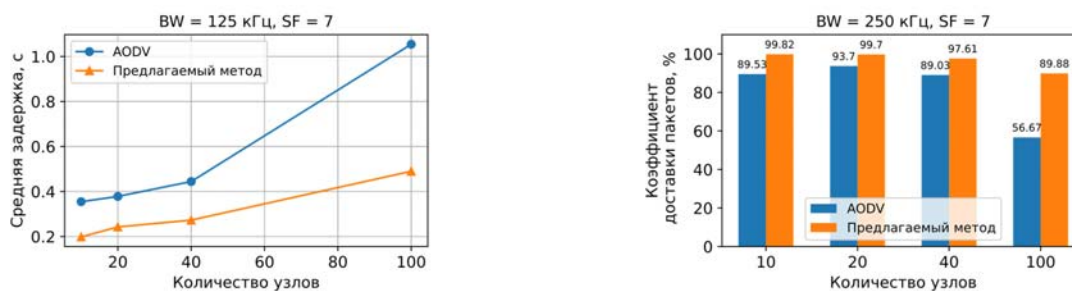


Рисунок 10 – Сравнение средней задержки доставки с протоколом AODV

Рисунок 11 – Сравнение коэффициента доставки пакетов с протоколом AODV

В разделе 3.4 предложен метод маршрутизации на основе машинного обучения с подкреплением. Узел сети представляет собой обучаемого агента, который осуществляет действия для дальнейшего выбора последующего узла-маршрутизатора. Как показано на рисунке 12, процесс маршрутизации определяется на базе машинного обучения и обновляется после каждой интеграции. По каждому из маршрутов агент получает обратную связь (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, обучается с помощью ряда факторов: состояние, действие, вознаграждение.

По состоянию 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  $d$ .

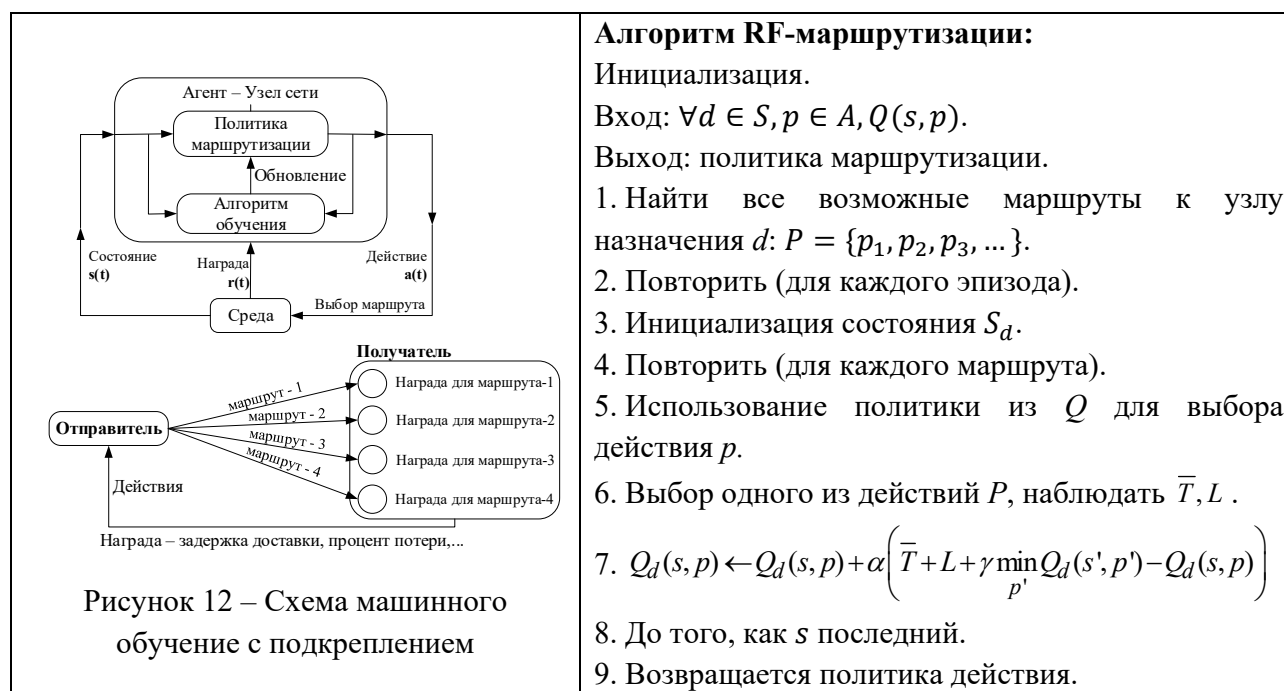
В действии существует набор маршрутов  $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots\}$ , по которым можно передавать данные к узлу-получателю. В качестве действия  $A(t)$  рассматриваем номера маршрута  $p_i$ , выбираемого для передачи к узлу назначения  $d$ .

