

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»**

МОХАММАД НАВАР

**Маршрутизация данных в гетерогенной
беспроводной сенсорной сети с применением методов
интеллектуального анализа данных**

Специальность: 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Воронова Лилия Ивановна

Москва - 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ.....	10
1.1. Показатели качества обслуживания QoS беспроводных сетей.....	10
1.2. Особенности структуры и функциональности беспроводных сенсорных сетей	13
1.3. Сенсорные сети с изменяемой топологией	17
1.4. Обзор и классификация протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях ..	20
1.5. Анализ технологий передачи данных, используемых при построении гетерогенных БСС	25
1.6. Сетевые системы моделирования беспроводных сенсорных сетей	30
Выводы по главе 1	33
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТРАФИКА В ГЕТЕРОГЕННОЙ БСС	34
2.1. Алгоритмы маршрутизации с использованием машинного обучения.....	34
2.2. Методы и модели интеллектуального анализа данных	37
2.3. Методы определения оптимального количество кластеров.....	46
2.4. Общая структура пакета данных протокола для беспроводной гетерогенной сенсорной сети	50
2.5. Структура пакетов данных для алгоритма маршрутизации в модели беспроводной гетерогенной сети	51
Выводы по главе 2	53
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ГЕТЕРОГЕННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ.....	54
3.1. Описание сетевой модели для гетерогенной БСС планируемой для реализации в Сирийской Арабской Республике	54
3.2. Модель рассеивания радиоэнергии в гетерогенной БСС	57
3.3. Разработка и применение методов ИАД для обработки трафика в гетерогенной БСС	60
3.3.1. Матрица радиовидимости узлов БСС.....	60
3.3.2. Построение алгоритма обучения сети Кохонена с Конструктивным методом (СККМ) для кластеризации БСС	61
3.3.3. Разработка метода эффективной кластеризации наземной БСС	63
3.3.4. Модель нейронной сети Хопфилда для маршрутизации данных в БСС	68
3.3.5. Разработка протокола сбора и маршрутизации данных KmHNNSP для НБСС	70
3.3.6. Алгоритм Дейкстры для поиска кратчайшего пути в рое БПЛА.....	73
3.3.7. Генетический алгоритм маршрутизации роа БПЛА	74
3.4. Разработка протокола передачи данных в гетерогенной БСС	80

Выводы по главе 3	85
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБРАБОТКЕ ТРАФИКА МЕТОДАМИ ИАД В ГЕТЕРОГЕННОЙ БСС	86
4.1. Модельные эксперименты кластеризации БСС с помощью алгоритма обучения сети Кохонена с Конструктивным методом	87
4.2. Определение оптимального количества кластеров с использованием модифицированного алгоритма К-средних	90
4.3. Моделирование эффективной кластеризации НБСС с использованием модифицированного алгоритма К-средних	92
4.4. Сравнение алгоритма обучения сети Кохонена с Конструктивным методом и модифицированного алгоритма К-средних	98
4.5. Модельные эксперименты маршрутизации данных в НБСС с помощью нейронной сети Хопфилда.....	98
4.6. Модельные эксперименты маршрутизации БПЛА с помощью генетического алгоритма	103
4.7. Модельные эксперименты маршрутизации для роя БПЛА с помощью комплексного алгоритма К-средних и Дейкстры.....	108
4.8. Сравнение протокола <i>KmHNNSP</i> с протоколами LEACH и ILEACH	110
Выводы по главе 4.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
Список использованных источников и литературы	123
Приложение А. Акт внедрения в учебный процесс МТУСИ	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время разработка и внедрение новых систем и устройств, содержащих элементы искусственного интеллекта, во все области народного хозяйства является приоритетным научным направлением. XXI век – это век интернета вещей (ИВ), как промышленного, так и социально-бытового, с повсеместным применением линейки методов и технологий интеллектуального анализа данных.

В архитектуре ИВ выделяют четыре уровня: уровень сенсоров и сенсорных сетей, уровень шлюзов и сетей, сервисный уровень и уровень приложений. Базовым уровнем являются низкоскоростные беспроводные сенсорные сети (БСС), основанные на нескольких стандартах. На сегодняшний день беспроводные сенсорные сети (БСС) позволяют собирать и передавать данные в Интернете вещей (IoT – Internet Of Things) и широко используются в различных областях, таких как военная, промышленная, сельскохозяйственная, экологическая, транспортная, социальная и медицинская. БСС относятся к типу повсеместных сетей, обеспечивающих непрерывную связь и доступ к информации в любое время и в любом месте.

Технологический прогресс, связанный в том числе и с применением методов интеллектуального анализа данных, привел к появлению новых типов БСС, таких как летающие сети, роевая робототехника, тактильный интернет, интеллектуальные телекоммуникационные услуги. В разных странах, в том числе и в Сирийской Арабской Республике рассматривается задача применения современных беспроводных сенсорных сетей в социально-экономической сфере, в частности в сельском хозяйстве, решение которой затруднено географическими особенностями горной местности. В этой связи перспективно применение гетерогенных сетей, интегрирующих сегменты наземной сети со стационарными сенсорными узлами с беспроводными датчиками с воздушной сетью беспилотных летательных аппаратов малой стоимости для передачи данных на большие расстояния для обработки на базовую станцию.

В связи с ограниченностью ресурсов БСС, включая мощность, память и скорость передачи данных, непосредственно влияющие на разработку протоколов и алгоритмов, используемых в БСС, выбор способа организации передачи информации является одной из основных научных проблем при проектировании БСС.

Для повышения эффективности БСС и улучшения показателей качества обслуживания QoS целесообразно исследовать применение современных интеллектуальных технологий, которые позволят выполнять передачу информации в распределённых сетях даже в случаях их частичной деградации или нарушения целостности. В соответствии с концепцией «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» на период до 2030 года, экономика переходит к повсеместному отраслевому внедрению ИИ в приоритетных отраслях, в том числе в

сельском хозяйстве, промышленности, инновационно-коммуникационных технологиях. В этой связи задача исследования и разработки интеллектуальных методов и алгоритмов эффективной кластеризации и маршрутизации БСС является актуальной и практически значимой.

Основные направления диссертационного исследования связаны с применением методов интеллектуального анализа данных с целью улучшения характеристик передачи данных и показателей качества в гетерогенной беспроводной сенсорной сети, включающей наземный сегмент со стационарными сенсорными узлами и летающую сеть, что является крайне актуальной задачей при мониторинге и контроле зон покрытия с использованием интернета вещей в труднодоступной горной местности в Сирии.

Объектом исследований являются гетерогенные беспроводные сенсорные сети и показатели качества их функционирования, а **предметом исследований** - методы и алгоритмы кластеризации и маршрутизации данных в гетерогенной беспроводной сети с использованием интеллектуального анализа данных.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время исследования в области беспроводных сенсорных сетей как основы Интернета Вещей активно ведутся в Российской Федерации. Они представлены в работах А.С. Аджемова, А.Е. Кучерявого, Е.А. Кучерявого, В.П. Волчкова, В.А. Нетеса, А.И. Парамонова, Л.О. Мыровой, С.Н. Степанова, М.С. Степанова, С.С. Шаврина, К. Е. Самуйлова, А. В. Рыжкова, В. Б. Крейнделина, А.В. Прокопьевой, В.А. Мочалова, Мутханной Аммара Салеха Али, и многих других. Наиболее значимые работы, посвящённые маршрутизации данных в беспроводных сенсорных сетях принадлежат таким учёным как: Е.Ю. Голубничая, Д.В. Окунева, С.С. Махров, К.А. Муравьев, В.М. Sahoo, P.Nayak, W.R.Heinzelman, M.A. Alsheikh. Наиболее значимые работы, посвящённые маршрутизации данных в летающих сенсорных сетях принадлежат таким учёным как: А.Е.Кучерявый, Р. В. Киричек, А.В. Леонов, М. Y. Arafat, S. I. Han, Y. N. Han.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является повышение эффективности БСС за счет применения методов и алгоритмов интеллектуального анализа при сборе и маршрутизации данных в гетерогенной БСС, объединяющей наземную сеть со стационарными сенсорными узлами и летающую сенсорную сеть.

Для достижения цели в настоящей работе решены следующие задачи:

1. Проведено исследование методов, алгоритмов и реализующих их программных средств, связанных с QoS БСС. Разработан формализм математической модели гетерогенной БСС, обеспечивающий эффективную обработку и передачу трафика в разных сегментах сети.

2. Разработан и исследован метод эффективной кластеризации в наземной БСС, обеспечивающий нахождение и распределение оптимального количества кластеров и маркировку головных кластерных узлов (ГКУ).
3. Разработан и исследован протокол эффективной маршрутизации данных с применением методов интеллектуального анализа, улучшающий показатели QoS гетерогенной сенсорной сети.
4. Разработан программный комплекс с удаленным доступом для моделирования обработки и передачи данных в гетерогенной БСС и исследования эффективности применения используемых методов и моделей.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработанная имитационная модель гетерогенной беспроводной сенсорной сети, включающая методы интеллектуального анализа данных, позволяет проводить комплексное моделирование и исследование показателей качества сети, автоматическую передачу данных между сегментами сети и видами агрегации данных.
2. Разработанный метод эффективной кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети с использованием модифицированного алгоритма K-средних, с учетом зон радиовидимости и GPS-координат узлов позволяет оптимизировать количество кластеров и избежать «скученности» ГКУ в малой области зоны покрытия, сокращая временные затраты на обработку информации в наземном шлюзе.
3. Предложенная методика маршрутизации данных для наземного сегмента БСС с использованием нейронной сети Хопфилда, с учетом энергоэффективности сенсорных узлов позволяет найти кратчайший путь, проходящий через все ГКУ к наземному шлюзу, снижая энергопотребление сенсорных узлов и увеличивая время жизни сети по сравнению с другими протоколами в зависимости от расположения шлюза: в случае базовая станция (БС) вне сенсорного поля время жизни сети увеличивается на 52% по сравнению с протоколом LEACH и на 45% по сравнению с протоколом ILEACH; в случае БС внутри сенсорного поля на 45% по сравнению с протоколом LEACH и на 6% по сравнению с протоколом ILEACH.
4. Разработанная методика скоростной маршрутизации данных для летающего сегмента сети (рой БПЛА) с использованием генетического алгоритма, учитывающая динамическое расположение дронов и их зоны радиовидимости, позволяет за доли секунды найти кратчайший путь между беспилотниками при динамическом изменении топологии сети и его отправку на наземный шлюз для передачи собранных данных с наземного сегмента на базовую станцию.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработке комплексной модели обработки и передачи данных от наземных беспроводных сенсорных узлов к базовой станции и через рой дронов/БПЛА с использованием интеллектуальных методов, обеспечивающих высокую эффективность расчетов и получение адекватных результатов.

Кроме того, предложенные методы кластеризации узлов в БСС и выбора головных кластерных узлов в разработанной модели на основе матрицы радиовидимости и местоположения узлов, позволяют провести агрегацию и сжатие данных для снижения нагрузки на базовую станцию.

Разработка протокола передачи данных между узлами наземной БСС с использованием интеллектуальных методов К-средних и нейронной сети Хопфилда увеличивает время жизни сети, использование кластеризации в процессе маршрутизации данных помогает снизить энергопотребление, а разработка интеллектуальных алгоритмов маршрутизации через рой БПЛА позволяет передавать данные на отдаленную базовую станцию с труднодоступных сенсорных полей.

Результаты диссертации, в том числе программный комплекс для моделирования гетерогенной БСС используется в учебном процессе на кафедре «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации» МТУСИ. Реализация результатов работы подтверждена соответствующим актом в приложении А.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории графов, математического моделирования, искусственных нейронных сетей, генетического алгоритма и К-средних. инженерии программного обеспечения. Для апробации алгоритмов использовался язык программирования Python в среде Anaconda, с библиотеками Pandas, NumPy, Sklearn, Matplotlib, ipywidgets, Mercury.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана комплексная модель гетерогенной беспроводной сенсорной сети, объединяющая структурно-функциональную модель, математические модели кластеризации и маршрутизации, сформированные с применением интеллектуальных методов, которая обеспечивает эффективную обработку данных и получение более высоких показателей качества сети, по сравнению с другими моделями.
2. Разработан метод эффективной кластеризации наземного сенсорного поля гетерогенной сети, обеспечивающий расчет оптимального количества кластеров и их рациональную топологию исключаящую «скученность» ГКУ в малой области, обеспечивающий стабильность работы и сокращающий временные затраты на обработку информации в наземном шлюзе по сравнению с другими подходами.

3. Разработан обобщенный протокол маршрутизации для гетерогенной БСС на основе структуры пакетов данных, объединяющий сценарии 1) сбора данных со всех ГКУ наземной части, увеличивающий время жизни сети и снижающий потребление энергии в среднем в 1,3 раза по сравнению с другими протоколами и 2) построения кратчайшего пути в летающей части при динамическом изменении топологии сети со скоростным доступом к базовой станции.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность результатов обеспечивается адекватностью используемых математических методов, верификацией математических моделей в комплексной модели гетерогенной БСС путем компьютерного моделирования. Полученные результаты опубликованы и обсуждались со специалистами на научных конференциях.

Основные результаты работы подтверждены и обсуждены на конференциях:

1. XI молодёжный научный форум МТУСИ «телекоммуникации и информационные технологии», Москва 2020.
2. XV международная отраслевая научно-техническая конференция «технологии информационного общества», Москва 2021.
3. VI международная научно-практическая конференция «Менеджмент качества, транспортная и информационная безопасность, информационные технологии» IT&QM&IS, Ярославль 2021.
4. XVI международная отраслевая научно-техническая конференция «технологии информационного общества», Москва 2022.
5. International Conference on Remote Sensing of the Earth: Geoinformatics, Cartography, Ecology, and Agriculture (RSE 2022), Dushanbe, Republic of Tajikistan 2022.
6. XVIII международная отраслевая научно-техническая конференция «технологии информационного общества», Москва 2024.
7. 2024 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications, IEEE, IRIS, Moscow 2024.
8. The 35th Conference of the Open Innovations Association FRUCT, Tampere, Finland, 2024.
9. XV молодёжный научный форум МТУСИ «телекоммуникации и информационные технологии», Москва 2024.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научно-технических журналах, в том числе публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки Российской Федерации (2 работы), в изданиях, , индексируемых в международных наукометрических базах, в т.ч. Scopus (3 работы), статьи и

материалы конференций индексируемые в РИНЦ (8 работ), включая свидетельства о регистрации ПО (3 работы), Всего опубликовано 11 работ.

Соответствие паспорту специальности. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно и соответствуют пунктам 1,2,4,5,8,11 паспорта специальности 2.2.15.

Личное участие соискателя. В опубликованные научные труды диссертантом внесен основной вклад, касающийся разработки методов, алгоритмов и их реализации. Вклад соавторов ограничивался постановкой задач на исследования и обсуждением результатов.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

В последние десятилетие продолжается активное развитие Интернета вещей с использованием нового класса систем передачи данных - беспроводных сенсорных сетей. Внедрение современных коммуникационных технологий Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, 4G и других привело к повсеместному применению БСС в разных областях человеческой деятельности от реализации умных домов, тактильного интернета, мониторинга больших наземных зон покрытия, мобильных и летающих сетей, спутниковых системах связи [[26], [43], [152]], для выбора способа организации передачи данных между сенсорами и шлюзами/базовыми станциями [[14], [39]], а также их совместного использования для решения задач передачи данных в гетерогенных сетях [[16], [42], [43], [120]]. Результативность применения БСС оценивается на основе показателей, характеризующих качество обслуживания сети QoS (Quality of Service) [44]. Подавляющее большинство теоретических и практических исследований направлено на повышение значений QoS сети.

1.1. Показатели качества обслуживания QoS беспроводных сетей

В табл.1.1 приведен общепринятый перечень показателей качества беспроводных сетей, Важной задачей при развертывании БСС является *выбор состава показателей качества*, максимально полно отражающий особенности исследуемой модели сети, зависящий от цели исследования и характера решаемых задач. При имитационном моделировании программное приложение может определить свои требования к QoS с помощью одной или нескольких метрик QoS, при этом определение подходящих метрик QoS для конкретного приложения считается сложной задачей

В настоящее время технологии ИВ дали возможность контролировать протяженные зоны покрытия в труднодоступных местах, в частности для нужд сельского хозяйства в течение длительного периода времени без присутствия человека, с использованием беспроводных датчиков, сбора данных и отправки их на базовую станцию для анализа и принятия решений. В этом случае наиболее важными характеристиками низкоскоростных БСС являются энергоэффективность и время жизни сети.

Основными методами, применяемыми для достижения высоких показателей QoS с точки зрения времени жизни и энергоэффективности БСС является кластеризация [1, 7, 9, 10, 15, 22, 23, 28, 45-47] и маршрутизация [2-5, 8, 11-14, 17-20, 24-30]. Разработчиками предложены и продолжают разрабатываться подходы, объединяющие различные способы построения кластеров и передачи данных между узлами разного топологического типа. Данные могут быть

отправлены с конечного узла непосредственно на базовую станцию или через узел ГКУ, или через их последовательность, прежде чем попасть на базовую станцию.

Таблица 1.1 - Показатели качества обслуживания QoS [44]

Показатель	Цель
Энерго-эффективность	Важнейшее требование QoS, поскольку сенсорные узлы работают от батарей. Сетевой уровень может повысить энергоэффективность путем внедрения таких механизмов, как кластеризация, многопутевая маршрутизация или несколько источников, в зависимости от требований приложения.
Задержка	Задержка, которую испытывает пакет на узле-источнике, пока не достигнет узла получателя. Сетевой уровень может минимизировать задержку или сквозную задержку путем поиска кратчайшего пути между источником и получателем при передаче пакетов данных.
Надежность	Способность сети передавать информацию в реальном времени к узлу получателя с минимальными потерями пакетов. Для обеспечения надежности на сетевом уровне между источником и получателем может быть установлено несколько маршрутов для избыточной передачи пакетов в динамических условиях сети.
Пропускная способность	Скорость успешной доставки пакетов по каналу связи. Поэтому, предлагая протокол маршрутизации для приложений реального времени, важно учитывать высокую пропускную способность.
Время жизни сети	Определяется как количество раундов связи до момента гибели первого узла (FND) или до момента гибели определенного количества узлов. Метрика FND обычно используется в редко развернутых БСС. Однако в плотно развернутых БСС отказ одного узла не повлияет на связность сети или активность зондирования. Поэтому в больших или плотно развернутых БСС для оценки времени жизни сети также используются такие метрики, как HND (половина узлов умерла) и LND (последний узел умер).
Адаптивность	Нагрузка на трафик данных, топология сети и условия беспроводного канала могут часто меняться из-за мобильности узлов, помех в беспроводном канале и вероятности отказа сенсорных узлов. Поэтому механизм QoS должен учитывать непрерывную адаптацию параметров работы сети для поддержки высокодинамичной среды.
Устойчивость	Способность протокола маршрутизации изменять конфигурацию сетевого соединения в случае отказа сенсорных узлов или каналов связи. В суровых условиях сенсорные узлы могут выйти из строя из-за быстрого истощения заряда батареи или неисправности оборудования. Отказ узла нарушает связь сети не только со стоком, но и с соседними сенсорными узлами. Поэтому протокол маршрутизации должен быть устойчив к внезапным отказам сенсорных узлов.

Основные задачи построения БСС определяются перечнем услуг, предоставляемых сетью, параметрами трафика, обслуживаемого сетью, требованиями к показателям производительности сети, выбором или разработкой модели (моделей) сети и решением проблемы обеспечения компромисса между объемом ресурсов и трафика и качеством работы. Таким образом,

получается, что основным этапом построения БСС является выбор или разработка модели для описания сети и методов обеспечения требуемых показателей эффективности [58].

Качество обслуживания (QoS) маршрутизации играет важную роль в беспроводных сенсорных сетях [59]. При изучении QoS учитываются различные параметры, среди которых время жизни сети, задержка, коэффициент доставки пакетов, энергоэффективность, накладные расходы, пропускная способность, вероятность ошибок, скорость передачи данных и количество хопов широко рассматривались для улучшения производительности маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях [61].

Каждый узел в БСС имеет независимый источник питания, представляющий собой аккумулятор, расходуемый при выполнении конкретной задачи, разряжающийся за определенное время и останавливающий работу узла. Время с момента начала работы сети до момента прекращения работы всех элементов БСС называется временем жизни сети [14].

При решении задач на основе БСС-сетей с показателем времени жизни связаны две основные задачи [57]:

- 1- Оценка времени жизни сети при заданных характеристиках элементов сети и алгоритмах их работы;
- 2- Увеличение времени жизни сети с помощью методов и алгоритмов.

В зависимости от требований приложений могут использоваться различные показатели времени жизни всей сети, основанные на: количестве узлов, работающих в сети, размере зоны покрытия сети, связности сетевого графа, задержке передачи данных и время жизни сетей.

Для увеличения времени жизни сети увеличивается емкость батареи, оптимизируется размещение ее на печатной плате или используются методы уменьшения энергопотребления компонентов элементов сети.

Для повышения качества показателей беспроводной сенсорной сети применяются современные технологии интеллектуального анализа данных [39-41, 48-53], которые обеспечивают возможность передачи данных в распределённых сетях даже в случаях их частичной деградации или нарушения целостности. Целесообразна разработка интеллектуальных алгоритмов, обеспечивающих максимизацию времени жизни БСС, на основе анализа жизнеспособности узлов.

В настоящее время выбор способа передачи данных от сенсорных узлов к шлюзу или базовой станции является одной из основных научных проблем при создании БСС и требует продолжения исследований в этом направлении, в том числе исследований гетерогенных сетей, объединяющих наземных сетей со стационарными узлами и летающие сети, интеграция которых является перспективной для решения задач геоинформационных задач интернета вещей.

1.2. Особенности структуры и функциональности беспроводных сенсорных сетей

Беспроводные сенсорные сети представляют собой самоорганизующиеся сети, состоящие из множества беспроводных сенсоров, распределенных по всей контролируемой среде для наблюдения за ее характеристиками [74], которые не зависят ни от стационарной инфраструктуры, ни от заранее установленной связи. Это свойство позволяет быстро развертывать сеть без точного предварительного знания интересующей зоны покрытия - следовательно, она хорошо подходит для ситуаций с отсутствием стационарной инфраструктуры или высоким риском, например, в военной связи, при ликвидации последствий стихийных бедствий, охране правопорядка и т.д.

Беспроводные сенсорные сети отличаются от других сетей ограниченными ресурсами датчиков, такими как пропускная способность, объем памяти, вычислительная мощность датчиков. Организация беспроводной сенсорной сети для решения конкретной задачи требует знания требуемой функции сети, энергетических характеристик, обеспечения качества обслуживания и соответствующих затрат.

Структура беспроводных сенсорных сетей

Беспроводные сенсорные сети являются основными средствами сбора данных, используемыми устройствами Интернета вещей (IoT). Узлы БСС используются в качестве базовой технологической инфраструктуры Интернета вещей.

В архитектуре Интернета вещей выделяют четыре уровня: *базовый уровень сенсоров и сенсорных сетей*, уровень шлюзов и сетей, сервисный уровень и уровень приложений. Физические характеристики в реальном мире фиксируются датчиками/сенсорами. На рис. 1.1. приведен сенсорный узел является минимальным элементом БСС и используется для формирования сети.

Сенсорные узлы состоят из блока питания, сенсорного блока, вычислительного блока и блока связи. Каждый блок содержит несколько компонентов, включая датчики/актуаторы, считывающие измерения из зоны мониторинга, микроконтроллер, память, систему позиционирования (GPS/ ГЛОНАСС) и радиопередатчик/приемник для беспроводной передачи данных. Сенсорные узлы также могут содержать несколько других подсистем. Основная функция сенсорного узла заключается в сборе информации из окружающей среды и передаче ее на базовую станцию (БС). [56]

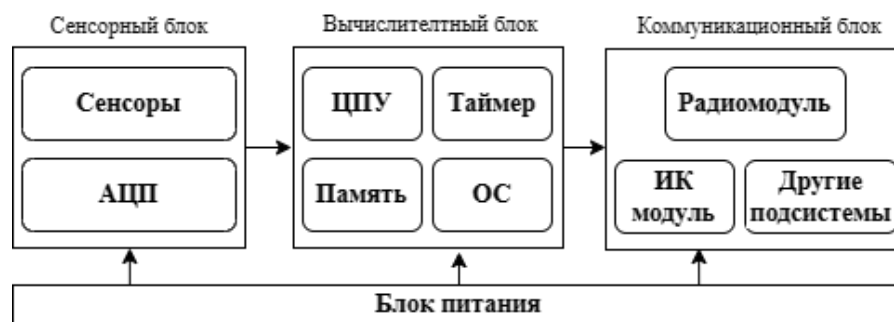


Рисунок 1.1 - Аппаратная архитектура сенсорного узла

Передача данных от датчиков в Интернет или место обработки осуществляется через шлюзы/базовые станции, которые являются частью второго уровня архитектуры Интернета вещей. Таким образом, датчики и шлюз/базовая станция являются двумя основными компонентами беспроводной сенсорной сети.

Особенности беспроводных сенсорных сетей заключаются в том, что датчики, распределенные в зоне мониторинга, собирают сигналы (свет, звук, давление, температура, химические сигналы и т.д.) из окружающей среды, преобразует их в электрические сигналы и передают их на микроконтроллер. Микроконтроллер обрабатывает полученные электрические сигналы, а затем приемопередатчик передает данные на БС (шлюз или приемник), расположенная в поле датчиков или рядом с ним, передает данные пользователю через различные сети, такие как сети связи, спутники и другие. Структура беспроводной сенсорной сети показана на рис.1.2.

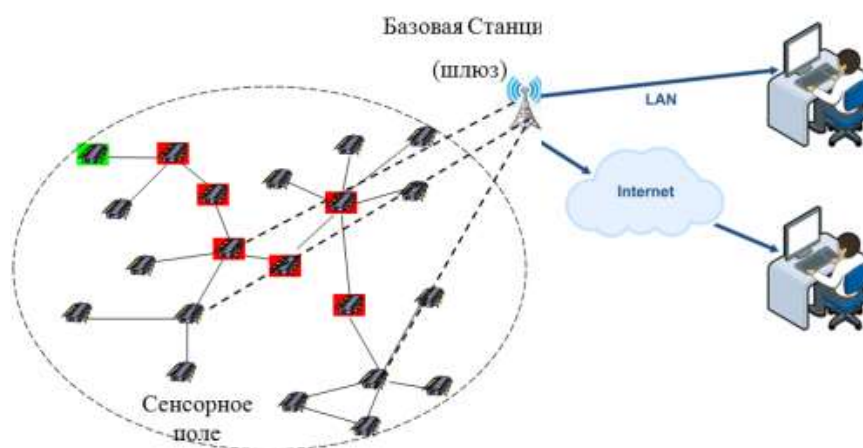


Рисунок 1.2 - Структура БСС [80]

В [54] БСС классифицируются по следующим типам.

- Наземные БСС (НБСС): Большое количество датчиков, расположенных на определенной территории над землей, которые в свою очередь связываются с базовой станцией для передачи данных.

- Подземные БСС: Эти сети состоят из датчиков, расположенных под землей для мониторинга некоторых параметров, которые в свою очередь связываются с приемниками, расположенными над землей, для передачи данных на БС.
- Подводные БСС: состоят из датчиков, размещенных под водой, и обычно для сбора данных с датчиков используются автономны подводные аппараты.
- Мобильные БСС: это наземные БСС, но они способны перемещаться и взаимодействовать с окружающей средой.
- Летающая сенсорная сеть (ЛСС): Она состоит из двух сегментов, первый - наземные БСС, а второй - один или несколько БПЛА. Эти два сегмента соединены друг с другом для передачи данных на БС.

В [55] предлагаю классификацию БСС на основе 6 различных концепций по способу работы и применению БСС, архитектуре сети, способу распределения сенсорных узлов, мобильности узлов, размерам пространства узлов и по гомогенности/однородности, как показано на рис.1.3.

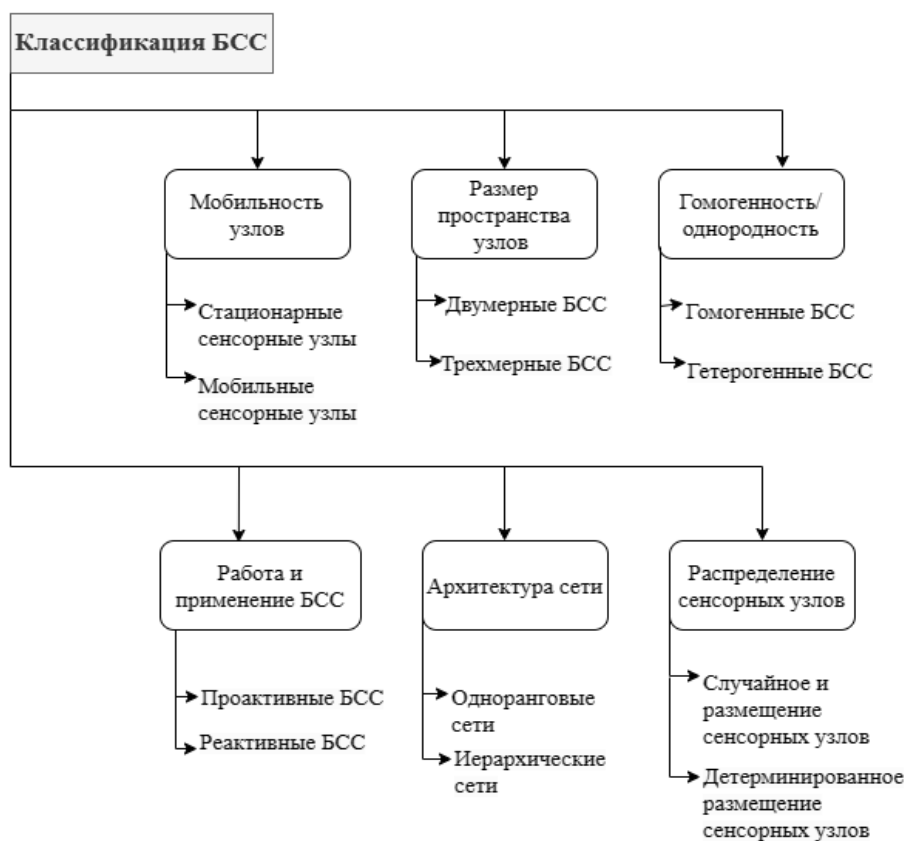


Рисунок 1.3 - Классификация сети БСС [55]

Когда говорят о неоднородности БСС подразумевают гетерогенность ресурсов сенсорных узлов (рис 1.4). В данной диссертации термин гетерогенность БСС подразумевает интеграцию наземной БСС с летающей БСС со стационарной и изменяющейся топологией и архитектурой.



Рисунок 1.4 - Гетерогенная модель БСС [55]

Особенностями стека протоколов БСС, как механизма организации связи, управления и взаимодействия между беспроводными сенсорными узлами в беспроводной среде является получение высокой производительности и эффективности при передаче данных в сети. При разработке протоколов, учитывается ряд показателей, приведенных в таблице 1.2 [57].

Таблица 1.2 - Показатели функционирования сети БСС [57]

Показатель	Функциональность показателя
Связность	определяет наличие связи между элементами сети (связь между датчиками, датчиками и базовой станцией, базовой станцией и NGN-сетью).
Мобильность	позволяет двигать компоненты БСС в соответствии с используемым приложением. Перемещение может осуществляться как внутри сети БСС, так и между сетями БСС или между сетями инфраструктуры.
Осведомленность о местонахождении	позволяет получать информацию о местоположении компонентов БСС для поддержки приложения, используемого для этих целей.
Осведомленность о присутствии	отражает возможность взаимодействия между подключенными компонентами БСС, информацию о работоспособности и операциях, выполняемых ими в данный момент
Осведомленность о неисправность	определяет способность БСС реагировать на любые сбои в работе сети для обеспечения ее надежности и доступности.
Маршрутизация	определяет путь между компонентами сети с учетом загруженности трафика между этими компонентами на основе статистических данных или в режиме реального времени, в зависимости от используемого приложения.
Масштабируемость	позволяет определить способность инфраструктуры БСС предоставлять пользователям услуги, соответствующие применению БСС.
Отказоустойчивость	обеспечивает возможность продолжения работы БСС даже при одновременном отказе одного или нескольких узлов.

Таблица 1.2 - продолжение

Показатель	Функциональность показателя
Безопасность	определяет возможность защиты конфиденциальных данных в БСС с помощью устойчивых к атакам транспортных протоколов и использования средств обнаружения атак.
Самоорганизация	отражает способность автоматически построить сеть, содержащую узлы, поименованные определенными идентификаторами.

Стек протоколов [56] сочетает в себе осведомленность о мощности и маршрутизации, объединяет данные с сетевыми протоколами, эффективно передает энергию через беспроводную среду и способствует совместным усилиям сенсорных узлов. Стек протоколов включает в себя пять уровней (прикладной, транспортный, сетевой, канальный и физический), плоскости управления питанием, плоскости управления мобильностью и плоскости управления задачами. На прикладном уровне могут быть созданы и использованы различные типы прикладного программного обеспечения в зависимости от задач зондирования. Этот уровень делает аппаратное и программное обеспечение самого нижнего уровня прозрачным для конечного пользователя. Транспортный уровень помогает поддерживать поток данных, если этого требует приложение сенсорной сети. Сетевой уровень отвечает за маршрутизацию данных, поставляемых транспортным уровнем, с помощью специальных протоколов многоцелевой беспроводной маршрутизации между сенсорными узлами и поглотителем. Канальный уровень отвечает за мультиплексирование потоков данных, обнаружение кадров, управление доступом к среде (MAC – Medium Access Control) и контроль ошибок. Поскольку окружающая среда является шумной, а сенсорные узлы могут быть мобильными, протокол MAC должен учитывать энергопотребление и минимизировать столкновения с широкоэмитерными сообщениями соседей. Физический уровень удовлетворяет потребности в простой, но надежной модуляции, выборе частоты, шифровании данных, технике передачи и приема.

1.3. Сенсорные сети с изменяемой топологией

Ad-hoc/целевая сеть - это сеть автономных узлов с динамичной, изменяемой топологией, не имеющая фиксированной инфраструктуры. Эта сеть характеризуется способностью узлов общаться друг с другом, образуя самоорганизующуюся сеть.

Ad-hoc/целевая сеть разделена на три структуры [69]:

- *Мобильные целевые сети (MANET - Ad-hoc Mobile Network)* является одной из архитектур ad-hoc/целевых сетей, предназначенная для соединения мобильных узлов друг с другом без опоры на какую-либо фиксированную инфраструктуру или централизованную координацию. Узлы могут динамически формировать и изменять топологию сети в зависимости от их мобильности и возможности подключения. Узлы

также могут выступать в роли маршрутизаторов и пересылать пакеты другим узлам сети. MANET децентрализованы, самоорганизуются и адаптируются к изменяющимся условиям сети.

- *Автомобильные целевые сети (VANET - Vehicular Ad-Hoc Network)* является еще одной из архитектур ad-hoc/целевых сетей, предназначена для транспортных средств с целью обеспечения безопасности водителя во время движения. Эти транспортные средства либо соединяются друг с другом в так называемой связи V2V (vehicle2vehicle), либо соединяются с инфраструктурой, сформированной в так называемой связи V2I (vehicle2infrastructure).
- *Летающие целевые сети (FANET - Flying Ad-Hoc Network)* - является формой MANET и также может быть классифицирована как подмножество VANET. Сеть FANET состоит из нескольких беспилотников (БПЛА), которые не связываются друг с другом, но взаимодействуют с сетями общего пользования и с наземной станцией.

Летающая сенсорная сеть является разновидностью Ad-hoc/целевой сети, и она появилась после непрерывного развития в тестировании использования беспроводных сенсорных сетей, начатого DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) в 1980 году в нескольких областях, включая мониторинг траекторий вертолетов, что привело к появлению Ad-hoc/целевой сети, до появления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в конце XX века [127].

Сеть *FANET* страдает от ограничений связи при наличии большого количества беспилотников (БПЛА) и наземной станции [63], поэтому разработаны новые структуры, которые основаны на связи беспилотников между собой и наземными станциями.

По причине ограничений связи появился новый тип сетей, названный сетью беспилотных летательных аппаратов (*БПЛА*). Эти сети характеризуются расширенными возможностями подключения; децентрализованной связью; отсутствием инфраструктуры; простотой развертывания и обслуживания. Эти особенности подходят для использования в гражданских, коммерческих целях, в случае бедствий, мониторинга, экстренных операций, таких как поиск и спасание [64].

Сеть БПЛА — это перспективное новое направление, которое находится в зоне пристального внимания ученых, исследователей и разработчиков [65]. Для проектирования сети БПЛА используются децентрализованные самоорганизующиеся топологии и организация надежной связи между объектами. Данные динамически отправляются между беспилотниками с помощью протоколов маршрутизации, основанных на сетевой связности. Беспилотные летательные аппараты можно классифицировать по принципу полета, времени полета и массе, также существует неофициальная российская классификация БПЛА. Однако эти классификации не определяют область применения беспилотников [66].

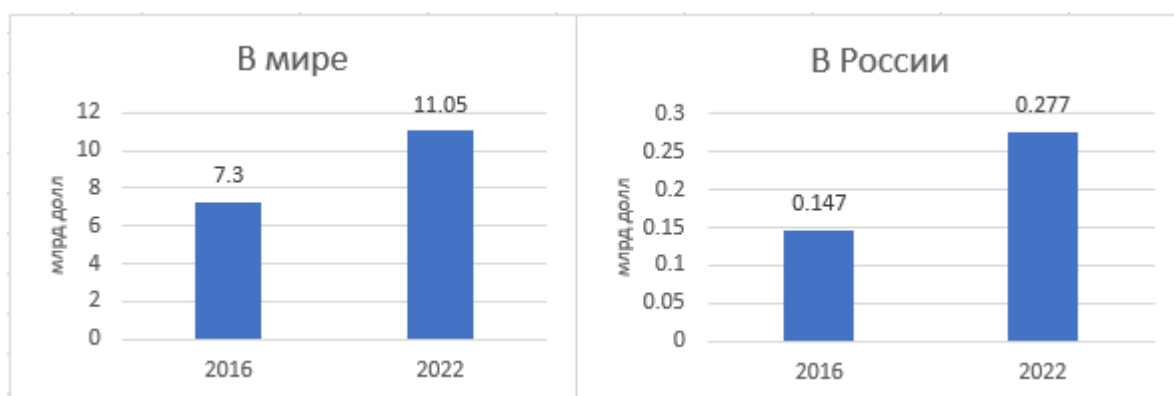


Рисунок 1.5 - Мировой и отечественный рынки БПЛА с 2016 г. по 2022 г. (в млрд. долларов США) [67]

Основными ограничениями мини-БПЛА являются размеры БПЛА, источник питания, радиус действия, препятствия для полета и стабильность полета. На рис. 1.5 приведено развитие мирового и отечественного рынков БПЛА с 2016 г. по 2022 г [67].

Летающие сенсорные сети (ЛСС)

Летающие сенсорные сети (ЛСС) — это тип беспроводной сенсорной сети (БСС), которая структурно представляет собой сеть, состоящую из двух подсетей [68]: первая - наземная беспроводная сенсорная сеть, состоящая из сенсорных узлов, распределенных на земле, и вторая - сеть беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), состоящая из одного или нескольких БПЛА, которые взаимодействуют друг с другом и с наземной сетью беспроводных сенсорных сетей [69].

Архитектура летающих сенсорных сетей делится на два типа: одноранговые сети с ячеистой архитектурой и иерархические сети с кластерной архитектурой.

Летающая беспроводная сенсорная сеть содержит три типа узлов:

1. *Координатор*: это базовая станция, подключенная к сети БПЛА. Задачей этого координатора является определение путей передачи информации, управление устройствами (датчиками, БПЛА), подключенными к сети, определение необходимых частотных каналов и установка параметров сети. Однако в диссертации будут использоваться два координатора, первый - шлюз в наземной беспроводной сенсорной сети, второй - базовая станция, подключенная только к летающей части (сети БПЛА).

2. *Маршрутизаторы*: это сенсоры или БПЛА, которые принимают, собирают, хранят и отправляют данные. В кластерной структуре эти маршрутизаторы являются головными кластерными узлами (ГКУ) каждого кластера.

3. *Оконечное устройство* представляет собой наземный датчик, собирающий данные, включая данные о температуре, влажности и т.д.

1.4. Обзор и классификация протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях

В большинстве существующих исследований протоколов маршрутизации в БСС [55], [70], [71], [26] и [57]. Для классификации используется ряд показателей, связанных с топологией сети, качеством обслуживания QoS и энергоэффективности БСС. Например, предложенная классификация существующих энергоэффективных алгоритмов маршрутизации основана на трех категориях в соответствии со схемой энергосбережения [72]: установка специальных узлов, энергоэффективное планирование и оптимизация потока данных как показано в таблице 1.3. В частности, установление специальных алгоритмов маршрутизации на основе узлов включает в себя установку иерархических узлов и специальные функциональные узлы. Энергоэффективные алгоритмы маршрутизации на основе планирования могут быть классифицированы под статическое планирование узлов и планирование мобильных узлов. Оптимизация алгоритмов маршрутизации на основе потока данных может быть классифицирована на одиночный путь и схемы маршрутизации с несколькими путями.

Таблица 1.3 - Классификация алгоритмов маршрутизации в БСС [72]

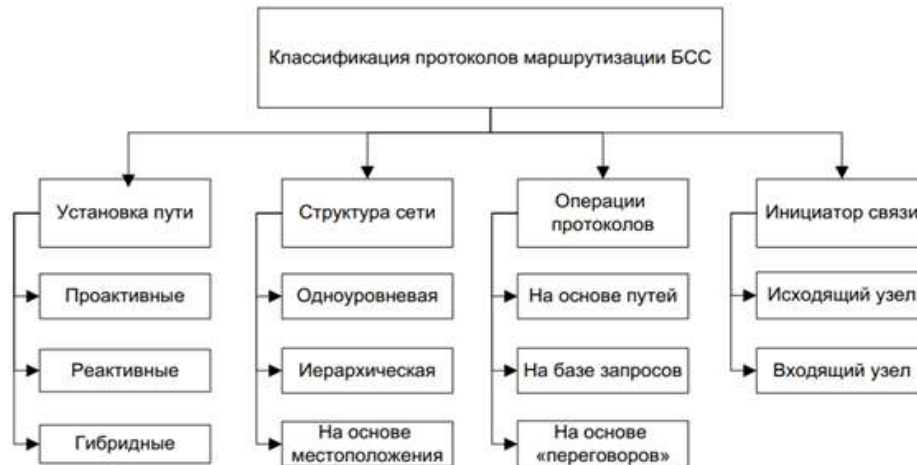
Традиционные протоколы маршрутизации в БСС					
Установка специальных узлов		Энергоэффективное планирование		Оптимизация потока данных	
Иерархические узлы	Специальные функциональные узлы	Планирование статических узлов	Планирование мобильных узлов	Одиночный путь	многопутевая связь

Существует также другая классификация протоколов маршрутизации согласно статье [73], которая делит протоколы маршрутизации на семь категорий, как показано на рис 1.6.

Категория протоколов	Протоколы
Основанные на местоположении узлов	MECN, SMECN, GAF, GEAR, Span, BVGF, GeRAF
Направленные на агрегацию данных	SPIN, Directed Diffusion, Rumor Routing, COUGAR, ACQUIRE, EAD, Information-Directed Routing, Gradient-Based Routing, Energy-aware Routing, Quorum-Based Information Dissemination, Home Agent Based Information Dissemination
Иерархические	LEACH, PEGASIS, HEED, TEEN, APTEEN
Основанные на мобильности	SEAD, TTDD, Joint Mobility and Routing, Data MULES, Dynamic Proxy Tree-Base Data Dissemination
Мульти-ориентированные	Sensor-Disjoint Multipath, Braided Multipath, N-to-1 Multipath Discovery
Основанные на гетерогенности	IDSQ, CADR, CHR
Основанные на качестве обслуживания (QoS)	SAR, SPEED, Energy-aware routing

Рисунок 1.6 - классификация протоколов маршрутизации

Кроме того, алгоритмы маршрутизации классифицируются по различным параметрам и критериям, как показано на рис. 1.7 (а,б).



а) [55]



б) [80]

Рисунок 1.7 - Классификация категорий протоколов маршрутизации в БСС

В БСС узлы, расположенные ближе к шлюзу, будут выполнять больше задач по передаче пакетов, чем узлы, расположенные дальше, что вызывает дисбаланс сетевой энергии и приводит к сокращению срока службы БСС. С помощью специальных узлов эти проблемы могут быть облегчены или даже решены. Решение проблем энергоэффективности связано с использованием кластеризации. Кластеризация является эффективным подходом для снижения энергопотребления, повышения стабилизации топологии сети и времени жизни сети.

Алгоритмы маршрутизации на основе *энергоэффективной кластеризации* решены в работах [1, 7, 9, 10, 15, 22, 23, 28, 45-47, 5-78], и некоторые из них будут рассмотрены ниже.

LEACH (Low-energy adaptive clustering hierarchy) [75] — иерархический алгоритм маршрутизации. Узлы в LEACH представлены головными узлами кластера (ГКУ) и членами кластера в соответствии с их ролями в БСС. Узлы-члены кластера собирают данные о своем окружении и отправляют их в кластере на ГКУ, отправляющий их на шлюз. LEACH балансирует

потребление энергии в кластере путем адаптивного выбора подходящих ГКУ. Однако прямая связь между ГКУ и шлюзом приводит к несбалансированному потреблению энергии между кластерами. Это связано со значительным увеличением энергопотребления при увеличении расстояния связи. Следовательно, ГКУ, удаленные от шлюза, будут потреблять больше энергии, что приводит к дисбалансу нагрузки между кластерами и не позволяет применять протокол LEACH в крупномасштабных БСС.

I-LEACH [9] — улучшенный энергоэффективный подход к маршрутизации, основанный на методе кластеризации. Этот подход является улучшением протокола LEACH и представляет собой новый подход к выбору ГКУ в сети в зависимости от остаточной энергии сенсорных узлов и формированию кластеров. Таким образом, покинутые узлы (ПУ), которые не могут достичь какого-либо кластера, также могут отправлять свои данные на шлюз/БС. Кроме того, предлагается многоходовая техника между ГКУ для выбора оптимального маршрута к БС или одноходового маршрута непосредственно к шлюзу, если это оптимальный путь. Предлагаемый подход предполагает, что в каждом раунде существуют кластеры. Предлагаемый протокол включает две фазы:

1- Начальная фаза связана с выбором ГКУ и формированием кластеров в соответствии с оставшейся мощностью узлов. Таким образом, кластеры формируются на основе определенного количества узлов. Формирование ГКУ будет происходить каждый раунд. На этой фазе, улучшенный LEACH [*I-LEACH*] делит сеть на кольцевые кластеры, где каждый кластер имеет свою кластерную голову. Число кластерных головок является оптимальным заранее заданным значением. Ограничение [кольцевые кластеры] основано на ширине сети, а диаметр каждого кольцевого кластера равен ширине, деленной на количество сегментов с каждой стороны.

2- Эта фаза представляет собой фазу передачи данных. Каждый ГКУ получает данные от члена кластера (который собирает информацию из окружающей среды) и агрегирует их. Затем каждый ГКУ использует многоходовую технику между ГКУ для выбора оптимального пути к БС или одноходового пути непосредственно к шлюзу, если это оптимальный маршрут. Кроме того, ПУ также могут отправлять свои данные на шлюз по одноходовому маршруту. Наконец, ближайший к шлюзу ГКУ отправляет на шлюз свою собственную информацию вместе с агрегированными пакетами других ГКУ.

В статье [7] предлагается использовать метод оптимизации роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) для формирования кластеров в БСС, а также предложен нечеткий протокол энергоэффективной маршрутизации (E-FEERP), использующий энергопотребление батареи, среднее расстояние узлов от базовой станции, плотность узлов и качество связи для оптимальной передачи данных от ГКУ-узлов к базовой станции.

В статье [10] предлагается модифицированный алгоритм сквозной безопасной адаптивной кластерной иерархии с низким энергопотреблением (ME-LEACH) для увеличения времени жизни БСС. ME-LEACH использует оптимальный протокол на основе цепочки между ГКУ и базовой станцией. Каждый ГКУ соединяется с ближайшим соседним ГКУ. Каждый ГКУ по очереди передает сигнал на базовую станцию и тем самым снижает потребление энергии за раунд. Идея заключается в том, чтобы изменить способ передачи данных ГКУ вместо того, чтобы передавать их непосредственно на базовую станцию. ГКУ будет передавать данные ближайшему ГКУ, если расстояние до него меньше, чем до базовой станции. Поэтому ГКУ будет искать ближайшую ГКУ и использовать ее в качестве следующего хопа.

При изучении любой сети связи одним из важнейших объектов исследования является изучение показателей качества обслуживания для эффективной маршрутизации БСС. Алгоритмы маршрутизации с учетом *качества обслуживания* по продлению времени жизни БСС решены в работах [2, 4, 11-15, 25, 29], и некоторые из них будут рассмотрены ниже.

В работе [2] представлены энергоэффективная кластеризация на основе k-медоидов с улучшенной искусственной пчелиной колонией (K-IABC) и протокол маршрутизации на основе межслойного алгоритма оптимизации Харриса-Хоукса (CL-ННО) для БСС, позволяющие достичь лучшего качества обслуживания (QoS). Для преодоления проблемы энергоасимметрии в беспроводных сенсорных сетях предлагается межслойное решение оптимальной маршрутизации. Целью алгоритмов межслойной маршрутизации является снижение задержки передачи данных по сети и энергопотребления.

В статье [4] предложена модифицированная версия алгоритма оптимизации "серый волк" (IGWO), позволяющая преодолеть преждевременную сходимость обычного алгоритма GWO. Алгоритм применяется для оптимизации выбора ГКУ в БСС с целью максимизации времени жизни сети. Улучшения алгоритма IGWO основаны на расстоянии до шлюза, коэффициенте балансировки ГКУ, остаточной энергии и среднем внутрикластерном расстоянии.

В исследовании [25] с целью продления времени жизни сети предложен протокол многоходовой маршрутизации, основанный на теории игр и оптимизации покрытия (MRP-GTSCO). На этапе настройки разработаны две инновационные стратегии, включая игру кластеризации со штрафной функцией и набор покрытий кластерных голов, которые позволяют добиться равномерности распределения кластерных голов и повысить рациональность выборов кластерных голов. На этапе передачи данных впервые выведена теорема о применимых условиях межкластерной многоходовой маршрутизации. На основе этого предложен новый алгоритм выбора многоходового пути, связанный с остаточной энергией и степенью узла, для обеспечения энергоэффективного пути передачи данных.

БСС имеют множество преимуществ, но заметным ограничением является то, что время жизни сенсорного узла определяется временем работы батареи. Два критических фактора, определяющих время жизни батареи, — это частота считывания показаний датчиков и дальность передачи данных сенсорными узлами. Алгоритмы маршрутизации с учетом *качества обслуживания* для оптимизации энергопотребления БСС решены в работах [[3], [5], [8], [17], [18], [20], [24], [27], [30]], и некоторые из них будут рассмотрены ниже.

В работе [3] исследованы алгоритмы и методы маршрутизации беспроводных сенсорных сетей, в частности традиционных и кластерных, и представлена система планирования сна на основе алгоритмов роевого интеллекта. Основной целью работы является поиск оптимальной реализации метода роя частиц для решения задачи оптимизации энергопотребления таких сетей.

В статье [5] представлена энергоэффективная система маршрутизации, названная Energy-aware Proportional Fairness Multi-user Routing (EPFMR) framework в БСС. EPFMR внедряется в среде БСС с использованием времени экземпляра. Время запроса, отправляемое для обнаружения маршрута, является главным действием, разработанным в рамках EPFMR для снижения энергопотребления. Пропорциональная справедливая маршрутизация в БСС выбирает наилучший путь для пакетного потока на основе соотношения между периодами запросов между различными датчиками. Маршрут, найденный для пакетного потока, также измеряет энергию на многопользовательском маршрутном пути с помощью метода Greedy Instance Fair Method (GIFM). GIFM в EPFMR разрабатывает энергоэффективный локализованный маршрутный путь, зависящий от узла, улучшая пропускную способность. Энергосберегающая система максимизирует пропускную способность и проводит экспериментальную оценку таких факторов, как уровень потребления энергии при маршрутизации, пропускная способность, Время поиска маршрута (RST), плотность узлов и средняя энергия на пакет в БСС.

В статье [8] рассматривается модифицированный протокол маршрутизации на основе расстояния и энергии (mDBEA) для оптимизации пути с целью увеличения времени жизни БСС в среде многоходовой маршрутизации. Данный подход решает проблему путем вычисления евклидова расстояния между последовательными узлами для определения кратчайшего расстояния, минимизирующего энергопотребление при передаче.

В статье [17] предложен протокол иерархической маршрутизации на основе порогового энергосберегающего зонального измерения эффективности (TEZEM). Это протокол, учитывающий гетерогенность и основанный на пороговых значениях, который обеспечивает лучшее решение существующих проблем в беспроводных сенсорных сетях нового поколения. В процессе работы TEZEM разделяет всю область сети на несколько зон для эффективного управления сетевым трафиком. На первом этапе TEZEM разрабатывается для однородной сети,

в которой начальная энергия всех узлов одинакова. Далее в среду выполнения TEZEM вносится неоднородность, чтобы оптимизировать ее энергопотребление.

В работе [24] направлена на разработку алгоритма маршрутизации для поиска оптимального пути с целью энергосбережения беспроводной сенсорной сети путем разработки математической модели, учитывающей пространственно-энергетические характеристики сети, поскольку предполагается, что Земля имеет сферическую форму. Алгоритм работает на базовой станции, где преобразует координаты узлов в радианы и использует формулу гаверсина для расчета расстояния между сенсорными узлами и формирования матрицы расстояний. Далее формируется таблица энергозатрат, в которой вычисляется потребляемая энергия путем нахождения мощности радиосигнала на передающей антенне и умножения ее на время. В таблице энергетических затрат выбирается оптимальный путь, потребляющий минимум энергии.

К предыдущим классификациям можно добавить новую категорию - алгоритмы маршрутизации на основе *машинного обучения/МО (Machine learning/ML)*, которые будут рассмотрены во второй главе.

1.5. Анализ технологий передачи данных, используемых при построении гетерогенных БСС

Связь между сенсорными узлами в БСС организуется с помощью технологий беспроводной связи. Ниже рассмотрены основные используемые технологии и их преимущества при создании гетерогенных беспроводных сенсорных сетей (наземных и летающих).

В наземных БСС (НБСС) используется ряд технологий беспроводной связи, работающих в нелицензируемом частотном диапазоне. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave, WirelessHART, 6LoWPAN и Wavenis [57]. Bluetooth, Wi-Fi и ZigBee являются основными технологиями для построения самоорганизующихся сетей. Эти технологии различаются между собой по пропускной способности, энергопотреблению и некоторым другим параметрам, но используют схожие частотные диапазоны.

Zigbee основан на стандарте IEEE 802.15.4. Это энергоэффективная технология беспроводной связи малого радиуса действия. Она функционирует в диапазоне ISM (Industrial, Scientific and Medical), который выделен для промышленного, научного и медицинского применения. Zigbee работает в диапазоне 2,4 ГГц, 868 и 928 МГц с полнодуплексной беспроводной передачей данных. Стандарт IEEE 802.15.4 определяет два уровня: физический уровень и уровень доступа к среде, а Zigbee Alliance расширил конфигурацию прикладного уровня и сетевого уровня. Максимальная пропускная способность, достижимая с помощью Zigbee, составляет 250 Кбит/с на расстояние до 100 метров. Zigbee может играть важную роль в эксплуатации и обслуживании электросети, накоплении данных, измерении параметров,

безопасности, мониторинге и интерфейсе с потребителями. Протокол Zigbee также характеризуется возможностью конфигурирования ячеистых сетей и возможностью динамического обновления соединения между узлами, поддерживает около 65 000 устройств в сети, но не поддерживает IP-адресацию на сетевом уровне.

Bluetooth — это технология беспроводной связи на небольшие расстояния, основанная на стандарте IEEE 802.15.1. Она использует беспроводную передачу коротких волн в нелицензируемом ISM-диапазоне от 2400 до 2480 МГц. Она использует технологию распространения спектра с прыжками по частоте (FHSS - frequency-hopping spread spectrum) и около 1600 прыжков в секунду. Его ключевыми особенностями являются широкая доступность, низкое энергопотребление и быстрый обмен данными. Bluetooth был первоначально разработан в 1994 году компанией Ericsson, а затем группа фирм сформировала специальную группу по интересам для сохранения и улучшения этой технологии. В Bluetooth используются две сетевые топологии, которые называются Piconet и Scatternet. Piconet создается персональной сетью, в которой один беспроводной клиент выступает в качестве ведущего, а другие беспроводные клиенты служат ведомыми. В одном Piconet могут взаимодействовать максимум восемь устройств. Scatternet — это группа Piconet. Bluetooth используется для связи между интеллектуальными бытовыми приборами, системами управления энергопотреблением и интеллектуальными счетчиками. Он имеет пиковую пропускную способность 1 Мбит/с, 79 радиочастотных каналов и полосу пропускания канала 1 МГц. Номинальный радиус действия составляет около 10 м. Bluetooth состоит из трех классов мощности, каждый из которых имеет свой радиус действия.

Wi-Fi -Технология беспроводной верности (Wireless Fidelity, Wi-Fi) или беспроводной локальной сети создана на основе стандарта IEEE 802.11. Беспроводные локальные сети преобладают в приложениях LAN с пиковой скоростью передачи данных около 150 Мбит/с и предельной дальностью покрытия 250 м. Wi-Fi (IEEE 802.11b), работающий в диапазоне 2,4 ГГц, достигает максимальной скорости передачи данных 11 Мбит/с. Другие версии, основанные на стандарте IEEE 802.11a, работают в диапазоне 5,8 ГГц с использованием ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing), а IEEE 802.11g (улучшенная версия Wi-Fi), работающая в диапазоне 2,4 ГГц, обеспечивает скорость передачи данных до 54 Мбит/с. IEEE 802.11 обеспечивает скорость передачи данных до 600 Мбит/с, используя технологию множественного входа-множественного выхода (MIMO – Multi Input Multi Output). Вопросы безопасности беспроводных локальных сетей решаются в стандарте IEEE 802.11i с помощью шифрования Wi-Fi Protected Access (WPA-2). В нем используется усовершенствованный стандарт шифрования (AES - Advanced Encryption Standard). Главная особенность Wi-Fi - широкая поддержка в большинстве электронных устройств. Это протокол

верхнего уровня, который позволяет общаться через Интернет без использования транслятора протоколов. В Wi-Fi/WLAN можно использовать ограниченное количество каналов без перекрытия. Это означает, что в сети может быть подключено ограниченное количество беспроводных клиентов. Однако преимуществами Wi-Fi являются высокая пропускная способность, широкая доступность, поддержка IP и масштабируемость сети [79].

Z-Wave -протокол специально разработан для приложений "умного дома". Он может быть использован в домашних сетях интеллектуальных сетей. *Z-Wave* — это стандарт радиочастотных ячеистых сетей с низкой скоростью передачи данных и малой дальностью действия, работающий в диапазоне 908 МГц. Максимальная зона покрытия составляет 30 м внутри помещения и 100 м снаружи. Он не требует центрального координатора, но использует ведущие и ведомые узлы. Он может поддерживать 232 устройства. Скорость передачи данных составляет от 9,6 Кбит/с до 40 Кбит/с.

WirelessHART (IEC 62591) основан на стандарте IEEE 802.15.4 и предназначен для промышленной автоматизации. Это централизованная многоходовая ячеистая сеть реального времени, разработанная для приложений промышленного мониторинга и управления. Он основан на совместимом радио IEEE 802.15.4 и работает в диапазоне ISM 2,4 ГГц. Она использует технологию распространения спектра с прямой последовательностью (DSSS - Direct-Sequence Spread Spectrum). Кроме DSSS, она использует технологию множественного доступа с временным разделением (TDMA - Time Division Multiple Access), в которой узлам выделяются временные интервалы по 10 мс. Дальность действия этой технологии составляет до 200 м. Безопасность связи обеспечивается с помощью 128-битного шифрования AES. Индивидуальные сеансовые ключи, а также общие ключи шифрования сети разделяются между всеми узлами для широковещательных услуг. *WirelessHART* преодолевает все недостатки *Zigbee* с точки зрения прочности, надежности, безопасности и доставки сообщений.

6LoWPAN (IPv6 Low Power Wireless Personal Area Network) (RFC4944) – стандартный протокол основан на стандарте IEEE 802.15.4 для реализации связи IPv6 в беспроводных сетях, состоящих из беспроводных модулей с низким энергопотреблением. Беспроводные датчики являются одним из маломощных устройств с ограниченными возможностями обработки, которые используют эту технологию в качестве части Интернета вещей. Эта технология позволяет передавать пакеты данных с использованием IPv6 через IEEE 802.15.4. Она работает в диапазоне 2,4 ГГц и суб-1 ГГц. Передача данных в стандарте *6LoWPAN* обеспечивает скорость передачи от 50 до 250 кбит / с на расстояние до 100 метров.

Wavenis - новая технология беспроводной связи для маломощных приложений связи между машинами. Она может использоваться на расстоянии до 200 м для различных приложений внутри помещений. Эта технология может быть использована в различных приложениях для

учета в интеллектуальных сетях. Она может быть использована в автоматическом считывании показаний счетчиков, усовершенствованной инфраструктуре учета и приложениях удаленной связи. Wavenis работает в диапазонах 868 МГц, 915 МГц и 433 МГц. Пропускная способность Wavenis составляет от 4,8 Кбит/с до 100 Кбит/с.

В таблице 1.4 приведен сравнительный анализ различных стандартов связи для передачи данных в НБСС.

В летающих БСС используется ряд технологий беспроводной связи, которые отличаются от наземных БСС. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются LoRa, SigFox и WiMax, которые отличаются скоростью передачи данных, задержкой, энергопотреблением и некоторыми другими параметрами [79][81].

LoRa (Long Range) – это протокол беспроводной связи с низким энергопотреблением, предназначенный для предоставления сетей сотового типа с низкой скоростью передачи данных. LoRa обеспечивает прерывистое соединение с низкой скоростью передачи данных на большие расстояния и может принимать чрезвычайно низкие уровни сигнала. Она работает в диапазоне 868 МГц ISM и имеет максимальную радиомощность 14 дБм. Дальность действия LoRa составляет 15-20 км, а время автономной работы превышает десять лет. Скорость передачи данных 250 бит/с.

Таблица 1.4 - Сравнительный анализ различных стандартов связи для БСС [62]

Протокол	Тип спектра	Диапазон частот	Макс. пропуск. способность	Диапазон покрытия	Преимущества	Недостатки	Рынок
Zigbee	Нелицензионный	868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	250 Kbps	До 100 м	низкая стоимость, низкое энергопотребление, меньшая сложность	низкая скорость передачи данных, малая дальность действия, помехи для других технологий, использующих ISM-диапазон, низкий уровень заряда батареи	очень высокий
Bluetooth	Нелицензионный	2.4 GHz	21 Kbps	До 100 м	низкое энергопотребление	низкая скорость передачи данных, очень малый радиус действия, меньшая защищенность, помехи для других технологий, использующих ISM-диапазон	очень высокий
Wi-Fi	Нелицензионный	2.4 GHz, 5.8 GHz	2 Mbps до 54 Mbps	До 250 м	Высокая скорость передачи данных, надежность, низкая стоимость, поддержка IP и масштабируемость сети	сложная конструкция, подверженность помехам, скорость передачи данных может снижаться из-за помех.	очень высокий
Z-Wave	Нелицензионный	868 MHz, 908 MHz	9.6 Kbps до 40 Kbps	До 30 м	низкое энергопотребление	очень низкая скорость передачи данных, малая дальность действия	средний

Таблица 1.4 - продолжение

Протокол	Тип спектра	Диапазон частот	Макс. пропуск. способность	Диапазон покрытия	Преимущества	Недостатки	Рынок
WirelessHART	Нелицензионный	2.4 GHz	До 250 Kbps	200 м	простые и недорогие решения, самоорганизованный стандарт, более защищенный.	все устройства должны иметь возможность маршрутизации, нет указаний на то, как сконфигурирована сеть.	очень высокая для применения в системах промышленного упр-ия
6LoWPAN	Нелицензионный	868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz	До 250 Kbps	До 100 м	низкое энергопотребление	низкая скорость передачи данных, малая дальность действия	средний
Wavenis	Нелицензионный	868 MHz, 915 MHz, 433 MHz	до 100 Kbps	До 200 м	низкое энергопотребление	Очень низкая скорость передачи данных, малая дальность действия	очень низкий

SigFox - работает в диапазоне 868 МГц (ISM) и обеспечивает простой способ подключения изолированных модулей с низким энергопотреблением к потребительским приложениям по низкой цене. Подключенные устройства могут передавать сообщения с полезной нагрузкой от 1 до 12 байт и ограничены максимум 140 сообщениями в день, со скоростью передачи данных 100 бит/с. SigFox использует сигналы Ultra Narrow Band с рабочим циклом в Европе, и имеет максимальную излучаемую мощность 14 дБм на устройство. В целях экономии энергии и максимального продления срока службы батареи радио включается только тогда, когда есть сообщение для передачи. Следовательно, радио работает в течение нескольких секунд каждый день, что обеспечивает срок службы батареи в несколько лет. SigFox достигает дальности действия до 10 км в городских условиях и 40 км в сельской местности [82]. В 2020 году сеть Sigfox IoT покрывает в общей сложности 5,8 миллиона квадратных километров в 72 странах.

WiMax. Сокращение от Worldwide Interoperability for Microwave Access, - это технология беспроводной связи, обеспечивающая предоставление высокоскоростных интернет-услуг на больших географических территориях, достигающих 50 км. WiMax основана на наборе стандартов IEEE 802.16. WiMax может работать в различных частотных диапазонах и поддерживать различные схемы модуляции и кодирования, в зависимости от условий канала и требуемой скорости передачи данных. WiMax также может поддерживать несколько методов доступа, таких как множественный доступ с временным разделением каналов (TDMA) и множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов (OFDMA). WiMax может использоваться в различных приложениях, таких как фиксированный беспроводной широкополосный доступ, мобильный доступ в Интернет, транзитная связь для сотовых сетей и беспроводные городские сети. WiMax конкурирует с другими беспроводными технологиями

четвертого поколения (4G), такими как Long Term Evolution (LTE) и High-Speed Packet Access (HSPA+) [83]. В таблице 1.5 приведен сравнительный анализ различных стандартов связи для передачи данных в летающих БСС.

Таблица 1.5 - Сравнительный анализ различных стандартов связи для летающих БСС [84]

Атрибуты	SigFox	LoRa	WiMAX
Скорость передачи данных	10 кбит/с	100 бит/с	До 40 Мбит/с
Диапазон	14.5 км	10 км	50 км
Задержка	< 2 с	> 10 с	<100 мс
Пропускная способность	Низкая	Низкая	Высокая
Покрытие	Длинное	Длинное	Длинное
Энергопотребление	Высокое	Низкое	Низкое

Топология летающей сети постоянно меняется, а расстояние между БПЛА может достигать нескольких километров. В связи с чем для обеспечения надежного соединения с высокой скоростью на больших расстояниях и низкой задержкой в летающей сети предлагается использовать стандарт WiMax.

1.6. Сетевые системы моделирования беспроводных сенсорных сетей

Существует два основных подхода к разработке систем сетевого моделирования: адаптивная разработка и новая разработка. До появления концепции беспроводных сенсорных сетей (БСС) моделирование проводилось с использованием адаптивной разработки в качестве среды моделирования. По мере роста популярности и распространения БСС расширялись и среды моделирования, появлялись новые разработки, создавались новые симуляторы для поддержки этих сетей с учетом специфических характеристик датчиков. Адаптивная разработка характеризуется повторным использованием хорошо проверенных идей и исходного кода, а также большой базой пользователей и разработчиков. Новые разработки ориентированы на особые характеристики и работу сенсорных узлов.

Высокая стоимость оборудования является основной проблемой в исследованиях беспроводных сенсорных сетей (БСС). Для решения этой проблемы были разработаны программные продукты, позволяющие моделировать и симулировать эти сети более экономично, получая результаты, сопоставимые с результатами, полученными на реальном оборудовании.

Моделирование БСС дает возможность приблизить теоретические расчеты, предсказать поведение реальной сети, протестировать новые протоколы, оптимизировать архитектуры и выбрать топологии для новых сетевых решений.

Критерии для оценки и сравнения выбранных систем моделирования БСС: Уровень детализации — Есть три вида систем моделирования (Общий, Уровень кода, Уровень прошивки), синхронизация, лицензия на ПО, популярность, поддержка кода моделирования, платформа

системы моделирования, платформы БСС, возможность портирования кода моделирования, масштабируемость, поддержка графического интерфейса пользователя (GUI – Graphical User Interface), симуляция мобильных сетей, возможность динамического изменения топологии сети, поддержка выполнения в режиме систем реального времени, потребность в расширениях для хорошей симуляции БСС, поддержка пользовательских расширений, наличие расширений для БСС, 3D-моделирование, доступные модели и протоколы, и модель энергопотребления. [85]

На сегодняшний день известно несколько систем моделирования сетей, разработанных в начале двухтысячных годов, написанных на высокоуровневых языках программирования с ограниченными интерфейсами, включая GloMoSim/QualNet, OPNET Modeler Wireless Suite, TOSSIM (TinyOS mote simulator), OMNeT++, NS-2 (Network Simulator), Avrora, J-Sim, АТЕМУ, EmStar, SENS, SENSE (Sensor Network Simulator and Emulator), Shawn и CupCarbon [85][86].

1. *OPNET Modeler Wireless Suite* — это коммерческий инструмент, используемый для моделирования и симуляции различных типов сетей, включая беспроводные сети. В этом инструменте используется механизм быстрого дискретно-событийного моделирования, работающий на 32-битном/64-битном полностью параллельном ядре моделирования. Он предусматривает предоставление объектно-ориентированного подхода к моделированию и иерархической среды моделирования. Несмотря на отсутствие специальных протоколов маршрутизации, разработанных для беспроводных сенсорных сетей, доступны различные методы распространения и модуляции, а также MAC-уровень ZigBee (802.15.4). Кроме того, инструмент поддерживает вычисления по сетке, что позволяет проводить распределенное моделирование.
2. *OMNeT++* — Это также инструмент, но не симулятор, используемый для моделирования объектно-ориентированных сетей, работающих в дискретном режиме. Этот инструмент позволяет моделировать архитектуру, протоколы, проводные и беспроводные сети. Одним из преимуществ этого инструмента является предоставление платформы для беспроводных сенсорных сетей: Mobility Framework, MiXiM, Castalia, INET Framework, NesCT.
3. *NS-2 (Network Simulator)* — это объектно-ориентированный симулятор дискретных событий, написанный на C++ и OTcl, объектно-ориентированной версии Tcl. NS2 поддерживает некоторые беспроводные протоколы для БСС, такие как 802.11, 802.16, IR-UWB, BlueTooth и 802.15.4. Существуют фреймворки, созданные на основе NS-2 для БСС, такие как Mannasim, NS2-MIUN и SensorSim. Он обеспечивает дополнительные возможности для моделирования сенсорных сетей, генерации сценариев и гибридного моделирования.
4. *CupCarbon* [87] — это симулятор беспроводной сенсорной сети «умного города» и Интернета вещей. Его целью является разработка, визуализация, отладка и проверка распределенных алгоритмов для мониторинга, сбора данных об окружающей среде и для создания сценариев

окружающей среды, таких как пожары, газ, мобы, а также для моделирования мобов, таких как транспортные средства и летающие объекты (например, БПЛА, насекомые и т.д.). CupCarbon предлагает две среды моделирования. Первая среда моделирования позволяет разрабатывать сценарии мобильности и генерировать природные события, такие как пожары и газ. Вторая среда моделирования представляет собой дискретно-событийное моделирование беспроводных сенсорных сетей, которое учитывает сценарий, разработанный на основе первой среды. Сети можно проектировать и создавать прототипы с помощью интерфейса, использующего структуру OpenStreetMap (OSM) для размещения датчиков непосредственно на карте. Он включает в себя скрипт SenScript, который позволяет программировать и настраивать каждый сенсорный узел в отдельности. CupCarbon разработан с модульной структурой для упрощения замены и настройки определенных частей эмулятора. Эмулятор работает под управлением операционной системы (MAC OS). Модульная структура обеспечивает две очень важные возможности. Во-первых, структура упрощает настройку целевой архитектуры, очень легко экспериментировать с частью архитектуры, сохраняя остальные неизменными. Это делает CupCarbon полезным для моделирования конкретных беспроводных сенсорных сетей. Во-вторых, модульная структура способствует нескольким реализациям данного модуля, что позволяет пользователям переключаться между очень точными и очень быстрыми версиями.

Перечисленные системы в основном разработаны в начале 21 века и представляют собой программы, написанные на языке C++, имеющие слабый интерфейс, затрудняющий работу с ними. Кроме того, в этих программах заложены предопределенные протоколы, не позволяющие проводить их модификацию. Это ограничивает возможность их применения для задач, связанных с обработкой трафика с помощью интеллектуальных методов.

Анализ источников и литературы, проведенный в первой главе, показывает высокий уровень заинтересованности исследователей в разработке новых методов и структур, связанных с беспроводными сенсорными сетями, в том числе с опорой на методы искусственного интеллекта для принятия оптимальных решений по маршрутизации данных.

Выводы по главе 1

1. Рассмотрены показатели качества обслуживания (QoS) для беспроводных сетей, проанализированы работы, в которых использовались методы кластеризации и маршрутизации для достижения высоких показателей качества обслуживания. Отмечено, что наиболее важными показателями являются время жизни сети и энергопотребление
2. Проанализированы разные подходы к классификации протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях, в том числе традиционные, основанные на разных параметрах и критериях. Показано, что протоколы маршрутизации можно классифицировать и на основе машинного обучения.
3. Рассмотрены особенности структуры БСС, типы протоколов БСС, и показатели функционирования сети БСС, связанные со стеком протоколов БСС
4. Рассмотрены сенсорные сети с изменяемой топологией Ad-hoc (мобильные целевые сети MANET, автомобильные целевые сети VANET, летающие целевые сети FANET) и развитие летающих сенсорных сетей.
5. Проанализированы технологии передачи данных, используемых при построении гетерогенных БСС (Zigbee, Bluetooth, Wi-Fi, Z-Wave, WirelessHART, 6LoWPAN, Wavenis, LoRa, SigFox и WiMAX).
6. Рассмотрены сетевые симуляторы и системы, используемые для моделирования беспроводных сенсорных сетей (GloMoSim/QualNet, OPNET Modeler Wireless Suite, TOSSIM, OMNeT++, NS-2, Avrora, J-Sim, J-Sim, EmStar, SENS, SENSE, Shawn, и CupCarbon). Показано, что перечисленные системы, написанные на языке C++, имеют ограниченный интерфейс, в них заложены predetermined протоколы, не позволяющие проводить модификацию. Это ограничивает возможность их применения для задач, связанных с обработкой трафика с помощью интеллектуальных методов.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ТРАФИКА В ГЕТЕРОГЕННОЙ БСС

В главе рассматриваются методы интеллектуального анализа данных (ИАД), которые можно использовать при обработке трафика в исследуемой гетерогенной сети. Проведен анализ моделей и алгоритмов ИАД для эффективной кластеризации и маршрутизации БСС с помощью машинного обучения, описана общая структура пакетов данных предлагаемого протокола для гетерогенной БСС.

2.1. Алгоритмы маршрутизации с использованием машинного обучения

Одна из основных задач в беспроводных сенсорных сетях любого типа – маршрутизация, т.е. нахождение *оптимального* пути для передачи данных от источника к получателю для повышения энергопотребления и увеличения времени жизни сети. На рис. 2.1 показана классическая архитектура протокола маршрутизации БСС.



Рисунок 2.1 - Архитектура протокола маршрутизации в БСС [92]

Назначить глобальные идентификаторы для большого числа развернутых сенсорных узлов крайне сложно. Поэтому традиционные протоколы могут оказаться неприменимыми для БСС. БСС обладает присущими только ей характеристиками, специфичными для конкретного приложения, что делает разработку протокола маршрутизации сложной задачей [89]. Основным ограничением сенсорного узла является энергия [90]. Датчики представляют собой вычислительные устройства с батарейным питанием. Замена батарей во многих ситуациях затруднена, поэтому для БСС необходим энергоэффективный протокол маршрутизации. Из-за плотного размещения сенсорные узлы генерируют избыточные данные, и базовая станция может получать несколько копий одних и тех же данных. Это приводит к неоправданному расходу

энергии сенсорных узлов. Иногда БСС не имеет какой-либо фиксированной инфраструктуры и является динамичной [91]. Динамичность инфраструктуры обусловлена в основном двумя причинами. Первая причина - энергетическая: сенсорные узлы имеют ограниченный запас энергии в виде батарей. Если протокол не сможет сбалансировать нагрузку между узлами, то сенсорный узел может погибнуть. Это приводит к динамической структуре сети. Вторая причина - мобильность: во многих сценариях после развертывания сенсорные узлы статичны, а поглотитель может перемещаться внутри сети. Это делает сеть динамичной, и протокол, работающий для статичного поглотителя, может быть неприменим для мобильного поглотителя [146].

Для повышения эффективности БСС и улучшения показателей качества протокола маршрутизации целесообразно исследовать применение современных интеллектуальных технологий, которые позволят выполнять передачу информации в распределённых сетях даже в случаях их частичной деградации или нарушения целостности.

При разработке любого алгоритма маршрутизации, в том числе с применением интеллектуальных методов, должен учитываться ряд факторов, таких как саморегулирование, энергоэффективность, гибкость, масштабируемость, отказоустойчивость, точность и качество [93]. Для решения проблем, связанных с снижением энергопотребления и оптимизацией использования энергетических ресурсов, необходимо использовать интеллектуальные протоколы маршрутизации.

Существуют различные способы поиска оптимального маршрута. Некоторые алгоритмы определяют маршруты на основе кратчайшего пути, малой задержки, более высокого отношения сигнал/шум, баланса нагрузки и др. [144]. Интеллектуальные протоколы маршрутизации в БСС, использующие методы ИАД, должны решать следующие задачи: самоорганизация узлов сети, маршрутизация пакетов данных и адресация узлов, минимизация энергопотребления узлов сети, увеличение общего времени жизни сети, сбор и агрегирование данных, регулирование скорости передачи и обработки данных в сети, максимизация зоны покрытия сети, качество обслуживания (QoS) и защита от несанкционированного доступа.

Построение алгоритма маршрутизации на основе машинного обучения является важным для маршрутизации в БСС по следующим причинам:

- БСС обычно контролируют динамическую среду, которая быстро меняется со временем, и местоположение узлов может меняться, что требует разработки алгоритмов маршрутизации с быстрой адаптацией и принятием решений,
- БСС могут быть использованы для сбора информации в опасных местах, недоступных для человека. Различные непредвиденные воздействия, которые могут возникнуть в таких ситуациях, могут парализовать работу некоторых узлов и повлиять на решения

по маршрутизации, поэтому для обеспечения точного сбора и передачи информации системам требуются сильные обучающие и самоадаптивные возможности. Поэтому машинное обучение очень подходит для разработки протоколов маршрутизации в БСС,

- При разработке алгоритмов маршрутизации в БСС необходимо учитывать проблемы, возникающие из-за множества влияющих факторов, таких как энергопотребление, отказоустойчивость, масштабируемость и охват данных. Машинное обучение позволяет узлам и шлюзам учиться на основе прошлого опыта и выбирать оптимизированный путь маршрутизации для адаптации в динамически меняющейся среде.

Преимущества использования машинного обучения для разработки алгоритмов маршрутизации можно суммировать следующим образом. Машинное обучение позволяет определить наилучший путь маршрутизации для снижения энергопотребления и продления срока службы БСС. Он может уменьшить вычислительную сложность путем разделения типичной проблемы маршрутизации на более простые подпроблемы маршрутизации. В каждой подзадаче узлы разрабатывают структуры графов, учитывая только своих локальных соседей, что приводит к недорогой, эффективной маршрутизации в реальном времени. Кроме того, требования качества обслуживания (QoS – Quality of Service) при маршрутизации удовлетворяются относительно простыми методами вычисления и классификаторами, что позволяет снизить стоимость и эффективно экономить электроэнергию.

Таблица 2.1 - Анализ алгоритмов маршрутизации на основе машинного обучения [72]

Алгоритм	Маршрутизация	Алгоритм машинного обучения (ML)	Накладные расходы	Масштабируемость	Задерживать	Качество обслуживания
WL-DCNN [48]	Многохоповая	CNN	Высокие	Хорошая	Низкая	Да
SecDL	Географическая	DNN	Высокие	Хорошая	Низкая	Да
QLRR-WA [50]	Многохоповая	Q-обучение	Низкая	Хорошая	Низкая	Нет
RLProph [51]	Многохоповая	Обучение с усилением (RL)	Низкая	Хорошая	Средняя	Да
DRLSOR [52]	Многохоповая	Обучение с усилением (RL)	Низкая	Хорошая	Низкая	Да
EL[53]	Многохоповая	Гибридный	Высокие	Хорошая	Средняя	Нет

В таблице 2.1 представлены алгоритмы энергоэффективной маршрутизации в БСС на основе машинного обучения. RL и Q-обучение на основе QLRR-WA демонстрируют низкую нагрузку на сеть. При использовании CNN (сверточной нейронной сети) и DNN (глубокой нейронной сети) накладные расходы сети высоки, но масштабируемость хорошая. EL,

основанный на гибридных алгоритмах обучения, обладает лучшей масштабируемостью. RL и Q-обучение на основе QLRR-WA, CNN и DNN достигают низкой задержки.

Алгоритмы маршрутизации на основе машинного обучения достигают энергоэффективности путем сокращения избыточных данных, оптимизации путей или оптимизации протоколов. Большинство схем оптимизируют пути маршрутизации для реализации энергосбережения

Разработка энергоэффективных ML-моделей является сложной задачей, требующей сбалансированности компромисса между накладными расходами на обучение моделей и экономией энергии при оптимальной маршрутизации.

2.2. Методы и модели интеллектуального анализа данных

В последние годы интеллектуальной обработке данных в Интернете вещей, в том числе и уровню беспроводных сенсорных сетей уделяется значительное внимание, что привело к появлению большого количества исследований и литературы. В данном разделе представлен обзор основных методов интеллектуальной обработки данных. Широкое распространение получили следующие основные методы исследования в практических приложениях: нейронные сети, метод random forest- случайного леса, SVM, K-средних, генетический метод, нечеткая логика [147]. Общая постановка задачи в этих методах формулируется следующим образом.:

Даны n обучающих выборок $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ из множества объектов X

т.е. $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset X$, и n известных ответов из множества ответов Y

т.е. $y_i = y(x_i)$, $i=1 \dots n$. Между X и Y существует неизвестная зависимость $y: X \rightarrow Y$.

Требуется найти алгоритм $a: X \rightarrow Y$,

решающая функция которого приближает y на всем множестве X .

Архитектуры нейронных сетей

В настоящее время одним из основных и широко распространенных методов, позволяющих решать обозначенные задачи и проводить классификацию или прогнозирование результатов являются нейронные сети.

Нейронная сеть — это динамическая система, состоящая из групп базовых единиц обработки, связанных между собой в виде узлов направленного графа, называемых формальными нейронами, и способная вырабатывать выходную информацию в ответ на входное воздействие. Математическая модель формального нейрона может быть выражена уравнением.

$$y = f(z) = f\left(\sum_{i=1}^n \theta^i x^i, +\theta^0\right) \quad (2.1)$$

где y - выход нейрона; $f(z)$ - функция выхода нейрона; θ^i - обучаемый вес i -го входа; x^i - i -й вход нейрона; θ^0 - начальное состояние нейрона; $i = 1, 2, 3 \dots n$ - номер нейрона; n - количество входных нейронов.

Название функции	Описание	Графическое представление
Линейная	$F(y) = ky,$ $k > 0,$ k - коэффициент активации	
Линейная с насыщением	$F(y) = \begin{cases} +1, & y > P, \\ ky, & y < 1, \\ -1, & y < -P \end{cases}$	
Определение знака	$F(y) = \text{sgn}(y)$	
Униполярная сигмоидальная (s-образная)	$F(y) = \frac{1}{1 + \exp(-ky)},$ $k > 0$	
Биполярная сигмоидальная (гиперболический тангенс)	$F(y) = \text{th}(ky),$ $k > 0$	
Пороговая	$F(y) = \begin{cases} 1, & y \geq P, \\ 0, & y < P \end{cases}$	

Рисунок 2.2 - Типы функций активации

Формальный нейрон состоит из n -входов, коэффициенты θ^i , известные как коэффициенты межнейронной связи, одного сумматора и выходного функционального преобразования, известного как функция активации. i -я связь деактивируется при отрицательном значении коэффициента θ^i ; активируется при положительном значении.

В нейронных сетях чаще всего используются следующие виды функций активации, приведенные на рис.2.2.

Нейронные сети в настоящее время бывают различной, порой довольно сложной архитектуры. Тем не менее в основе этого метода лежит модель работы слоев из нейронов, функционирующих как сумматоры.

В наборе формул 2.2 представлены вычисления, которые производит трехслойная сеть в векторном виде. θ

$$\begin{aligned} z^{(2)} &= \theta^{(1)}x = \theta^{(1)}a^{(1)} & a^{(2)} &= g(z^{(2)}), \\ z^{(3)} &= \theta^{(2)}a^{(2)} & h_{\theta}(x) &= a^{(3)} = g(z^{(3)}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Здесь x -входной вектор, $a_i^{(j)}$ – активация узла i в слое j , $h_{\theta}(x) = g(z)$ – гипотеза, где $\theta^{(j)}$ – матрица параметров («весов»), контролирующая отображение функций активации от слоя j до $j+1$. Размерность матрицы весов между слоями j и $j+1$, с количеством нейронов s_j и s_{j+1} равна : $s_{j+1} \times (s_j + 1)$.

В настоящее время с точки зрения топологии, нейронные сети можно разделить на: полносвязные сети, многослойные или слоистые сети, слабосвязные сети (нейронные сети с локальными связями). Существует большое разнообразие различных нейросетевых архитектур, ниже приведены некоторые из них [95].

Нейросети прямого распространения

Нейросети прямого распространения — полносвязные нейросети (Fully Connected Feed-Forward Neural Network, FNN). В нейронной прямого распространения (FNN) каждый нейрон имеет входящие соединения только с предыдущего слоя и исходящие соединения только со следующим слоем. В FNN, для обучения сети обычно используется контролируемое обучение, в частности обратное распространение. Ошибка обратного распространения рассчитывается с помощью средней квадратичной ошибки (MSE - Mean Squared Error) для определения разницы между входными и выходными значениями. Эта сеть имеет достаточное количество скрытых нейронов. На практике их часто комбинируют с другими сетями для создания новых сетей.

FNN можно использовать для определения более продвинутых архитектур, таких как: экстремальные обучающиеся машины (extreme learning machines, ELM), сверточные нейронные сети (convolutional neural networks, CNN), радиальные базисные функции (radial basis functions, RBF), нейронные сети с временной задержкой (time delay neural networks, TDNN) и автоэнкодеры, вероятностные нейронные сети (probabilistic neural networks, PNU).

Глубокие нейронные сети

Глубокая нейронная сеть (ГНС) — это ИНС с большим количеством скрытых слоев между входным и выходным слоями. Используемые в них методы, могут быть как контролируемые, так и полуконтролируемые или неконтролируемые. ГНС способны моделировать сложные нелинейные зависимости. Количество скрытых слоев, в основном нелинейных, может быть

большим. Существует множество архитектур глубоких нейронных сетей [96], и ниже приведены некоторые из них.

Глубокие остаточные сети (Deep residual networks, DRN) — это тип глубокой нейронной сети, которая использует остаточные связи для обучения сложным и высокоуровневым характеристикам на основе необработанных данных. Остаточные связи — это пропускные связи, которые позволяют добавить выход предыдущего слоя к входу последующего слоя, создавая короткий путь для передачи информации. Это помогает облегчить проблему исчезающих градиентов и ухудшения точности при увеличении глубины сети. Сети DRN делятся на два семейства: DRN-C и DRN-D. Модели DRN-C используют расширенные свертки для увеличения рецептивного поля сети без снижения разрешения карт признаков. Модели DRN-D — это упрощенные версии DRN-C, использующие стандартные свертки со страйдом и пулингом для уменьшения дискретизации карт признаков. Модели DRN-C и DRN-D продемонстрировали превосходную производительность в различных задачах компьютерного зрения, включая классификацию изображений, семантическую сегментацию и обнаружение объектов. [153]

Мультимодальное обучение (Multimodal Learning). Мультимодальное обучение в контексте машинного обучения — это тип глубокого обучения, который использует комбинацию различных типов данных, таких как текст, изображения, аудио и видео, для обучения на основе сложных и разнообразных сценариев реального мира. Цель мультимодального обучения - повысить производительность и надежность системы обучения за счет использования дополнительной и избыточной информации из нескольких модальностей [148]. Мультимодальное обучение можно разделить на три основных типа: раннее слияние, позднее слияние и гибридное слияние. Мультимодальное обучение имеет множество применений в различных областях, включая создание подписей к изображениям, обобщение видео, распознавание эмоций и кросс-модальный поиск.

Рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks, RNN)

RNN — это тип искусственных нейронных сетей, используемых для обработки последовательных данных, таких как естественный язык, речь или временные ряды. RNNs имеют циклическую структуру, которая позволяет им поддерживать внутреннее состояние (память), кодирующее историю входной последовательности. Эта особенность позволяет им улавливать долгосрочные зависимости и временную динамику в данных. Однако одной из основных проблем RNN является проблема исчезающих или взрывающихся градиентов. RNN можно обучать с помощью метода обратного распространения по времени (BPTT).

RNN состоят из сети рекуррентных блоков, которые на каждом временном шаге получают входной вектор и вырабатывают выходной вектор. Рекуррентные блоки также имеют вектор

скрытого состояния, который обновляется на каждом временном шаге на основе текущего входного сигнала и предыдущего скрытого состояния.

RNN широко используются в различных приложениях, включая нейронный машинный перевод, синтез речи, создание подписей к изображениям и текстов.

Существуют многомерные рекуррентные нейронные сети: многомерные и многонаправленные. Одной из последних работ является (*ReNet_* 2015) [149]. Другая работа (*PyraMiD-LSTM*) представляет собой умную нейронную сеть, которая использована для сегментации срезов мозга. Также существует разработка *Grid LSTM* [150].

Нейронная сеть Хопфилда (НСХ), изобретенная доктором Джоном Дж. Хопфилдом, представляет собой разновидность рекуррентной искусственной нейронной сети и состоит из одного слоя из N полностью связанных рекуррентных нейронов [102]. НСХ обычно используется при решении задач автосогласования и оптимизации, вычисляется с помощью сходящегося интерактивного процесса. Сети Хопфилда, представляющие собой контент-адресуемые ("ассоциативные") системы памяти с двоичными пороговыми узлами или с непрерывными переменными. Существует два типа нейронных сетей Хопфилда:

- дискретная сеть Хопфилда - полностью взаимосвязанная нейронная сеть, в которой каждый нейрон соединен с каждым другим нейроном, дает конечный отчетный выход двух типов [бинарный (0/1) или биполярный (-1/1)];

- непрерывная сеть Хопфилда - временной параметр рассматривается как непрерывная переменная. Вместо бинарных/биполярных выходов получаемые значения лежат между 0 и 1. Данный тип использован для решения задач оптимизации с ограничениями и ассоциативной памяти.