В качестве вознаграждения в соответствии с каждым действием агент получает награду. Определение информации о вознаграждении  $R(t)$  является целью обучения, т.е. что и с какими показателями 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  $Q_d(s, p)$ . 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  $Q_d(s, p)$  использует старое и текущее значения:

$$Q_d(s, p) \leftarrow Q_d(s, p) + \alpha \left( \bar{T} + L + \gamma \min_{p'} Q_d(s', p') - Q_d(s, p) \right), \quad (15)$$

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

В процессе действия 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 (15).



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 13. По графикам на рисунке 13 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.

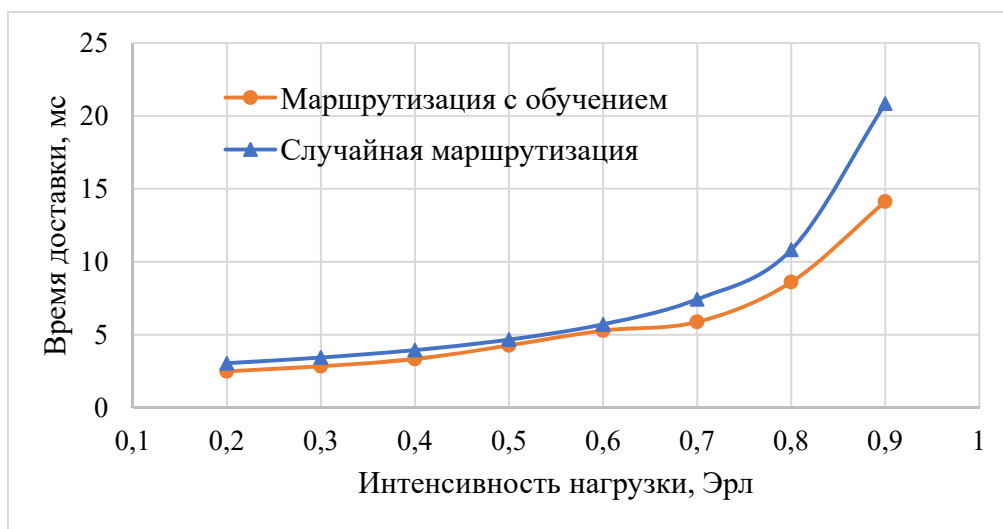


Рисунок 13 – Среднее время доставки пакетов

В четвертой главе представлен метод передачи мультимедийного трафика в энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия. В данной главе описан фрагмент энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия на основе технологии ПД LoRa для передачи мультимедийного трафика. В частности, предложен метод передачи изображений через данную сеть. В данном случае описаны формат пакета изображения и процедура запроса передачи изображения. Рассмотрены такие параметры, как размер изображения, количество пакетов, потери пакетов, оценка качества полученных изображений, энергопотребление узла передатчика изображения. В экспериментальном исследовании будет передаваться изображение с различным разрешением и условным уровнем качества (QL – quality level) изображения JPEG (задается в программном обеспечении отладочной платы с камерой).