Сети долговременной/кратковременной памяти (Long/short term memory networks, LSTM) — это тип RNN, обрабатывающий долгосрочные зависимости в последовательных данных и решающий проблему затухающего/исчезающего градиента. Они требуют больше ресурсов для работы, чем другие RNN. В LSTM-сетях используется структура ячейки памяти с тремя затворами: входным, забывающим и выходным. Эти ворота регулируют поток информации в ячейку и из нее, позволяя сети выборочно запоминать или забывать предыдущие состояния. Было доказано, что LSTM способны обучать сложные последовательности, например, писать или сочинять примитивную музыку.

Закрытые рекуррентные блоки (Gated recurrent units, GRU) — это тип рекуррентных нейронных сетей (RNN), способных обрабатывать последовательные данные. Они используют механизм стробирования для управления потоком информации между входом, скрытым состоянием и выходом сети. У GRU меньше параметров, чем у сетей с долговременной

кратковременной памятью (LSTM), что делает их быстрее и проще в управлении. Однако они также немного менее выразительны.

Сети GRU состоят из двух ворот: ворот сброса и ворот обновления. Ворота сброса определяют, какая часть предыдущего скрытого состояния должна быть забыта, а ворота обновления определяют, какая часть предыдущего скрытого состояния должна быть перенесена в текущее состояние. Скрытое состояние вычисляется как линейная комбинация предыдущего состояния и состояния-кандидата, которое получается путем применения нелинейной функции активации к входу и затвору сброса. Выход GRU совпадает со скрытым состоянием.

Дифференцируемые нейронные компьютеры (Differentiable Neural Computers, DNC) — это разновидность нейронных сетей с расширенной памятью (MANN), способных обрабатывать и хранить последовательные данные. DNC используют внешнюю матрицу памяти, которая может быть динамически выделена и доступна через операции чтения, записи и стирания. Кроме того, DNC используют механизмы внимания для контроля модификации памяти и отслеживания временного порядка данных. DNC являются дифференцируемыми от конца к концу, что означает, что они могут быть эффективно обучены с помощью градиентных методов. DNC являются расширением нейронной машины Тьюринга (NTM) и могут работать с более долгосрочными зависимостями и большими объемами памяти, чем NTMs [108].

Сверточные нейросети (Convolutional Neural Network, CNN)

Сеть CNN — это нейронная сеть с обратной связью, которая обучается построению признаков путем оптимизации фильтров. CNN извлекают признаки с помощью сверточных и объединяющих слоев и используют их для классификации или обнаружения объектов. CNN, также известные как искусственные нейронные сети с инвариантом сдвига или инвариантом пространства (SIANN), основаны на архитектуре сверточных ядер или фильтров с общим весом. Эти фильтры скользят по входным признакам и обеспечивают переводно-эквивариантные ответы, которые известны как карты признаков. В сетях CNN используется механизм, позволяющий уменьшить количество параметров и предотвратить перебор. Использование регуляризованных весов в меньшем количестве связей в CNN обеспечивает предотвращение исчезающих градиентов и взрывающихся градиентов, наблюдаемых при обратном распространении в нейронных сетях. CNN обычно состоит из трех слоев: сверточного, объединяющего и полностью связанного. Слои располагаются таким образом, что сначала обнаруживаются более простые паттерны, а затем более сложные [151]. Сверточные нейросети решают 3 основные задачи: классификация, детекция, сегментация. Современные архитектуры сверточных нейросетей сильно усложнились. Примеры, сети Inception (Google), ResNet (Microsoft), Inception-ResNet, DenseNet, MobileNet v1, MobileNet v2, VGGNet (Oxford visual

Geometry Group). Есть такая разновидность сверточных нейросетей, называется Fully-convolutional networks (FCN). Более продвинутый пример — Deconvolution networks. Сравнение перечисленных архитектур приведено в табл.2.2.

Таблица 2.2 - Сравнение модели архитектуры сверточных нейросетей [98]

Модель	Размер	Топ-1 Точность	Топ-5 Точность	Параметры	Глубина
Xception	88 MB	0.790	0.945	22.9 М	81
VGG16	528 MB	0.715	0.901	138.4 М	16
VGG19	549 MB	0.727	0.910	143.7 М	19
ResNet50	99 MB	0.759	0.929	25.6 М	107
InceptionV3	92 MB	0.788	0.944	23.9 М	189
InceptionResNetV2	215 MB	0.804	0.953	55.9 М	449
MobileNet	17 MB	0.665	0.871	4.3 М	55
DenseNet121	33 MB	0.745	0.918	8.1 М	242
DenseNet169	57 MB	0.759	0.928	14.3 М	338
DenseNet201	80 MB	0.770	0.933	20.2 М	402

В последнее время появились *глубокие сверточные инверсные графические сети* (Deep convolutional inverse graphics networks, DCIGN) — это вариационный автоэнкодер (VAE-variational autoencoder), но с CNN и DNN в качестве кодировщиков и декодировщиков. Эти сети моделируют "особенности", закодированные в виде вероятностей, если на отдельных изображениях присутствует только одна из них. А также могут также обучаться моделированию сложных преобразований изображения, например, изменению источника света или повороту 3D-объекта [107].

Генеративные состязательные сети (Generative adversarial networks, GAN)

GAN это тип сети, состоящей из двух сетей, как правило, комбинации FFN и CNN. Ее цель заключается в генерации новых данных, имеющих те же характеристики, что и обучающие данные. Одна сеть предназначена для создания контента (генератор), а другая - для оценки контента (дискриминатор). Задача генератора - генерировать реалистично выглядящие данные, чтобы обмануть дискриминатор, который, в свою очередь, пытается отличить настоящие данные от поддельных. Обучение GAN может быть сложной задачей, так как требует балансировки динамики двух сетей [97].

Сети Кохонена (Kohonen networks, KN)

Сети Кохонена, также называемые самоорганизующимися картами (SOM) или самоорганизующимися картами признаков (SOFM), — это искусственные нейронные сети без контроля, позволяющие создавать низкоразмерное представление высокоразмерного набора данных, сохраняя при этом их топологическую структуру. Нейроны в сети Кохонена

располагаются в виде сетки с использованием алгоритма конкурентного обучения, в результате чего нейроны, расположенные близко друг к другу в сетке, реагируют на одинаковые входные сигналы [109].

Рассмотрен ряд современных архитектур нейронных сетей, используемых в моделях интеллектуального анализа данных. Ниже приведены и другие, активно используемые, методы интеллектуального анализа данных.

Метод K-средних

Алгоритм k-средних - один из методов кластеризации в области интеллектуального анализа данных и контролируемого машинного обучения, позволяющий кластеризовать немаркированные наборы данных на различные кластеры таким образом, чтобы каждый набор данных принадлежал только одному кластеру, имеющему сходные свойства. Путем выборки алгоритм пытается показать, к какой категории, или кластеру, относятся данные, причем количество кластеров определяется значением k .

K-средних — это алгоритм кластеризации на основе центроида, при котором вычисляется расстояние между каждой точкой данных и центроидом для принадлежности ее к кластеру. Задача заключается в определении K-числа кластеров в наборе данных. Это итерационный процесс отнесения каждой точки данных к группам, и постепенно точки данных объединяются в кластеры на основе схожих признаков. Задача состоит в минимизации суммы расстояний между точками данных и центроидом кластера, позволяющей определить, к какой группе должна принадлежать каждая точка данных. Как известно, в алгоритме кластеризации K-средних случайным образом инициализируются K кластеров, которые итеративно настраиваются до тех пор, пока эти K -центроидов не придут в равновесное состояние. Для определения K (" количество кластеров") используется методика, называемая методом «Elbow», находящий оптимальное число кластеров, исходя из плотности размещения в них узлов, причем в рамках диссертации метод не учитывает радиовидимость датчиков и их местоположение.

Случайный лес (RF - Random Forest)

RF - это высокоэффективный метод интеллектуального анализа данных и контролируемого машинного обучения. RF может использоваться для решения задач классификации и регрессии в машинном обучении. В основе RF лежит концепция ансамблевого обучения, представляющего собой процесс объединения нескольких классификаторов для решения сложной задачи и улучшения производительности модели. RF является классификатором, содержащим несколько деревьев решений на различных подмножествах заданного набора данных и берущим среднее значение для повышения точности предсказания этого набора данных. Однако вместо того, чтобы полагаться на одно дерево решений, случайный

лес берет прогнозы от каждого дерева и на основе большинства голосов прогнозов предсказывает конечный результат [110].

Support Vector Machine (SVM)

SVM - один из наиболее популярных алгоритмов контролируемого обучения, используемый как для решения задач классификации, так и регрессии. Целью алгоритма SVM является создание наилучшей линии или границы принятия решения, называемой гиперплоскостью, позволяющей разделить n-мерное пространство на классы таким образом, чтобы в дальнейшем отнести новую точку данных к нужной категории. SVM выбирает экстремальные точки/векторы, называемые опорными векторами, помогающие в построении гиперплоскости [111].

Нечеткая логика

Математический метод представления нечеткости и неопределенности при принятии решений, допускающий частичную истинность. Нечеткая логика основана на понятии функции принадлежности, определяющей степень принадлежности входной величины к определенному множеству или категории, реализация осуществляется с помощью нечетких правил, выражающих связь между входными и выходными переменными в нечеткой форме. Архитектура нечеткой логики состоит из четырех частей:

- *База правил* содержит набор правил и условий IF-THEN, предоставляемых экспертами для управления системой принятия решений.
- *Фаззификация* используется для преобразования входных данных в нечеткие множества.
- *Система вывода* определяет степень соответствия текущего нечеткого входного сигнала каждому правилу и решает, какие правила должны быть запущены в соответствии с входным полем. Далее сработавшие правила объединяются в управляющие воздействия.
- *Дефаззификация* используется для преобразования нечетких множеств, полученных в результате работы механизма вывода, в четкие значения.

Генетический алгоритм

Существует множество эвристических алгоритмов, используемых для решения сложных оптимальных задач. Генетические алгоритмы (ГА) [142] - один из наиболее мощных и успешных методов стохастического поиска и оптимизации, основанный на принципах теории эволюции. Генетический алгоритм разработан на основе дарвиновской теории эволюции, основанной на естественном отборе. Алгоритм запускается с набором решений (представленных хромосомами), называемым популяцией. Решения из одной популяции берутся и используются для формирования новой популяции. Это мотивируется желанием, чтобы новая популяция была лучше старой. Решения, которые отбираются для формирования новых решений (потомства),

выбираются в соответствии с их пригодностью - чем они более пригодны, тем больше у них шансов на размножение. В принципе, для алгоритма рассматривается несколько случайных наборов параметров, и для каждого из них вычисляется значение пригодности (величина оптимизации). На основе значений пригодности лучшие наборы смешиваются (комбинируются отбор, кроссинговер и мутация) вместе, и новые наборы снова применяются к алгоритму до тех пор, пока не будет получен оптимальный параметр (параметры). Такой эффект обычно достигается путем разбиения генетического алгоритма на несколько небольших частей. Алгоритм останавливается при выполнении заранее заданных условий (например, количества популяций или улучшения наилучшего решения). В диссертации генетический алгоритм применяется для решения задачи маршрутизации в рое БПЛА.

2.3. Методы определения оптимального количество кластеров

В диссертационной работе рассматривается прикладной аспект применения ИАД в БСС, связанный с повышением эффективности БСС за счет применения методов и алгоритмов интеллектуального анализа при кластеризации и маршрутизации данных в гетерогенной БСС.

Для решения задач кластеризации в диссертационной работе исследуется возможность применения двух методов. Первый - ИНС Кохонена, выбор которой обусловлен возможностью обучения НС без учителя, с использованием в качестве метода обучения – конструктивного метода [114].

В качестве второго метода кластеризации БСС используется модифицированный метод К-средних, характеризующийся высокой скоростью обработки данных.

Основная идея оптимальной кластеризации (выбор оптимального количества кластеров или головных кластерных узлов) заключается в определении такой кластеризации сети, при которой вся энергия, необходимая для сбора данных со всей сети, минимизируется по сравнению с другими возможными схемами кластеризации [116]. В [117] проанализированы параметры комплексной трёхуровневой модели, влияющие на оптимальное количество кластеров в БСС: уровень радиомодели, уровень сети и уровень кластеризации. В таблице 2.3 представлены все факторы, влияющие на оптимальное количество кластеров в БСС.

1. Параметры уровня радиомодели

Энергетическая модель: Оптимальное количество кластеров сильно зависит от типа используемой энергетической модели. Поэтому важно использовать правильную энергетическую модель. В БСС существует четыре энергетические модели, которые обычно используются [121].

Таблица 2.3 - Параметры, влияющие на оптимальное количество кластеров на разных уровнях в БСС

Уровень	Параметры
Уровень радиомодели	Энергетические модели
	Модель зондирования
	Показатель затенения и потери пути
Уровень сети	Плотность узлов
	Схема передатчика и приемника
	Размер сенсорных полей
	Количество базовых станций
	Позиционирование базовой станции
	Одно- и многохоповая связь
Уровень кластеризации	Расстояние между базовой станцией и ГКУ
	Расположение ГКУ
	Внутрисетевая обработка
	Корреляция и искажения данных

Модель зондирования: влияет на оптимальное количество кластеров, так как расстояние между ГКУ и базовой станцией меняется при изменении модели зондирования узлов. В основном в литературе описаны два типа моделей зондирования. Первая модель является детерминированной, а вторая - вероятностной (булева модель зондирования, модель зондирования с теньвыми замираниями и модель зондирования Элфеса). Согласно этой модели [122], вероятность того, что датчик обнаружит событие на расстоянии.

Показатель затенения и потери пути: влияние эффекта затенения на оптимальное число кластеров более значительно при большем значении экспоненты потерь пути (n), чем при меньшем n . Большее n может усилить эффект затенения на оптимальное число кластеров [124].

2. Параметры уровня сети

Плотность узлов: Результаты экспериментов показывают, что при низкой плотности (275-375 узлов/км² примерно) оптимальный размер кластера большой, а при более высокой плотности (400-500 узлов/км² примерно) оптимальный размер кластера - один-хоп при фиксированном размере поля зондирования. Это связано с общими накладными расходами на внутрикластерную связь для узлов с низкой плотностью [125].

Энергия схем передатчика и приемника: Энергопотребление схемы передатчика E_{tx_elec} не влияет на оптимальное количество кластеров. Энергопотребление электроники приемника E_{rx}

$_{elec}$ может значительно изменить оптимальное число кластеров. Это очень важный фактор, который может решить, стоит ли выполнять кластеризацию в сенсорной сети.

Размер поля зондирования: Оптимальное количество кластеров зависит только от количества сенсоров, $K_{opt} = f(N)$, и не зависит от площади сенсорного поля, если выполняются следующие условия:

- значение энергии при приеме (E_{rx_elec}) значительно меньше энергии при передаче (E_{tx_elec});
- для передачи радиоволн используется модель распространения радиоволн в свободном пространстве;
- базовая станция расположена в пределах сенсорного поля.

Если вышеуказанные требования выполнены, оптимальное количество кластеров будет зависеть только от количества сенсорных узлов в сети $K_{opt} = f(N)$. Если зона зондирования имеет квадратную или круглую форму, оптимальное количество кластеров можно выразить как $K_{opt} = \tau \sqrt{N}$, где τ - константа, максимальное значение которой равно единице.

Количество базовых станций: Межкластерная связь увеличивается при увеличении числа базовых станций. Для большой сети потребление энергии практически одинаково для кластеров с одним и двумя хопами. Однако при использовании трех базовых станций и больших сетей оптимальный размер кластера составляет 2 хопа для снижения энергопотребления в сети.

Позиционирование базовой станции: Оптимальное количество кластеров будет больше, если БС расположена в центре поля зондирования. По мере удаления БС от центра области поля зондирования к границе и за пределы поля зондирования, оптимальное количество кластеров уменьшается.

Одно- и многохоповая связь: Влияние выбора оптимального размера кластера на общее энергопотребление более заметно при однохоповой связи, чем в многохоповых БСС. Это связано с тем, что функция энергии пропорциональна квадрату расстояния, на которое осуществляется передача данных, и это расстояние для однохоповой связи часто больше, чем для многохоповой.

3. Параметры уровня кластеризации

Расстояние между базовой станцией и ГКУ: Выбор оптимального количества кластеров также зависит от расстояния между ГКУ и БС путем выбора размера поля зондирования и типа моделей зондирования.

Расположение ГКУ: Оптимальное количество кластеров будет большим, если БС расположен в центре поля зондирования. По мере удаления БС от центра области поля зондирования к границе и за пределы поля зондирования оптимальное число кластеров будет уменьшаться. Положение ГКУ также важно по двум причинам. Во-первых, оно влияет на баланс

нагрузки и, следовательно, на потребление энергии внутри кластера для агрегации маршрутизации данных. Во-вторых, накладные расходы при маршрутизации данных внутри кластеров с учетом размещения ГКУ [125].

Внутрисетевая обработка: рассматривается возможность обработки данных внутри кластера. После обработки данные будут передаваться в ГКУ. Потребление энергии снижается с увеличением размера кластера, поскольку трафик данных уменьшается, а скорость агрегации данных растет. Однако для очень больших кластеров производительность не имеет значения, поэтому предпочтение следует отдавать кластерам с 3-4 хопами, поскольку они имеют одновременно низкое энергопотребление и низкую скорость агрегации данных.

Корреляция и искажение данных: Нахождение оптимального размера кластера зависит от величины корреляции. Большой размер кластера оптимален при низкой корреляции, а малый размер кластера оптимален при высокой корреляции, существуют промежуточные размеры кластеров, которые работают почти оптимально в широком диапазоне пространственных корреляций. Этот почти оптимальный размер кластера зависит только от положения базовой станции и общего количества узлов в поле зондирования [113].

Таблица 2.4 - Формулы выбора оптимального количества кластеров [124]

Сенсорное поле	Радиомодель	Расположение БС	Оптимальное количество кластеров (малый E_{Rx})
Квадрат ($M * M$)	Свободное пространство	Центр	$K_{opt} = 0.977 \sqrt{N}$
		Угол	$K_{opt} = 0.489 \sqrt{N}$
		Средняя точка стороны	$K_{opt} = 0.618 \sqrt{N}$
		Внешнее	$K_{opt} = \sqrt{\frac{N * M}{2\pi(M^2/6 + L^2)}}$
	Двухлучевая	Центр	$K_{opt} = \sqrt{\frac{90 * N \epsilon_{fs}}{7\pi \epsilon_{mp} M^2}}$
		Угол	$K_{opt} = \sqrt{\frac{45 * N \epsilon_{fs}}{56\pi \epsilon_{mp} M^2}}$
		Средняя точка стороны	$K_{opt} = \sqrt{\frac{360 * N \epsilon_{fs}}{193\pi \epsilon_{mp} M^2}}$
		Внешнее	$K_{opt} = \sqrt{\frac{M^2 * N \epsilon_{fs}}{2\pi \epsilon_{mp} \left(\frac{7M^2}{150} + \frac{2}{3} M^2 L^2 + L^4\right)}}$

где L - количество битов в каждом сообщении данных.

В таблице 2.4 из [124] приведены практически важные данные для сравнительного анализа алгоритмов, реализующих кластеризацию, с учетом следующих характеристик: размер поля зондирования, тип радиомодели, положение базовой станции и аналитическое значение оптимального числа кластеров.

2.4. Общая структура пакета данных протокола для беспроводной гетерогенной сенсорной сети

Собранные данные с наземных беспроводных датчиков инкапсулируются в пакеты для кластеризации, маршрутизации на шлюз и передаче через рой БПЛА их на базовую станцию. В гетерогенной модели предлагается структура пакетов данных, обменивающихся между сенсорами, беспилотниками, шлюзом и базовой станцией.

Пакет данных состоит из 6 полей как показано на рис.2.3:

1. *Идентификатор/ID*: представляет собой серийный номер пакета.
2. *Источник*: представляет собой адрес отправителя пакета данных.
3. *Получатель*: представляет собой адрес приемника пакета данных.
4. *Тип*: представляет тип отправленного пакета данных. Если его значение равно 0, тип пакета - "КОМАНДЫ". Если его значение равно 1, тип пакета - "ДАнные".
5. *Флаг*: используется совместно с полем "Тип" для указания типа пакета "КОМАНДЫ". Если значение поля "флаг" равно 0, то пакет "КОМАНДЫ" запускает работу сенсоров, и если значение поля "Флаг" равно 1, то пакет запрашивает информацию о местоположении узлов, а если значение поля "Флаг" равно 2, то пакет содержит информацию о кластеризации (головные узлы и члены) и пути передачи данных (адрес назначения для каждого головного узла). Если значение поля "Тип" равно 1, что означает, что пакет является "даннными", то поле "флаг" не учитывается.
6. *Информация*: это реальные данные, которые будут отправлены

ID	Источник	Получатель	Тип	Флаг	Информация
----	----------	------------	-----	------	------------

Рисунок 2.3 - Структура широковещательного пакета данных

- а) «Тип» = 0 и «Флаг» = 0, информация о начале работе,
- б) «Тип» = 0 и «Флаг» = 1, запрос информации о местоположении и радиовидимости узлов,
- в) «Тип» = 0 и «Флаг» = 2, информация о кластеризации и пути передачи данных,
- г) «Тип» = 1, пакет является "даннными", «флаг» не учитывается

2.5. Структура пакетов данных для алгоритма маршрутизации в модели беспроводной гетерогенной сети

В этом пункте приведены структуры пакетов данных, в зависимости от сценария работы алгоритма маршрутизации в модели гетерогенной БСС описываемой на основе протокола маршрутизации, изложенного в третьей главе, в п.3.4.

- Структура широковещательного пакета "КОМАНДЫ", передаваемого базовой станцией (БС) при запуске, выглядит следующим образом:

1	БС	наземный шлюз	0	0	начало работы
---	----	---------------	---	---	---------------

- Структура широковещательного пакета "КОМАНДЫ", передаваемого от наземного шлюза к датчикам, следующая:

2	наземный шлюз	датчики	0	1	запрос информации
---	---------------	---------	---	---	-------------------

- Структура широковещательного пакета "ДАННЫЕ", передаваемого от датчиков на наземный шлюз в качестве ответа, следующая:

3	датчики	наземный шлюз	1	-	координаты датчиков
---	---------	---------------	---	---	---------------------

- На наземном шлюзе запускается программы кластеризации для группировки датчиков в кластеры на основе полученных данных и поиска пути между *всеми* узлами ГКУ. По завершении программ кластеризации и маршрутизации, структура широковещательного пакета "КОМАНДЫ", передаваемого от наземного шлюза к датчикам, выглядит следующим образом:

4	наземный шлюз	датчики	0	2	узлы ГКУ, члены, путь передачи данных между ГКУ
---	---------------	---------	---	---	---

- Структура широковещательного пакета "КОМАНДЫ", передаваемого с базовой станции всем БПЛА, выглядит следующим образом:

5	БС	БПЛА	0	1	запрос информации
---	----	------	---	---	-------------------

- Структура пакета "ДАННЫЕ", передаваемого с БПЛА на базовую станцию в качестве ответа, выглядит следующим образом:

6	БПЛА	БС	1	-	координаты дронов
---	------	----	---	---	-------------------

- Базовая станция запускает программу маршрутизации для поиска кратчайшего пути между дронами, начиная с дрона, расположенного ближе всего к наземному шлюзу, и заканчивая базовой станцией. Структура широковещательного пакета "КОМАНДЫ", передаваемого с базовой станции всем БПЛА, выглядит следующим образом:

7	БС	БПЛА	0	2	Кратчайший путь передачи данных между БПЛА
---	----	------	---	---	--

Таким образом, каждый беспилотник, находящийся на сформированном пути, знает адрес своего назначения (следующего беспилотника).

- Структура пакета "ДАННЫЕ", передаваемого от датчиков в ГКУ, выглядит следующим образом:

8	датчики	Узел ГКУ	1	-	Информация
---	---------	----------	---	---	------------

- Структура пакета "ДАННЫЕ", передаваемого от ГКУ к наземному шлюзу, выглядит следующим образом:

9	Узел ГКУ	наземный шлюз	1	-	Агрегированные данные
---	----------	---------------	---	---	-----------------------

- Структура пакета "ДАННЫЕ", передаваемого с наземного шлюза ближайшему БПЛА в рое, такова:

10	наземный шлюз	БПЛА	1	-	Агрегированные данные
----	---------------	------	---	---	-----------------------

- Структура пакета " ДАННЫЕ", отправляемого на базовую станцию с ближайшего БПЛА, такова:

11	БПЛА	БС	1	-	Агрегированные данные
----	------	----	---	---	-----------------------

Конечные точки маршрута, по которому передаются данные в рое БПЛА идентифицируется с помощью ближайших (с минимальным евклидовым расстоянием) от БПЛА до шлюза и/или базовой станции.

Выводы по главе 2

1. Рассмотрены алгоритмы маршрутизации в БСС на основе машинного обучения. Отмечается, что среди исследователей существует большой интерес к разработке новых методов и структур, связанных с беспроводными сенсорными сетями, в том числе с опорой на методы интеллектуального анализа данных для принятия оптимальных решений по маршрутизации данных.
2. Исследованы некоторые методы ИАД, подходящие для использования в беспроводных сенсорных сетях, в том числе архитектуры нейронных сетей, метод К-средних, случайный лес (RF), машина опорных векторов (SVM), нечеткая логика и генетический алгоритм. На основе исследования выбраны сеть Кохонена, метод К-средних в качестве методов кластеризации, генетический алгоритм и нейронная сеть Хопфилда в качестве методов маршрутизации данных.
3. Исследованы параметры, влияющие на выбор оптимального количества кластеров на разных уровнях в БСС, рассмотрены формулы, используемые для их выбора. Модель радиосвязи в свободном пространстве выбрана в случае низкого энергопотребления при приеме данных и расположения шлюза в центре зоны покрытия.
4. Сформированы структуры пакетов данных для алгоритма маршрутизации в модели беспроводной гетерогенной сети, обеспечивающие агрегирование и инкапсуляцию собранных данных с наземных беспроводных датчиков при отправке на наземный шлюз и передаче через летающую сеть на базовую станцию.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ГЕТЕРОГЕННОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Благодаря быстрому технологическому развитию коммуникационных и сетевых технологий и появлению технологии Интернета вещей, БСС и беспилотные летательные аппараты стали использоваться практически во всех сферах жизни общества, от военных до гражданских, оснащённые различными датчиками и средствами связи, используются на дорогах, в сельском хозяйстве, строительстве, средствах массовой информации и т. [128].

Сельское хозяйство - одна из областей, в которой БСС и БПЛА будут использоваться для контроля обширных площадей сельскохозяйственных культур. БСС и БПЛА смогут получать данные о состоянии почвы, улучшать сельское хозяйство и использовать средства защиты растений от насекомых и птиц. Следовательно, сельское хозяйство будет крупнейшим рынком для БПЛА. На рис 3.1 показан спрос на беспилотные летательные аппараты для общего пользования [131].

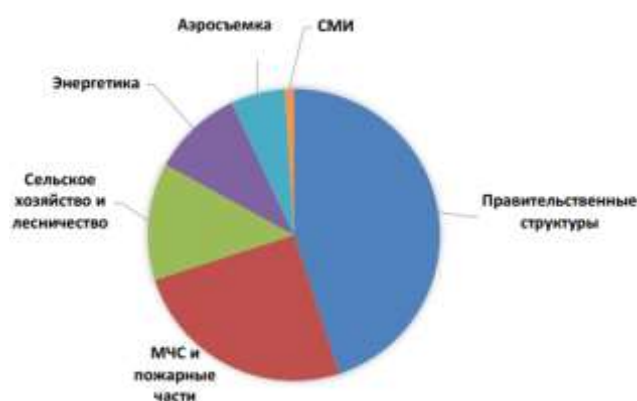


Рисунок 3.1 - Спроса БПЛА общего пользования [131].

В диссертации предлагается обеспечить маршрутизацию передачи информационных пакетов в комбинированной сети Интернета вещей, содержащей наземные стационарные датчики и рой БПЛА для сбора информации из труднодоступных сельскохозяйственных районов и передачи собранной информации через рой БПЛА на базовую станцию.

3.1. Описание сетевой модели для гетерогенной БСС планируемой для реализации в Сирийской Арабской Республике

В настоящее время в Сирийской Арабской Республике, несмотря на трудности, послевоенного времени, большие надежды возлагаются на использование технологий Интернета вещей в разных областях, позволяющих существенно улучшить некоторые стороны социальной жизни. В частности, уделяется большое внимание использованию плодородных долин в горной

местности под сельскохозяйственные угодья. Проблема заключается в том, что необходимый регулярный мониторинг насаждений затруднен из-за плохой доступности к этим районам.

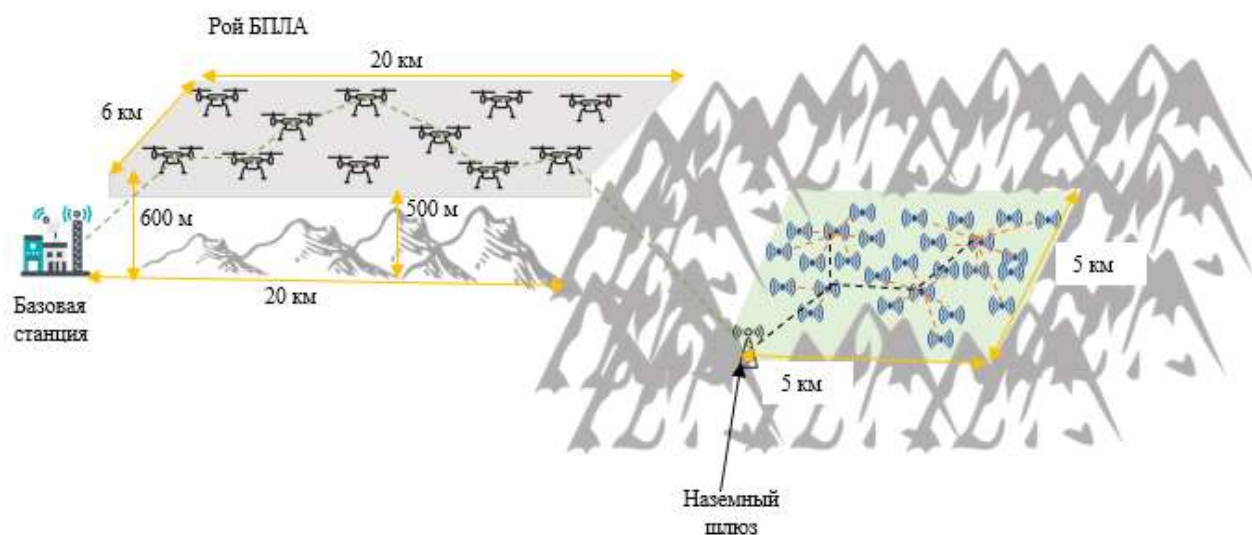
В этой связи предпринимается комплексная автоматизация мониторинга с использованием технологий беспроводных сенсорных сетей и беспилотных летательных аппаратов. В зоне покрытия размещается необходимое для детального мониторинга заданное количество стационарных сенсоров/датчиков, передающих информацию через воздушный коридор, в котором курсируют беспилотники, связывающий наземный шлюз в плодородной зоне горной местности и базовую станцию с комплексом управления интернетом вещей.

На рис 3.2(a) приведена визуализация разработанной автором модели для гетерогенной БСС, включающей наземную беспроводную сеть со стационарными сенсорными узлами и летающую сеть БПЛА.

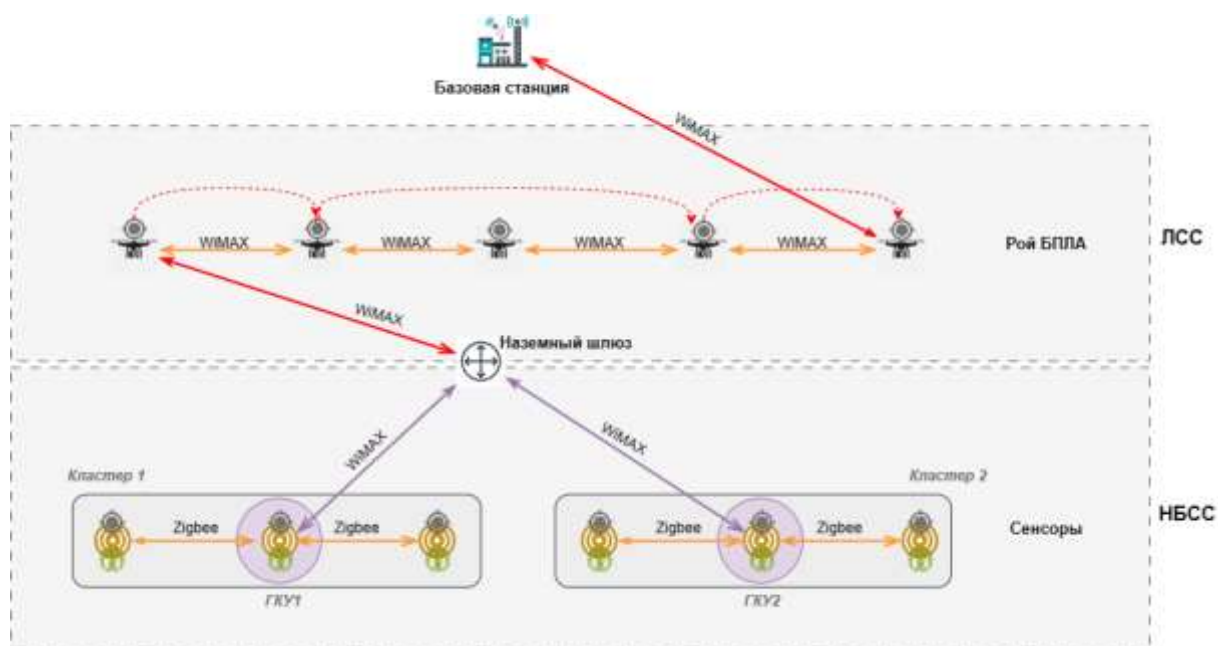
Модель гетерогенной БСС [100] применяется и исследуется для горной сельскохозяйственной территории в Сирии с размерами $S_1 = (5 \times 5) = 25 \text{ км}^2$ и с «коридором» для БПЛА S_2 длиной $L = 20 \text{ км}$, $D = 6 \text{ км}$ в слое над землёй высотой между 500 и 600 м.

Гетерогенная сетевая модель используется для передачи данных на большие расстояния и состоит из двух частей [129], как показано на рис.3.2(б)

Наземная часть (НБСС) — это сеть беспроводных стационарных датчиков, которая состоит из большого количества самоорганизующихся коммуникативных групп множества различных датчиков с низким энергопотреблением, которые следят за состоянием земли, сельскохозяйственных культур и лесных массивов.



а)



б)

Рисунок 3.2 - Модель для гетерогенной беспроводной сенсорной сети
 а) визуальная модель ситуации, б) структура гетерогенной модели БСС

Эти датчики сгруппированы в кластеры, и в каждом кластере есть головной кластерный узел (ГКУ), который собирает данные от остальных узлов кластера и отправляет их на наземный шлюз. Наземный шлюз собирает данные со всех ГКУ, инкапсулирует их и отправляет на ближайший БПЛА во второй части.

В пределах наземной части случайным образом размещаются датчики, измеряющих углекислый газ, влажность почвы, температуру, влажность воздуха и количество осадков, и каждый датчик оснащен блоком GPS (Global Positioning System) для определения своего местоположения, а радиус действия каждого датчика 100 метров. Для передачи данных между сенсорами используется IEEE 802.15.4 и протокол, использующий эту технологию: Zigbee, который обеспечивает скорость передачи от 20 до 250 кбит/с на расстояние 1 до 100 м. Информация, собранная в наземной сети, передается через шлюз к рою БПЛА, в котором происходит маршрутизация и дальнейшая передача данных к базовой станции.

Воздушная часть (ЛСС) — это летающая сенсорная сеть, которая представляет собой рой БПЛА, через который передаются данные по кратчайшему пути к базовой станции (БС).

В фиксированном непересекающемся воздушном коридоре перемещаются 10 дронов/БПЛА. Каждый БПЛА оснащен блоком GPS для определения своего местоположения во время полета и имеет радиовидимость 2000 метров. В качестве технологии передачи данных между роем БПЛА используется IEEE 802.16e. Протокол, использующий эту технологию: WiMax, который обеспечивает скорость передачи до 40 Мбит/с на расстояние 1 до 5 км.

В модели учитывается динамическое движение дронов, поскольку их положения меняются с течением времени, поэтому матрицы радиовидимости сети БПЛА, полученные в разные моменты времени t могут отличаться.

3.2. Модель рассеивания радиоэнергии в гетерогенной БСС

Для характеристики рассеиваемой энергии в наземной сети датчиков разного типа, рассмотрена простая радиомодель узла: передатчик рассеивает энергию для работы радиоэлектроники и усиливает энергию для передачи данных на большие расстояния, а приемник рассеивает энергию для работы радиоэлектроники, как показано на рисунке (3.3)

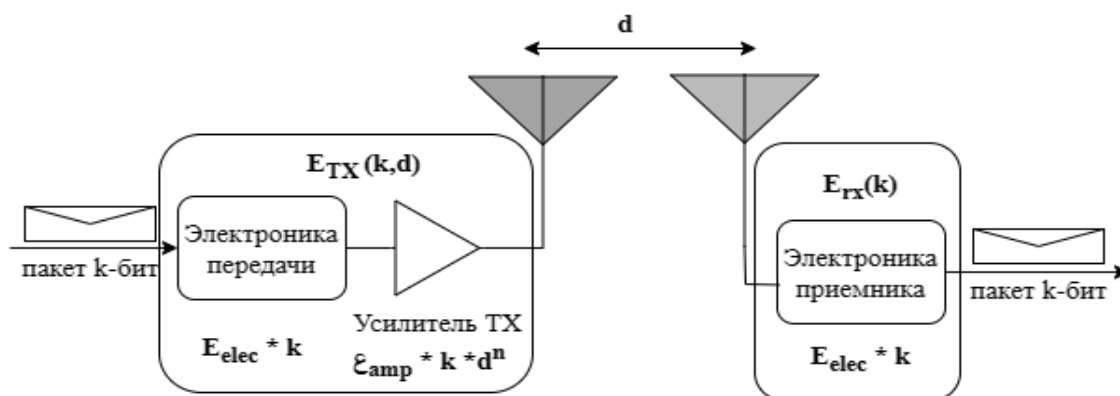


Рисунок 3.3 - Радиомодель узлов гетерогенной БСС [134]

При маршрутизации данных в БСС с помощью протоколов маршрутизации по беспроводным каналам связи затрачивается энергия. Количество затрачиваемой энергии зависит от типа модели канала, которую можно разделить на два типа [134]:

1. Потери энергии в случае свободного пространства и необходимая энергия усиления $\epsilon_{fs}d^2$, где ϵ_{fs} — энергия усиления в случае свободного пространства, а d — расстояние между передатчиком и приёмником.

2. Потери энергии в случае многолучевого демпфирования $\epsilon_{mp}d^4$, где ϵ_{mp} — энергия усиления, если используется модель многолучевого демпфирования.

Контроллер энергии можно использовать для выбора одной из этих моделей каналов с соответствующей настройкой для усилителя энергии следующим образом: если расстояние между передатчиком и приёмником меньше порога d_0 , то используется модель свободного пространства.

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (3.1)$$

В противном случае используется многолучевая модель демпфирования.

Радиоизлучение поглощается для сообщения k -бит на расстояние d следующим образом:

мощность передачи на короткие расстояния (упрощенная форма):

$$E_{TX}(k, d) = kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2 \quad (3.2)$$

общая форма:

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\varepsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3.3)$$

где k — количество битов сообщения, d — расстояние передачи, E_{elec} — энергия электроники, а E_{emp} — мощность усиления.

Мощность приёма. Узел потребляет энергию для получения сообщения следующим образом:

$$E_{Rx}(k, d) = k * E_{elec} \quad (3.4)$$

где E_{elec} — энергия электроники и зависит от таких факторов, как цифровое кодирование, модуляция, фильтрация и усиление сигнала, а усилитель мощности $\varepsilon_{mp}d^4$ или $\varepsilon_{fs}d^2$ зависит от расстояния до передатчика и приемлемой частоты ошибок кодирования.

Энергия, потребляемая ГКУ. ГКУ использует энергию для приёма сигналов от узлов, энергию для сбора сигналов и энергию для передачи собранного сигнала на базовую станцию. Предполагается, что рассеянная энергия соответствует модели демпфирования многолучевого распространения d^4 , поскольку базовая станция находится далеко от узлов, а модели свободного пространства d^2 в случае, когда БС находится рядом с узлами. В случае, когда узел ГКУ передает сигнал другому узлу ГКУ, рассеиваемая энергия соответствует модели свободного пространства. Таким образом, энергия, рассеиваемая в головном кластерном узле (ГКУ) для отправки сообщения, рассчитывается как:

$$E_{CH} = kE_{elec} \left(\frac{N}{k} - 1 \right) + kE_{DA} \frac{N}{K} + k\varepsilon_{mp}d \quad (3.5)$$

$$d = \begin{cases} d_{toBS}^4, & \text{при передаче сигнала от ГКУ к БС и } d_{toBS} \geq d_0 \\ d_{toBS}^2, & \text{при передаче сигнала от ГКУ к БС и } d_{toBS} < d_0 \\ d_{toCH}^2, & \text{при передаче сигнала от ГКУ к другому ГКУ} \end{cases}$$

где d_{toBS} — расстояние между ГКУ и базовой станцией, d_{toCH} — расстояние между двумя узлами ГКУ, E_{DA} — энергия сбора данных, N — количество узлов.

Энергия, потребляемая членами кластера (не ГКУ) Каждому такому узлу необходимо передавать свои данные в ГКУ только один раз для каждого пакета, а поскольку расстояние между узлом и ГКУ кластера невелико, рассеиваемая энергия использует модель потерь энергии

в свободном пространстве, поэтому энергия, используемая в этих узлах, рассчитывается следующим образом:

$$E_{non-CH} = kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d_{toCH}^2 \quad (3.6)$$

где d_{toCH} — расстояние между узлом и ГКУ.

Изложенная на рис.3.3 модель расхода электромагнитной энергии в БСС используется в дальнейшем в разработанном автором протоколе *KmHNNSP* для определения времени жизни НБСС, при сравнении с другими протоколами.

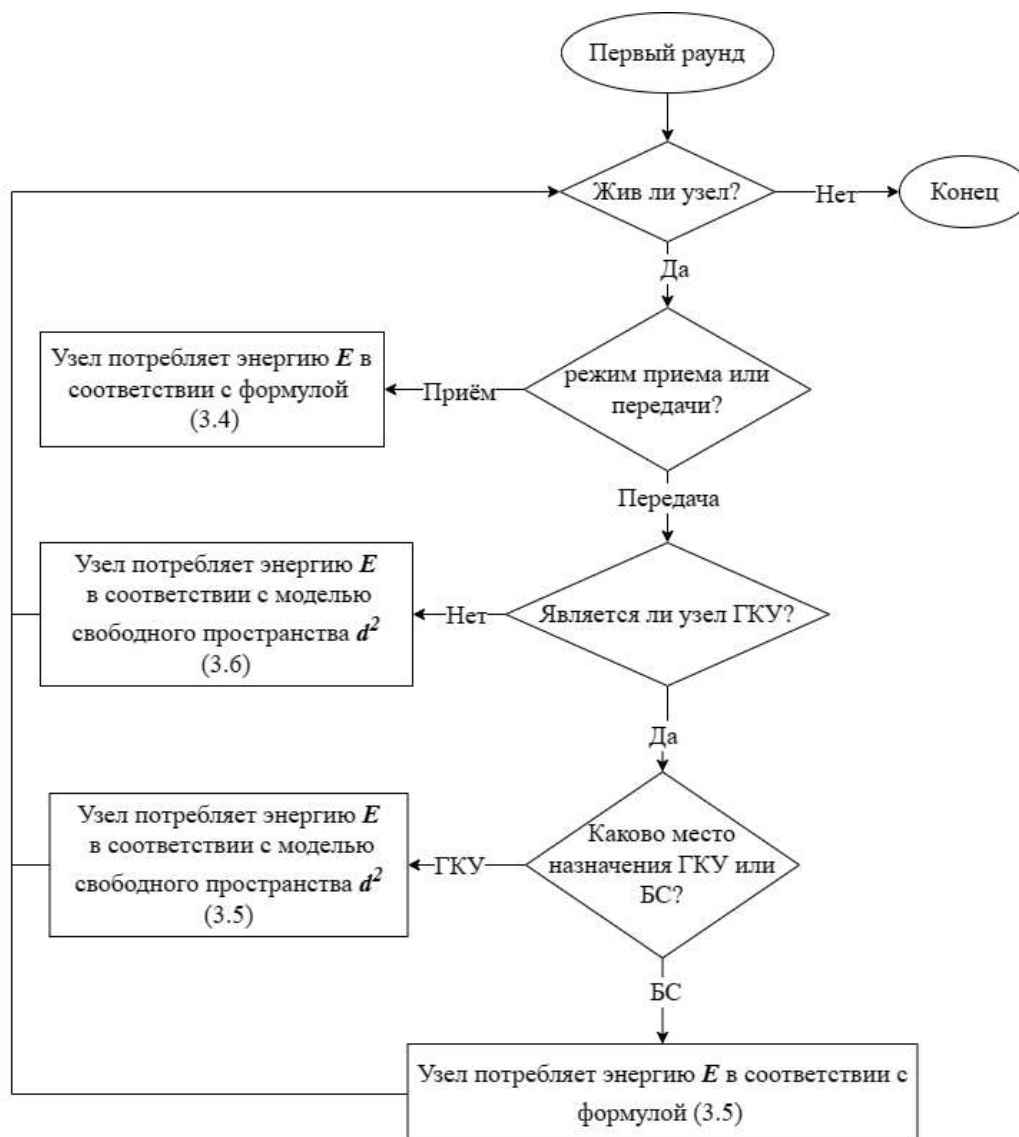


Рисунок 3.4 - Блок-схема жизненного цикла узла

На рис. 3.4 представлена используемая в диссертации блок-схема жизненного цикла узла, на основе потребляемой узлами при передаче и приеме энергии в зависимости от типа этого узла. В режиме передаче, если узел является членом кластера, то он отправляет данные своему ГКУ, потребляя энергию по формуле (3.6), а когда узел является ГКУ, то возможны два случая. В случае, когда узел является последним на пути и отправляет данные на базовую станцию в

соответствии со своим местоположением, узел потребляет энергию в соответствии с моделью многолучевого демпфирования, если базовая станция находится далеко от узлов, или в соответствии с моделью свободного пространства, если базовая станция находится близко к узлам. В случае, когда узел находится цепочке маршрута и отправляет данные следующему узлу ГКУ, он потребляет энергию в соответствии с моделью свободного пространства согласно формуле (3.5). В режиме приема, узел потребляет энергию в соответствии с формулой (3.4).

В заключение следует отметить, что жизненный цикл узлов может быть использован в качестве показателя времени жизни сети. Для исследования эффективности модифицированного алгоритма К-средних и разработанного протокола предлагается использовать показатель времени жизни узла, представленный на блок-схеме (рис.3.4), для изучения потребления энергии каждым узлом в зависимости от его типа и сетью в целом.

3.3. Разработка и применение методов ИАД для обработки трафика в гетерогенной БСС

Для реализации задач оптимизации трафика в гетерогенной беспроводной сенсорной сети, включающей два сегмента: наземную беспроводную сеть со стационарными сенсорными узлами и летающую сеть БПЛА автор использует ряд методов ИАД. В основе подхода лежит использование матрицы радиовидимости. Для наземного сегмента при кластеризации и маршрутизации используются методы сети Кохонена и Конструктивный, модифицированный К-Средних совместно с *моделью* нейронной сети Хопфилда, а для коридора БПЛА используются алгоритма Дейкстры, генетического алгоритма.

3.3.1. Матрица радиовидимости узлов БСС

В сети БСС, каждый узел подключается к своим соседям, когда они находятся в пределах радиовидимости узла. Таким образом, каждый узел имеет свой собственный вектор, который представляет его взаимосвязь с остальными узлами в сети в зависимости от расстояния между узлами и их покрытия [93].

По расположению датчиков и диапазону их обнаружения можно получить матрицу радиовидимости БСС, которая определяет механизм связи датчиков между ними, то есть определяет датчики, которые физически связаны друг с другом.

Матрица радиовидимости — это квадратная матрица N-го порядка, описывающая связь между узлами в беспроводной сети и внутри роя дронов, где каждому узлу присваивается близости к его соседям. Если сосед находится вне зоны действия узла, то ему присваивается 0.

Если сосед находится в зоне действия узла, то близости определяется путем вычисления расстояния между узлом и его соседом.

Математически матрица радиовидимости описывается следующим образом:

$$\vec{P}_i \in Z_i = \{p\} \in \{z\} = p_1 \in z_1, \dots, p_j \in z_j, \dots, p_L \in z_L \quad (3.7)$$

$$\forall q_i \exists Z_i \in q_i : (p_1 \in z_1, \dots, p_j \in z_j, \dots, p_L \in z_L) \in q_i \quad (3.8)$$

Таким образом, соединение узлов и радиовидимость каждого узла по отношению к остальным узлам можно смоделировать, используя так называемую матрицу радиовидимости P.

$$P = \begin{bmatrix} 100 & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & 100 & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & 100 & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nj} & \dots & 100 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$P_{ij} = \begin{cases} P_{ij}, & \text{если } i \neq j \\ \text{иначе } 100, & P_{ij} \in [0 \dots 100] \end{cases}$$

Первая строка означает радиовидимость первого узла по отношению к остальным узлам. Вторая строка означает радиовидимость второго узла по отношению к остальным узлам и так далее.

На основании анализа, связанного с современными методами и алгоритмами передачи и обработки информации в БСС, существуют несколько типов протоколов маршрутизации. В данной работе автор сосредоточился на разработке протоколов с использованием методов интеллектуального анализа данных такие как алгоритм обучения сети Кохонена с Конструктивным методом, алгоритм К-Средних, нейронные сети Хопфилда и генетический алгоритм.

3.3.2. Построение алгоритма обучения сети Кохонена с Конструктивным методом (СККМ) для кластеризации БСС

Существуют различные методы организации передачи данных в БСС, но преимущественно используется кластеризация, поскольку она играет большую роль в маршрутизации данных на базовую станцию путём идентификации центров кластеров, которые передают данные. Таким образом уменьшает количество путей для передачи данных и снижается нагрузка на сеть. Одним из эффективных методов снижения энергопотребления сенсорных узлов и БСС является кластеризация, позволяющая продлить время жизни БСС [132].

В процессе кластеризации необходимо решить следующие задачи:

1- определение множества объектов кластера (группы узлов БСС, которые рассматриваются как источники трафика);

2- Определение свойств объектов кластеризации (местоположение узлов, т.е. координаты узлов в двух- или трехмерном пространстве и их радиовидимость)

3- Определение цели кластеризации (определение структуры сети доступа, т.е. выбор координат головных кластерных узлов (ГКУ), которые рассматриваются как промежуточные узлы для доступа к шлюзу)

4- Определение критерия выделения кластеров - требований или условий разделения узлов сети для оценки близости характеристик объектов внутри образуемых кластеров, таких как: максимальное количество кластеров, размер кластера, количество узлов в кластерах и другие (в нашем случае выделяется заданное количество кластеров).

Один из способов кластеризации, выбранный для исследования, строится на основе алгоритма обучения сети Кохонена с Конструктивным методом [130] и основан на представлении узлов в виде матрицы радиовидимости P по формуле (3.9). В этом алгоритме в матрице радиовидимости, каждому узлу ставится в соответствие мощностей сигналов (RSS) его соседей.

Алгоритм обучения сети Кохонена с Конструктивным методом (СККМ)

После формирования матрицы радиовидимости P , ее необходимо нормализовать по следующей формуле:

$$P_{NORM} = \frac{P}{P_{max}} \quad (3.10)$$

где, $P_{max} = 100$

Сеть NET используемая для кластеризации зависит от следующих параметров:

$$NET(N, K, \alpha_0, \tau, R, \varepsilon, \{L\}) \quad (3.11)$$

где:

N – количество входных нейронов, равно количеству узлов сети.

K – выходных нейронов, равно количеству кластеров.

A_0 – начальное значение скорости обучения; и снижается со временем.

T – постоянная времени обучения.

R – радиус чувствительности.

ε – точность обучения.

$\{L\}$ – обучающая выборка, равно P_{NORM} .

Используя эти параметры, формирование кластеров по конструктивному методу происходит следующим образом и состоит из шести этапов:

1- Строки матрицы радиовидимости передаются как обучающие векторы на вход нейронной сети.

2- В случае первой операции нейронной сети есть только один нейрон, и его веса инициализируются значениями первой строки матрицы радиовидимости, затем переходят к шагу 1, иначе переходят к шагу 3

3- Вычисляется Евклидово расстояние по формуле (3.12) между текущим входным вектором и весами каждого нейрона, а затем выбирается наименьшее расстояние, которое представляет нейрон-победитель (или кластер) для текущего входного вектора.

$$d(x, w_i) = \|x - w_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - w_{ij})^2} \quad (3.12)$$

$$d(x, w_i) \leq \sqrt{NR} \quad (3.13)$$

4- Если Евклидово расстояние между кластером-победителем и входным вектором $d(x, w_i)$ не выполняет условию (3.13), то к нейронной сети будет добавлен новый нейрон, и его веса будут значениями этого входного вектора, с последующим переходом к шагу 1.

5- Веса кластера-победителя и коэффициент скорости обучения корректируются по формуле (3.14, 3.15):

$$w_i^{t+1} = w_i^t + \alpha(t) \cdot (x - w_i^t) \quad (3.14)$$

где w_i^t – вектор весов i -го нейрона, t – номер итерации обучения, x – входной вектор, $\alpha(t)$ – коэффициент скорости обучения.

$$\alpha(t) = \alpha_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = 0.7 \cdot \exp\left(-\frac{t}{1000}\right) \quad (3.15)$$

6- В случае, если текущий обучающий вектор является последним, если веса каждого нейрона изменяются более чем на ε по сравнению с предыдущим случаем (Финальная матрица весов не изменится на каждой итерации обучения, если веса каждого нейрона изменяются меньше чем на ε), тогда обучение нейронной сети прекращается, в противном случае следует переход к шагу 1, и обучение продолжается снова с первого обучающего вектора.

3.3.3. Разработка метода эффективной кластеризации наземной БСС

Ниже описывается разработанный метод эффективной кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети с использованием модифицированного алгоритма К-средних, с

учетом зон радиовидимости и GPS-координат узлов позволяющий оптимизировать количество кластеров и избежать «скученности» ГКУ в малой области зоны покрытия.

Базовый алгоритм K-Средних

В многих интеллектуальных задачах связанных с Интернетом Вещей, используется метод K-средних. Метод K-средних — один из методов кластеризации без учителя, цель которого является разделение m элементов (из пространства) на заранее известное число кластеров k , при этом каждый элемент относится к тому кластеру, к центру которого он ближе всего.

На каждой итерации пересчитывается центр каждого кластера, полученный на предыдущем шаге. Затем кластеры формируются на основе того, какой из новых центров оказался ближе по метрике Евклидова расстояния. Алгоритм завершается, когда центры кластеров не изменяются.

В качестве меры близости используется Евклидово расстояние по формуле (3.16):

$$p(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{p=1}^n (x_p - y_p)^2}, x, y \in R^n \quad (3.16)$$

узлы $(x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}), x^{(i)} \in R^n$

Псевдокод базового алгоритма K-средних

- Этап 1. Инициализировать K центры кластеров случайным образом
- Этап 2. Определение центров кластеров и узлов, принадлежащих к каждому кластеру: где m - число узлов; K - количество кластеров; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K \in R^n$ - центры кластеров; $c^{(i)} \in C$ - вектор узлов, содержащий номер кластера, к которому принадлежит каждый узел.

Повторить {

For $i = 1$ to m

$c^{(i)}$ = индекс (от 1 до K) центра кластера, ближайшего к $x^{(i)}$,

For $k = 1$ to K

μ_k = рассчитывать, как усредненную сумму по координатам векторов узлов входящих в кластер k

}

Процесс кластеризации заканчивается, когда все координаты центров кластеров $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K$ не изменяются по сравнению с их предыдущими координатами.

- Этап 3. Определение значения «стоимости кластеризации», как сумму квадратов расстояний между узлом и ближайшими центрами кластеров, следующим образом.

$$J(c^{(1)}, \dots, c^{(m)}, \mu_1, \dots, \mu_K) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \|x^{(i)} - \mu_{c^{(i)}}\|^2 \quad (3.17)$$

Однако у алгоритма К-средних есть два недостатка:

- определение количества кластеров (К) производится вручную до начала моделирования,
- алгоритм изначально инициализирует центры кластеров случайным образом, что приводит к появлению различных результатов (центров кластеров) каждый раз, когда запускается алгоритм на одних и тех же данных и к неустойчивости алгоритма.

Для устранения этих недостатков используется разработанный автором модифицированный алгоритм К-средних, который будет описан ниже.

Модифицированный алгоритм К-средних для метода эффективной кластеризации

Эффективность кластеризации в конечном итоге зависит от нахождения оптимального количества кластеров в сети. Для достижения этой цели автор модифицировал базовый алгоритм К-средних следующим образом [154]:

- Этап 1. Исходное количества кластеров определяется с помощью формулы (3.18), приведенной в табл. 2.3, исходя из формы поля зондирования (квадратное поле), модели радиосвязи (свободное пространство) и количества узлов, распределенных в зоне зондирования [124].

$$K_{opt} = \sqrt{\frac{3*N}{\pi}} = 0.977 * \sqrt{N}, \quad (3.18)$$

где N - количество узлов.

- Этап 2. Недостаток случайной инициализации центров кластеров (ГКУ) устраняется путем нахождения начальных виртуальных точек центров кластеров по окружности, как показано на рис. 3.5 в соответствии с формулой (3.19):

$$\theta = \frac{2 * \pi}{K_{opt}},$$

$$X_{гку} = R * \cos(\theta * k), k = 1, \dots, K_{opt}, R = \frac{L}{4} \quad (3.19)$$

$$Y_{гку} = R * \sin(\theta * k)$$

где K_{opt} - оптимальное количество кластеров; L - длина сенсорного поля; θ - угол, определяющий расстояние между ГКУ на окружности; R - радиус окружности, равный четверти длины зоны зондирования. Этот подход позволяет избежать «скученности» ГКУ в малой области зоны покрытия. Для определения узлов ГКУ необходимо найти узлы, ближайšie к точкам центра каждого кластера. Затем в каждом кластере необходимо убедиться, что все узлы в кластере находятся в зоне действия узла ГКУ.

- Этап 3. Определение узлов, принадлежащих к каждому кластеру, как на этапе 2 базового алгоритма К-средних. Узлы, не находящиеся в зоне радиовидимости какого-либо узла ГКУ, отправляют свои данные непосредственно на базовую станцию.
- Этап 4. Выполняется алгоритм нахождения ближайшего узла к центру кластера и назначения его в качестве ГКУ с использованием Евклидова расстояния по формуле (3.16).

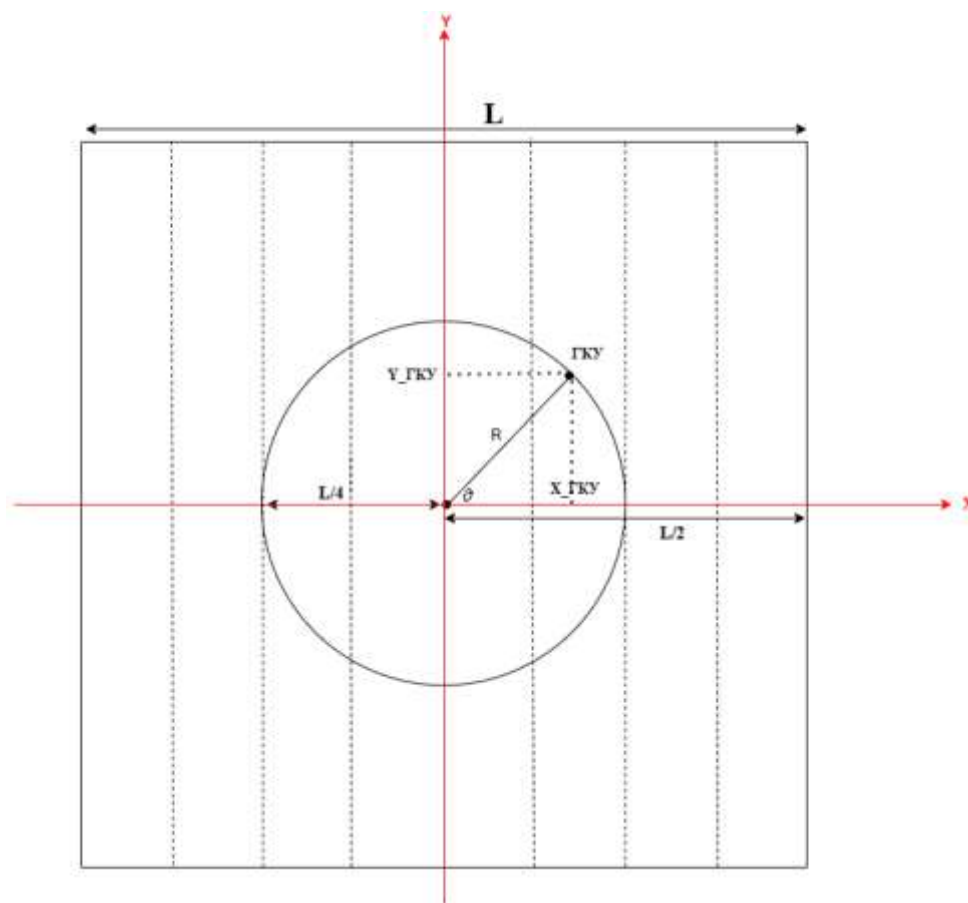


Рисунок 3.5 - Распределение узлов ГКУ по окружности

На рис. 3.6 представлена блок-схема модифицированного алгоритма К-средних. На входе задаются начальные параметры, затем определяется оптимальное количество кластеров K_{opt} по формуле (3.18) и тестирующие эксперименты для подтверждения используемых значений, затем инициализируются начальные координаты центров кластеров μ_k на окружности по формуле (3.19). Внутри цикла вычисляется Евклидово расстояние $p(x, y)$ между каждым узлом и ближайшим к нему центром кластера по формуле (3.16), находится вектор узлов C , содержащий номера кластеров, к которым принадлежит каждый узел. Затем координаты центров кластеров μ_k в каждом кластере пересчитываются путем нахождения усредненной суммы по координатам векторов узлов, входящих в каждый кластер. Затем проверяется, изменились ли координаты текущих центров кластеров по сравнению с предыдущими. Если изменились, то цикл повторяется снова для нахождения новых координат центров кластеров. Если координаты не изменились, то цикл останавливается, и в

каждом кластере находится ближайший к центру этого кластера узел, который назначается ГКУ-узлом.



Рисунок 3.6 - Блок-схема модифицированного алгоритма К-средних

В результате в сенсорном поле сформирована оптимальная последовательность кластеров и найдены все головные кластерные узлы. Для построения маршрутизации через полученные ГКУ используется ИНС Хопфилда.

3.3.4. Модель нейронной сети Хопфилда для маршрутизации данных в БСС

Нейронная сеть Хопфилда (НСХ) представляет собой однослойную рекуррентную сеть, в которой нейроны полностью связаны, т. е. каждый нейрон связан с другими нейронами. Если есть два нейрона i и j , то между ними лежит вес связности $w_{i,j}$, который симметричен $w_{i,j} = w_{j,i}$. Нейронная вычислительная схема Хопфилда [102] представлена на рис.3.7.

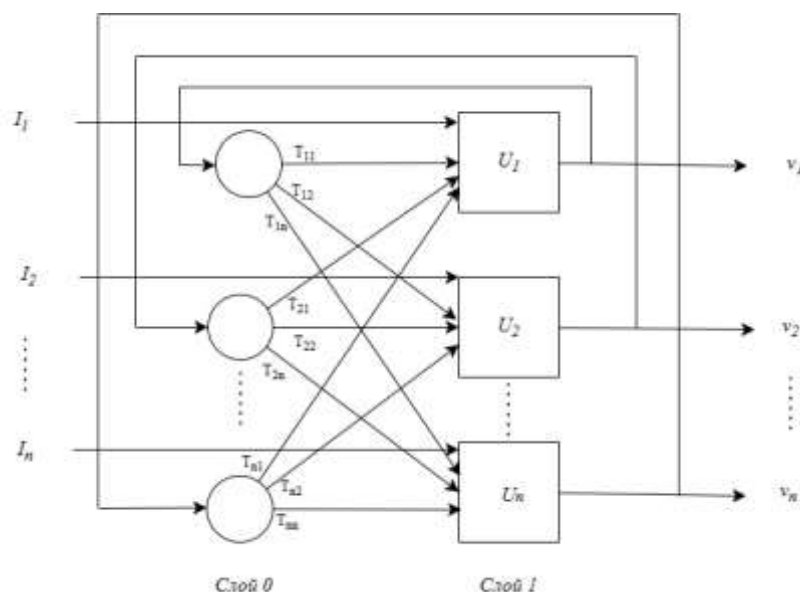


Рисунок 3.7 - Базовая структура нейронной сети Хопфилда

Нейроны являются обрабатывающими элементами. Выход каждого нейрона связан с входом всех остальных нейронов через веса. Каждая связь в коммуникационной сети между двумя соседними узлами связана с одним нейроном. Например, связь между узлом x и узлом i связана с нейроном x_i . Выход нейрона $V_{x,i}$ определяется входом $U_{x,i}$ оценивается с помощью сигмовидной функции (3.20). Вход каждого нейрона представляет собой сумму выходов других нейронов u_j , взвешенных с помощью весов (матрица $T_{xi,yj}$), с учетом внешнего смещения $I_{x,i}$. Параметр λ определяет время сходимости и корректность алгоритма. При больших значениях λ логистическая функция становится более ступенчатой. [144]

$$V_{x,i} = g(U_{x,i}) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda U_{x,i}}} \quad (3.20)$$

$$\forall (x, i) \in \bar{N} \times \bar{N}, x \neq i$$

где: $V_{x,i}$ - Выход нейрона, $U_{x,i}$ - вход нейрона

Целью НСХ является определение направленного пути, представленного в виде упорядоченной последовательности узлов, который соединяет исходный узел 's' с узлом назначения 'd', при условии обеспечения того, что все связи в сети имеют неотрицательную стоимость ($C_{i,j}$). Этот путь называется " L_{sd} " и представляет собой минимальную стоимость между исходным и конечным узлами. Матрица стоимости обычно симметрична ($C_{x,i} = C_{i,x}$). Элементы $C_{i,i}$ являются нулевыми, поскольку узел не может быть соединен сам с собой. Матрица $\rho_{x,i}$ (3.21) определяет, существует ли связь x_i в топологии сети связи.

ρ_{xi} определяется как:

$$\rho_{x,i} = \begin{cases} 1, & \text{если ссылка } x_i \text{ не существует} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (3.21)$$

НСХ сходится, когда изменение каждого выходного значения между последовательными итерациями ($\Delta V_{x,i}$) ниже порога, т. е. $\Delta V_{th} < 10E-5$. После этого оценивается новая матрица ($Y_{x,i}$). Если выход имеет значение больше 0,5, $Y_{x,i}$ устанавливается на «1», в противном случае $Y_{x,i}$ устанавливается на «0». Если $Y_{x,i} = 1$, то ссылка x_i является частью кратчайшего пути L_{sd} , иначе нет.

Более того, каждый нейрон стимулируется извне входным смещением $I_{x,i}$ (3.22), включающим в себя стоимость связей и информацию о топологии сети, как показано ниже:

$$I_{x,i} = -\frac{\mu_1}{2} * C_{x,i} * (1 - \delta_{x,d} \delta_{i,s}) - \frac{\mu_2}{2} * C_{x,i} * (1 - \delta_{x,d} * \delta_{i,s}) - \frac{\mu_4}{2} + \frac{\mu_5}{2} \delta_{x,d} * \delta_{i,s} \quad (3.22)$$

$$\forall(x \neq i)$$

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{если } i \neq j \\ 1, & \text{если } i = j \end{cases} \quad (3.23)$$

где $I_{x,i}$ - внешнее смещение, δ — функция Кронекера, а μ_1 , μ_2 , μ_4 и μ_5 — параметры НСХ. μ_1 минимизирует общую стоимость, μ_2 разрешает только связи, существующие в пути, μ_4 обеспечивает сходимость к устойчивому состоянию, а μ_5 проверяет, что узлы источника и назначения являются частью пути.

Матрица $T_{xi,yj}$ описывается как:

$$T_{xi,yj} = \mu_4 * \delta_{x,y} * \delta_{i,j} - \mu_3 * \delta_{x,y} - \mu_3 * \delta_{i,j} + \mu_3 * \delta_{j,x} + \mu_3 * \delta_{j,y} \quad (3.24)$$

$$\forall(x \neq i), \forall(y \neq j)$$

где $T_{xi,yj}$ - соединение или весовая матрица, μ_3 — параметр НСХ, используемый для обеспечения сходимости

Следовательно, если система устойчива по Ляпунову, то итерации приводят к меньшим изменениям выхода. Как следствие, после некоторых итераций НСХ сходится. Шулер и др. обновляли нейроны, используя уравнение (3.25). Это уравнение позволило снизить количество итераций, необходимых для достижения сходимости, и уменьшить количество ошибок при поиске путей. [94]

$$U_{x,i}^{n+1} = U_{x,i}^n - A * U_{x,i}^{n-1} + B * \sum_{y=1}^n \sum_{j \neq y}^n T_{xi,yj} * V_{y,j}^n + C * I_{x,i} \quad (3.25)$$

где А, В и С - константы, которые настраивают веса предыдущих входов.

Ниже показан псевдокод алгоритма маршрутизации на основе НСХ, в котором U_{xi} инициализируется низкими и случайными значениями ($-0.0002 \leq U_{xi} \leq 0.0002$), чтобы ускорить сходимость.

Псевдокод нейронной сети Хопфилда

- Получение параметров для построения матрицы весов ($\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$)
- Определить матрицу весов ($T_{xi,yj}$)
- Получение параметров (источник, пункт назначения, λ, A, B, C)
- Получение матрицы стоимости ($C_{x,i}$)
- Вычисление топологической матрицы и матрицы смещения ($\rho_{x,i}, I_{x,i}$)
- Инициализировать матрицу входных нейронов ($U_{x,i}$)
- Вычисление матрицы выходных нейронов ($V_{x,i}$)
- while $\Delta V_{x,i} < \Delta V_{th}$ do
 - Вычисление новой матрицы входных нейронов ($U_{x,i}$) используя (3.25)
 - Вычисление матрицы выходных нейронов ($V_{x,i}$) используя (3.20)
- Применение пороговой функции к матрице выходных нейронов ($Y_{x,i}$)
- Определение маршрута от $Y_{x,i}$

3.3.5. Разработка протокола сбора и маршрутизации данных KmHNNSP для НБСС

Для наземной беспроводной сенсорной сети разработан протокол, объединяющий кластеризацию, сбор данных и нахождение кратчайшего пути через все ГКУ *KmHNNSP* (*K-means and Hopfield Neural Network for Shortest Path*) между узлами ГКУ для передачи данных на наземный шлюз. Данный протокол основан на интеграции модифицированного алгоритма К-

средних для кластеризации НБСС и определения узлов ГКУ и алгоритма нейронной сети Хопфилда для поиска пути передачи данных между узлами ГКУ к наземному шлюзу. На рис. 3.8 показан принцип работы протокола *KmHNNSP*, который состоит из двух этапов:

1. *Этап формирования кластера* - включает в себя:

- Выбор оптимального количества кластеров по формуле (3.18),
- Формирование кластеров с помощью модифицированного алгоритма К-средних, описанного в п. 3.3.3.

2. *Этап передачи данных* - каждый раунд передачи данных включает в себя:

- Выбор узлов ГКУ внутри сформированных кластеров и последующую периодическую передачу статуса ГКУ в каждом кластере в соответствии со следующей формулой для увеличения времени жизни сети:

$$y_{gku} = r \bmod n \quad (3.26)$$

где: n - количество узлов в кластере; r - номер раунда; y_{gku} - узел, который будет выбран в качестве ГКУ.

- Внутрикластерная передача данных: отправление данных от узлов и сбор их в узлах ГКУ.
- Выбор кратчайшего пути, проходящего через все узлы ГКУ, с помощью нейронной сети Хопфилда, описанной в п. 3.3.4,
- Межкластерная передача данных: данные передаются с узлов ГКУ на наземный шлюз.

В каждом раунде передачи/приема данных рассчитывается затрата энергии каждым узлом, как описано в п. 3.2.

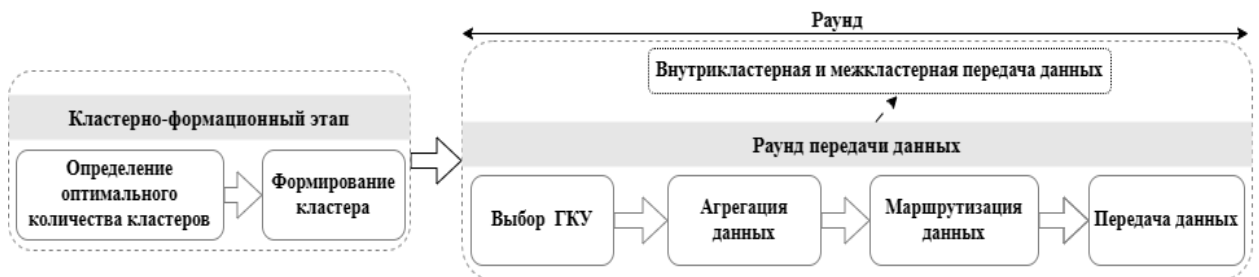


Рисунок 3.8 - Диаграмма этапов работы алгоритма маршрутизации *KmHNNSP* в течение одного раунда передачи данных

Блок-схема алгоритма кластеризации и маршрутизации НБСС для протокола *KmHNNSP* представлена на рис. 3.9.

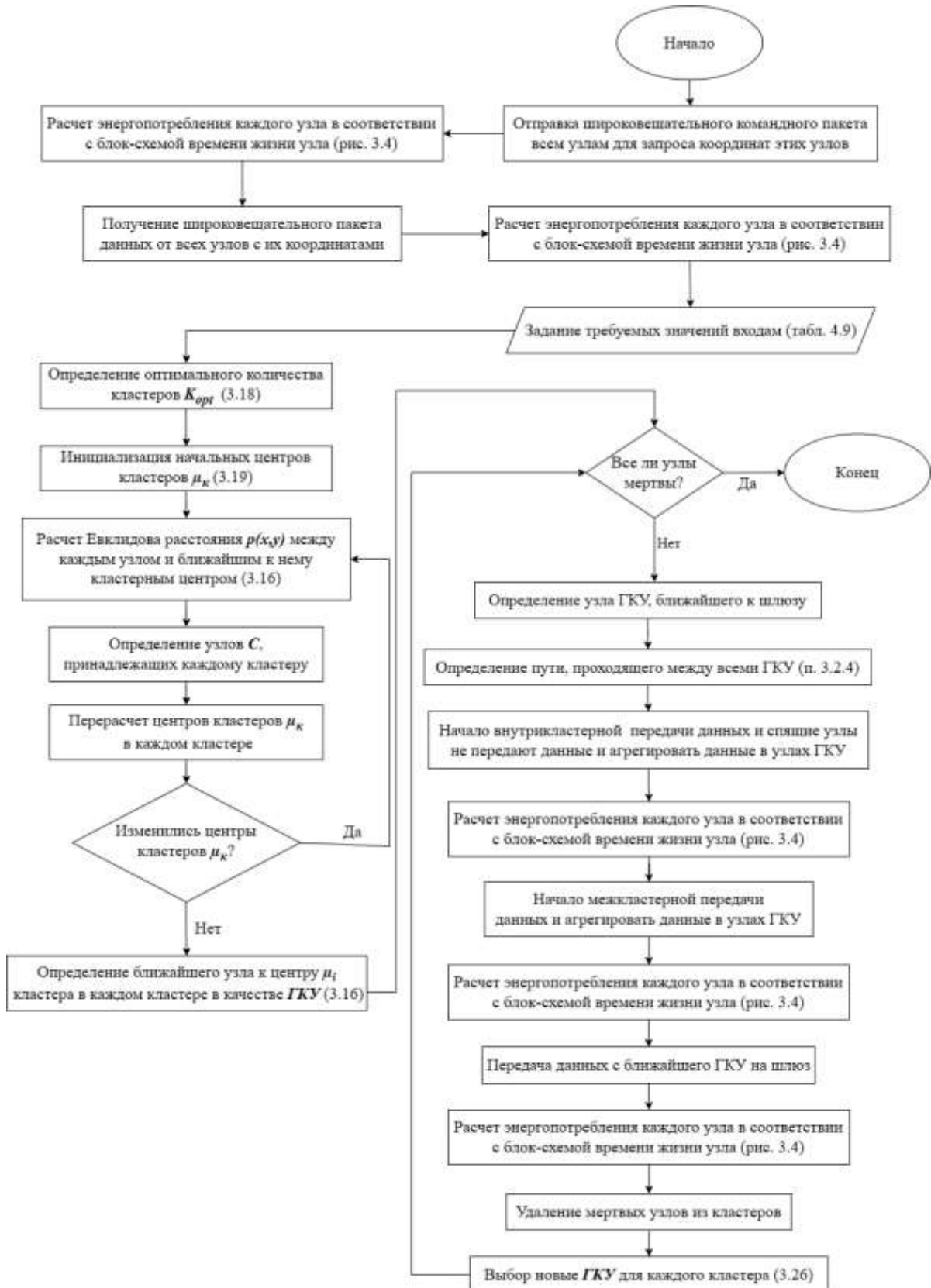


Рисунок 3.9 - Блок-схема алгоритма кластеризации и маршрутизации НБСС

Схема отображает формирование кластеров по модифицированному алгоритму К-средних, проверку в каждом раунде не мертвы ли все узлы. Если все узлы мертвы, то протокол завершается, а если живые узлы есть, то для каждого кластера выбираются ГКУ-узлы,

определяется путь между этими ГКУ-узлами, начинается передача данных внутрикластерная, межкластерная, а затем на базовую станцию. При каждой передаче и приеме данных узлы, только посылающие данные, расходуют энергию в соответствии с блок-схемой жизненного цикла узла, а спящие узлы не посылают данные и не расходуют энергию. По окончании раунда производится осмотр узлов, мертвые узлы удаляются из кластеров, после этого начинается следующий раунд, и так далее.

3.3.6. Алгоритм Дейкстры для поиска кратчайшего пути в рое БПЛА

После сбора данных в наземной части гетерогенной БСС, агрегированный пакет данных передается с наземного шлюза на базовую станцию через рой БПЛА, что требует решения задачи маршрутизации. Это одна из основных задач в сетях БПЛА, связанная с поиском кратчайшего пути для передачи данных от источника к приёмнику. В этой работе в качестве тестового варианта использовался алгоритм Дейкстры, который находит дерево кратчайших путей, начиная с источника на основе двух групп, первая группа содержит вершины в дереве кратчайших путей, а вторая группа содержит вершины, которые ещё не были добавлены к дереву кратчайшего пути. Пока алгоритм работает, мы ищем вершину в наборе вершин, не добавленных в дерево, которая имеет кратчайшее возможное расстояние от источника.

Псевдокод алгоритма Дейкстры:

```
function Dijkstra (graph, source)
  for each (vertex) in (graph)
    distance[vertex] = infinite
    previous[vertex] = NULL
  If (vertex) != source, add (vertex) to Priority Queue (queue)
  distance[source] = 0
  while (queue) IS NOT EMPTY
    N = Pop MIN from (queue)
    for each unvisited neighbor (vertex) of N
      temp = distance[N] + distanceBetween(N, vertex)
      if temp < distance[vertex]
        distance[vertex] = temp
        previous[vertex] = N
  return distance[], previous[]
```

Ограничения, описанные в алгоритме Дейкстры

В разработанной имитационной модели используют ряд ограничений, описанных ниже в предлагаемом алгоритме поиска кратчайшего пути. При имитационном моделировании сделаны следующие предположения и приняты ограничения:

- БПЛА в модели рассматриваются как точки с заданными координатами, которые изменяются с течением времени
- Рассматривается ситуация в фиксированный момент времени
- Точки (БПЛА) приблизительно равномерно распределены в трёхмерном модельном кубе, с относительными координатами x, y, z $(0,0,0)$, $(1,1,1)$ в слое между плоскостями $z=0.7$, $z=1$
- Источник сигнала с сети наземных датчиков располагается вблизи т. $(0, 0, 0)$ - начала координат. Это модель приёмника сигналов с сети наземных датчиков.
- Базовая станция или сервер куда должен передаваться сигнал находится вблизи т $(1,1,0)$.
- В заданный момент времени осуществляется кластеризация роя БПЛА, которая реализуется с использованием метода К-средних
- Затем находятся кластеры, у которых СН расположены наиболее близко к источнику сигнала с сети наземных датчиков (СН_1) и к базовой станции (СН_2).

С приёмника сигнал передаётся на СН_1, затем включается алгоритм Дейкстры, который ищет кратчайший путь между СН_1 и СН_2, сигнал с СН_2 передается на базовую станцию.

3.3.7. Генетический алгоритм маршрутизации роя БПЛА

Другим методом решения задачи маршрутизации данных в летающем сегменте является генетический алгоритм, учитывающий динамическое расположение дронов и их зоны радиовидимости [136].

Динамический характер топологии сети, связанный с постоянным движением дронов в рое и ограниченностью используемых ресурсов, таких как зона покрытия отдельного узла, делает рассматриваемую маршрутизацию сложной задачей.

Каждый БПЛА оснащен блоком GPS (Global Positioning System) для определения своего местоположения во время полета и имеет радиус радиовидимости 2000 м.

В табл.3.1 приведена информация о дальности действия и цене БПЛА нескольких типов. Анализ данных таблицы показывает, что лучшим выбором будет дрон JJRC X12 Pro Aurora, поскольку он может подниматься на высоту 500 м и его цена приемлема.

Таблица 3.1 - Сравнение типов БПЛА

Модель	Радиус действия	Цена
3DR Solo	До 1 км	25 000 руб
GoPro Karma	До 1 км	90 000 руб
Xiro Xplorer	До 1 км	36 000 руб
JJRC X19 pro	До 1 км	19 599 руб
JJRC X12 Pro Aurora	До 3 км	18 990 руб
Xiaomi Fimi X8 SE 2022 v2	До 1 км	39 990 руб
WL Toys V383	До 500 м	18 200 руб
SJRC F11 Pro 2K	До 1200 м	17 730 руб

В этом случае имеется m БПЛА с координатами $(X_{\text{бпла}}, Y_{\text{бпла}}, Z_{\text{бпла}})$, распределенных в заданной области. Для работы с данным алгоритмом необходимо определить последовательность БПЛА, с помощью которых будет формироваться оптимальный путь для передачи данных от источника с координатами $(X_{\text{источник}}, Y_{\text{источник}}, Z_{\text{источник}})$ до БС с координатами $(X_{\text{бс}}, Y_{\text{бс}}, Z_{\text{бс}})$ с использованием генетического алгоритма. Первоначально, для нахождения кратчайшего пути должно быть сформировано потенциальное решение «хромосома», на основании которой строится начальная популяция, содержащая все возможные пути/хромосомы из БПЛА.

Для работы с данным алгоритмом необходимо учитывать 3 матрицы: матрица связи, матрица расстояний, матрица стоимости.

Матрица связи/ радиовидимости C должна иметь размерность $(N*N)$, где N — количество БПЛА и может быть представлена в виде:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & C_{12} & \dots & C_{1j} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & 0 & \dots & C_{2j} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{i1} & C_{i2} & \dots & 0 & \dots & C_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nj} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{Существует связь между узлом } i \text{ и узлом } j \\ 0; & \text{Нет связи между узлом } i \text{ и узлом } j \end{cases}$$

где значение 1 означает, что между двумя узлами есть соединение (первый узел — это строка, а второй узел — соответствующий столбец), а значение 0 означает, что соединения нет.

Кроме того, матрица расстояний D также должна иметь размерность $(N * N)$, которая рассчитывается с использованием евклидова расстояния по формуле (3.16), и каждое значение в матрице представляет собой расстояние между узлом в строке с соответствующим узлом в столбце, и эта матрица представлено следующим образом:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2j} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & 0 & \dots & d_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nj} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

где d_{ij} - расстояние между узлом i с соответствующим узлом j .

Чтобы вычислить функция пригодности, нужна *матрица стоимости* F , которая является поэлементным произведением матрицы связи на матрицу расстояний и, таким образом, получено расстояние между узлами, между которыми есть только связь. Матрица стоимости представлена следующим образом:

$$F = D .* C \quad (3.29)$$

Эта матрица будет использоваться в функции пригодности.

Лучший путь в популяции выбирается по наименьшему значению функции пригодности, поэтому к значениям матрицы стоимости, для которых нет связи между любыми двумя узлами, следует применять штраф, тогда как узел соединён сам с собой должен оставаться нулём. В конце, матрица стоимости представлена следующим образом:

$$F = \begin{cases} D_{ij} * C_{ij}; & \forall (i, j) \text{ узлы: } C_{ij} \neq 0 \\ D_{ij} + \text{штраф}; & \forall (i, j) \text{ узлы: } C_{ij} = 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

где штраф = 100 применяется к любым двум БПЛА, которые не имеют связи или связаны "сами с собой", так как функция пригодности учитывает наименьшую стоимость.

Для решения задачи маршрутизации в рое БПЛА с помощью генетических алгоритмов (ГА) используется несколько концепций, включающих хромосому, генетические факторы, такие как скрещивание/ кроссинговер и мутация, а также функцию пригодности. Эти понятия позволяют выбрать оптимальный путь данных, закодированный хромосомой, после выполнения генетических операций. Функция пригодности используется для оценки качества решения для каждой особи.

Схема кодирования хромосомы

В начале работы генетического алгоритма путь передачи данных внутри роя должен быть закодирован в виде массива целых чисел. Каждая ячейка массива соответствует узлу в рое, и такое кодирование представляет собой кратчайший путь между БПЛА. Такое кодирование называется хромосомой, а каждая ячейка в ней - геном [138]. На рис. 3.10 показана схема маршрутизации в рое БПЛА. Значения генов в позициях от 0 до 9 представляют БПЛА,

формирующие путь от БПЛА, ближайшего к наземному шлюзу в позиции 0 (БПЛА 2), до БПЛА, ближайшего к базовой станции в позиции 9 (БПЛА 4).



Рисунок 3.10 - Схематическое представление кратчайшего пути в хромосоме.

С помощью позиций узлов БПЛА в рое, можно создавать маршруты случайным образом для исходной популяции, путём выбора нескольких возможных путей между источником и базовой станцией. Очевидно, что в этом случае Предполагая, что каждый БПЛА имеет " d " соседей, количество возможных решений (путей) для n БПЛА составляет $O(dn)$. Ввиду обширного пространства поиска решений задачи маршрутизации в рое и необходимости выбора кратчайшего пути за короткий период времени рекомендуется использовать генетический алгоритм.

Отбор. Основопологающим аспектом генетических алгоритмов для генерации потенциальных решений является отбор родительских особей для создания новых особей или новых потенциальных путей. В данной работе используется турнирный метод отбора родительских особей.

Скращивания. Первоначальный генетический процесс, используемый для улучшения качества решения (потенциального пути) после отбора лучших родителей, включает в себя скрещивание. В качестве фактора скрещивания выбран одноточечный скрещивание, при котором в каждом родителе выбирается случайная точка скрещивания для обмена генами. При этом выделенные фрагменты генов, которыми обмениваются родители, изолируются, а дублирующийся гены удаляются.

Мутации. Для поддержания генетического разнообразия в популяции и избегания попадания в локальном оптимуме используется второй генетический фактор - мутация. Этот процесс изменяет значение гена в выбранной позиции в процессе скрещивания на случайное число от 1 до $N-1$.

Функция пригодности G . Необходимой функцией генетического алгоритма является определение функции пригодности для каждой сформированной особи (возможного пути) для оценки её качества. В этом случае имеет смысл определить функцию пригодности на основе

заданных критериев. В качестве критериев в работе приняты радиус радиовидимости каждого БПЛА и попарные расстояния между узлами БПЛА.

$$G(m) = \sum F_{i,j} ; \text{ где } (i,j) \text{ узлы } \in \text{ маршрут } m \quad (3.31)$$

где m – маршрут, содержащий узлы; $G(m)$ — пригодность маршрута m ; $F_{i,j}$ — стоимость связи ячеек для i, j узлов, которых имеется связь.

Псевдокод работы генетического алгоритма

Шаг 1. Все расстояния между узлами задаются в матрице стоимостей, поэтому каждая диагональная ячейка равна 0, а ij -ячейка — это расстояние между узлами i и j .

Шаг 2. Для создания начальной популяции необходимо задать её размер (`pop_size`) и количество поколений (`gen_max`). В методе `generate_population` случайным образом генерируется начальная популяция.

Шаг 3. Кроссовер. Два случайных родителя (пути) должны быть взяты и к ним применяется метод кроссовера. `crossover(self, mother, father)` Количество взятых хромосом от родительских особей генерируется случайным образом.

Шаг 4. Мутация. Каждый потомок после скрещивания родительских хромосом подвергается мутации.

Шаг 5. Фитнес. Приспособленность каждого поколения следует измерять путём измерения длины предлагаемого пути. На каждой итерации работы алгоритма мы ищем наиболее подходящий путь и помещаем его в лучшую переменную.

Шаг 6. Отбор. Метод отбора отсортировать новое поколение и предыдущее поколение с помощью функции пригодности и выделить лучших представителей каждого поколения и собрать их вместе, обновляя массив популяции.

В цикле повторяются шаги 3, 4, 5 и 6 по 1000 раз. Следовательно, базовую структуру генетического алгоритма можно продемонстрировать следующим образом, приведенным на рис.3.11.