Серия испытаний была проведена на базе научно-исследовательской и испытательной лаборатории инновационных инфокоммуникаций ПАО «Ростелеком» с целью практической оценки качества полученных изображений и энергопотребления узла-передатчика изображения на базе фрагмента энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия. В качестве узла-передатчика изображения была использована отладочная плата ESP32-CAM, в которой можно варьировать размер разрешения (240x240, 320x240, 480x320) и уровень качества изображения JPEG (10, 30 и 60). Более



подробно описание экспериментальной установки представлено в тексте диссертации. Результаты экспериментов показывают большую разницу по качеству изображения при изменении условных уровней качества изображения 10 и 60. Соответственно, количество пакетов при фрагментации изображения получено с разными параметрами камеры (рисунок 14). Например, для передачи изображения с разрешением 240x240 и уровнем качества изображения 30 требовалось более 30 пакетов. Более того, 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 через фрагмент энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия на базе технологии ПД LoRa возможна, если не учитывать сетевую задержку, которая возрастает при увеличении количества узлов-ретрансляторов.

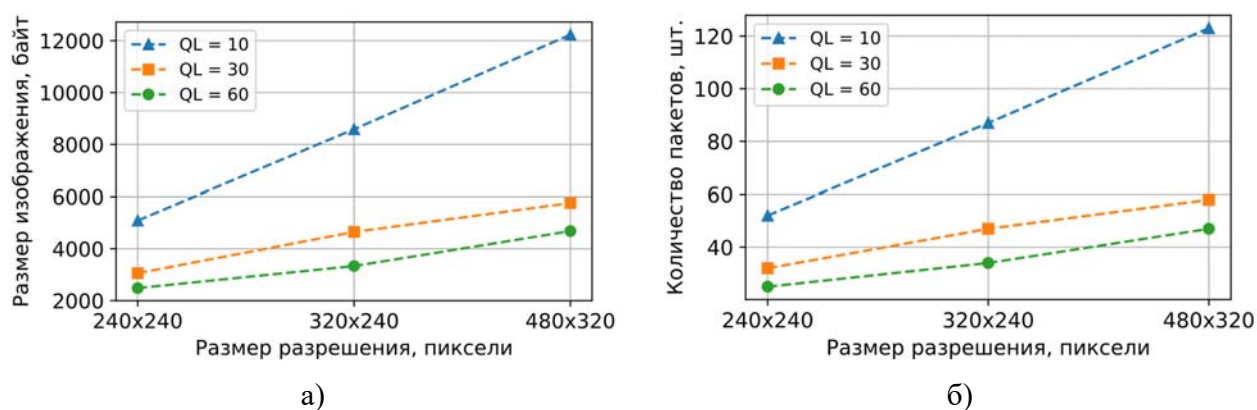


Рисунок 14 – Зависимость: а) размера изображения (байт); б) количества пакетов от разрешения изображения при различных уровнях качества изображения

Также в результате испытаний было получено среднее энергопотребление для передачи одного пакета, примерно одинаковое во всех случаях (42–45 мкАч). Следовательно, среднее энергопотребление для передачи одного изображения варьируется в зависимости от необходимого количества пакетов для передачи этого изображения (рисунок 15).

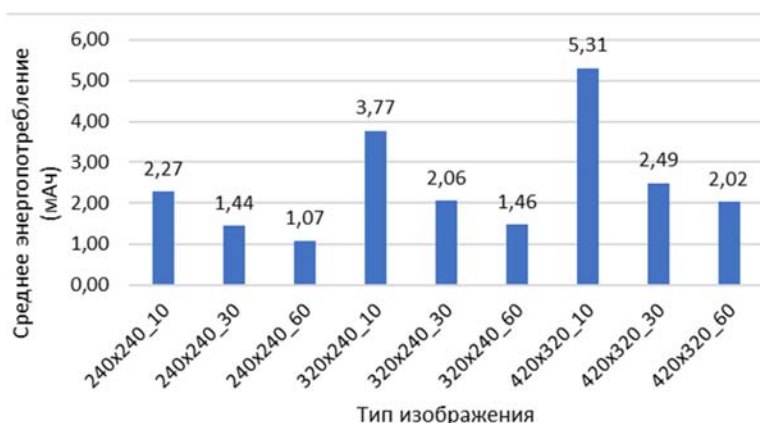


Рисунок 15 – Энергопотребление при передаче изображения по различным типам

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при использовании батареи емкостью 1200 мАч (теоретическая емкость =  $1200 \times 90\% = 1080$  мАч) можно передавать приблизительно 500 изображений с разрешением 480x320 и уровнем качества изображения 30.