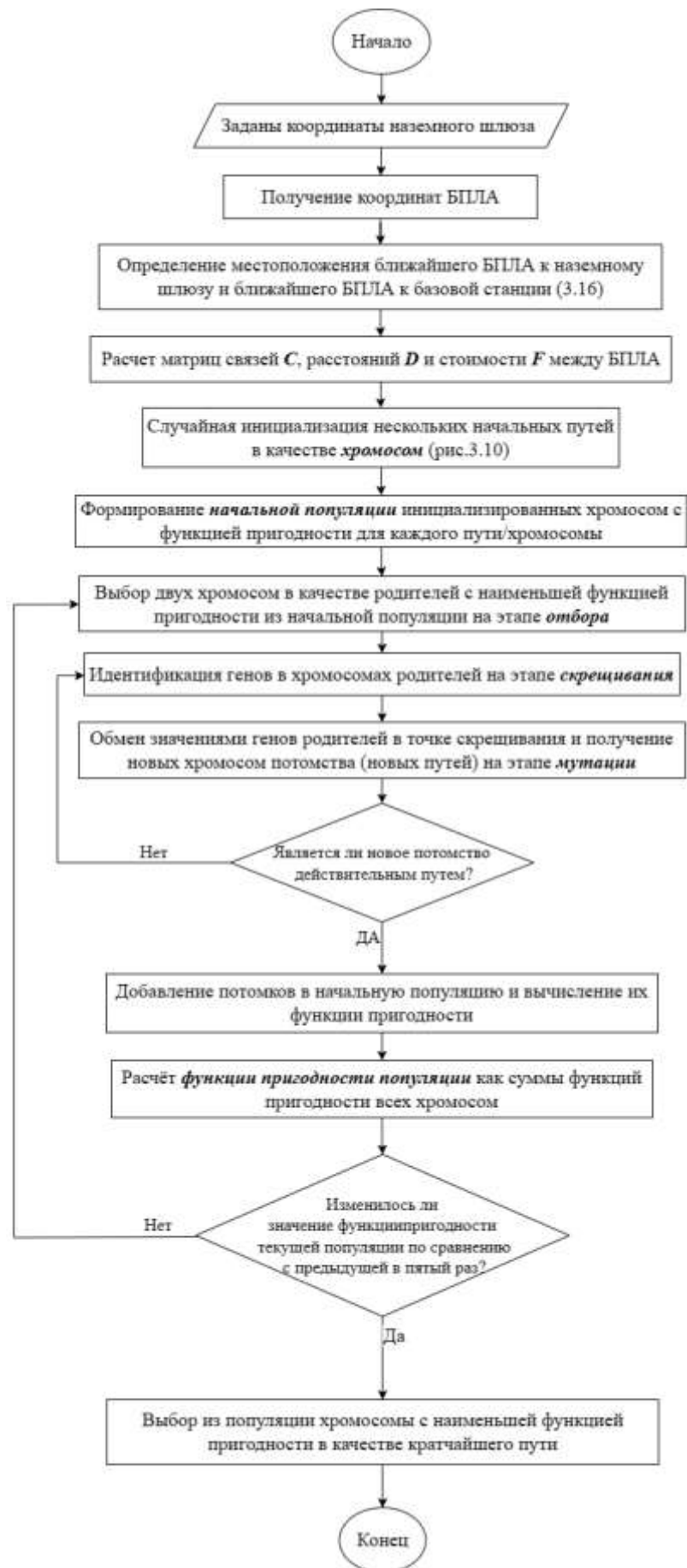


Рисунок 3.11 - Блок-схема алгоритма маршрутизации в летающем сегменте БСС

На рисунке 3.11 показана блок-схема алгоритма маршрутизации в летающей сети. Базовая станция знает координаты наземного шлюза и получает от каждого БПЛА пакет данных с координатами. Затем базовая станция выполняет ряд расчетов. Сначала рассчитывает расстояние между наземным шлюзом и каждым БПЛА и выбирает тот, который находится ближе всего к шлюзу. Во-вторых, рассчитывает расстояние между базовой станцией и каждым БПЛА и выбирает ближайший к ней. В-третьих, рассчитывает и формирует матрицы связи, расстояния и стоимости, на их основе формируется несколько случайных путей в виде хромосом между БПЛА, ближайшим к шлюзу, и БПЛА, ближайшим к базовой станции, для каждого пути/хромосомы рассчитывается функция пригодности, а затем эти пути инициализируются в начальной популяции в качестве входных данных для генетического алгоритма. Затем выполняются процессы отбора, скрещивания и мутации, после чего вычисляется функция пригодности популяции. Затем выполняются операции отбора, скрещивания и мутации, после чего вычисляется функция пригодности популяции. Пока значение функции пригодности популяции отличается от предыдущего поколения, процессы отбора, скрещивания и мутации повторяются снова, пока значение функции пригодности не станет постоянным в течение определенного количества раз, после чего генетический алгоритм останавливается. В конце, хромосома с наименьшей функцией пригодности выбирается в качестве кратчайшего пути от БПЛА, ближайшего к наземному шлюзу, к БПЛА, ближайшему к базовой станции.

3.4. Разработка протокола передачи данных в гетерогенной БСС

Для определения эффективной маршрутизации в сети, включающей наземную и летающую сенсорные сети, автором сформирован сценарий передачи пакетов данных на основе структур описанных в п.2.4, в рамках протокола в гетерогенной сети.

Протокол наземной сенсорной сети работает в соответствии с несколькими этапами.

Этап 1. Наземный шлюз посылает широковещательный пакет "КОМАНДЫ"(рис.3.12) всем узлам, расположенным в радиовидимости наземного шлюза, затем эти узлы передают этот широковещательный пакет узлам в своей собственной радиовидимости и так далее, пока все узлы не получат широковещательный пакет. Функция этого пакета заключается в инициализации сети. Все узлы, получившие этот пакет, знают, что наземному шлюзу нужна информация об узлах.

Этап 2. Отправка информации на наземный шлюз: узлы, получившие широковещательный пакет "КОМАНДЫ", отправляют пакет "ДААННЫЕ" на наземный шлюз, который содержит информацию о местоположении этих узлов (рис.3.12).

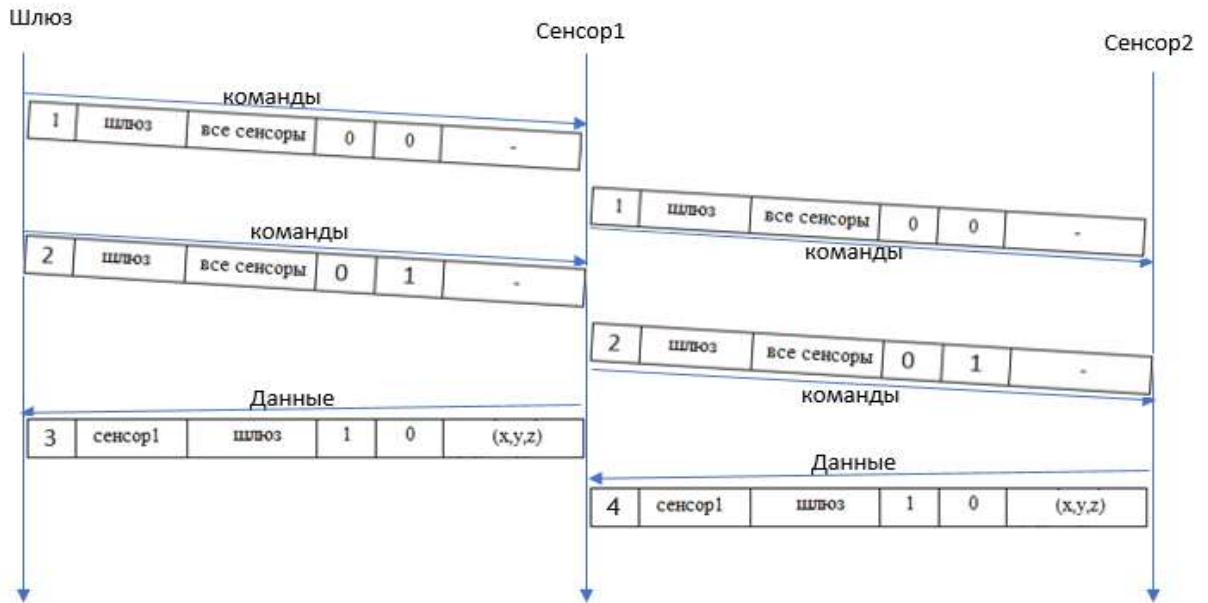


Рисунок 3.12 - Схема обмена данными при начале работы протокола в НБСС

Этап 3. Группировка узлов в кластеры и сбор данных: после того как наземный шлюз получает пакет "ДАННЫЕ" от всех узлов, в наземном шлюзе формируется топология сети, реализуется процесс кластеризации с помощью модифицированного алгоритма К-средних. в результате формируются головные кластерные узлы (ГКУ) и члены их кластеров. После этого, шлюз запускает нейросетевой алгоритм Хопфилда для определения пути между всеми головными кластерными узлами (ГКУ), чтобы передать данные, собранные через эти ГКУ, на шлюз (рис.3.13).

Затем шлюз отправляет всем узлам широковещательный пакет данных, аналогично первому этапу, который содержит информацию об узлах, ставших ГКУ, членах кластеров и адресе адресата каждого узла (ГКУ или шлюз). Когда узел получает этот пакет, он либо становится членом кластера и в этом случае следующим хопом /адресатом является ГКУ этого кластера, либо головным кластерным узлом (ГКУ), и в этом случае следующим хопом /адресатом является ГКУ следующего кластера, либо шлюз.

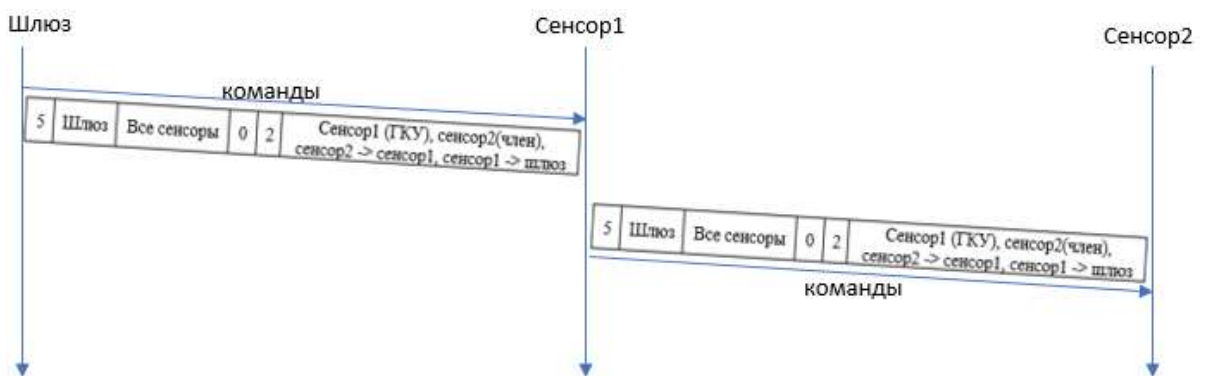


Рисунок 3.13 - Схема обмена данными при кластеризации и маршрутизации в НБСС

Этап 4. Датчики начинают ощущать окружающую среду и отправляют информацию на свои ГКУ, которые, в свою очередь, считывают информацию с датчиков, собирают важную информацию и отправляют ее на шлюз (рис.3.14). Например, при считывании информации о температуре или рН почвы сохраняются показания, которые выше или ниже определенного уровня, затем каждый ГКУ последовательно отправляет данные, отправленные от своих членов, следующим ГКУ (согласно сформированному маршруту на этапе 3) и так далее до шлюза.

Следует отметить, что каждый процесс передачи, приема и суммирования данных соответствует затрате энергии сенсорного узла в соответствии с моделью, указанной в третьей главе. В конце этапа 4 подсчитываются активные датчики и датчики, которые не работают, и повторяются этапы 3 и 4.

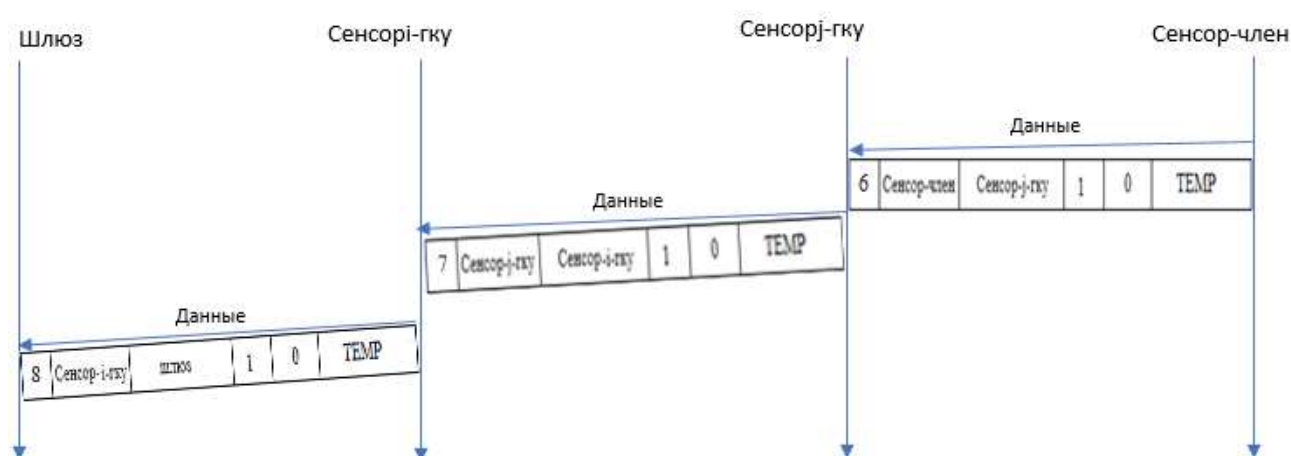


Рисунок 3.14 - Схема обмена данными при маршрутизации в НБСС

Протокол летающей сенсорной сети также работает в соответствии с несколькими шагами, описанными ниже:

1. Этап конфигурации летающей сети:

Базовая станция передает пакет "КОМАНДЫ" в пределах своей радиовидимости всем БПЛА, которые, в свою очередь, пересылают в пределах своих радиовидимости этот пакет другим БПЛА, и так далее, пока пакет "КОМАНДЫ" не достигнет всех БПЛА (рис. 3.15). После получения пакета "КОМАНДЫ", БПЛА передают на базовую станцию в виде широковещательной рассылки пакет данных, содержащий информацию об их положении и радиовидимости относительно остальных БПЛА. В конце этого этапа базовая станция имеет информацию о топологии летающей сети, и начинается второй этап.

2. Этап формирования кратчайшего пути для передачи данных:

Зная топологию летающей сети, базовая станция находит кратчайший путь для передачи данных к себе от БПЛА, ближайшего к наземному шлюзу, затем она запускает генетический алгоритм для определения этого кратчайшего пути. После этого базовая станция отправляет пакет данных, который содержит информацию о сформированном пути, БПЛА. Информация о

маршруте в пакете "КОМАНДЫ" включает адрес назначения каждого БПЛА, участвующего в маршруте, то есть каждый БПЛА идентифицирует следующий БПЛА как адрес адресата и так далее до ближайшего БПЛА, который идентифицирует базовую станцию как адрес адресата (рис.3.16).

3. Этап передачи данных от наземного шлюза к базовой станции:

Наземный шлюз передает данные ближайшему БПЛА, который, в свою очередь, передает их на следующий БПЛА в маршруте, затем данные передаются на базовую станцию по пути (рис. 3.17), указанному на предыдущем этапе.

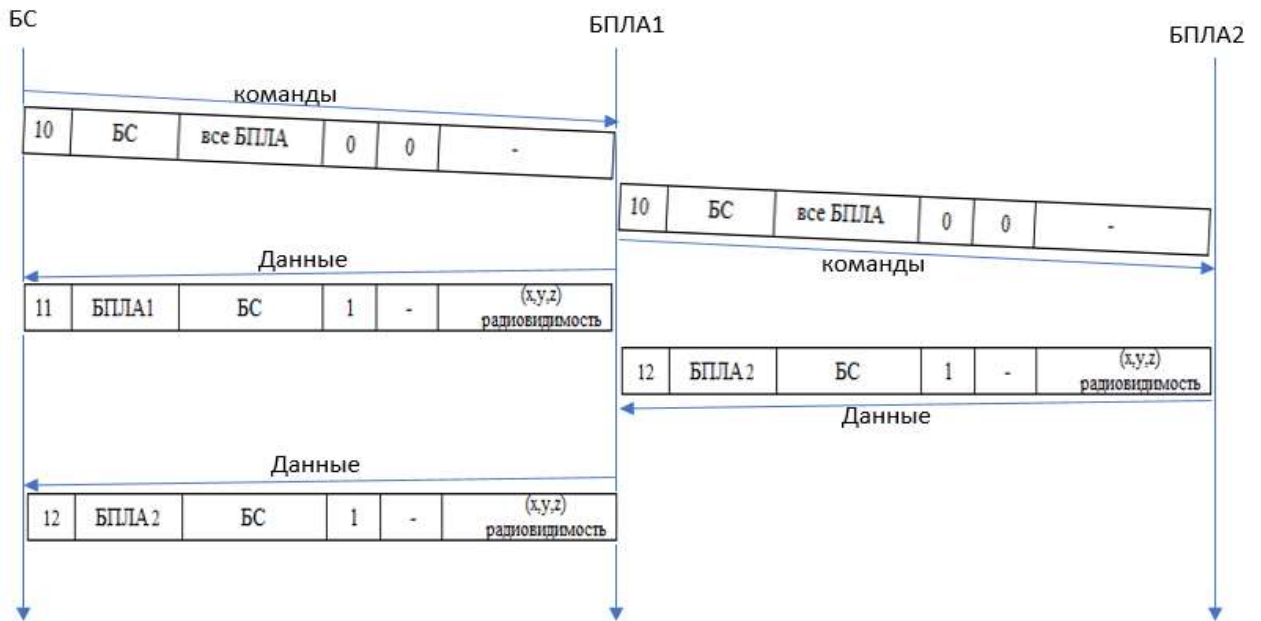


Рисунок 3.15 - Схема обмена данными при начале работы протокола в рое БПЛА



Рисунок 3.16 - Схема пакета "КОМАНДЫ" при маршрутизации в рое БПЛА

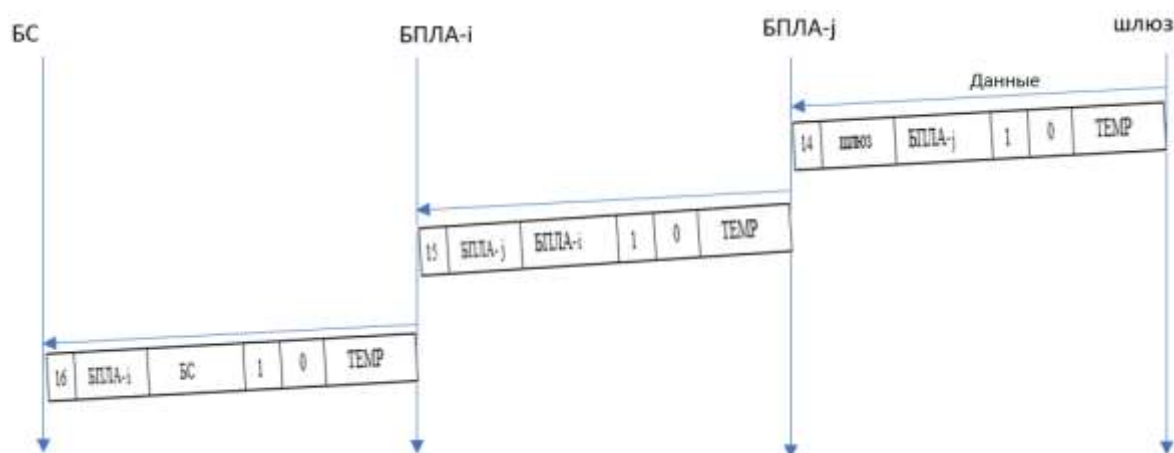


Рисунок 3.17 - Схема обмена данными при маршрутизации в рое БПЛА

Таким образом, в сценарии работы алгоритма маршрутизации в гетерогенной сети присутствует восемь этапов: 1) рассылка наземным шлюзом широкоэвещательного пакета "КОМАНДЫ"; 2) отправка информации с узлов НБСС на наземный шлюз, 3) группировка узлов в кластеры; 4) сбор данных: со всех ГКУ, с помощью нейросетевого алгоритма Хопфилда, 5) передача данных ГКУ узлами в кластерах. При этом каждый процесс передачи, приема и суммирования данных соответствует затрате энергии сенсорного узла в соответствии с моделью, указанной во второй главе. В конце подсчитываются активные/неработающие датчики и повторяются этапы 3, 4 и 5. 6) этап конфигурации летающей сети: БС передает пакет "КОМАНДЫ" в пределах своей радиовидимости всем БПЛА; 7) Этап формирования кратчайшего пути для передачи данных с помощью генетического алгоритма, 8) передача данных от наземного шлюза к базовой станции.

Стоит отметить, что конкретное использование дрона подпадает под местные законы, нормы и правила, поэтому перед полетом дрона всегда следует консультироваться с местными властями.

Выводы по главе 3

1. На основе топологии заданной области в Сирийской Арабской Республике разработана гетерогенная модель беспроводной сенсорной сети, включающая две части: наземную беспроводную сенсорную сеть (НБСС) и летающую сенсорную сеть (ЛСС). Данный метод позволяет исследовать труднодоступную горную местность и передавать данные на удаленную базовую станцию для обработки.
2. На основе матрицы радиовидимости узлов разработан алгоритм объединявший метод построения сети Кохонена с Конструктивным методом для кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети.
3. Разработан метод эффективной кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети с использованием модифицированного алгоритма К-средних, использующий аналитический метод для нахождения оптимального количества кластеров, для заданного количества узлов, распределенных в области зондирования. Предложена методика улучшения распределения ГКУ при инициализации по окружности, радиус которой равен четверти длины области зондирования, а центром окружности является середина области, что позволяет преодолеть сходимость к локальному минимуму модифицированный алгоритм К-средних позволяет оптимизировать количество кластеров и избежать «скученности» ГКУ в малой области зоны покрытия, сокращая временные затраты на обработку информации в наземном шлюзе.
4. Для летающего сегмента гетерогенной БСС, на основе данных о местоположении БПЛА, протестирован алгоритм Дейкстры, позволяющий находить кратчайший маршрут в рое. Данный метод позволяет пересылать данные с наземного шлюза на базовую станцию для их обработки.
5. На основе топологии узлов, матрицы расстояний, матрицы связи/радиовидимости между узлами и матрицы стоимости пути разработан генетический алгоритм для поиска кратчайшего пути между беспилотными летательными аппаратами.
6. Описана модель рассеивания радиоэнергии в гетерогенной БСС с учётом разницы потери энергии при передаче данных в схеме передатчика и приемника сенсорного узла. Такая модель позволяет рассчитать время жизни узлов и, следовательно, время жизни сенсорной сети в целом в качестве показателя качества обслуживания.
7. На основе структуры пакетов данных разработан протокол, содержащий сценарий сбора и передачи данных для этапов кластеризации в наземной сети БСС и маршрутизации в наземном и летающем сегментах БСС гетерогенной сети.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБРАБОТКЕ ТРАФИКА МЕТОДАМИ ИАД В ГЕТЕРОГЕННОЙ БСС

В главе приводятся результаты компьютерных экспериментов, полученные в рамках программного комплекса для моделирования гетерогенной БСС (ПК МГБСС), включающей два сегмента; наземную БСС со стационарными сенсорными узлами и летающую БСС сформированную с помощью БПЛА. Моделирование проводится последовательным применением методов ИАД в рамках разработанных моделей. Первоначально реализуется кластеризация, сбор и маршрутизация данных в наземной части сети, с последующей передачей данных на шлюз, и поиск оптимального маршрута в воздушном коридоре, по которому осуществляется передача собранных пакетов данных из наземного сегмента на удаленную БС для дальнейшей обработки полученной информации. Также приводятся результаты, промежуточных исследований по применению методов, с точки зрения целесообразности их использования для получения адекватных результатов.

Структура программного комплекса для моделирования гетерогенной БСС (ПК МГБСС) [155], приведена на рис.4.1. При программировании использовался язык Python в среде Anaconda с библиотеками Pandas, NumPy, Sklearn, Matplotlib, Ipywidgets.

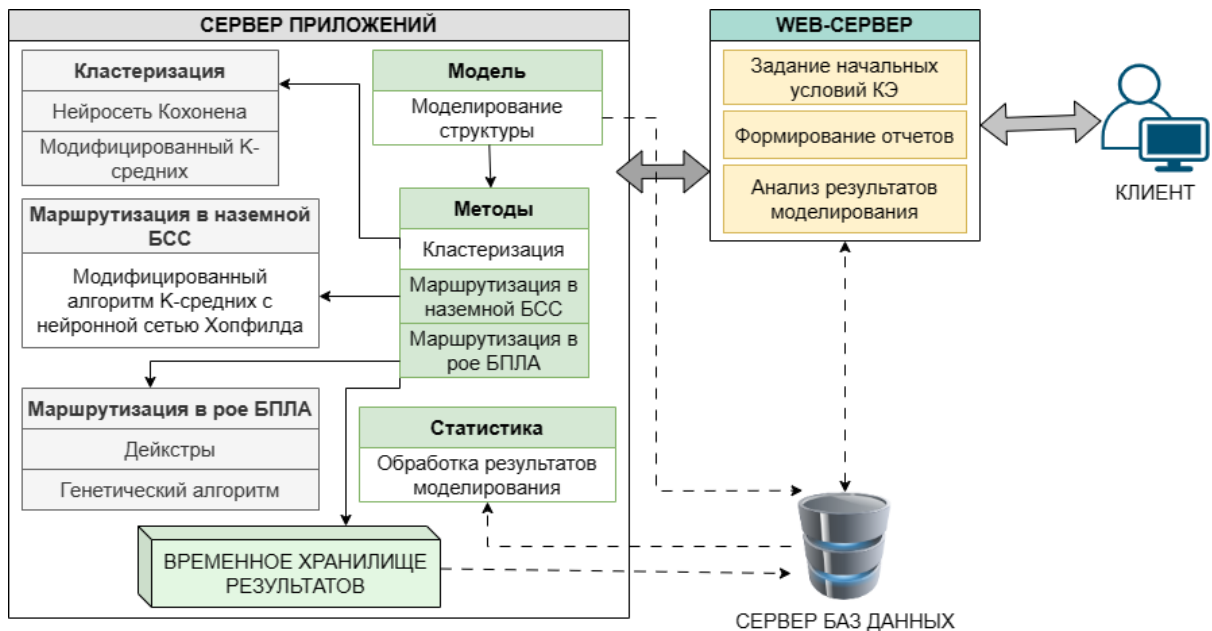


Рисунок 4.1 - Структура программного комплекса МГБСС для
моделирования гетерогенной БСС

На рис.4.1 показано, что ядром программного комплекса МГБСС является сервер приложений, в рамках которого функционируют приложения, на основе алгоритмов интеллектуального анализа данных, приложения, содержащие описания моделей структуры,

методы комплексирования и статистические методы, обеспечивающие структурное моделирование и обработку данных. Удаленный пользователь через приложение на WEB-сервере задает набор начальных условий для эксперимента, запускает моделирование, а условия обрабатываются на сервере приложения.

Рисунок 4.2 - Графический интерфейс программного комплекса МГБСС

Используя графический интерфейс программного комплекса, как показано на рис.4.2, имеется возможность запуска *двух вариантов компьютерного эксперимента*: 1) с использованием протокола **KmHNSP** и генетического алгоритма, 2) с использованием алгоритмов *K-средних* и *Дейкстры*.

Перед «сборкой» программного комплекса МГБСС были проведены предварительные исследования пригодности отдельных методов ИАД для решения задач кластеризации и маршрутизации узлов в зоне покрытия БСС.

4.1. Модельные эксперименты кластеризации БСС с помощью алгоритма обучения сети Кохонена с Конструктивным методом

Для исследования возможности кластеризации автором разработана программа, объединяющая метод построения сети Кохонена с конструктивным методом (**СККМ**), использующая в качестве фактора связности матрицу радиовидимости. В экспериментах предполагалось, что датчики в зоне покрытия распределены случайным образом, и показатель интенсивности принимаемого сигнала (RSSI) для каждого датчика также задан случайным образом, в итоге формируется матрица радиовидимости, обеспечивающая связь между датчиками. Ниже приведены результаты моделирования для шести экспериментов с разными размерами кластеров при радиусе чувствительности R равном (0,26, 0,28, 0,30, 0,32, 0,34, 0,36) проведены по формуле 3.5.

На входе всех экспериментов используются следующие параметры:

$N = 100$ узлов; Матрица радиовидимости P приведена на рис 4.3.

<p>Матрица радиовидимости:</p> <pre>[[100. 80. 23. ... 99. 87. 57.] [80. 100. 99. ... 68. 91. 90.] [23. 99. 100. ... 24. 93. 75.] ... [99. 68. 24. ... 100. 45. 56.] [87. 91. 93. ... 45. 100. 92.] [57. 90. 75. ... 56. 92. 100.]]</pre> <p>Количество узлов: 100</p>	<p>Первая строка матрицы радиовидимости</p> <pre>[100. 80. 23. 51. 26. 81. 76. 99. 95. 69. 21. 20. 59. 11. 80. 90. 55. 18. 58. 28. 26. 93. 14. 99. 91. 98. 68. 44. 69. 89. 76. 43. 90. 89. 56. 87. 69. 62. 61. 49. 97. 46. 81. 95. 56. 93. 55. 95. 69. 69. 76. 30. 43. 56. 52. 50. 24. 86. 36. 36. 63. 84. 94. 93. 26. 73. 13. 32. 59. 96. 43. 68. 97. 68. 67. 66. 96. 81. 84. 49. 37. 86. 24. 93. 33. 47. 59. 63. 25. 64. 93. 66. 50. 87. 73. 33. 59. 99. 87. 57.]</pre>
---	--

(a)

(б)

Рисунок 4.3 - Представление матрицы радиовидимости:

(a) матрица радиовидимости, (б) первая строка из матрицы радиовидимости

На рис.4.3(a) приведены начальный и конечный блоки полученной матрицы радиовидимости, на рис.4.3(б) приведена полученная первая строка из матрицы радиовидимости. Эта строка представляет собой вектор мощности сигнала, который первый узел получил от других узлов в сети. «100» означает радиовидимость первого узла для самого себя и представляет наибольшее значение, так как остальные узлы находятся в рамках [0... 99].

Эксперимент №1

В данном эксперименте задан радиус чувствительности $R = 0,26$. При обучении нейронной сети, ей передаются строки матрицы в качестве входных векторов. Нейронная сеть работает с использованием следующих значений параметров из формулы (3.5): $NET(P_{NORM}, N = 100, R = 0.26, \alpha_0 = 0.7, \varepsilon = 0.1, \tau)$. Значения R, α_0, ε выбраны согласно рекомендациям [93]. Количество кластеров, сформированных на основе матрицы радиовидимости узлов и заданных в эксперименте 1 параметров, составляет **96** кластеров.

Необходимое время для создания кластеров = 0.08299064636230469

Финальные веса =

```
[[1. 0.8 0.23 ... 0.99 0.87 0.57]
 [0.8 1. 0.99 ... 0.68 0.91 0.9 ]
 [0.23 0.99 1. ... 0.24 0.93 0.75]
 ...
 [0.59 0.33 0.8 ... 0.92 0.52 0.46]
 [0.87 0.91 0.93 ... 0.45 1. 0.92]
 [0.57 0.9 0.75 ... 0.56 0.92 1. ]]
```

Весовая матрица первого кластера

```
[1. 0.8 0.23 0.51 0.26 0.81 0.76 0.99 0.95 0.69 0.21 0.2 0.59 0.11
 0.8 0.9 0.55 0.18 0.58 0.28 0.26 0.93 0.14 0.99 0.91 0.98 0.68 0.44
 0.69 0.89 0.76 0.43 0.9 0.89 0.56 0.87 0.69 0.62 0.61 0.49 0.97 0.46
 0.81 0.95 0.56 0.93 0.55 0.95 0.69 0.69 0.76 0.3 0.43 0.56 0.52 0.5
 0.24 0.86 0.36 0.36 0.63 0.84 0.94 0.93 0.26 0.73 0.13 0.32 0.59 0.96
 0.43 0.68 0.97 0.68 0.67 0.66 0.96 0.81 0.84 0.49 0.37 0.86 0.24 0.93
 0.33 0.47 0.59 0.63 0.25 0.64 0.93 0.66 0.5 0.87 0.73 0.33 0.59 0.99
 0.87 0.57]
```

Рисунок 4.4 - Финальные веса принадлежности к каждому кластеру ($R = 0,26$)

На рис. 4.4 показаны итоговые веса, полученные в нейронной сети Кохонена после обучения, которые содержат матрицу весов для каждого кластера, и время формирования кластеров, которое составляет примерно 0.083 секунды.

Эксперимент №2

Радиус чувствительности кластера $R = 0,32$. Нейронная сеть запускается со следующими значениями инициализированных параметров из формулы (3.5): $NET(P_{NORM}, N = 100, R = 0.32, \alpha_0 = 0.7, \varepsilon = 0.1, \tau)$. В результате получена матрица весов, определяющая принадлежность узла к конкретному кластеру. Время формирования возможных кластеров, составляет примерно 0.034 секунды. На рис. 4.5 показано количество полученных кластеров и принадлежность узлов из первого десятка к кластерам.

```

Количество кластеров: 8
Узел 1 подает в кластер 1
Узел 2 подает в кластер 2
Узел 3 подает в кластер 6
Узел 4 подает в кластер 6
Узел 5 подает в кластер 5
Узел 6 подает в кластер 6
Узел 7 подает в кластер 6
Узел 8 подает в кластер 8
Узел 9 подает в кластер 6
Узел 10 подает в кластер 6
  
```

Рисунок 4.5 - Количество кластеров и пример распределения узлов по кластерам

Эксперимент №3

Радиус чувствительности кластера $R = [0.28, 0.30, 0.34, 0.36]$. После обучения нейронной сети с использованием следующих значений параметров из формулы (3.5): $NET(P_{NORM}, N = 100, R = [0.28, 0.30, 0.34, 0.36], \alpha_0 = 0.7, \varepsilon = 0.1, \tau)$, количество и время формирования возможных кластеров получено для различных значений R :

- При $R = 0,28$: количество кластеров равно 61, время составляет 0.048 секунды.
- При $R = 0,30$: количество кластеров равно 21, время составляет 0.047 секунды.
- При $R = 0,34$: количество кластеров равно 3, время составляет 0.032 секунды.
- При $R = 0,36$: количество кластеров равно 1, время составляет 0.713 секунды.

На рис. 4.6 показано количество полученных кластеров для различных значений R и принадлежность узлов из первого десятка к кластерам.

Количество кластеров: 83	Количество кластеров: 29	Количество кластеров: 2	Количество кластеров: 1
Узел 1 подает в кластер 43	Узел 1 подает в кластер 1	Узел 1 подает в кластер 1	Узел 1 подает в кластер 1
Узел 2 подает в кластер 2	Узел 2 подает в кластер 2	Узел 2 подает в кластер 1	Узел 2 подает в кластер 1
Узел 3 подает в кластер 3	Узел 3 подает в кластер 12	Узел 3 подает в кластер 1	Узел 3 подает в кластер 1
Узел 4 подает в кластер 43	Узел 4 подает в кластер 4	Узел 4 подает в кластер 1	Узел 4 подает в кластер 1
Узел 5 подает в кластер 5	Узел 5 подает в кластер 12	Узел 5 подает в кластер 1	Узел 5 подает в кластер 1
Узел 6 подает в кластер 6	Узел 6 подает в кластер 6	Узел 6 подает в кластер 1	Узел 6 подает в кластер 1
Узел 7 подает в кластер 7	Узел 7 подает в кластер 7	Узел 7 подает в кластер 1	Узел 7 подает в кластер 1
Узел 8 подает в кластер 8	Узел 8 подает в кластер 12	Узел 8 подает в кластер 1	Узел 8 подает в кластер 1
Узел 9 подает в кластер 9	Узел 9 подает в кластер 9	Узел 9 подает в кластер 1	Узел 9 подает в кластер 1
Узел 10 подает в кластер 10	Узел 10 подает в кластер 12	Узел 10 подает в кластер 1	Узел 10 подает в кластер 1

а) при $R=0.28$

б) при $R=0.30$

в) при $R=0.34$

г) при $R=0.36$

Рисунок 4.6 - Количество кластеров и пример распределения узлов по кластерам для 100 узлов

Аналогичные эксперименты для исследования кластеризации методом *СККМ* были проведены для других количеств узлов: 250, 500 и 1000 на входе, с использованием всей линейки значений R от 0,26 до 0.36 через 0,02. Полученные результаты обучения сети Кохонена с конструктивным методом на различном количестве узлов (N) и различных значениях размера кластера (R) приведены табл.4.1.

Таблица 4.1 - Результаты обучения сети Кохонена с конструктивным методом на различном количестве узлов (N) и различных значениях размера кластера (R , отн.ед)

№ узла	Количество узлов (N)	Время работы ПК (t), сек						Количество кластеров (K)					
		$R = 0.26$	$R = 0.28$	$R = 0.3$	$R = 0.32$	$R = 0.34$	$R = 0.36$	$R = 0.26$	$R = 0.28$	$R = 0.3$	$R = 0.32$	$R = 0.34$	$R = 0.36$
1	100	0.083	0.048	0.047	0.034	0.032	0.713	96	61	21	8	3	1
2	250	0.428	0.353	0.178	0.105	1.765	1.826	250	236	55	7	1	1
3	500	7.984	8.503	2.117	0.301	3.783	3.735	500	500	206	6	1	1
4	1000	49.77	50.90	46.55	0.888	9.338	11.22	1000	1000	854	6	1	1

Как показали эксперименты существует сильная зависимость размеров получающихся кластеров, а следовательно, и их количества от параметра R – радиуса чувствительности, который опосредованно связан с матрицей радиовидимости. Не удастся однозначно определить оптимальное количество кластеров, при которых потеря энергии при передаче пакетов будет минимальной, а время жизни сети – максимальным. Получающиеся решения неустойчивы и для выбора значений по входным параметрам требуется кропотливая работа исследователя по принятию «ручного» экспертного решения.

В связи неудовлетворительными результатами по автоматизации подбора параметров в методе *СККМ* требуются дальнейшие исследования по разработке и применению методов ИАД для оптимальной кластеризации.

4.2. Определение оптимального количества кластеров с использованием модифицированного алгоритма К-средних

Определение оптимального числа кластеров является одной из важных задач кластеризации, позволяющее снизить энергопотребление, продлить время жизни сети и группировать узлы в кластеры. В связи с этим будет проведено несколько экспериментов по поиску оптимального количества кластеров (K) в модифицированном алгоритме К-средних с различным количеством узлов (100, 250, 500, 1000) в модельном квадрате на плоскости, с

различным расположением шлюза/базовой станции (в центре сенсорного поля, на углу сенсорного поля, вне области сенсорного поля) путем выбора значения K , при котором время жизни сети будет как можно выше.

В табл. 4.2 приведено время жизни сети для 100 узлов, когда базовая станция находится в центре сенсорного поля, для различного числа кластеров. Из таблицы видно, что при значении $K = 10$ время жизни сети больше, чем при остальных значениях K . Следовательно, можно считать, что в случае, когда базовая станция находится в центре сенсорного поля, а число узлов равно 100, оптимальное число кластеров K равно 10, что согласуется с формулой (3.18).

Таблица 4.2 - Время жизни сети при различном количестве кластеров, когда БС находится в центре сенсорного поля и количество узлов $N = 100$

	Количество узлов $N = 100$, БС находится в центре сенсорного поля									
K	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Время жизнь (раунд)	4715	4838	4894	4917	4992	4951	4838	4877	4865	4865

В случае, когда число узлов, распределенных по сенсорному полю, составляет 250, из табл. 4.3 видно, что оптимальное число кластеров K равно 15.

Таблица 4.3 - Время жизни сети при различном количестве кластеров, когда БС находится в центре сенсорного поля и количество узлов $N = 250$

	Количество узлов $N = 250$, БС находится в центре сенсорного поля									
K	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Время жизнь (раунд)	4556	4528	4605	4583	4702	4670	4644	4648	4654	4632

Из табл. 4.4 также видно, что оптимальное число кластеров K равно 22 при числе распределенных узлов 500 и расположении базовой станции в центре сенсорного поля.

Таблица 4.4 - Время жизни сети при различном количестве кластеров, когда БС находится в центре сенсорного поля и количество узлов $N = 500$

	Количество узлов $N = 500$, БС находится в центре сенсорного поля							
K	10	18	19	20	21	22	23	24
Время жизнь (раунд)	4476	4575	4574	4547	4565	4587	4557	4540

Кроме того, в табл. 4.5 видно, что при количестве узлов 1000 и расположении БС в центре сенсорного поля оптимальное число кластеров равно 31.

Таблица 4.5 - Время жизни сети при различном количестве кластеров, когда БС находится в центре сенсорного поля и количество узлов $N = 1000$

	Кол-во узлов $N = 1000$, БС находится в центре сенсорного поля					
K	28	29	30	31	32	33
Время жизнь (раунд)	4548	4555	4560	4580	4577	4559

С целью получения информации о показателях качества QoS гетерогенной БСС исследуемой в диссертации с удалённым расположением шлюза/БС, рассмотрено размещение шлюза/базовой станции в нескольких позициях, удаленных от центра сенсорного поля размером $100 \times 100 \text{ м}^2$ содержащего 100 узлов, распределенных в случайным образом. При этом время жизни сети рассчитывается в программном комплексе итеративным методом с использованием формул (3.5, 3.6) для вычисления количества затраченной энергии индивидуальными узлами. В случае, когда базовая станция расположена вне области сенсорного поля с координатами, в полтора раза превышающими длину область сенсорного поля, проведены эксперименты по расчету времени жизни сети для определения оптимального количества кластеров из разного количества кластеров (К), и получены результаты, приведенные в табл.4.6.

Таблица 4.6 - Время жизни сети при различном количестве кластеров К, когда БС находится вне области сенсорного поля и количество узлов $N = 100$

К	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Время жизнь (раунд)	4403	4397	4403	4454	4454	4343	4359	4379	4350	4360

Из табл.4.6 видно, что оптимальное число кластеров в случае, когда базовая станция находится вне области сенсорного поля, составляет 9 или 10.

Исходя из предыдущих таблиц (4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6), можно сделать вывод, что полученные результаты подтверждают эффективность формулы (3.18), представленной в п.3.3.3 третьей главы, при расчете оптимального количества кластеров в модифицированном алгоритме К-средних. Соответственно, ее можно рассматривать как критерий для определения оптимального количества кластеров.

4.3. Моделирование эффективной кластеризации НБСС с использованием модифицированного алгоритма К-средних

Для расчёта эффективной кластеризации в модели наземного сегмента БСС применяется разработанный автором *модифицированный алгоритм К-средних*, описанный в п.3.3.3. ГКУ сформированных кластеров, будут действовать как маршрутизаторы для передачи данных на наземный шлюз.

Моделирование кластеризации наземного сегмента БСС осуществляется с таким же количеством узлов, как в алгоритме *СККМ*, в п.4.1. Наземные сенсоры описываются координатами x , y и z в двумерном пространстве, изначально предполагается, что $z=0$.

В программном комплексе МГБСС проведены четыре эксперимента с различным количеством узлов (100, 250, 500, 1000) в модельном квадрате на плоскости, с изменяющимся размером площади.

Эксперимент 1

Сто узлов расположено на плоскости с размером площади равной 100×100 . Координаты вдоль границ квадрата изменяются от 0 до 99. Координаты узлов заданы случайным образом как на рис.4.7.

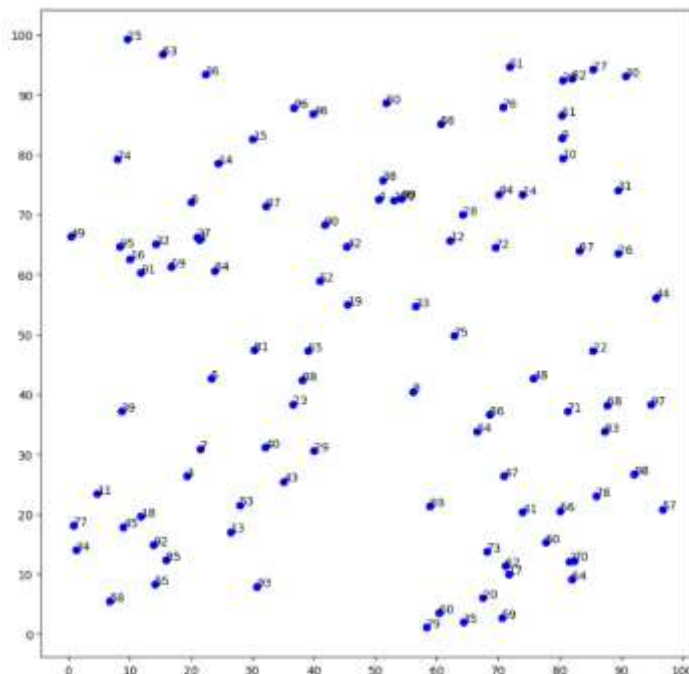


Рисунок 4.7 - Размещение 100 узлов в модельном пространстве квадрата единичной площади (координаты заданы случайным образом)

Для нахождения оптимального количества кластеров используется формула (3.18), описанная в третьей главе, п.3.3.3, как видно из рисунка 4.8, оптимальное количество кластеров равно десяти, а время, необходимое для формирования кластеров, равно 0.03 секунды.

Количество узлов $N = 100$

Необходимое время для создания кластеров = 0.03

Оптимальное количество кластеров $k = 10$

Оптимальные ГКУ:

[60, 71, 37, 14, 5, 4, 2, 52, 72, 77]

Оптимальные кластеры:

[[8, 9, 20, 26, 29, 30, 50, 60, 75, 81], [11, 23, 25, 32, 43, 66, 71, 74, 93], [3, 18, 27, 37, 41, 55, 79, 98, 99], [14, 35, 45, 51, 62, 86, 89, 95], [0, 5, 13, 15, 24, 31, 36, 48, 68, 73, 83, 90, 94], [4, 38, 64, 80, 87], [2, 6, 10, 17, 33, 44, 54, 57, 76, 84, 91], [12, 22, 28, 39, 42, 52, 92], [16, 19, 34, 49, 58, 59, 61, 63, 72, 78, 88], [1, 7, 21, 40, 46, 47, 53, 56, 65, 67, 69, 70, 77, 82, 85, 96, 97]]

Стоимость: 0.02

Рисунок 4.8 - Результаты процесса кластеризации (эксперимент №1)

Кроме того, на рис.4.8 приведена матрица узлов входящих в сформированные кластеры, со стоимостью полученного распределения данной кластеризации, равной 0.02. Каждый кластер содержит порядковый номер принадлежащих ему узлов. В матрице ГКУ приведены номера

узлов, определённых как ГКУ, например, узел 60 является ГКУ первого кластера, а узел 71 - ГКУ второго кластера. На рис.4.9. приведена визуализация полученного распределения, показывающая связь ГКУ с входящими в кластер узлами.

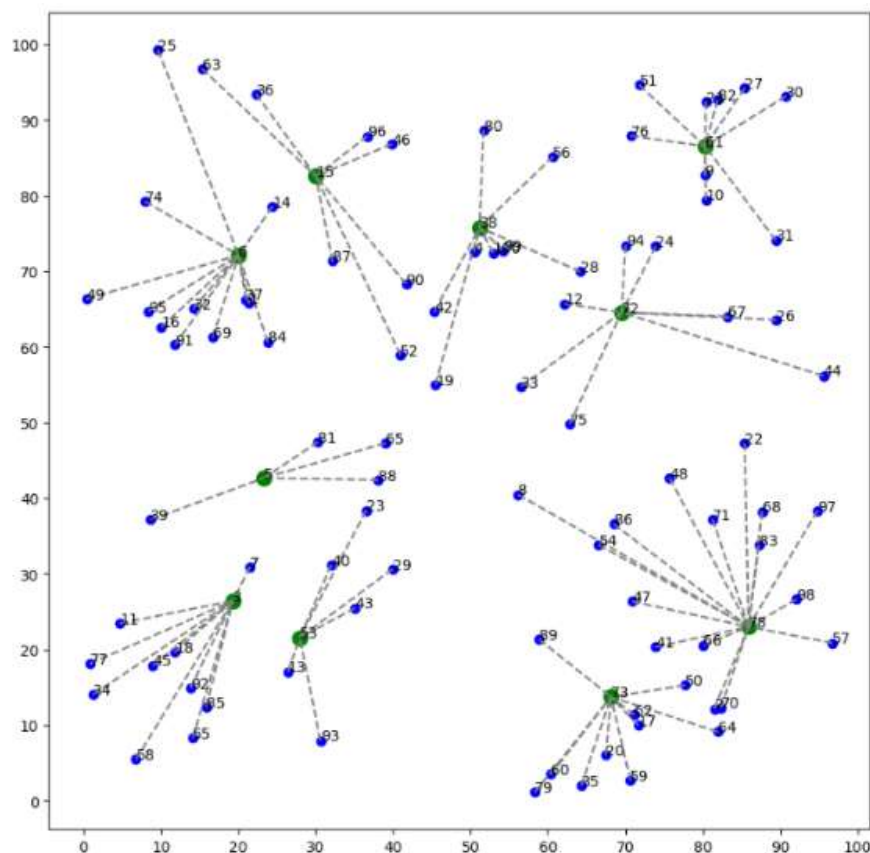


Рисунок 4.9 - Визуализация распределения 100 узлов по кластерам (эксперимент №1)

Эксперимент 2

Во втором эксперименте задействовано 250 узлов, со случайным распределением узлов на плоскости с размерами в 1,6 раза превышающую для эксперимента 1.

На рис. 4.10 показано, что оптимальное количество кластеров равно пятнадцати, время, необходимое для формирования кластеров, составляет 0,06 секунды.

```

Количество узлов N = 250
Необходимое время для создания кластеров = 0.06

Оптимальное количество кластеров k = 15

Оптимальные ГКУ:
[151, 44, 51, 246, 35, 205, 121, 6, 83, 72, 63, 172, 233, 33, 78]

```

Рисунок 4.10 - Результаты процесса кластеризации (эксперимент №2)

На рис.4.11. приведена визуализация полученного распределения, показывающая связь ГКУ с входящими в кластер узлами.

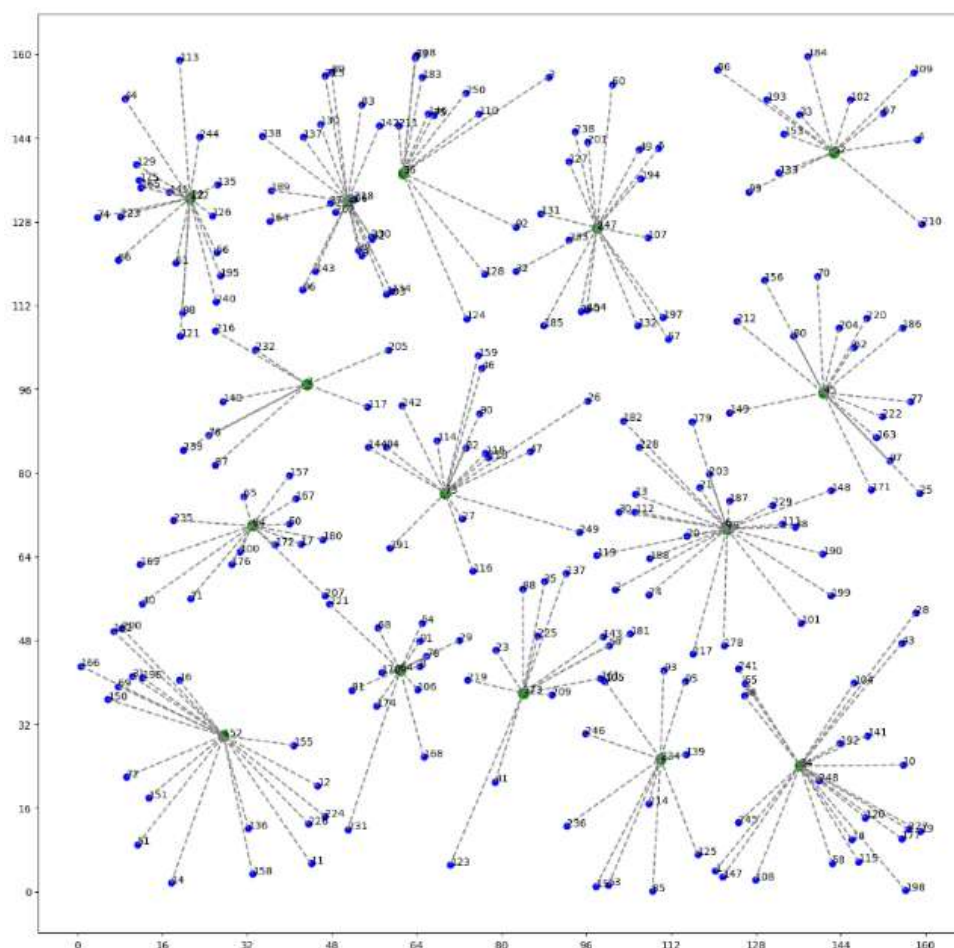


Рисунок 4.11 - Визуализация распределения 250 узлов по кластерам (эксперимент №2)

Эксперимент 3

В третьем эксперименте задействовано 500 узлов, расположенных случайным образом на заданной площади 220*220.

В результате кластеризации, оптимальное количество кластеров K равно двадцати двум. Время, необходимое для формирования кластеров, составляет 0,09 секунды как показано на рис. 4.12.

Количество узлов $N = 500$

Необходимое время для создания кластеров = 0.09

Оптимальное количество кластеров $k = 22$

Оптимальные ГКУ:

[464, 278, 109, 352, 95, 451, 148, 329, 428, 350, 173, 59, 375, 108, 146, 279, 376, 366, 154, 89, 16, 495]

Рисунок 4.12 - Результаты процесса кластеризации (эксперимент №3)

На рис.4.13. приведена визуализация полученного распределения, показывающая связь ГКУ с входящими в кластер узлами.

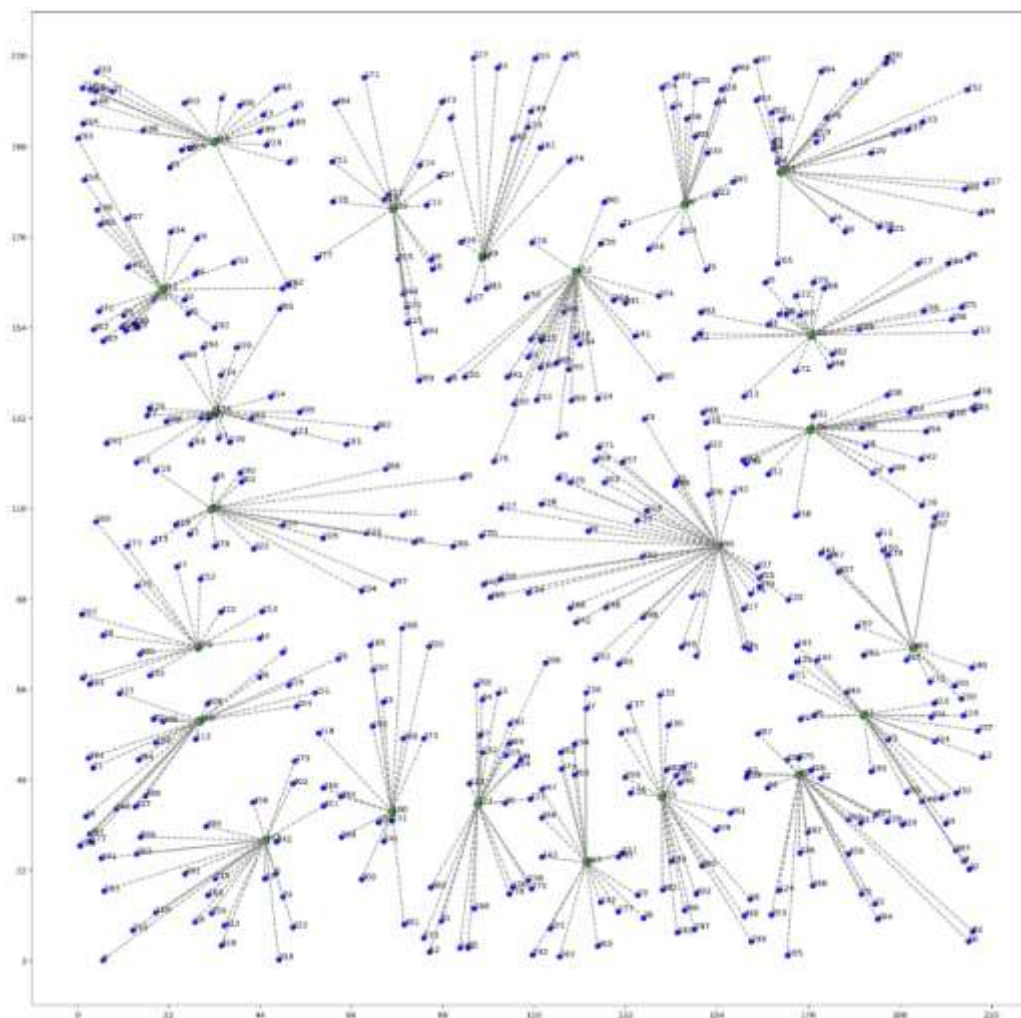


Рисунок 4.13 - Визуализация распределения 500 узлов по кластерам (эксперимент №3)

Эксперимент 4

В четвертом эксперименте задействовано 1000 узлов на заданной площади 320*320.

По результатам кластеризации оптимальное количество кластеров K равно тридцати одному. Время, необходимое для формирования кластеров, составляет 0,28 секунды как показано на рис. 4.14.

Количество узлов $N = 1000$

Необходимое время для создания кластеров = 0.28

Оптимальное количество кластеров $k = 31$

Оптимальные ГКУ:

[721, 711, 359, 821, 892, 416, 270, 905, 596, 302, 347, 369, 565, 537, 901, 204, 490, 918, 303, 583, 343, 998, 288, 931, 119, 189, 67, 472, 670, 781, 731]

Рисунок 4.14 - Результаты процесса кластеризации (эксперимент №4)

На рис.4.15. приведена визуализация полученного распределения, показывающая связь ГКУ с входящими в кластер узлами.

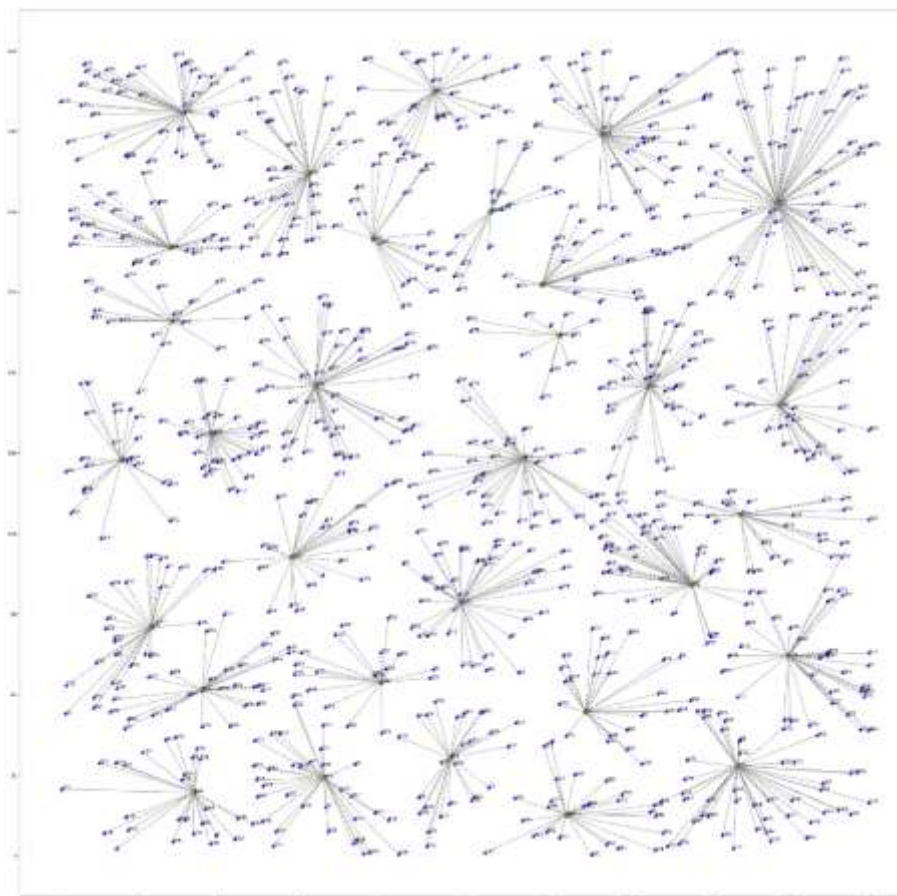


Рисунок 4.15 - Визуализация распределения 1000 узлов по кластерам (эксперимент №4)

Таблица 4.7 - Результаты экспериментов по эффективной кластеризации при нахождении шлюза/БС внутри сенсорного поля

№	Количество узлов (N)	Длина квадратного наземного поля, м	Время работы ПК (t), сек	Количество кластеров (K)
1	100	100	0,03	10
2	250	160	0,06	15
3	500	220	0,09	22
4	1000	320	0,28	31

В таб.4.7 приведены результаты экспериментов с различным количеством узлов в сенсорном поле. Для каждой зоны покрытия найдено оптимальное количество кластеров, определены узлы, принадлежащие каждому кластеру.

Таким образом, как следует из таблицы 4.7, проведенные эксперименты показали, что использование модифицированного алгоритма К-средних для кластеризации различного количества узлов наземного сегмента БСС дает адекватные результаты, показывающие что при увеличении числа узлов на увеличивающейся площади зоны покрытия, при, в основном, сохраняющейся топологии сети, размеры кластеров по количеству входящих узлов не слишком отличаются, что приводит к закономерному постепенному увеличению количества кластеров.

4.4. Сравнение алгоритма обучения сети Кохонена с Конструктивным методом и модифицированного алгоритма К-средних

В ходе экспериментов, проведенных на модифицированном алгоритме К-средних и сети Кохонена с Конструктивным методом для групп с различным количеством узлов, отмечается, что сеть Кохонена с Конструктивным методом не удалось определить оптимальное количество кластеров, в то время как модифицированный алгоритм К-средних смог найти оптимальное количество кластеров. Кроме того, выяснилось, что модифицированный алгоритм К-средних быстрее, чем сеть Кохонена, формирует кластеры. Поэтому в качестве механизма кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети в данной работе был принят модифицированный алгоритм К-средних, использующийся в качестве первого этапа процесса маршрутизации/передачи данных на наземный шлюз.

Эксперименты по моделированию методов кластеризации и маршрутизации проводились на персональном компьютере со следующими характеристиками: процессор - intel Core 3-2328M, 2.2 ГГц; оперативная память - 8ГБ; операционная система - Windows 11 Pro 64-bit. Программы разрабатывались в среде Python, с использованием библиотек Pandas, NumPy, Sklearn, Matplotlib, ipywidgets.

4.5. Модельные эксперименты маршрутизации данных в НБСС с помощью нейронной сети Хопфилда

В первом варианте компьютерного эксперимента в рамках программного комплекса МГБСС, для реализации маршрутизации данных к наземному шлюзу, используется протокол *КмHNNSP* который описан в третьей главе, п. 3.3.5, комбинирующий модифицированный алгоритм К-средних с нейронной сетью Хопфилда в НБСС для поиска кратчайшего пути между *всеми* узлами получающихся ГКУ. Проведено моделирование процесса маршрутизации данных в наземном сегменте БСС с входными данными, содержащими информации о ГКУ, полученными по результатам моделирования с помощью, модифицированного алгоритме К-средних (п.4.2). Механизм маршрутизации реализуется относительно местоположения датчиков и наземного шлюза, описываемого координатами x , y и z в двумерном пространстве, первоначально принимая $z = 0$. В подсистеме «Кластеризация» ПК МГБСС проведены четыре эксперимента с различным количеством узлов (100, 250, 500, 1000) в модельном квадрате на плоскости разных размеров ($100*100 \text{ м}^2$, $160*160 \text{ м}^2$, $220*220 \text{ м}^2$, $320*320 \text{ м}^2$). Наземный шлюз размещен в точке с координатами ($x=200$, $y=200$) для всех экспериментов.

Эксперимент 1

В программный блок с реализацией сети Хопфилда, в автоматическом режиме, передаются координаты ГКУ, полученные в эксперименте 1, приведенные на рис. 4.8 с результатами кластеризации и рис. 4.9 с визуализацией распределения 100 узлов по кластерам. Место расположения наземного шлюза - с координатами (200, 200). Результаты расчета маршрутизации данных через ГКУ определённые с помощью НС Хопфилда приведены на рис. 4.16.

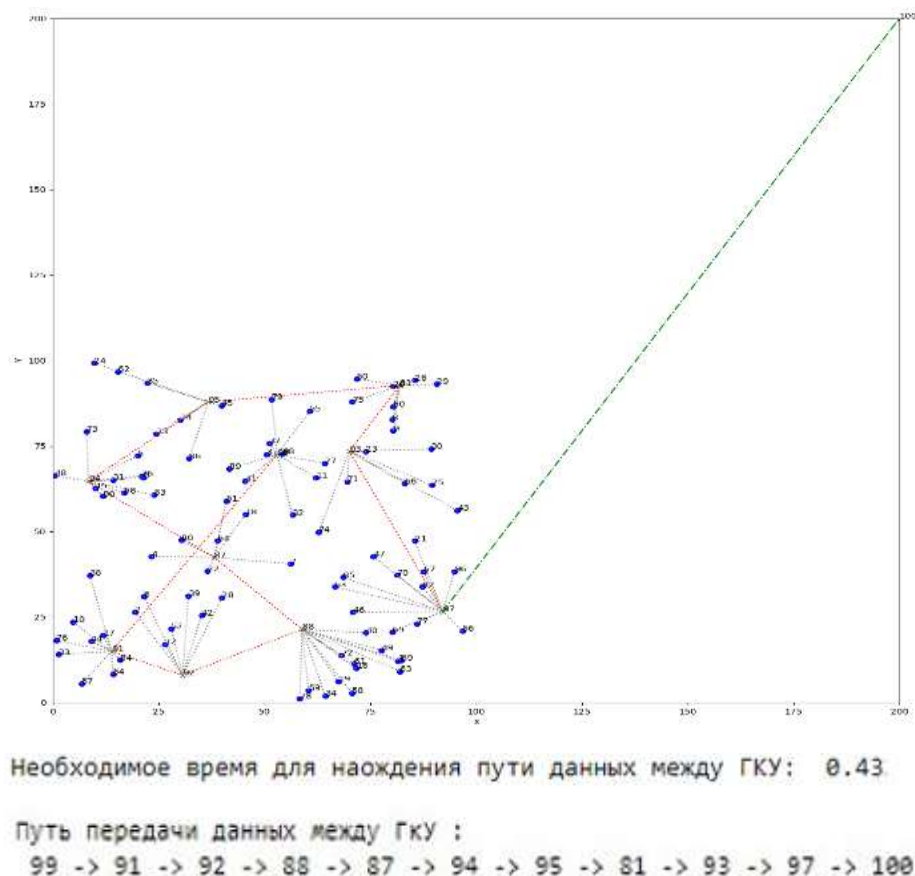


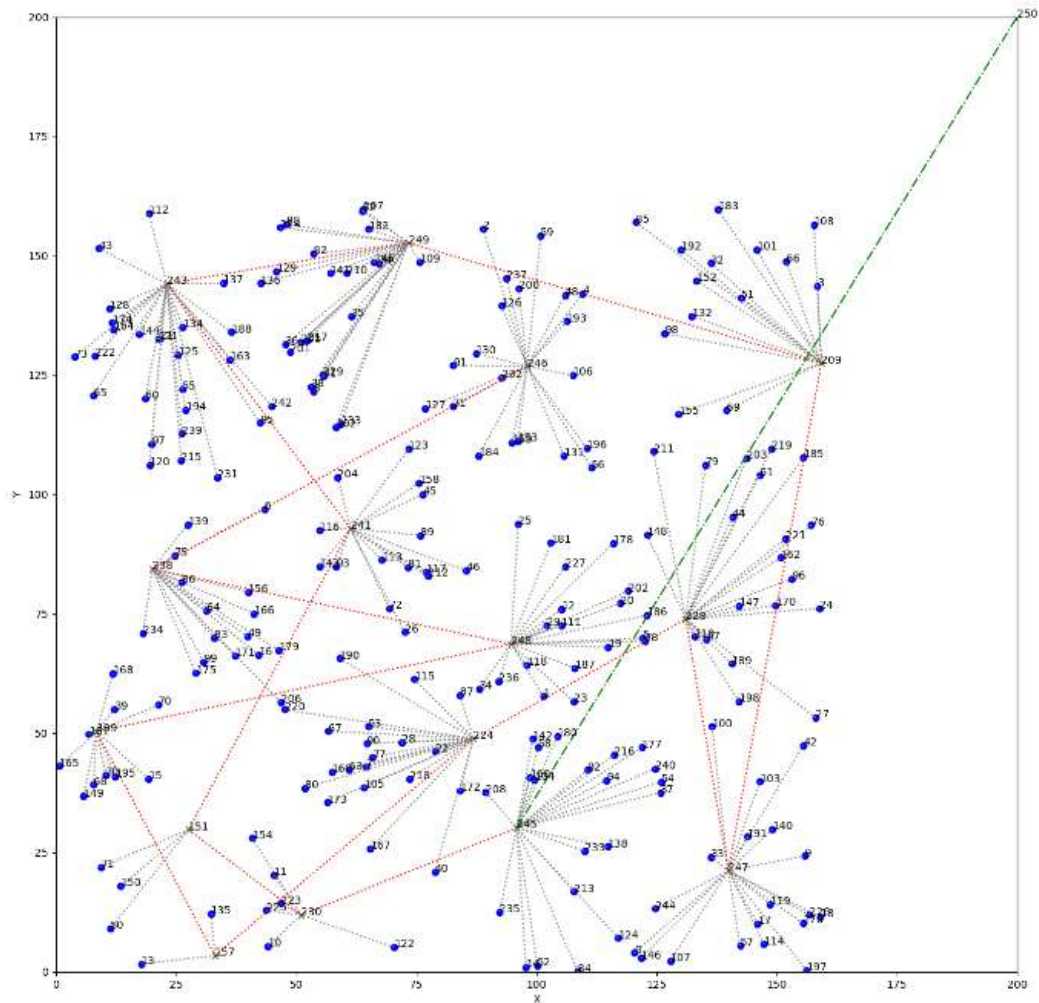
Рисунок 4.16 - Визуализация пути передачи данных (эксперимент №1)

На рис. 4.16, серые линии представляют собой путь передачи данных от датчиков к их ГКУ, красные линии - путь передачи данных между ГКУ, а зеленая линия - путь передачи данных от ГКУ к наземному шлюзу. Время нахождения пути составляет 0,43 секунды.

Эксперимент 2

Во втором эксперименте задействовано 250 узлов на плоскости с размерами в 1,6 раза превышающую для эксперимента 1 как показано в п.4.2.

Результат применения алгоритма маршрутизации с использованием нейронной сети Хопфилда представлен на рис. 4.17, где для каждого узла ГКУ найден соседний узел ГКУ для передачи данных. Время нахождения пути составляет 1,04 секунду.



необходимое время для нахождения пути данных между ГКУ: 1.04:

Путь передачи данных между ГКУ :

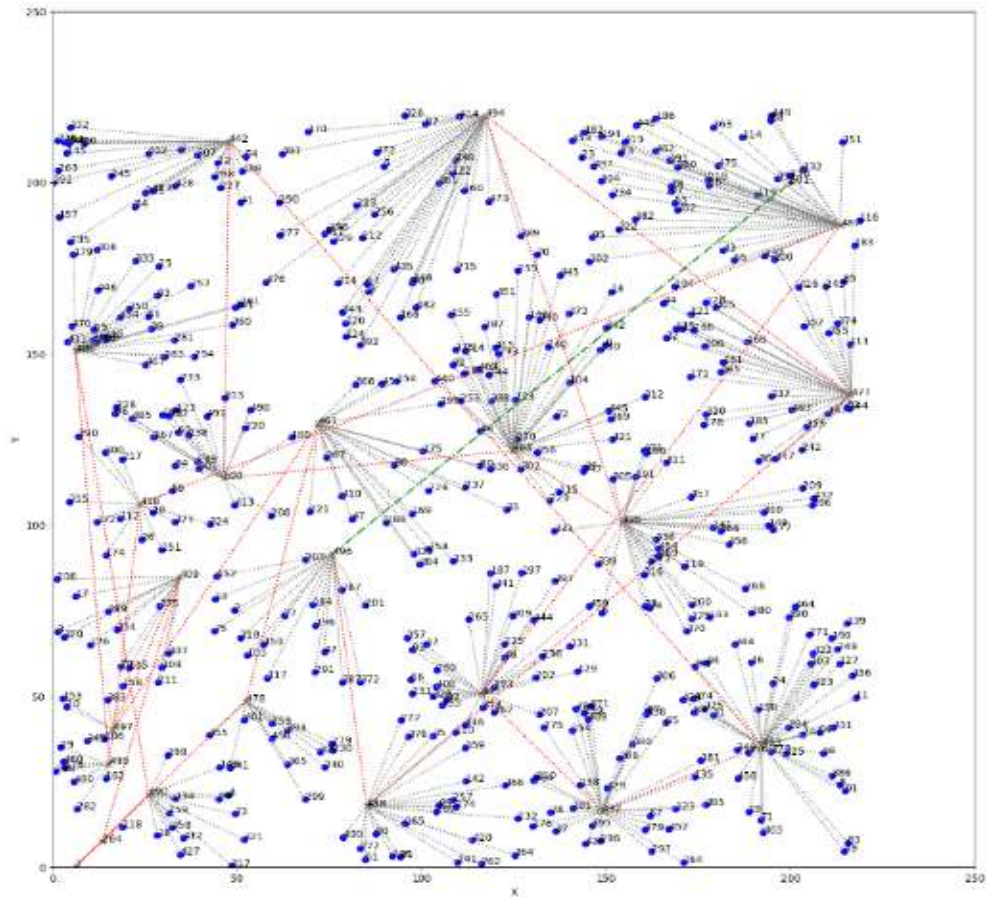
245 -> 230 -> 151 -> 241 -> 243 -> 249 -> 209 -> 247 -> 228 ->
224 -> 157 -> 199 -> 248 -> 238 -> 246 -> 250

Рисунок 4.17 - Визуализация пути передачи данных (эксперимент №2)

Эксперимент 3

В третьем эксперименте задействовано 500 узлов, случайным образом распределенных в заданной области 220*220, как показано в п.4.2.

Результат применения алгоритма маршрутизации с использованием нейронной сети Хопфилда представлен на рис. 4.18, где для каждого узла ГКУ найден следующий узел ГКУ для передачи данных. Время нахождения пути составляет 4,64 секунды.



Необходимое время для нахождения пути данных между ГКУ: 4.64

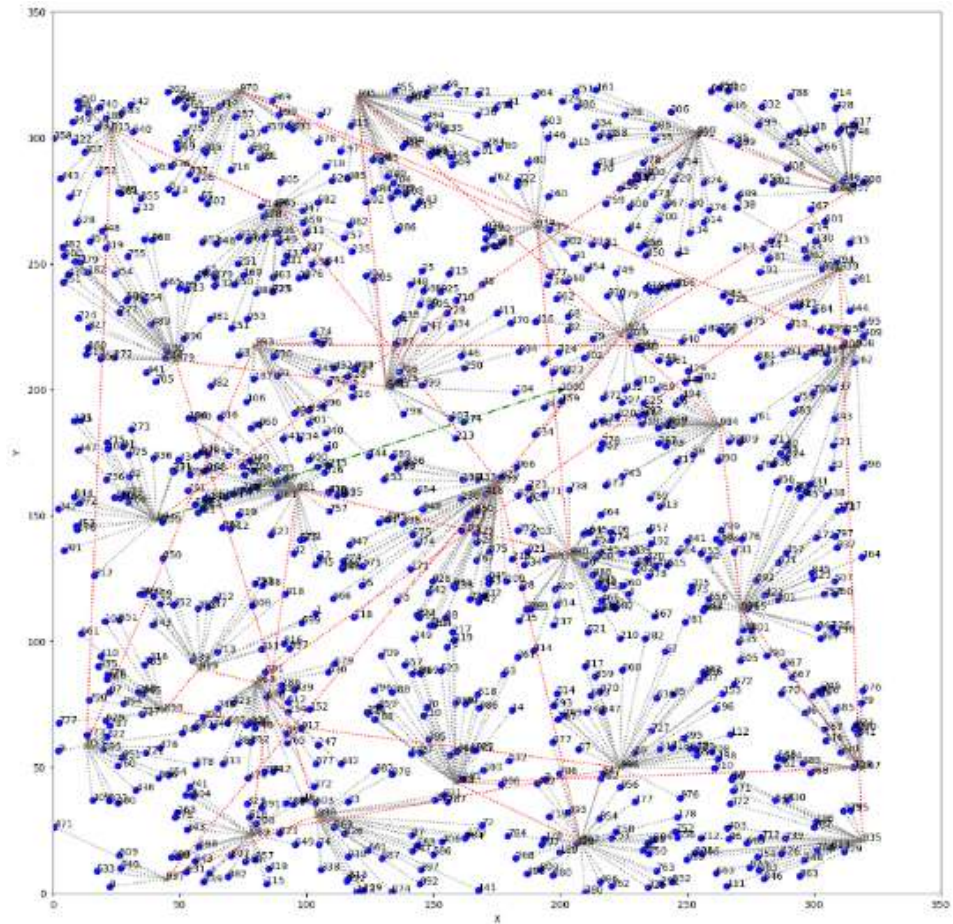
Путь передачи данных между Гку :

496 -> 488 -> 477 -> 494 -> 495 -> 468 -> 500 -> 442 -> 493 ->
 492 -> 481 -> 487 -> 418 -> 499 -> 486 -> 490 -> 7 -> 478 -> 461
 -> 497 -> 409 -> 264 -> 500

Рисунок 4.18 - Визуализация пути передачи данных (эксперимент №3)

Эксперимент 4

В четвертом эксперименте задействовано 1000 узлов на площади 320*320 как в п.4.2. Результат применения алгоритма маршрутизации с использованием нейронной сети Хопфилда представлен на рис. 4.19, где для каждого узла ГКУ найден следующий узел ГКУ для передачи данных. На рис. 4.19 визуализирован путь передачи данных между узлами ГКУ. Время нахождения пути составляет 14,54 секунды.



Необходимое время для нахождения пути данных между ГКУ: 14.54

Путь передачи данных между ГКУ :

994 -> 959 -> 957 -> 974 -> 997 -> 998 -> 979 -> 941 -> 995 ->
 984 -> 991 -> 967 -> 988 -> 987 -> 999 -> 965 -> 915 -> 953 ->
 993 -> 908 -> 970 -> 934 -> 990 -> 981 -> 989 -> 996 -> 898 ->
 919 -> 963 -> 939 -> 935 -> 1000

Рисунок 4.19 - Визуализация пути передачи данных (эксперимент №4)

В табл.4.8 приведены результаты экспериментов протокола *KmHNNSP* в НБСС, где каждая цифра в пути передачи данных представляет собой порядковый номер узла ГКУ.

Таблица 4.8 - Результаты экспериментов по передаче данных с протоколом *KmHNNSP* в НБСС

№ экс.	Время работы ПК (t), сек	Путь передачи данных между всеми ГКУ
1	0,43	99 -> 91 -> 92 -> 88 -> 87 -> 94 -> 95 -> 81 -> 93 -> 97 -> 100
2	1,04	245 -> 230 -> 151 -> 241 -> 243 -> 249 -> 209 -> 247 -> 228 -> 224 -> 157 -> 199 -> 248 -> 238 -> 246 -> 250
3	4,64	496 -> 488 -> 477 -> 494 -> 495 -> 468 -> 500 -> 442 -> 493 -> 492 -> 481 -> 487 -> 418 -> 499 -> 486 -> 490 -> 7 -> 478 -> 461 -> 497 -> 409 -> 264 -> 500

Таблица 4.8 - продолжение

№ экс.	Время работы ПК (t), сек	Путь передачи данных между всеми ГКУ
4	14,54	994 -> 959 -> 957 -> 974 -> 997 -> 998 -> 979 -> 941 -> 995 -> 984 -> 991 -> 967 -> 988 -> 987 -> 999 -> 965 -> 915 -> 953 -> 993 -> 908 -> 970 -> 934 -> 990 -> 981 -> 989 -> 996 -> 898 -> 919 -> 963 -> 939 -> 935 -> 1000

В результате завершения маршрутизации в сегменте НБСС пакет с агрегированными данными инкапсулируется в наземном шлюзе, после чего происходит отправка полученных данных с наземного шлюза на ближайший БПЛА в летающей сети в пакете "ДАННЫЕ" в последовательные моменты времени как показано на рис.4.20.

1	2	3	4	5	6
11	наземный шлюз (100)	БПЛА (UAV3)	1	-	Агрегированные данные

а)

1	2	3	4	5	6
11	наземный шлюз (100)	БПЛА (UAV0)	1	-	Агрегированные данные

б)

Рисунок 4.20 - Структура пакета данных, передаваемого с наземного шлюза на ближайший БПЛА в два момента времени: а) в момент времени t_0 , б) в момент времени t_1 .

Первое поле в структуре пакета представляет собой порядковый номер пакета, второе - адрес отправителя, третье - адрес получателя, четвертое - тип отправляемого пакета, пятое - тип отправляемых команд, но в примере командный пакет отсутствует, следовательно, данное поле не учитывается, и шестое - собственно отправляемые данные.

4.6. Модельные эксперименты маршрутизации БПЛА с помощью генетического алгоритма

Модель гетерогенной БСС применяется и исследуется для горной сельскохозяйственной территории в Сирии с размерами $S_1=(5*5)= 25 \text{ км}^2$ и с «коридором» для БПЛА S_2 длиной $L = 20 \text{ км}$, $D = 6 \text{ км}$ в слое над землёй высотой между 500 и 600 м.

Поскольку расчет маршрута в рое БПЛА, а следовательно, и ближайшего беспилотника к шлюзу происходит очень быстро, за сотые доли секунды, процесс маршрутизации в рое запускается сразу, после капсулирования пакета с агрегированными данными в наземном шлюзе.

Проведено исследование маршрутизация в рое 10 БПЛА, случайно распределенных в трехмерном коридоре заданного объема, как показано на рис.4.21, с ограничениями, описанными в статье с помощью генетического алгоритма.

Рой БПЛА:					Рой БПЛА:				
	Name	X	Y	Z		Name	X	Y	Z
0	UAV0	7.751633	5.715294	0.571667	0	UAV0	0.951263	0.018498	0.571667
1	UAV1	11.368178	4.463166	0.595000	1	UAV1	2.465868	1.290249	0.570000
2	UAV2	8.742965	5.745215	0.516000	2	UAV2	4.804845	2.282044	0.578000
3	UAV3	2.112382	5.815435	0.510000	3	UAV3	6.212491	3.683365	0.550000
4	UAV4	9.184689	3.875214	0.589000	4	UAV4	8.490468	4.759797	0.582000
5	UAV5	17.085356	5.038679	0.546000	5	UAV5	10.043892	5.008226	0.530000
6	UAV6	7.845376	4.100961	0.529000	6	UAV6	12.774707	1.129034	0.563000
7	UAV7	17.431422	2.032484	0.530000	7	UAV7	14.130625	2.983399	0.517000
8	UAV8	4.157236	5.877046	0.572000	8	UAV8	16.988485	4.568070	0.557000
9	UAV9	15.685338	5.712699	0.574000	9	UAV9	18.495587	3.978519	0.513000

Рисунок 4.21 - Координаты роя БПЛА в модельном пространстве а) при t_0 , б) при t_1

Модельные эксперименты проводились в два последовательных момента времени t_0 , t_1 , во время которых БПЛА изменили свои местоположения. На основании этой информации рассчитывается матрица расстояний между БПЛА, содержащая 40 неповторяющихся значений.

Затем рассчитывается матрица стоимости, используемая в функции пригодности после применения штрафа, указанного в формуле (3.30), где штраф составляет 100 как показано на рис 4.22.

Матрица стоимости:					Матрица стоимости:				
[[0.	100.	0.99334476	100.	100.	[[0.	1.97772172	100.	100.	100.
100.	1.61761547	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
[100.	0.	100.	100.	100.	[1.97772172	0.	100.	100.	100.
100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
[0.99334476	100.	0.	100.	1.92285047	[100.	100.	0.	1.98644136	100.
100.	1.87334145	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
[100.	100.	100.	0.	100.	[100.	100.	1.98644136	0.	100.
100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
[100.	100.	1.92285047	100.	0.	[100.	100.	100.	100.	0.
100.	1.35952985	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
[100.	100.	100.	100.	100.	[100.	1.57402244	100.	100.	100.
0.	100.	100.	100.	1.55407132]	[100.	100.	100.	100.	1.57402244
[1.61761547	100.	1.87334145	100.	1.35952985	[100.	100.	100.	100.	100.
100.	0.	100.	100.	100.	100.	0.	100.	100.	100.
[100.	100.	100.	100.	100.	[100.	100.	100.	100.	100.
100.	100.	0.	100.	100.	100.	100.	0.	100.	100.
[100.	100.	100.	100.	100.	[100.	100.	100.	100.	100.
100.	100.	100.	0.	100.	100.	100.	100.	0.	1.61890785]
[100.	100.	100.	100.	100.	[100.	100.	100.	100.	100.
100.	100.	100.	100.	0.	100.	100.	100.	1.61890785	0.
1.55407132	100.	100.	100.	0.]	100.	100.	100.	0.]]

Рисунок 4.22 - Матрица стоимости а) при t_0 , б) при t_1

Для нахождения кратчайшего пути между источником и шлюзом применен генетический алгоритм, работающий в течение 1000 поколений, а используемая начальная популяция состоит из 10 хромосом. Поскольку рабочая среда является динамичной и изменяющейся, формирование хромосом вручную нецелесообразно. Авторами разработана программа, формирующая хромосомы автоматически. На рис. 4.23. приведены последовательности генов в каждой из 10 хромосом, а также рассчитаны функция пригодности для каждой хромосомы в начальных популяциях в момент времени t_0 и t_1 .

<pre> ===== Начальная популяция: ===== [3, 8, 2, 0, 6, 1, 7, 9, 4, 5] 702.61 [3, 8, 1, 9, 7, 4, 2, 6, 0, 5] 605.41 [3, 1, 9, 4, 2, 8, 0, 6, 7, 5] 703.54 [3, 4, 0, 9, 8, 6, 7, 2, 1, 5] 900.0 [3, 0, 9, 6, 4, 1, 2, 8, 7, 5] 801.35 [3, 7, 6, 2, 9, 0, 8, 1, 4, 5] 801.87 [3, 6, 1, 7, 9, 0, 8, 2, 4, 5] 801.92 [3, 2, 6, 7, 1, 9, 0, 8, 4, 5] 801.87 [3, 2, 4, 6, 0, 1, 7, 8, 9, 5] 506.45 [3, 8, 4, 2, 6, 0, 1, 7, 9, 5] 506.96 </pre>	<pre> ===== Начальная популяция: ===== [0, 5, 2, 3, 1, 4, 6, 8, 7, 9] 801.98 [0, 3, 7, 1, 4, 8, 6, 5, 2, 9] 900.0 [0, 4, 6, 8, 3, 5, 7, 1, 2, 9] 900.0 [0, 5, 6, 1, 3, 7, 8, 2, 4, 9] 900.0 [0, 4, 5, 8, 2, 3, 1, 7, 6, 9] 703.56 [0, 6, 4, 7, 5, 8, 2, 1, 3, 9] 900.0 [0, 4, 5, 7, 1, 6, 2, 3, 8, 9] 605.17 [0, 8, 5, 2, 1, 6, 3, 7, 4, 9] 900.0 [0, 7, 3, 6, 2, 1, 4, 5, 8, 9] 703.19 [0, 1, 7, 8, 5, 6, 4, 2, 3, 9] 703.96 </pre>
а)	б)

Рисунок 4.23 - Формирование начальной популяции из 10 хромосом
а) начальная популяция при t_0 , б) начальная популяция при t_1

В процессе работы алгоритма в каждом поколении получены функции пригодности маршрутов и на их основе найдены лучшие хромосомы в популяциях. В результате работы алгоритма в момент времени t_0 получена лучшая хромосома/кратчайший путь {3,4,6,2,9,5}, которая состоит из последовательности индексов БПЛА, составляющих путь, т.е. 3 – индекс БПЛА, который равен UAV3 и 4 – индекс БПЛА, который равен UAV4 и т.д. UAV3 — это ближайший БПЛА к наземному шлюзу, а UAV5 — ближайший БПЛА к базовой станции. Также, в момент времени t_1 получена лучшая хромосома/кратчайший путь {0,2,3,4,9}, как показано на рис.4.24.

<pre> ===== Решение: [3, 4, 6, 2, 9, 5] ===== Пригодность: 204.78694261244175 Время нахождения пути данных: 0.0129 Маршрут: UAV3 -> UAV4 -> UAV6 -> UAV2 -> UAV9 -> UAV5 </pre>	<pre> ===== Решение: [0, 2, 3, 4, 9] ===== Пригодность: 301.9864413584731 Время нахождения пути данных: 0.018 Маршрут: UAV0 -> UAV2 -> UAV3 -> UAV4 -> UAV9 </pre>
а)	б)

Рисунок 4.24 - Результаты генетического алгоритма и получение кратчайшего пути:
а) кратчайший маршрут при t_0 , б) кратчайший маршрут при t_1

Маршрут интегрированного пакета с данными, полученными от наземной сети, начинается от шлюза (0, 0, 0), который передает данные в ближайший БПЛА (UAV3 в момент времени t_0 и UAV0 в момент t_1) и последовательно до узла (UAV5 в момент времени t_0 и UAV9 в момент времени t_1), который передает данные на базовую станцию (20, 06, 0), как показано на рис.4.25. Необходимое время нахождения пути данных составляет 0,013 секунды в момент времени t_0 и 0,018 секунды в момент времени t_1 .

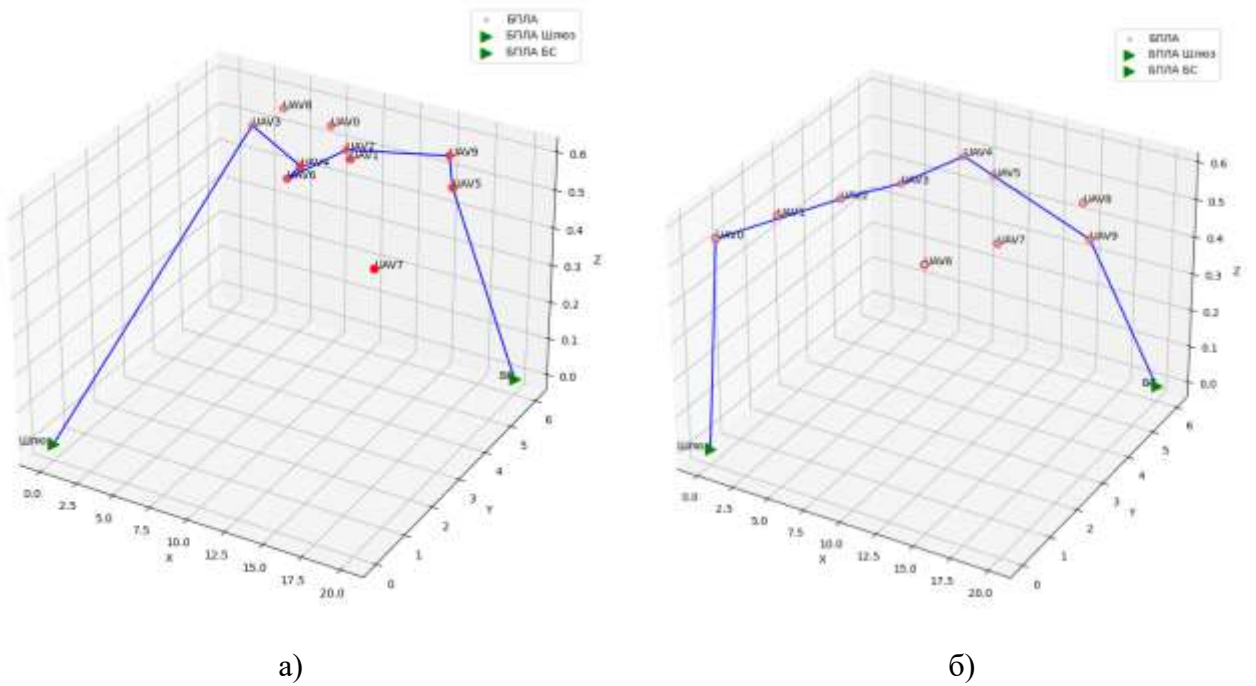


Рисунок 4.25 - Визуализация результатов маршрутизации в 3D-пространстве:

а) маршрут при t_0 , б) маршрут при t_1

На рис.4.26(а) можно наблюдать изменение эффективности функции пригодности популяции, с довольно быстрым уменьшением при изменении поколений и выходом на плато фиксированного значения, которое не меняется и при котором формируется кратчайший путь в момент времени t_0 и t_1 .