В приложениях к диссертационной работе приведены листинги программы и документы, подтверждающие акт внедрения результатов.

## 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-получателю 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 при описании различных способов выбора маршрута в зависимости от соответствующей метрики.

Проанализировав международные научные публикации, был сделан вывод о том, 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 технологий 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 приема 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 необходимы 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России**

1. Фам, В. Д. Модель энергоэффективной ячеистой сети дальнего радиуса действия / В. Д. Фам, Д. А. Галлямов, О. И. Ворожейкина [и др.] // Электросвязь. – 2020. – № 5. – С. 33–40.

2. Фам, В. Д. Метод передачи изображений в энергоэффективной сети дальнего радиуса действия с ячеистой топологией / В. Д. Фам, В. С. Кисель, Р. В. Киричек [и др.] // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2021. – № 1. – С. 2–15.

3. 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. 2–9.

### **Научные статьи, опубликованные в международных базах цитирования**

#### **Scopus и/или Web of Science**

4. Pham, V. D. Analytic Model of a Mesh Topology based on LoRa Technology / R. Kirichek, V. Vishnevsky, V. D. Pham [et al.] // 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – IEEE, 2020. – P. 251–255.

5. Pham, V. D. Evaluation of routing protocols for mesh LPWAN network / 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, vol. 12525 / O. Galinina, S. Andreev, S. Balandin [et al.] (eds). – Springer, 2020. – P. 255–266.

6. Pham, V.D. Applying the Concept of Software-Defined Networking in Wireless Mesh Network / E. Kuznetsova, Y. Avakyan, V. D. Pham [et al.] // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2020, ruSMART 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol. 12526 / O. Galinina, S. Andreev, S. Balandin [et al.] (eds). – Springer, 2020. – P. 28–38.

7. Pham, V.D. SDN-assisted Unmanned Aerial System for Monitoring Sensor Data / V. Vishnevsky, V. D. Pham, R. Kirichek [et al.] // 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – IEEE, 2020. – P. 313–317.

8. Pham, V. D. Research on Using the AODV Protocol for a LoRa Mesh Network / V. D. Pham, D. T. Le, R. Kirichek [et al.] // Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol. 12563 / V. M. Vishnevskiy, K. E. Samouylov, D. V. Kozyrev (eds). – Springer, 2020. – P. 149–160.

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

10. Pham, V. D. Methods and Models for Using Heterogeneous Gateways in the Mesh LPWANs / V. Kulik, V.D. Pham, R. Kirichek // Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12563 / V. M. Vishnevskiy, K. E. Samouylov, D. V. Kozyrev (eds). – Springer, 2020. – P. 137–148.

11. Pham, V. D. A Hybrid Wireless Mesh Network for Sensor and Actuator Management in Smart Sustainable Cities / V. D. Pham, A. Ovchinnikov, A. Zadorozhnaya [et al.] // The 4th International Conference on Future Networks and Distributed Systems (ICFNDS). – 2020. – P. 1–4.

12. Pham, V. D. Evaluation of A Mesh Network based on LoRa Technology / V. D. Pham, V. Kisel, R. Kirichek [et al.] // 23rd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT, IEEE). Transactions on Advanced Communications Technology (ICACT-TACT Journal). – 2021. – Vol. 9, Issue. 2. – P. 1280–1285.

**Научные статьи, опубликованные в других изданиях и материалах научных конференций**

13. 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.

14. 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 (DCCN-2020). – Москва: ИПУ РАН, 2020. – С. 466–473.

15. Pham, V. D. 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 (dscn-2020). – Москва: ИПУ РАН, 2020. – С. 458–465.

16. 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.

17. 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 (DCCN-2020). – Москва: ИПУ РАН, 2020. – С. 490–498.

18. 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.

19. 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. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 187–190.