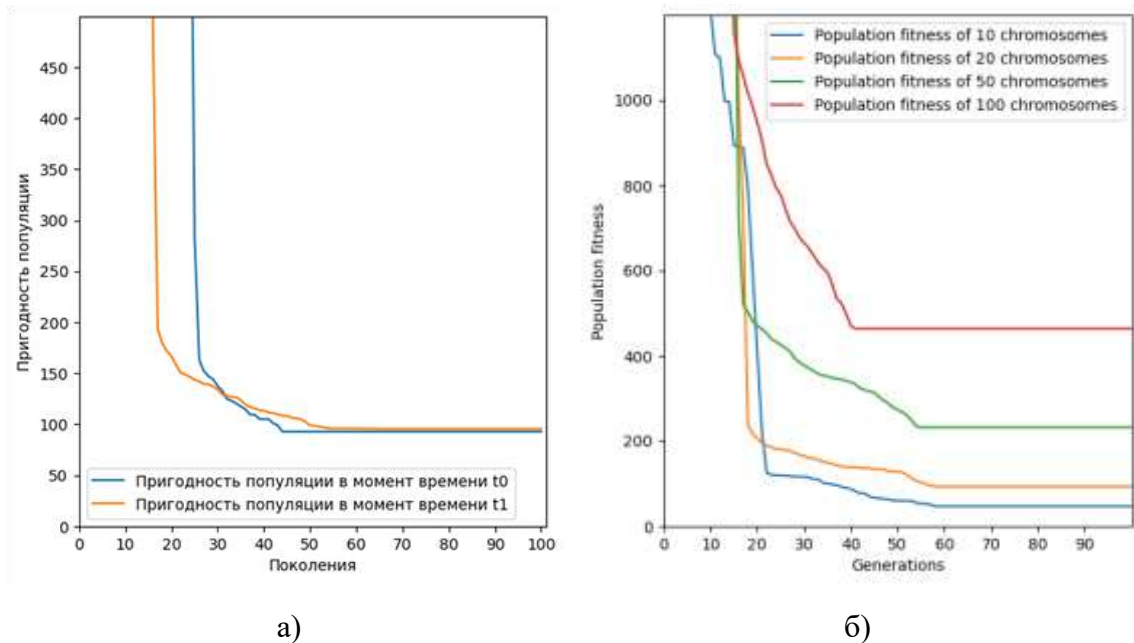


Рисунок 4.26 - Значения функции пригодности популяции в двух случаях:
а) при изменении топологии летающей сети в течение двух последовательных периодов времени t_0 и t_1 , б) при различных размерах начальной популяции

При применении генетического алгоритма к нескольким начальным популяциям, состоящим из нескольких хромосом (10, 20, 50, 100 хромосом), замечено, что чем больше размер начальной популяции (большое количество хромосом), тем быстрее находится путь данных за меньшее количество поколений, как на рис.4.26(б).

Завершающим этапом является передача данных, полученных ближайшим к БС БПЛА, на базовую станцию в пакете "ДАННЫЕ" в два последовательных момента времени как показано на рис.4.27.

12	БПЛА (UAV5)	БС	1	-	Агрегированные данные
----	-------------	----	---	---	-----------------------

а)

12	БПЛА (UAV9)	БС	1	-	Агрегированные данные
----	-------------	----	---	---	-----------------------

б)

Рисунок 4.27 - Структура пакета данных, передаваемого с БПЛА на базовую станцию в два момента времени: а) в момент времени t_0 , б) в момент времени t_1

На основе полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности применения генетического алгоритма для решения задачи маршрутизации в меняющейся динамической среде.

В итоге для различного количества наземных сенсорных узлов (100, 250, 500, 1000) в типовом квадрате на плоскости разных размеров (100*100, 160*160, 220*220, 320*320) общее время, затрачиваемое на поиск пути от наземных узлов ГКУ до базовой станции, составляет последовательность:

- В момент времени t_0 , (0.458, 1.068, 4.668, 14.568) секунд,
- В момент времени t_1 , (0.4639, 1.0739, 4.6739, 14.5739) секунд.

Таким образом, время формирования пути через *все* ГКУ для НБСС существенно превышает время формирования маршрута в рое, которое составляет сотые доли секунды.

По результатам маршрутизации с помощью генетического алгоритма идентифицированы БПЛА участвующих в процессе формирования кратчайшего пути в рое дронов. В качестве показателей эффективности использовались зона покрытия, радиус радиовидимости и местонахождение БПЛА в процессе маршрутизации. Путем расчета эффективности функции пригодности для начальной популяции в два разных периода времени t_0 и t_1 обнаружено, что поиск или формирование кратчайшего пути выполнено менее чем за 100 поколений. На основе полученных результатов можно сделать вывод о хорошей применимости генетического алгоритма для решения задачи маршрутизации в меняющейся динамической среде.

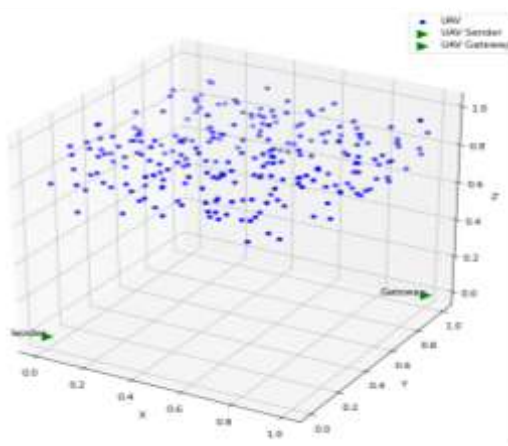
4.7. Модельные эксперименты маршрутизации для роя БПЛА с помощью комплексного алгоритма К-средних и Дейкстры

Во *втором варианте* работы программного комплекса МГБСС реализована модель маршрутизации данных от наземного шлюза к базовой станции, алгоритма поиска кратчайшего пути в рое из 250 БПЛА. В первоначальной постановке диссертационных задач предполагалось, индивидуальное исследование трафика в рое БПЛА из 250 аппаратов, с расширенной функциональностью, связанной с мониторингом экосистем, наблюдением за поверхностью с с/х объектами, аэрофотосъемки и видеосъемки различных процессов, включая рекламу, недвижимость и туризм.

Для анализа передачи получаемой информации на базовую станцию в таком рое, описываемом координатами в трёхмерном пространстве, автором предложен механизм кластеризации и маршрутизации данных с использованием методов интеллектуального анализа, в частности комплексированием модифицированного алгоритма К-средних и алгоритма Дейкстры.

Рой БПЛА моделируется как летающая сеть из 250 БПЛА в определенный период времени. В реальности не нужно такое количество БПЛА, но в этой задаче нам нужно достаточно кластеров, чтобы проверить эффективность механизма маршрутизации в этой сети.

Нормальное распределение роя БПЛА в модельном кубе с относительными координатами x, y, z $(0,0,0)$, $(1,1,1)$ в слое между плоскостями $z=0.7$, $z=1$, показано на рис.4.28. Узел sender с координатами $(0,0,0)$ является передатчиком данных от наземных датчиков роя дронов, а узел Gateway с координатами $(1,1,0)$ — это шлюз, который принимает данные, отправленные от sender через сеть БПЛА, и отправляет их на базовую станцию как показано на рис.4.28(а).



а)

UAVs :				
	UAV	X	Y	Z
0	UAV1	0.075099	0.764975	0.967457
1	UAV2	0.170120	0.658262	0.776480
2	UAV3	0.364190	0.529402	0.877692
3	UAV4	0.568669	0.490616	0.866232
4	UAV5	0.468099	0.789758	0.947731
..
245	UAV246	0.779912	0.312076	0.898892
246	UAV247	0.690558	0.334108	0.992902
247	UAV248	0.764197	0.741408	0.891568
248	UAV249	0.955924	0.701235	0.886617
249	UAV250	0.637756	0.484941	0.897145

[250 rows x 4 columns]

б)

Рисунок 4.28 - Размещение роя БПЛА: а) в модельном пространстве; б) координаты БПЛА заданы случайным образом.

В результате реализации алгоритма К-средних, рой БПЛА группируется в десять кластеров, как показано на рис.4.29(а), где каждый цвет представляет кластер, а каждый знак (х) представляет центр кластера. БПЛА, играющие роль головных узлов кластера, были получены после округления значений центров кластеров, полученных после завершения процесса

кластеризации, до ближайших к ним БПЛА. Эти главные узлы: CH134, CH167, CH106, CH26, CH1123, CH158, CH225, CH63, CH109, CH154. CH167 указывает на то, что 167-й БПЛА является главным узлом или центром кластера и т. д., как на рис.4.29(б).

После определения положения ГКУ (CH), узел sender отправляет данные ближайшему главному узлу (ближайший CH), чтобы начать маршрутизацию с использованием алгоритма Дейкстры.

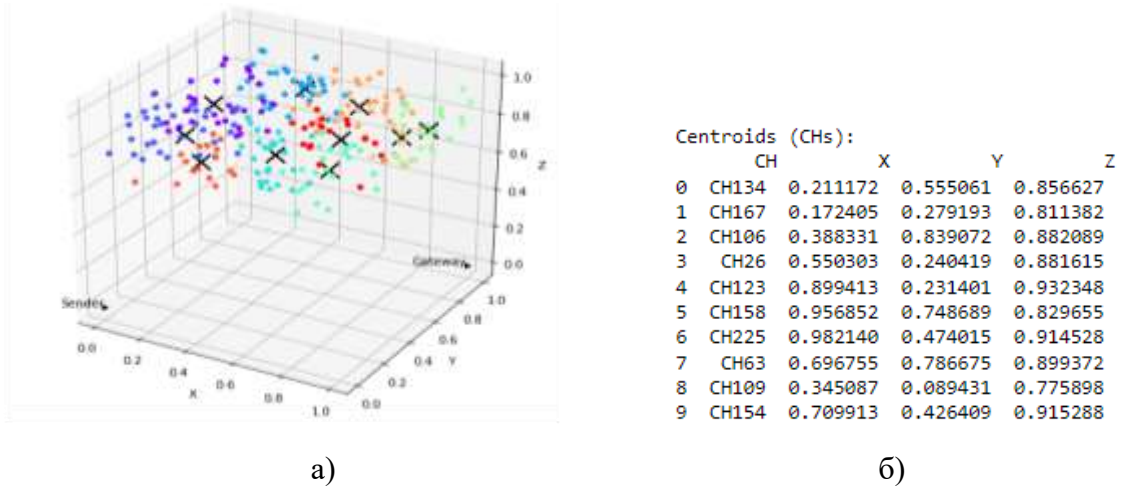


Рисунок 4.29 - Результаты применения алгоритма кластеризации К-средних: а) результат кластеризации, б) Координаты центров кластеров.

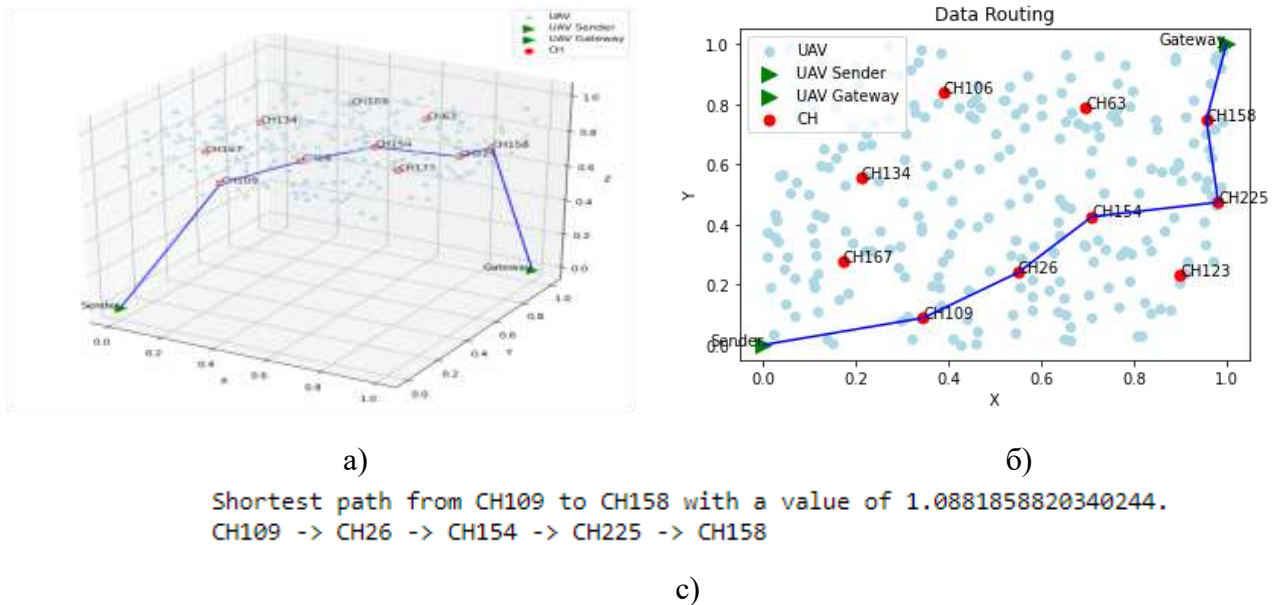


Рисунок 4.30 - Результаты применения алгоритма Дейкстры: а) путь данных через главные узлы кластера от отправителя к получателю в 3D, б) путь данных в 2D, в) кратчайший путь, полученный при применении алгоритма Дейкстры

Алгоритм Дейкстры определяет кратчайший путь между главными узлами (CH134, CH167, CH106, CH26, CH1123, CH158, CH225, CH63, CH109, CH154. CH167) как показано на рис.4.30(а,

б), и этот путь начинается от sender с координатами (0, 0, 0), который передаёт данные в свой ближайший кластер главного узла СН109, который, в свою очередь, ищет свой ближайший СН - СН26. и так далее до тех пор, пока ближайший СН не будет достигнут к шлюзу, которым является СН158, который передаёт данные на базовую станцию, поэтому путь данных через сеть БПЛА - СН126 -> СН154 -> СН225 -> СН158 как показано на рис.4.30(с), а затем передаётся данные в базовую станцию через узел Gateway с координатами (1, 1, 0).

Таким образом, проведённые эксперименты показали, что для роя БПЛА возможно использование алгоритма К-средних для кластеризации, а также нахождение кратчайшего пути через ГКУ с применением алгоритма Дейкстры без учета зоны покрытия радиосигнала для отправки данных на базовую станцию или сервер для обработки этой информации.

4.8. Сравнение протокола *KmHNNSP* с протоколами LEACH и ILEACH

Для проверки эффективности протокола *KmHNNSP* выбран один из самых популярных протоколов в беспроводных сенсорных сетях и более распространенный по сравнению с другими протоколами - протокол LEACH и также выбран современный, улучшенный протокол на основе протокола LEACH, которым является ILEACH. Сравнение между протоколами проводилось на основе характеристик, описанных в известных литературных источниках. Для моделирования протоколов задаются входные значения и используется модель энергопотребления [120], как показано в таблице 4.9. Для нейронной сети Хопфилда использовались следующие параметры μ_1 , μ_2 , μ_3 , μ_4 и μ_5 . Значение μ_1 минимизирует общую стоимость, μ_2 предотвращает включение в выбранный путь несуществующих звеньев, μ_4 предотвращает сходимость к нестабильному состоянию, μ_5 вводится для обеспечения того, чтобы исходный и конечный узлы принадлежали решению, а μ_3 — параметр, используемый для обеспечения сходимости; параметр λ определяет время вычисления нейронной сети Хопфилда НСХ до сходимости и корректность алгоритма; А, В и С - константы, регулирующие вес предыдущих входов нейронной сети Хопфилда.

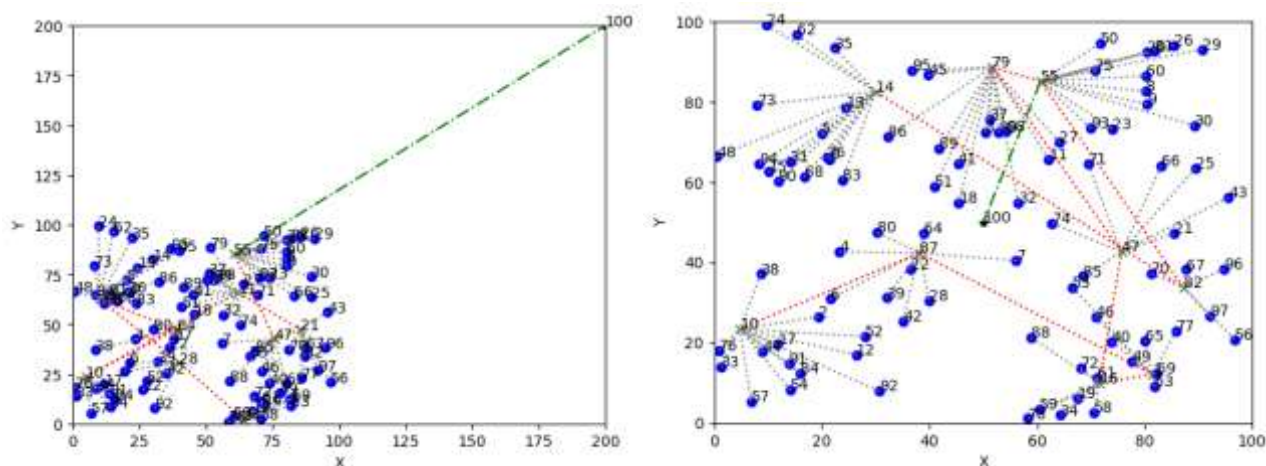
Для оценки эффективности протоколов в качестве показателей использовались время жизни сети, количество головных кластерных узлов (ГКУ), потребляемая энергия, количество пакетов к ГКУ, количество пакетов к БС и пропускная способность сети. Протоколы LEACH и ILEACH смоделированы в среде MathWorksMATLABR2019b с использованием кода, взятого с официального сайта MathWorks[143], а протокол *KmHNNSP* смоделирован в среде Anaconda на языке Python.

Протокол *KmHNNSP* реализован для передачи данных в двух ситуациях: базовая станция находится вне области БСС(а), базовая станция находится в центре области БСС (б).

Таблица 4.9 - Параметры инициализации протоколов

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Размеры наземного сенсорного поля	100 * 100 м ²	$\mu 1$	950
координаты базовой станции (БС)	x = 200 м; y = 200 м; x = 50 м; y = 50 м	$\mu 2$	2500
количество беспроводных узлов	100	$\mu 3$	1500
Радиус радиовидимости датчика	100 м	$\mu 4$	475
Начальная энергия датчиков (E_0)	2 Дж/бит	$\mu 5$	2500
Энергия передачи (E_{TX})	50 нДж/бит	A	0.0001
Энергия приёма (E_{RX})	50 нДж/бит	B	0.00001
Энергия агрегации данных (E_{DA})	5 нДж/бит	C	0.00001
ϵ_{mp} — энергия усиления в случае многолучевого демпфирования	0.0013 пикоДж/бит	λ	1
ϵ_{fs} — энергия усиления в случае свободного пространства	10 пикоДж/бит		
размер пакета данных	4000 байт		
размер пакета команд	100 байт		

В первом раунде результат передачи данных в соответствии с протоколом *KmHNNSP* приведен на рис.4.31(а,б). Здесь и на последующих рисунках «живые» узлы обозначены синим цветом, а «мертвые» - красным, цветовые обозначения линий такие-же как на рис.4.16.

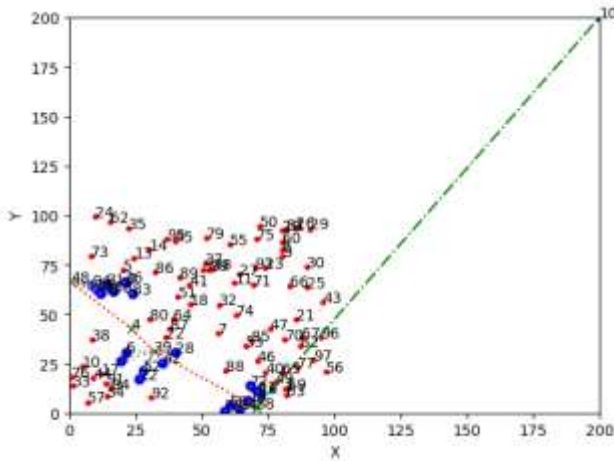


а)

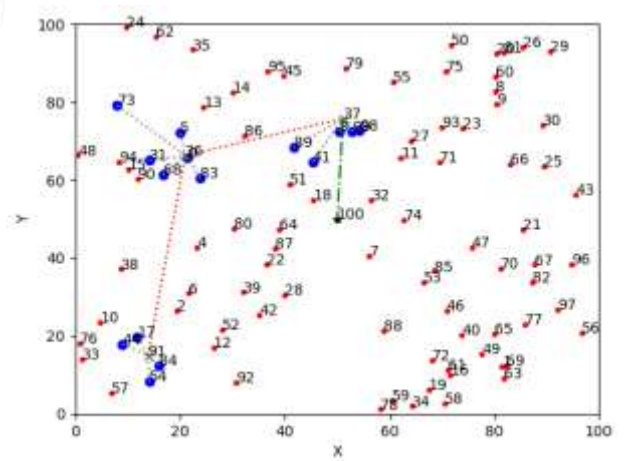
б)

Рисунок 4.31 - Путь передачи данных в протоколе *KmHNNSP* в первом раунде: а) БС находится вне области БСС; б) БС находится в центре области БСС

После значительного количества раундов начальная запасенная узлами энергия заканчивается, и узлы начинают умирать, что учитывается в протоколе *KmHNNSP*, как показано на рис.4.32(а,б).



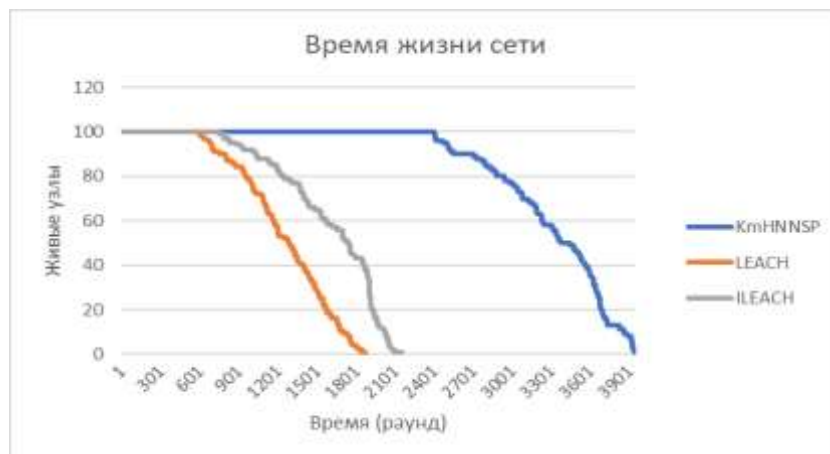
а)



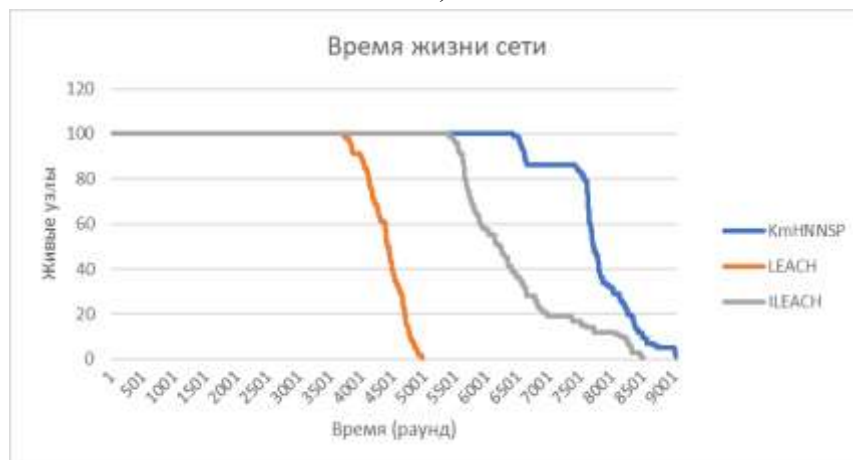
б)

Рисунок 4.32 - Поток передачи данных при гибели узлов после нескольких раундов:
а) БС находится вне области БСС; б) БС находится в центре области БСС

В результате моделирования протоколов *KmHNNSP*, LEACH и ILEACH, получены графики соотношения количества живых и мертвых узлов в раунде, как показано на рис.4.33.



а)



б)

Рисунок 4.33 - Результаты времени жизни сети для протоколов *KmHNNSP*, ILEACH и LEACH: а) БС находится вне области БСС, б) БС находится в центре области БСС

При нахождении базовой станции вне области беспроводной сенсорной сети значение времени жизни сети при использовании разработанного протокола *KmHNNSP* с учетом условий, указанных в таблице выше, составляет 3950 раунда, а при использовании протокола LEACH - 1893 раунда и протокола ILEACH - 2158 раунда. В случае, когда базовая станция находится в центре области БСС, значение времени жизни сети при использовании разработанного протокола *KmHNNSP* составляет 9050 раундов, а при использовании протокола LEACH - 4973 раунда и протокола ILEACH - 8510 раундов.

На рис.4.33 показано, что время жизни сети меньше во всех протоколах, когда базовая станция расположена вне сенсорного поля, а не внутри. Это подтверждает, что время жизни сети зависит от расположения базовой станции и расстояния между узлами и базовой станцией. Стоит отметить, что время жизни сети в разработанном протоколе значительно больше, чем в других, особенно когда базовая станция расположена за пределами сенсорного поля. Этот вывод согласуется с предложенной моделью сети.

Таким образом, в случае нахождения БС вне области БСС время жизни сети в протоколе *KmHNNSP* больше, чем в LEACH и ILEACH, так как количество отправленных пакетов на базовую станцию в первом протоколе меньше, чем во втором и третьем, и это связано с механизмом передачи пакетов на базовую станцию только через головные узлы, а не напрямую от ГКУ к базовой станции. Кроме того, период стабильности (время до гибели первого узла) в разработанном протоколе длиннее, чем в LEACH и ILEACH, и это связано с формированием кластеров и выбором ГКУ. Таким образом, разработанный протокол *KmHNNSP* балансирует энергопотребление между узлами и снижает энергопотребление и лучше согласуется с предложенной моделью гетерогенной БСС.

Также проведены эксперименты по исследованию времени жизни сети при использовании разработанного протокола *KmHNNSP* при наличии спящих узлов для различных расположений базовых станций (150,150) и (200,200) в зависимости от ее удаленности от сенсорного поля с размерами (100*100 м²), и получены результаты, приведенные в табл.4.10.

Таблица 4.10 - Время жизни (в раундах) протокола *KmHNNSP* при наличии спящих узлов для различных расположений базовых станций

Кол-во спящих узлов	Координаты БС (м)	
	(150,150)	(200,200)
Спящие узлы = 0	4341	3950
Спящие узлы = 1	4659	4209
Спящие узлы = 2	5131	4513

На рис.4.34 видно, что добавление спящих узлов значительно увеличивает время жизни сети независимо от позиционирования базовой станции.

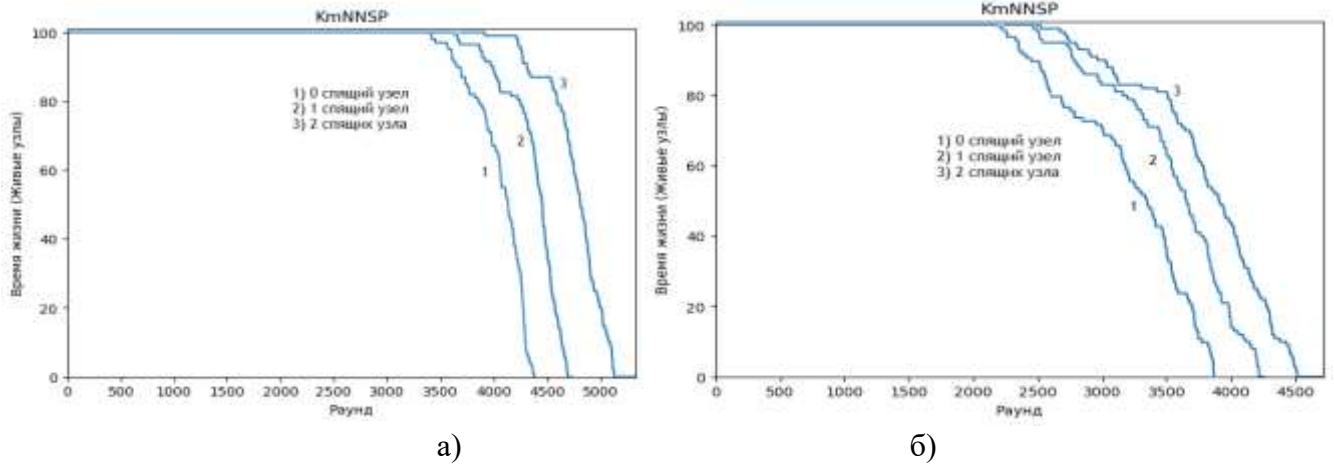


Рисунок 4.34 - Время жизни протокола *KmHNSP* при наличии спящих узлов для различных расположений базовых станций

- а) При нахождении базовой станции (150,150)
- б) При нахождении базовой станции (200,200)

На рис.4.35 показано количество головных кластерных узлов (ГКУ), полученных в двух случаях с использованием протоколов *KmHNSP*, *LEACH* и *ILEACH*.

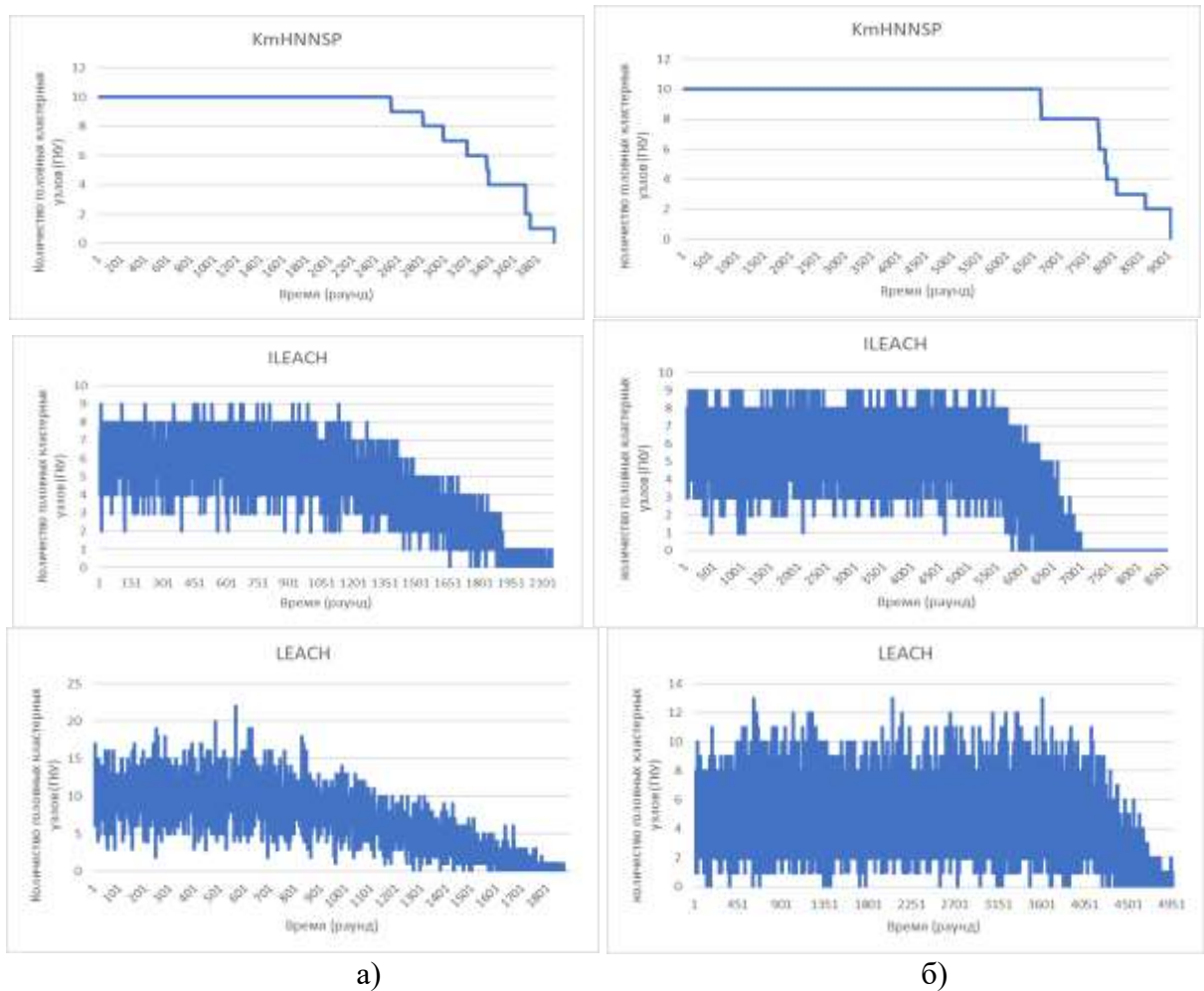


Рисунок 4.35 - Количество головных кластерных узлов (ГКУ) для протоколов *KmHNSP*, *ILEACH* и *LEACH* а) БС находится вне области БСС, б) БС находится в центре области БСС

Как видно из рис.4.35, количество ГКУ-узлов в протоколе *KmHNNSP* фиксировано, что снижает нагрузку на базовую станцию при прохождении пакетов данных. В то время как в протоколах *LEACH* и *ILEACH*, количество ГКУ-узлов изменяется в зависимости от каждого раунда, может быть получено большое количество ГКУ-узлов в протоколе *LEACH*, что увеличивает нагрузку на базовую станцию. Во всех протоколах количество ГКУ-узлов уменьшается с течением времени (раундов) в результате уменьшения количества работающих (живых) узлов.

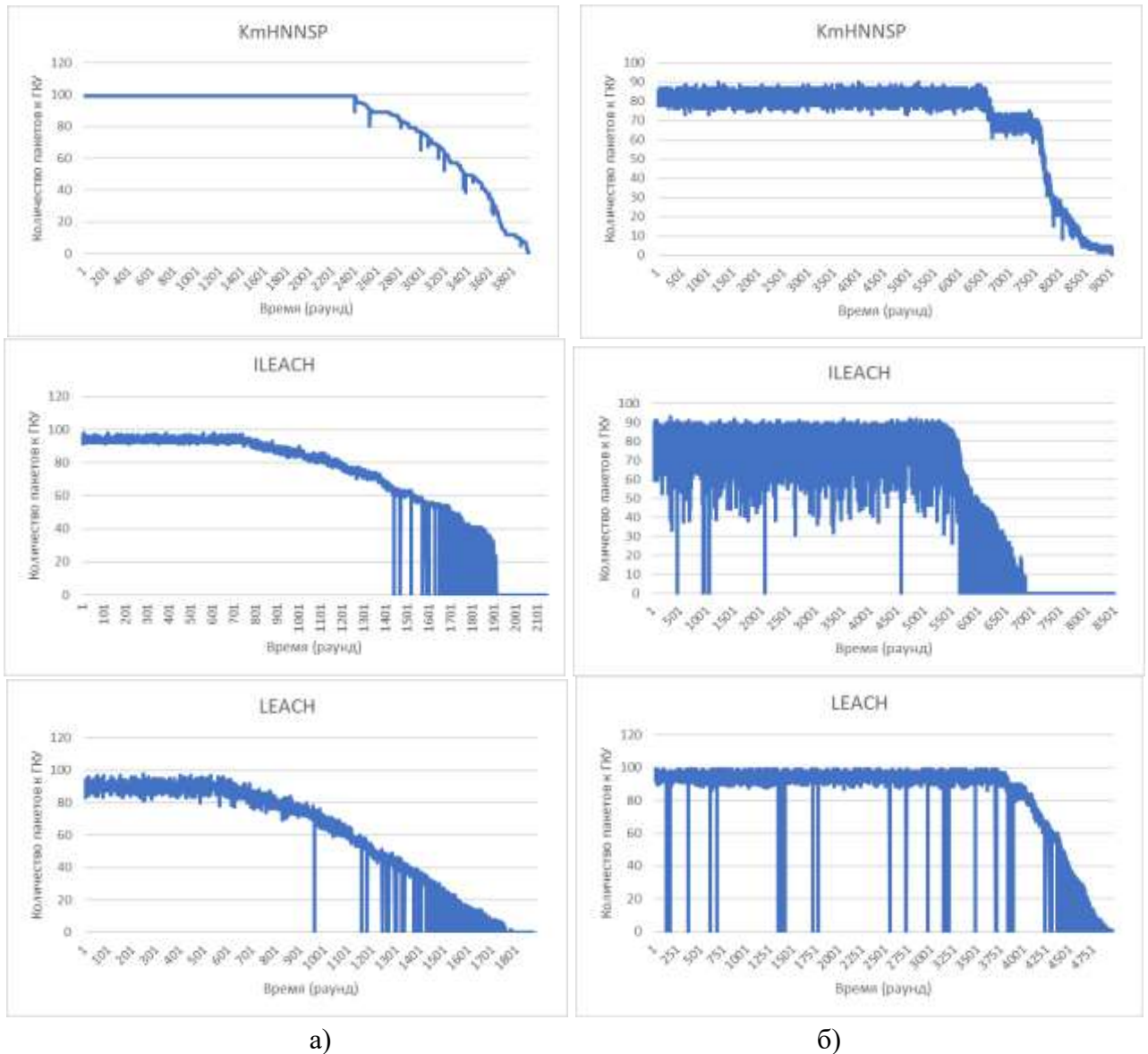


Рисунок 4.36 - Количество пакетов к ГКУ для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*:

а) БС находится вне области БСС б) БС находится в центре области БСС

На рис.4.36 показано количество пакетов данных, отправленных от сенсорных узлов к ГКУ в каждом раунде. Отмечается, что в протоколах *LEACH* и *ILEACH* существуют раунды, в которых данные могут не передаваться к ГКУ, но, а к БС. В то время как в протоколе *KmHNNSP*

количество пакетов данных фиксированное, регулярное и прямо пропорционально количеству полученных ГКУ-узлов.

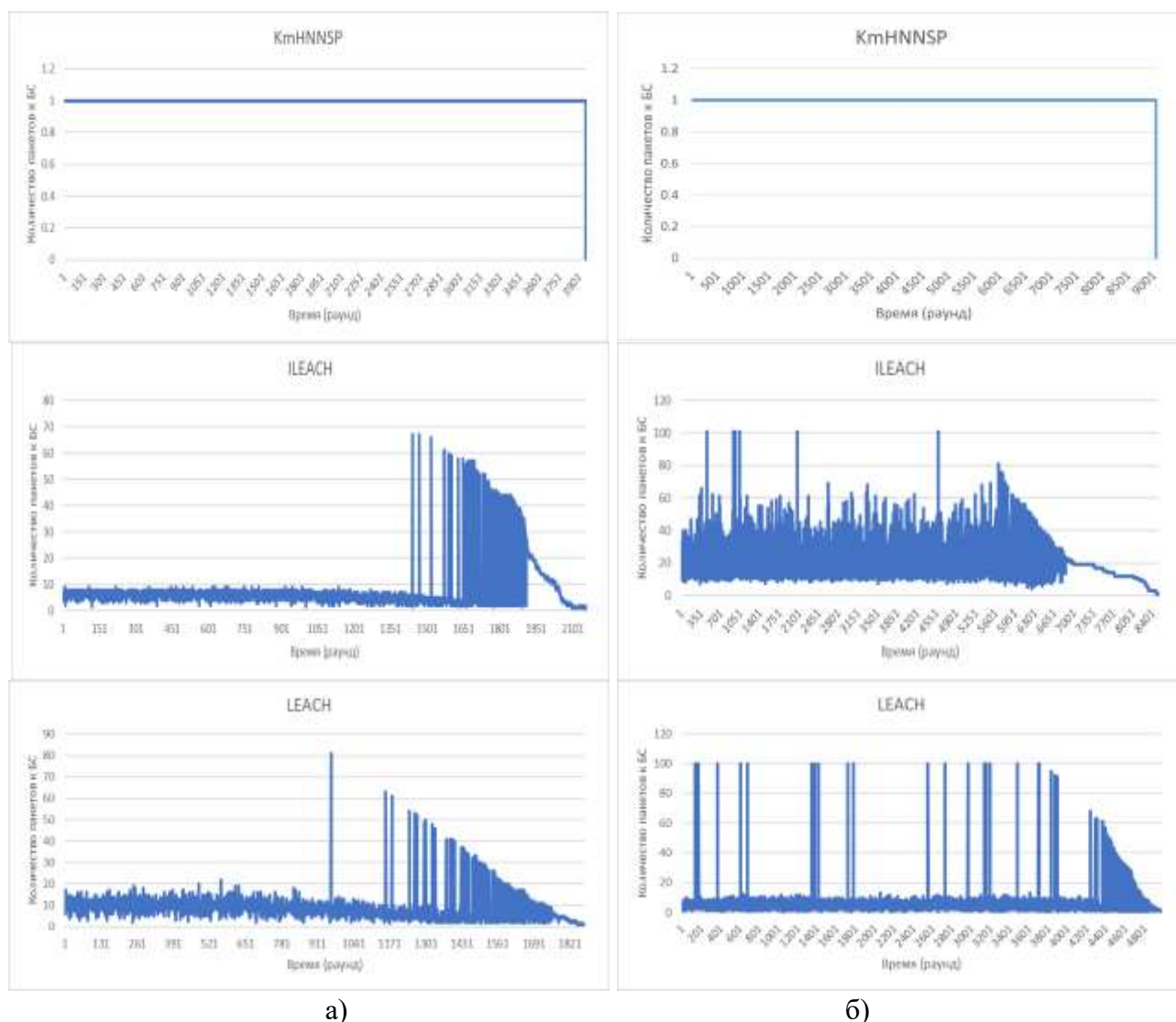
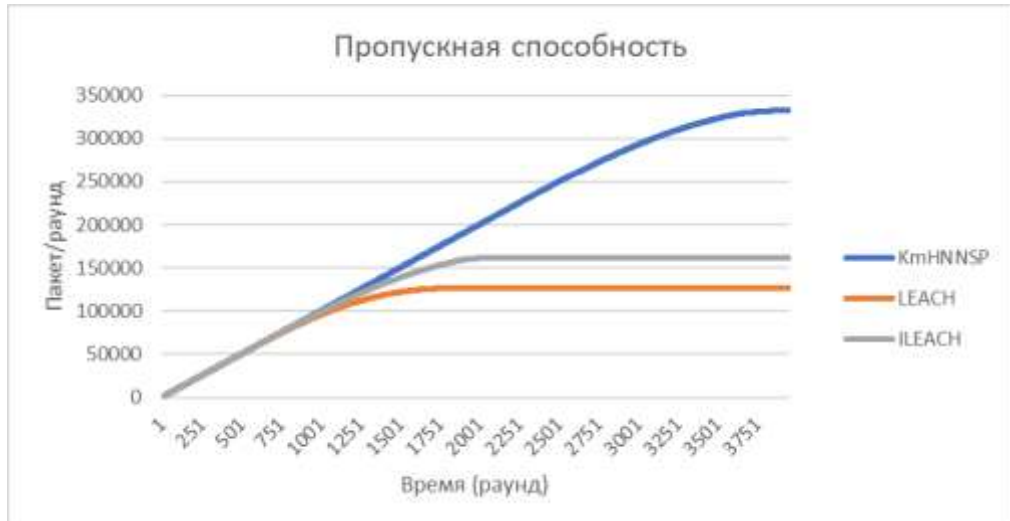
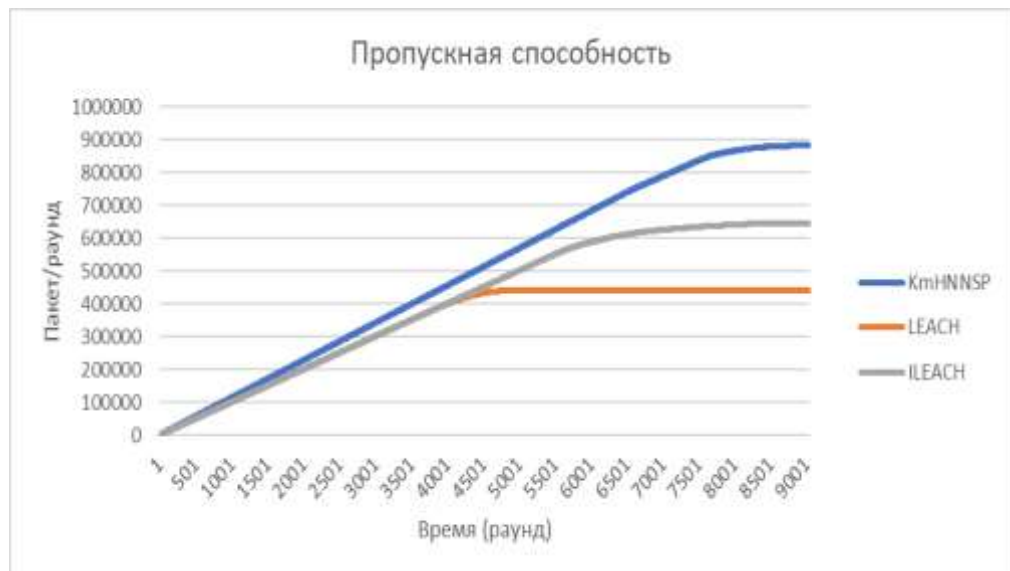


Рисунок 4.37 - Количество пакетов, передаваемых к БС для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*: а) БС находится вне области БСС, б) БС находится в центре области БСС

На рисунке 4.37 показано количество пакетов, отправленных на базовую станцию для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH* в обоих случаях. Замечено, что процесс отправки пакетов на базовую станцию увеличивается при уменьшении количества ГКУ-узлов в сети или их отсутствии в протоколах *LEACH* и *ILEACH* в случае, когда БС находится вне области БСС. Что касается протокола *KmHNNSP*, то передача пакетов остается неизменной при постоянном количестве ГКУ-узлов. Если базовая станция находится вне области БСС, то во всех раундах на базовую станцию отправляется только один пакет. Это снижает нагрузку на базовую станцию. Замечено, что количество пакетов, отправленных на базовую станцию, уменьшается по мере гибели узлов сети.



а)



б)

Рисунок 4.38 Пропускная способность сети для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*:

а) БС находится вне области БСС

б) БС находится в центре области БСС

На рисунке 4.38 показана пропускная способность сети для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH* в обоих случаях. Видно, что пропускная способность сети выше при использовании протокола *KmHNNSP* по сравнению с другими.



а)



б)

Рисунок 4.39 - Результаты энергопотребления для протоколов *KmHNNSP*, *ILEACH* и *LEACH*:

а) БС находится вне области БСС

б) БС находится в центре области БСС

На рис.4.39 также показан график энергопотребления в каждом раунде при использовании протоколов *KmHNNSP*, *LEACH* и *LEACH*. Меньше потребление энергии, т.е. большая остаточная энергия наблюдается в протоколе *KmHNNSP* по сравнению с протоколами *ILEACH* и *LEACH*.

Таким образом, можно сделать заключение о том, что протокол *KmHNNSP* работает лучше, чем протоколы *LEACH* и *ILEACH*, и видно, что протокол *KmHNNSP* очень эффективен для передачи данных на большие расстояния, что согласуется с исследуемой моделью гетерогенной БСС для горной местности с удаленным положением базовой станции.

Анализ эффективности протоколов KmHNNSP, LEACH, ILEACH

В таблице 4.11 представлен анализ характеристик протокола **KmHNNSP** в сравнении с протоколами маршрутизации LEACH и ILEACH с оценкой эффективности каждого из них.

Таблица 4.11 - Сравнение характеристик протокола *KmHNNSP* с протоколом LEACH и ILEACH

Свойство/Протокол		KmHNNSP	LEACH	ILEACH
Масштабируемость (кол-во узлов)		Да	Нет	Да
Возможность работы без модулей определения местоположения (GPS/ГЛОНАСС)		Да	Да	Да
Период стабильности, когда БС находится внутри сенсорного поля		длительный	короткий	средний
Период стабильности, когда БС находится вне сенсорного поля		длительный	короткий	короткий
Возможность увеличения нагрузки на базовую станцию.		Нет	Да	Да
Внутрикластерная передача данных		Да	Нет	Да
Межкластерная передача данных		Да	Нет	Да
Сложность		Высокая	Средняя	Средняя
Качество кластеризации	БС хранит информацию об узлах сети	Да	Нет	Да
	Наличие узла в нескольких кластерах	Нет	Нет	Нет
	Наличие изолированных узлов, не способных передавать данные на БС	Нет	Да	Нет
	Определение начального количества кластеров	Нет	Нет	Нет

KmHNNSP и *ILEACH* превосходит протокол *LEACH* по следующим пунктами:

- Высокой масштабируемости (более 10 000 узлов).
- Возможность передаче пакетов от ГКУ к БС через другие ГКУ.
- Возможность динамического назначения ГКУ.
- Точность формирования кластеров.

Результаты анализа в таблице 4.11 показывают, что:

- Протокол *KmHNNSP* более эффективен, чем протоколы *ILEACH* и *LEACH*, но его сложность более высокая.

Выводы по главе 4

1. Разработан программный комплекс с удаленным доступом для моделирования передачи данных в гетерогенной БСС и исследования эффективности применения алгоритмов интеллектуального анализа данных
2. В рамках программного комплекса проведено имитационное моделирование передачи данных в гетерогенной БСС для разных сегментов сети, топологий и с разным количеством узлов, продемонстрирована работоспособность выработанных решений на основе интеллектуальных методов.
3. Исследованы два алгоритма кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети для различного количества датчиков: алгоритм обучения сети Кохонена с Конструктивным методом и модифицированный алгоритм К-средних. Выяснилось, что нейронная сеть Кохонена с Конструктивным методом, не способна определить оптимальное количество кластеров, в то время как модифицированный алгоритм К-средних позволяет находить оптимальное количество кластеров, в этой связи для программного комплекса выбран модифицированный алгоритм К-средних.
4. Разработан протокол маршрутизации данных *KmHNNSP* в наземной беспроводной сенсорной сети, объединяющий два механизма: кластеризацию с помощью модифицированного метода К-средних и поиск кратчайшего пути между всеми головными кластерными узлами (ГКУ) с помощью нейронной сети Хопфилда. Данный протокол позволяет снизить энергопотребление при передаче/приеме данных.
5. Исследована и смоделирована маршрутизация данных в рое БПЛА с использованием алгоритма Дейкстры и генетического алгоритма. Показано, что генетический алгоритм позволяет за доли секунды найти кратчайший путь между беспилотниками при динамическом изменении топологии сети, а алгоритм Дейкстры не учитывает данные от матрицы радиовидимости.
6. Протокол LEACH является одним из наиболее известных протоколов, используемых в беспроводных сенсорных сетях, и в него было внесено множество улучшений, последним из которых является протокол ILEACH. Проведено сравнение результатов эксперимента разработанного протокола *KmHNNSP* с этими протоколами учитывая расположение наземного шлюза в двух случаях (внутри области зондирования, вне области зондирования).
7. В результате оценки эффективности протокола *KmHNNSP* по сравнению с LEACH, ILEACH получены результаты подтверждающие лучшие значения для таких показателей QoS как время жизни сети, энергоэффективность (остаточная энергии сети), и пропускная способность сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных в рамках диссертационной работы связанных с применением методов интеллектуального анализа данных для повышения показателей качества и эффективности сбора и передачи данных в гетерогенной БСС, объединяющей наземную сеть со стационарными сенсорными узлами и летающую сенсорную сеть получены следующие результаты.

Разработана комплексная модель гетерогенной беспроводной сенсорной сети, объединяющая структурно-функциональную модель сети, математические модели кластеризации и маршрутизации, сформированные с применением интеллектуальных методов, обеспечивающая эффективную обработку данных и получение более высоких показателей качества сети, по сравнению с другими моделями.

Разработан метод эффективной кластеризации наземной беспроводной сенсорной сети с использованием модифицированного алгоритма K-средних, с учетом зон радиовидимости и GPS-координат узлов, обеспечивающий расчет оптимального количества кластеров и их рациональную топологию, исключающую «скученность» ГКУ в малой области, аварийные остановки и сокращающий временные затраты на обработку информации в наземном шлюзе по сравнению с другими подходами.

Разработана методика маршрутизации данных для наземного сегмента БСС с использованием нейронной сети Хопфилда, с учетом энергоэффективности сенсорных узлов позволяющая найти кратчайший путь через все ГКУ к наземному шлюзу, снижая энергопотребление сенсорных узлов и увеличивая время жизни сети по сравнению с другими протоколами с учетом расположения шлюза: в случае БС вне сенсорного поля время жизни сети увеличивается на 52% по сравнению с протоколом LEACH и на 45% по сравнению с протоколом ILEACH; в случае БС внутри сенсорного поля на 45% по сравнению с протоколом LEACH и на 6% по сравнению с протоколом ILEACH.

Исследована и смоделирована маршрутизация данных в рое БПЛА с использованием *генетического алгоритма*. Показано, что генетический алгоритм позволяет учитывать динамическое изменение топологии сети и данные матрицы радиовидимости.

На основе структуры пакетов данных для гетерогенной БСС разработан обобщенный протокол маршрутизации, объединяющий протокол маршрутизации данных *KmHNNSP (K-means and Hopfield Neural Network for Shortest Path)* в наземной беспроводной сенсорной сети, увеличивающий время жизни сети и снижающий потребление энергии в среднем в 1,3 раза по сравнению с другими протоколами и протокол построения кратчайшего пути в летающей части сети при динамическом изменении ее топологии со скоростным доступом к базовой станции.

Разработан программный комплекс с удаленным доступом для моделирования передачи данных в гетерогенной БСС и исследования эффективности применения алгоритмов интеллектуального анализа данных. Имитационное моделирование сбора и передачи данных в гетерогенной БСС для разных сегментов сети, топологий и с разным количеством узлов, продемонстрировало работоспособность выработанных решений на основе интеллектуальных методов и целесообразность их использования, за счет более высоких значений показателей QoS для исследуемой модели сети.

Полученные результаты можно рекомендовать для применения в социально-экономической сфере, в частности в сельском хозяйстве, для территорий с осложненными географическими особенностями горной местности, где целесообразно применение гетерогенных сетей, интегрирующих наземные сегменты со стационарными сенсорными узлами с беспроводными датчиками с воздушной сетью БПЛА малой стоимости для передачи данных на большие расстояния для обработки на базовую станцию.

Полученные результаты предполагают возможность расширения исследований в направлении применения интернета вещей. В частности, целесообразно развитие модели гетерогенной беспроводной сенсорной сети с учетом нескольких наземных сегментов со стационарными сенсорными узлами, существенно разнесенных в пространстве, на значительных расстояниях друг от друга, передачу информации о состоянии которых будут обеспечивать беспилотные летательные аппараты, по заданным расписаниям.

Список использованных источников и литературы

- [1] Татарникова Т. М. Модель кластеризации беспроводной сенсорной сети / Т. М. Татарникова, Н. С. Мокрецов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2023. – Т. 1. – С. 322-325.
- [2] Xue X, Shanmugam R, Palanisamy S, Khalaf OI, Selvaraj D, Abdulsahib GM. A hybrid cross layer with harris-hawk-optimization-based efficient routing for wireless sensor networks. *Symmetry*. 2023 Feb 7;15(2):438.
- [3] Гаврилов И. С. Разработка симулятора беспроводных сенсорных сетей, использующего энергоэффективные методы маршрутизации трафика / И. С. Гаврилов // ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОВРЕМЕННОЙ науки : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. В 2 ч., Пенза, 25 июня 2022 года. Том 1. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 117-123.
- [4] Hegde K, Dilli R. Wireless sensor networks: network life time enhancement using an improved grey wolf optimization algorithm. *Engineered Science*. 2022 Jun 8;19:186-97.
- [5] Mehbodniya A, Bhatia S, Mashat A, Elangovan M, Sengan S. Proportional Fairness Based Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Network. *Computer Systems Science & Engineering*. 2022 Jun 1;41(3).
- [6] Ataei FA, Akram R, Safieh S. Presenting a method in order to increase the energy efficiency of routing protocols in wireless sensor networks in the central node mode in the center of the network. *Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России»*. 2022(3):102-9.
- [7] Narayan V, Daniel AK, Chaturvedi P. E-FEERP: Enhanced Fuzzy based Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Network. *Wireless Personal Communications*. 2023 Apr 20:1-28.
- [8] Abdulai JD, Adu-Manu KS, Katsriku FA, Engmann F. A modified distance-based energy-aware (mDBEA) routing protocol in wireless sensor networks (WSNs). *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2022 Jan 8:1-23.
- [9] Daanoune, I., Baghdad, A. and Ballouk, A., 2021. Improved LEACH protocol for increasing the lifetime of WSNs. *Int. J. Electr. Comput. Eng. IJECE*, 11, pp.3106-3113.
- [10] Abdurohman M., Supriadi Y. and Fahmi, F.Z., 2020. A modified E-LEACH routing protocol for improving the lifetime of a wireless sensor network. *Journal of Information Processing Systems*, 16(4), pp.845-858.
- [11] Ebrahimi, N., Taghavirashidizadeh, A. and Hosseini, S.S., 2022. Extend the lifetime of wireless sensor networks by modifying cluster-based data collection. *arXiv preprint arXiv:2207.08018*.
- [12] Njoya, A.N., Thron, C., Awa, M.N., Ari, A.A.A. and Gueroui, A.M., 2022. Lifetime optimization of dense wireless sensor networks using continuous ring-sector model. *Future Generation Computer Systems*, 129, pp.212-224.
- [13] Khan, M.A., Khan, J., Mahmood, K., Bari, I., Ali, H., Jan, N. and Ghoniem, R.M., 2022. Algorithm for increasing network lifetime in wireless sensor networks using jumping and mobile sensor nodes. *Electronics*, 11(18), p.2913.
- [14] Jain, K., Kumar, A. and Singh, A., 2023. Data transmission reduction techniques for improving network lifetime in wireless sensor networks: An up-to-date survey from 2017 to 2022. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 34(1), p.e4674.
- [15] Gamal, M., Mekky, N.E., Soliman, H.H. and Hikal, N.A., 2022. Enhancing the lifetime of wireless sensor networks using fuzzy logic LEACH technique-based particle swarm optimization. *IEEE Access*, 10, pp.36935-36948.
- [16] Gou P, Guo B, Guo M, Mao S. VKECE-3D: energy-efficient coverage enhancement in three-dimensional heterogeneous wireless sensor networks based on 3D-voronoi and K-means algorithm. *Sensors*. 2023 Jan 4;23(2):573.
- [17] Jaffri ZU, Asif M, Khan WU, Ahmad Z, Akhtar ZU, Ullah K, Ali MS. TEZEM: A new energy-efficient routing protocol for next-generation wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2022 Jun;18(6):15501329221107246.

- [18] Кирилова, Д. А. Разработка энергоэффективного алгоритма маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей / Д. А. Кирилова // Цифровой мир: математика, технологии, связь : Материалы и доклады I Всероссийской научно-практической конференции, Княгинино, 21 апреля 2022 года. – Княгинино: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2022. – С. 82-84.
- [19] Gupta, S.K. and Singh, S., 2022. Survey on energy efficient dynamic sink optimum routing for wireless sensor network and communication technologies. *International Journal of Communication Systems*, 35(11), p.e5194.
- [20] Mehbodniya, A., Bhatia, S., Mashat, A., Elangovan, M. and Sengan, S., 2022. Proportional Fairness Based Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Network. *Computer Systems Science & Engineering*, 41(3).
- [21] Кирилова, Д. А. Моделирование энергосберегающего алгоритма маршрутизации для беспроводной сенсорной сети / Д. А. Кирилова // Региональная информатика и информационная безопасность : Сборник трудов Юбилейной XVIII Санкт-Петербургской международной конференции, Санкт-Петербург, 26–28 октября 2022 года. Том Выпуск 11. – Санкт-Петербург: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2022. – С. 62-64.
- [22] Тун, Ю. Исследование протокола LEACH для беспроводных сенсорных сетей / Ю. Тун, Т. П. Новикова // Аспекты моделирования систем и процессов : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 27 мая 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 409-415. – DOI 10.58168/AMSP2022_409-415.
- [23] Qu, Z. and Li, B., 2022. An Energy-Efficient Clustering Method for Target Tracking Based on Tracking Anchors in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 22(15), p.5675.
- [24] Астахова Т. Н. Разработка алгоритма маршрутизации для беспроводной сенсорной сети / Т. Н. Астахова, Д. А. Кирилова, М. О. Колбанев, Н. С. Маслов // Телекоммуникации. – 2023. – № 4. – С. 30-38. – DOI 10.31044/1684-2588-2023-0-4-30-38.
- [25] Yao, Y.D., Li, X., Cui, Y.P., Deng, L. and Wang, C., 2022. Game theory and coverage optimization based Multihop routing protocol for network lifetime in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 22(13), pp.13739-13752.
- [26] Иванов В. И. Методы многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки и обработки информации о местоположении абонентских терминалов в низкоорбитальных спутниковых системах связи с межспутниковыми линиями : специальность 05.12.13 "Системы, сети и устройства телекоммуникаций" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванов Валерий Игоревич, 2020. – 194 с.
- [27] Ефремова, А. Е. Протокол маршрутизации RASeR для беспроводных самоорганизующихся сенсорных сетей / А. Е. Ефремова, А. В. Парашинец // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 40-46. – DOI 10.21293/1818-0442-2020-23-1-40-46.
- [28] Ahmad, I.A., Al-Nayar, M.M.J., Mahmood, A.M. (2023). Dynamic low power clustering strategy in MWSN. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, Vol. 10, No. 4, pp. 1249-1256.
- [29] Sinde, R., Begum, F., Njau, K. and Kaijage, S., 2020. Refining network lifetime of wireless sensor network using energy-efficient clustering and DRL-based sleep scheduling. *Sensors*, 20(5), p.1540.
- [30] Mote, T.S. and Jagtap, S.K. Adaptive Threshold Residual Energy-Based Efficient Sensor Network Protocol (ATREEN). *Journal of Sensors*, 2023.
- [31] Мохаммад, Н. Моделирование кластеризации беспроводной сенсорной сети нейросетевым конструктивным методом / Н. Мохаммад, Л. И. Воронова // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 4-19.
- [32] Voronova, L. I. Modeling the Clustering of Wireless Sensor Networks Using the K-means Method / L. I. Voronova, V. I. Voronov, N. Mohammad // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, Yaroslavl, 06–10 сентября 2021 года. – Yaroslavl, 2021. – P. 740-745. – DOI 10.1109/ITQMIS53292.2021.9642747.

- [33] Mohammad, Nawar, L. I. Voronova, and V. I. Voronov. "Development of a simulation model for using a swarm of UAVs in agriculture." In International Conference on Remote Sensing of the Earth: Geoinformatics, Cartography, Ecology, and Agriculture (RSE 2022), vol. 12296, pp. 174-180. SPIE, 2022.
- [34] Мохаммад, Н. Разработка имитационной модели использования роя беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Н. Мохаммад, Л. И. Воронова, В. И. Воронов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2022. – Т. 14. – № 3. – С. 55-61. – DOI 10.36724/2409-5419-2022-14-3-55-61
- [35] Мохаммад Навар, Воронова Л.И., Воронов В.И., Ларин А.И. «Программа для моделирования маршрутизации в кластеризованном рое БПЛА с использованием генетического алгоритма» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618357, 2023.
- [36] Навар, М. Моделирование маршрутизации в кластеризованном рое БПЛА с использованием генетического алгоритма / М. Навар, Л. И. Воронова, В. И. Воронов // Первая мила. – 2023. – № 6(114). – С. 46-53. – DOI 10.22184/2070-8963.2023.114.6.46.52.
- [37] Мохаммад Навар, Воронова Л.И., Воронов В.И., Ларин А.И. «Программа для моделирования динамической кластеризации роя БПЛА с использованием алгоритма К-средних» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023618048, 2023.
- [38] Мохаммад Навар, Воронова Л.И., Воронов В.И., Смольников В.А. «Программный комплекс для моделирования гетерогенной беспроводной сенсорной сети» Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685567, 2023.
- [39] Arya, G., Bagwari, A. and Chauhan, D.S., 2022. Performance analysis of deep learning-based routing protocol for an efficient data transmission in 5G WSN communication. *IEEE Access*, 10, pp.9340-9356.
- [40] Sable, N.P., Rathod, V.U., Salunke, M.D., Jadhav, H.B., Tambe, R.S. and Kothavle, S.R., 2023. Enhancing Routing Performance in Software-Defined Wireless Sensor Networks through Reinforcement Learning. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 11(10s), pp.73-83.
- [41] Alsawad, A., 2022. Increase Efficiency And Lifetime In Wsns Through Data Reduction. *Iraqi Journal of Intelligent Computing and Informatics (IJICI)*, 1(2), pp.97-106.
- [42] Bilal, M., Munir, E.U. and Alarfaj, F.K., 2022. Hybrid clustering and routing algorithm with threshold-based data collection for heterogeneous wireless sensor networks. *Sensors*, 22(15), p.5471.
- [43] Chen, J. and Tang, J., 2022. UAV-assisted data collection for dynamic and heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(6), pp.1288-1292.
- [44] Kaur, T. and Kumar, D., 2020. A survey on QoS mechanisms in WSN for computational intelligence based routing protocols. *Wireless Networks*, 26, pp.2465-2486.
- [45] Алзагир А. А. Алгоритмы кластеризации для БПЛА в сетях пятого и последующих поколений / А. А. Алзагир, В. Н. Коваленко, А. С. Бородин [и др.] // Электросвязь. – 2022. – № 10. – С. 9-15. – DOI 10.34832/ELSV.2022.35.10.002.
- [46] Ben Gouisssem, B., Gantassi, R. and Hasnaoui, S., 2022. Energy efficient grid based k-means clustering algorithm for large scale wireless sensor networks. *International Journal of Communication Systems*, 35(14), p.e5255.
- [47] Sharma, R., Vashisht, V. and Singh, U., 2022. eeFFA/DE-a fuzzy-based clustering algorithm using hybrid technique for wireless sensor networks. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 21(1-2), pp.129-157.
- [48] Huang, R.; Ma, L.; Zhai, G.; He, J.; Chu, X.; Yan, H. Resilient Routing Mechanism for Wireless Sensor Networks with Deep Learning Link Reliability Prediction. *IEEE Access* 2020, 8, 64857-64872.
- [49] Sujanthi, S.; Kalyani, S.N. SecDL: QoS-Aware Secure Deep Learning Approach for Dynamic Cluster-Based Routing in WSN Assisted IoT. *Wirel. Pers. Commun.* 2020, 114, 2135–2169.
- [50] Künzel, G.; Indrusiak, L.S.; Pereira, C.E. Latency and Lifetime Enhancements in Industrial Wireless Sensor Networks: A Q-Learning Approach for Graph Routing. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020, 16, 5617–5625.

- [51] Sharma, D.K.; Rodrigues, J.J.; Vashishth, V.; Khanna, A.; Chhabra, A. RLProph: A dynamic programming-based reinforcement learning approach for optimal routing in opportunistic IoT networks. *Wirel. Netw.* 2020, 26, 4319–4338.
- [52] Cong, P.; Zhang, Y.; Liu, Z.; Baker, T.; Tawfik, H.; Wang, W.; Xu, K.; Li, R.; Li, F. A deep reinforcement learning-based multioptimality routing scheme for dynamic IoT networks. *Comput. Netw.* 2021, 192, 108057.
- [53] Hooda, N.; Bawa, S.; Rana, P.S. MCTOPE Ensemble Machine Learning Framework: A Case Study of Routing Protocol Prediction. In *Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS), Kathmandu, Nepal, 27–30 October 2018*; pp. 92–99.
- [54] Мальцева Н.С., Зубова А. Д., Марышева И. Н. Анализ способов построения беспроводных сенсорных сетей // *Инженерностроительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурностроительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ»*, 2018. № 2 (24). С. 31–36
- [55] Сафронов П.С. Анализ характеристик протокола функционирования беспроводных сенсорных сетей LEACH: автореф. дис. Челябинск: ЮУрГУ, 2017. 95 с
- [56] Лихтциндер Б. Я. Беспроводные сенсорные сети : Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.02 и 11.04.02 - "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" квалификации (степени) бакалавр, магистр / Б. Я. Лихтциндер, Р. В. Киричек, Е. Д. Федотов [и др.] ; Под общей редакцией Б.Я. Лихтциндера. – Москва : Научно-техническое издательство "Горячая линия-Телеком", 2020. – 236 с. – ISBN 978-5-9912-0822-2.
- [57] Нуриллоев И. Н. Разработка и исследование методов обеспечения связности в беспроводных сенсорных сетях : специальность 05.12.13 "Системы, сети и устройства телекоммуникаций" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нуриллоев Илхом Нусратуллоевич. – Самара, 2018. – 170 с.
- [58] Бузюков Л.Б., Окунева Д.В., Парамонов А.И. ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ // *Труды учебных заведений связи.* 2017. №1.
- [59] Листопад, Н. И. QoS маршрутизация в сетях телекоммуникаций / Н. И. Листопад, О. А. Лавшук // *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.* – 2022. – Т. 20, № 3. – С. 45-53. – DOI 10.35596/1729-7648-2022-20-3-45-53.
- [60] Мутханна Аммар Салех Али. Исследование трафика и протоколов маршрутизации в беспроводных сетях : диссертация ... кандидата технических наук : 05.12.13 / Мутханна Аммар Салех Али; [Место защиты: Поволж. гос. акад. телекоммуникаций и информатики]. - Санкт-Петербург, 2016. - 176 с. : ил.
- [61] Воротницкий, Ю. И. Анализ подходов к оптимизации параметров беспроводных сенсорных сетей / Ю. И. Воротницкий, А. К. Шульган // *Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : Материалы VII Международной научно-практической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения академика Антона Никифоровича Севченко, Минск, 18–19 мая 2023 года / Редколлегия: Ю.И. Дудчик (гл. ред.), И.М. Цикман, И.Н. Кольчевская [и др.]. – Минск: Белорусский государственный университет, 2023. – С. 149-151.*
- [62] Chhaya, L., Sharma, P., Bhagwatikar, G. and Kumar, A. Wireless sensor network based smart grid communications: Cyber attacks, intrusion detection system and topology control. *Electronics*, 2017, 6(1), p.5.
- [63] Bekmezci, Ilker, Ozgur Koray Sahingoz, and Şamil Temel. "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey." *Ad Hoc Networks* 11, no. 3 (2013): 1254-1270.
- [64] Khan, M. A. Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols / M. A. Khan [et al.] // *First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT).* – Karachi, Pakistan, 2017. – P. 1–9.
- [65] Bacco, M. A Survey on Network Architectures and Applications for Nanosat and UAV Swarms / M. Bacco [et al.] // *Wireless and Satellite Systems / eds. P. Pillai [et al.]. – Cham : Springer International Publishing.* 2018. – Vol. 231. – P. 75–85.

- [66] Леонов А. В. Разработка адаптивного алгоритма маршрутизации на основе роевого интеллекта пчелиной колонии для самоорганизующихся сетей беспилотных летательных аппаратов // дисс. кандидат наук, 05.12.13, 2021, 186 с.
- [67] Костин, А. С. Анализ рынка беспилотных летательных аппаратов в России и мире / А. С. Костин, Н. В. Богатов // *Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Сборник докладов Первой Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2020 года.* – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2020. – С. 125-130. – DOI 10.31799/978-5-8088-1450-9-2020-1-125-130.
- [68] Аль Бахри М. С. Исследование взаимодействия фрагмента беспроводной сенсорной сети с сетью связи общего пользования на базе шлюза LTE / М. С. Аль Бахри, Р. В. Киричек // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах.* — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2015. — С. 174–178.
- [69] Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В., Парамонов А.И., Прокопьев А.В., Богданов И.А., Дорт-Гольц А.А. Летящие Сенсорные Сети // *ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ.* - № 9. - 2014. - С. 2-5.
- [70] Футахи Абдо Ахмед Хасан. Исследование влияния временных мобильных головных узлов на характеристики беспроводных сенсорных сетей: диссертация ... кандидата Технические наук: 05.12.13 / Футахи Абдо Ахмед Хасан; [Место защиты: ОТКЗ ФГБОУВО Московский технический университет связи и информатики], 2017
- [71] Выборнова Анастасия Игоревна. Исследование характеристик трафика в беспроводных сенсорных сетях: диссертация ... кандидата технических наук: 05.12.13 / Выборнова Анастасия Игоревна; [Место защиты: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, www.sut.ru].- Санкт-Петербург, 2014.- 183 с
- [72] Ding Q, Zhu R, Liu H, Ma M. An Overview of Machine Learning-Based Energy-Efficient Routing Algorithms in Wireless Sensor Networks. *Electronics.* 2021; 10(13); p.1539.
- [73] Ерохин С. Д., Махров С. С. Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях: основанные на местоположении узлов и направленные на агрегацию данных // *T-Comm.* 2013. №3.
- [74] Писарчук А. С. Анализ применения беспроводных самоорганизующихся сетей / А. С. Писарчук, Д. Д. Мельникова // *The World of Science Without Borders*, 11 февраля 2022 года, 2022. – Р. 314-316.
- [75] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, HI, USA, 2000, pp. 10 pp. vol.2-, doi: 10.1109/HICSS.2000.926982.IEEE.
- [76] Евстифеева Е. А., Семейкин В. Д. Методика выбора головного кластерного узла в беспроводной сенсорной сети на основе нечеткой логики // *ВЕСТНИК АСТРАХАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. СЕРИЯ: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА.* - № 1. - 2018. - С. 81-89.
- [77] Татарникова Т.М., Дзюбенко И.Н. Методы увеличения жизненного цикла сети Интернета вещей // *НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ.* -№ 5. - 2018. - С. 843-849
- [78] Демидов Д. Е., Будылдина Н. В. Повышение времени жизни беспроводных сенсорных сетей с использованием нечеткой логики // *НиКСС.* 2018. №3 (23).
- [79] Dinis, Hugo, João Rocha, Tiago Matos, Luís M. Gonçalves, and Marcos Martins. "The Challenge of Long-Distance Over-the-Air Wireless Links in the Ocean: A Survey on Water-to-Water and Water-to-Land MIoT Communication." *Applied Sciences* 12, no. 13 (2022): 6439.
- [80] Аль-Кадами, Н. А. С. Исследование алгоритмов кластеризации в беспроводных сенсорных сетях : специальность 05.12.13 "Системы, сети и устройства телекоммуникаций" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аль-Кадами Нассер Ахмед Салех. – Владимир, 2016. – 22 с

- [81] Bogena, Heye Reemt, Ansgar Weuthen, and Johan Alexander Huisman. 2022. "Recent Developments in Wireless Soil Moisture Sensing to Support Scientific Research and Agricultural Management" *Sensors* 22, no. 24: 9792.
- [82] Mekki, K.; Bajic, E.; Chaxel, F.; Meyer, F. A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT Deployment. *ICT Express* 2019, 5, 1–7
- [83] H. ZEMRANE, A. N. ABBOU, Y. BADDI and A. HASBI, "Wireless Sensor Networks as part of IOT: Performance study of WiMax - Mobil protocol," 2018 4th International Conference on Cloud Computing Technologies and Applications (Cloudtech), Brussels, Belgium, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/CloudTech.2018.8713351.
- [84] Rodrigues, W.B., Teixeira, E.H., Lugli, A.B., Neto, J.D.S. and Bonatto, B.D., 2022. 5g utilization analysis for smart grid applications compared to wimax and lpwan technologies. *ICIC International*, 2022, ISSN 2185, 2766, pp.355-362.
- [85] Sharma, R., Vashisht, V. and Singh, U., 2020. Modelling and simulation frameworks for wireless sensor networks: a comparative study. *IET Wireless Sensor Systems*, 10(5), pp.181-197.
- [86] Silmi, S., Doukha, Z., Kemcha, R. and Moussaoui, S., 2020. Wireless sensor networks simulators and testbeds. arXiv preprint arXiv:2009.03640.
- [87] Bounceur A. CupCarbon: a new platform for designing and simulating smart-city and IoT wireless sensor networks (SCI-WSN). In *Proceedings of the International Conference on Internet of things and Cloud Computing 2016 Mar 22* (pp. 1-1).
- [88] Narzullo Agzamovich Rajabov, Temur Narzullayevich Azamov, Arslon Davron O'G'Li Saidov Analysis of modern methods of intelligent data processing in network systems // *Science and Education*. 2023. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analysis-of-modern-methods-of-intelligent-data-processing-in-network-systems>.
- [89] D. Zhang, G. Li, K. Zheng, X. Ming, and Z. H. Pan, "An Energy-Balanced Routing Method Based on Forward-Aware Factor for Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 1, Pages 766 – 773, February 2014.
- [90] T. K. Jain, D. S. Saini, and S. V. Bhooshan, "Lifetime Optimization of a Multiple Sink Wireless Sensor Network through Energy Balancing," *Journal of Sensors*, Vol. 2015, Pages 1 – 6, 2015.
- [91] M. Gholipour, A. T. Haghghat, and M. R. Meybodi, "Hop-by-Hop Traffic-Aware Routing to Congestion Control in Wireless Sensor Networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2015, No. 15, Pages 1 – 13, January 2015.
- [92] Sarkar A. and Murugan T.S., 2016. Routing protocols for wireless sensor networks: What the literature says?. *Alexandria Engineering Journal*, 55(4), pp.3173-3183.
- [93] Махров С.С. Использование нейронных механизмов искусственного интеллекта для кластеризации узлов и маршрутизации данных в беспроводных сенсорных сетях: специальность 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук / Техн. ун-т связи и информатики - Москва: 2015. - 22 с.
- [94] W. H. Schuler, C. J. A. Bastos-Filho, A. L. I. Oliveira: A novel hybrid training method for hopfield neural networks applied to routing in communications networks, *Int. J. Hybrid Intell. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 27–39, 2009
- [95] Гафаров Ф.М Г12 Искусственные нейронные сети и приложения: учеб. пособие / Ф.М. Гафаров, А.Ф. Галимянов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. – 121 с.
- [96] Созыкин, А. В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей / А. В. Созыкин // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика*. – 2017. – Т. 6, № 3. – С. 28-59. – DOI 10.14529/cmse170303.
- [97] Goodfellow, Ian, et al. "Generative adversarial nets." *Advances in Neural Information Processing Systems* (2014).
- [98] Keras Applications [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://keras.io/api/applications/> (Дата обращения: 08.10.2021).
- [99] Visin, F., Kastner, K., Cho, K., Matteucci, M., Courville, A., & Bengio, Y. (2015). Renet: A recurrent neural network based alternative to convolutional networks. arXiv preprint arXiv:1505.00393.

- [100] Кучерявый А. Е. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети / А. Е. Кучерявый, А. И. Парамонов, М. А. Маколкина [и др.] // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2022. – Т. 10, № 3. – С. 1-12. – DOI 10.31854/2307-1303-2021-10-3-1-12.
- [101] Elman, Jeffrey L. “Finding structure in time.” *Cognitive science* 14.2 (1990): 179-211.
- [102] D. E. Aliabadi, (2015) “Modeling Shortest Path Routing Problem with Hopfield Neural Network”, *Graph Theory and Network Flow*, DOI:10.13140/RG.2.1.3133.2960.
- [103] He, Kaiming, et al. “Deep residual learning for image recognition.” *arXiv preprint arXiv:1512.03385* (2015)
- [104] Паращинец, А. В. Нейросетевой алгоритм кластеризации узлов беспроводной сенсорной сети на основе самоорганизующейся карты Кохонена / А. В. Паращинец, А. Е. Ефремова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 87-91. – DOI 10.21293/1818-0442-2018-21-4-87-91.
- [105] Chung, Junyoung, et al. “Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling.” *arXiv preprint arXiv:1412.3555* (2014).
- [106] Dosovitskiy, A., Tobias Springenberg, J., & Brox, T. Learning to generate chairs with convolutional neural networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, (pp. 1538-1546).
- [107] Kulkarni, Tejas D., et al. “Deep convolutional inverse graphics network.” *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2015
- [108] Graves, Alex, et al. “Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory.” *Nature* 538 (2016): 471-476
- [109] Паращинец, А. В. Нейросетевой алгоритм кластеризации узлов беспроводной сенсорной сети на основе самоорганизующейся карты Кохонена / А. В. Паращинец, А. Е. Ефремова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 87-91. – DOI 10.21293/1818-0442-2018-21-4-87-91
- [110] Charbuty, B., & Abdulazeez, A. Classification based on decision tree algorithm for machine learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2021, 2(01), 20-28.
- [111] Borkar, G. M., Patil, L. H., Dalgade, D., & Hutke, A. (2019). A novel clustering approach and adaptive SVM classifier for intrusion detection in WSN: A data mining concept. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 23, 120-135.
- [112] Вахрушев, В. И., Курзаева, Л. В. Обзор методов и средств интеллектуального анализа данных при оценке стоимости жилой недвижимости. *Научный электронный журнал Меридиан*, 2020, (2), 108-110.
- [113] Patten, S.; Krishnamachari, B.; Govindan, R. The Impact of Spatial Correlation on Routing with Compression in Wireless Sensor Networks. *ACM/IEEE IPSN*, Berkeley, US, 2004, p.28-35, Dabirmoghaddam, A.; Ghaderi M.; Williamson, C. On the optimal randomized clustering in distributed sensor networks. *Journal of computer network*, 2014, 59, 11,p.17–32.
- [114] Баталов А.С Конструктивный метод обучения нейронной сети Кохонена // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2012». - Выпуск 2. Том 1. -Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. - С. 94-99.
- [115] Воронова Л. И., Мохаммад Н. Беспроводные Сенсорные Сети Как Основа Интернета Вещей // сборник материалов XI Молодёжного научного Форума МТУСИ. 2020. С. 155 - 161.
- [116] Dabirmoghaddam, A.; Ghaderi M.; Williamson, C. On the optimal randomized clustering in distributed sensor networks. *Journal of computer network*, 2014, 59, 11,p.17–32.
- [117] Kumar, Vinay, Sanjay B. Dhok, Rajeev Tripathi, and Sudarshan Tiwari. "A review study on analytical estimation of optimal number of clusters in wireless sensor networks." *Transactions on Networks and Communications* 2, no. 5 (2014): 75-103.
- [118] Mille, M. J.; Vaidya, N. H. A MAC protocol to reduce sensor network energy consumption using a wakeup radio. *IEEE Transaction on Mobile Computing*, 2005, 4(3), p.228–242.
- [119] Zhu, J.; Papavassiliou, S. On the energy-efficient organization and the lifetime of multi-hop sensor networks,” *IEEE Communication Letter*. 2003, 7(110), p. 537–539.

- [120] Liaw J., Chang L., Chu H. Improving lifetime in heterogeneous wireless sensor networks with the energy-efficient grouping protocol // *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. – 2012. vol. 9, №9. -pp. 6037-6047
- [121] Medagliani, P.; Martalò, M.; Ferrari, G. Clustered Zigbee networks with data fusion: Characterization and performance analysis. *Journal of Ad Hoc Networks*, 2011, 9(7), p. 1083-1103
- [122] Hossain, A.; Chakrabarti, S.; Biswas, P.K. Impact of Sensing Model on Wireless Sensor Network Coverage. *IET wireless sensor system*, 2012, 2(3),p. 272-28
- [123] Wang, L. C.; Wang, C. W.; Liu, C. M. Optimal number of Clusters in Dense Wireless Sensor Networks: A Cross-Layer Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(2), p.966-976.
- [124] Navid, A.; Alireza, V.; Wenyao, X.; Mario, G.; Majid, S. Cluster size optimization in sensor networks with decentralized cluster-based protocols. *Journal of Computer Communications*, 2012, 35(2),p. 207–220
- [125] Förster, A.; Murphy, A. L. Optimal cluster sizes for wireless sensor networks: an experimental analysis. *Ad-Hoc Networks, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 2010, 28,p. 49–63.
- [126] Deosarkar, B. P.; Yadav, N. S.; Yadav, R. Cluster head selection in clustering algorithms for wireless sensor networks: A Survey. *Proceedings of International Conference on Computing, Communication and Networking*, 2008, p. 1–8
- [127] Гольдштейн, Б. С. Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. — СПб.: БХВ, 2013. — 162.
- [128] Бондарев, А. Н. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах/А. Н. Бондарев, Р. В. Киричек // *Информационные технологии и телекоммуникации 2016 Т 4 № 4 С 13–23*.
- [129] Алзагир А. А. Алгоритмы кластеризации для БПЛА в сетях пятого и последующих поколений / А. А. Алзагир, В. Н. Коваленко, А. С. Бородин [и др.] // *Электросвязь*. – 2022. – № 10. – С. 9-15. – DOI 10.34832/ELSV.2022.35.10.002.
- [130] Казаков М.А. К вопросу об оптимизации конструктивного метода обучения нейронных сетей // *Вест. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2018. №3 (23). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-optimizatsii-konstruktivnogo-metoda-obucheniya-neyronnyh-setey>.
- [131] Беспилотный летательный аппарат [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Беспилотный_летательный_аппарат (Дата обращения: 21.03.2022).
- [132] Асейдулин И. Р. Исследование низкоэнергетической адаптивной кластеризации на основе иерархической маршрутизации беспроводных сенсорных сетей // *Тенденции развития науки и образования*. – 2020. – №. 63-3. – С. 25-28.
- [133] Евстифеева Е. А. АЛГОРИТМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ // *Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения*. – 2019. – С. 14-14.
- [134] Евстифеева Е. А., Семейкин В. Д., Методика выбора головного кластерного узла в беспроводной сенсорной сети на основе нечеткой логики // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ.* 2018. — № 1. — С. 81–89
- [135] H. KALITA and A. KAR, "A New Algorithm of Self Organization in Wireless Sensor Network," *Wireless Sensor Network*, Vol. 2 No. 1, 2010, pp. 43-47. doi: 10.4236/wsn.2010.21006.
- [136] Леонов, А. В. Разработка адаптивного алгоритма маршрутизации на основе роевого интеллекта пчелиной колонии для самоорганизующихся сетей беспилотных летательных аппаратов: специальность 05.12.13: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Омск, 2020. — 186 с.
- [137] Лучшие квадрокоптеры с большим радиусом действия и камерой. — Текст : электронный // *Мир квадрокоптеров* : [сайт]. — URL: <https://mirquadrocopteroj.ru/blog/top-luchshih/luchshie-kvadrokoptery-s-bolshim-radiusom-dejstviya-i-kameroj> (дата обращения: 23.01.2023).
- [138] КУДР, Л. А., & СКОБЦОВ, Ю. А. (2014). Генетический алгоритм маршрутизации беспроводных сенсорных сетей. *ПИТ*, 1(015), 1-320.

- [139] Chakraborty, A., Mitra, S. K., & Naskar, M. K. (2011). A genetic algorithm inspired routing protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Computer Intelligence-Theory and Practice*, (6).
- [140] Окунева Дарина Владимировна. Разработка и исследование моделей беспроводных сенсорных сетей при неравномерном распределении узлов: диссертация ... кандидата Технические наук: 05.12.13 / Окунева Дарина Владимировна; [Место защиты: ФГБОУВПО Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики], 2017.- 159 с
- [141] Леонов А. В. Разработка адаптивного алгоритма маршрутизации на основе роевого интеллекта пчелиной колонии для самоорганизующихся сетей беспилотных летательных аппаратов // дисс. кандидат наук, 05.12.13, 2021, 186 с.
- [142] Никонов а. Г., юрочкин а. Г. Генетический алгоритм маршрутизации беспроводных сенсорных сетей // Вестник воронежского института высоких технологий. -№ 2 (21). - 2017. - С. 117-121.
- [143] MATLABCentral. FileExchange: [электронный документ].-Режим доступа: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>. (Дата обращения: 11.04.2023).
- [144] Bastos-Filho, C.J., Oliveira, M.A., Silva, D.R. and Santana, R.A., 2011, April. Optimizing a routing algorithm based on hopfield neural networks for graphic processing units. In 2011 IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI) (pp. 88-93). IEEE.
- [145] Heinzelman W.R., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, vol. 8 // IEEE, Proceedings of the Thirty Third Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00). - Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2000. - С. p. 3005–3014.
- [146] M. Azharuddin and P. K. Jana, “A Distributed Algorithm for Energy Efficient and Fault Tolerant Routing in Wireless Sensor Networks,” *Wireless Networks*, Vol. 21, No. 1, Pages 251 – 267, January 2015.
- [147] Курзаева Л.В. Нечеткая логика и нейронные сети: учебное пособие. Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 113 с.
- [148] Vinyals, O., Toshev, A., Bengio, S., & Erhan, D. Show and tell: A neural image caption generator. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2015, (pp. 3156-3164).
- [149] Visin, F., Kastner, K., Cho, K., Matteucci, M., Courville, A., & Bengio, Y. (2015). Renet: A recurrent neural network based alternative to convolutional networks. arXiv preprint arXiv:1505.00393
- [150] Kalchbrenner, N., Danihelka, I., & Graves, A. (2015). Grid long short-term memory. arXiv preprint arXiv:1507.01526. <https://arxiv.org/abs/1507.01526>
- [151] Yamashita, R., Nishio, M., Do, R.K.G. et al. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights Imaging* 9, 611–629 (2018).
- [152] Assim, M. and Al-Omary, A., 2020, December. Design and implementation of smart home using WSN and IoT technologies. In 2020 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing and Technologies (3ICT) (pp. 1-6). IEEE.
- [153] Sang, K.X., Shang, J. & Lin, T.R. Synchroextracting Transform and Deep Residual Network for Varying Speed Bearing Fault Diagnostic. *J. Vib. Eng. Technol.* 11, 343–353 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00584-y>
- [154] Nawar Mohammad, “Development of wireless sensor networks efficient clusterization method,” *Synchroinfo Journal* 2024, vol. 10, no. 1, pp. 32-38. DOI: 10.36724/2664-066X-2024-10-1-32-38.
- [155] N. F. Mohammad, L. I. Voronova, V. I. Voronov and S. A. Rozhkov, " Software Complex for Modelling Routing in Heterogeneous Model of Wireless Sensor Network," 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2024. (in press)

Приложение А. Акт внедрения в учебный процесс МТУСИ



- рекомендациями по применению обобщенного протокола маршрутизации для гетерогенной БСС на основе структуры пакетов данных.

Указанные новации расширяют научно-методическую базу учебной дисциплины и способствуют овладению профессиональной компетенцией ПК-10 «Способность использовать современные технические средства управления, вычислительную технику, технологии компьютерных систем и телекоммуникаций при проектировании систем автоматизации и управления».

Председатель комиссии

д.т.н., профессор


 Рожков С.А.

Члены комиссии:

к.т.н., доцент

 Репинский В.Н.


к.п.н., доцент

 Яблочникова И.О.

Акт об использовании результатов диссертации обсужден и одобрен на заседании кафедры «Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации», протокол №2 от 6 сентября 2023 г.

Заведующий кафедрой

Интеллектуальные системы в управлении и автоматизации

доктор физико-математических наук, профессор  Воронова Л. И.