

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

На правах рукописи

Марочкина Анастасия Вячеславовна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ
ТРЕХМЕРНЫХ СЕТЕЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ
ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Парамонов Александр Иванович

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ.....	11
1.1 Развитие концепции Интернета вещей	11
1.2 Характеристики концепции Интернета вещей.....	14
1.3 История появления беспроводных сенсорных сетей	18
1.4 Протоколы для беспроводных сенсорных сетей	19
1.5 Применение беспроводных сенсорных сетей	22
1.6 Функции самоорганизации сетей связи	26
1.7 Трехмерные сети интернета вещей высокой плотности	28
1.8 Выводы	30
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СЕТЕЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ.....	33
2.1 Задачи построения трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности	33
2.2 Фрактальная размерность.....	38
2.2.1 Понятие фрактальной размерности.....	38
2.2.2 Фрактальная размерность сети	40
2.2.3 Анализ методов кластеризации	42
2.3 Моделирование и кластеризация трехмерной сети интернета вещей с применением метода оценки фрактальной размерности	48
2.3.1 Предварительные замечания.....	48
2.3.2 Модель сети и ее фрактальная размерность.....	50
2.3.3 Метод кластеризации сети	56
2.4 Выводы	61
3. ВЫБОР ГОЛОВНЫХ УЗЛОВ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, РАЗМЕЩЕННОЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ	62
3.1 Структура сети интернета вещей высокой плотности	62
3.2 Методы выбора головных узлов.....	64
3.2.1 Задачи выбора ГУ и кластеризации	64
3.2.2 Анализ известных алгоритмов выбора ГУ и кластеризации	71
3.3 Применение моделей точечных процессов для сетей ИВВП в трехмерном пространстве	76

3.4 Точечные процессы Неймана-Скотта	83
3.5 Выбор головных узлов кластеров в трехмерных сетях Интернета вещей высокой плотности.....	87
3.5.1 Предварительные замечания.....	87
3.5.2 Модель сети и постановка задачи	88
3.5.3 Метод выбора головных узлов	90
3.6 Выводы	101
4. МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТИ ИВ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, РАЗМЕЩЕННОЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ.....	103
4.1 Задачи маршрутизации в сетях ИВ	103
4.2 Общие сведения о теории серых систем и серый реляционный анализ .	106
4.3 Анализ методов поиска кратчайшего пути	112
4.4 Метод маршрутизации трафика в сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного анализа.....	121
4.4.1 Предварительные замечания.....	121
4.4.2 Модель сети и постановка задачи	123
4.4.3 Метод многокритериального выбора пути.....	125
4.4.4 Пример решения.....	129
4.4.5 Эффективность метода	135
4.5 Выводы	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
ЛИТЕРАТУРА	142
ПРИЛОЖЕНИЕ	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Жизнь современного общества в значительной степени связана с достижениями в области телекоммуникаций, развитием вычислительной техники и методов доставки и обработки информации, которые реализуются современной инфокоммуникационной системой. Базой инфокоммуникационной системы являются сети связи, которые за последние десятилетия претерпели существенные эволюционные преобразования. Эти преобразования привели как к технологическому развитию средств связи, так и росту проникновения услуг связи. В настоящее время происходит переход к пятому поколению сетей связи (5G). Этот переход связан как с технологическим развитием, так и с развитием модельно методического аппарата, предназначенного для решения задач планирования и управления сетями связи.

Наряду с улучшением основных показателей качества функционирования сетей связи происходит развитие такого направления как Интернет вещей (ИВ) [1], которое включает в себя коммуникации между различного рода автоматическими устройствами [2]. Развитие ИВ привело к тому, что уже сегодня количество подключенных к сети связи устройств превысило количество жителей на планете [3]. Тенденция роста этого количества сохраняется, как в настоящее время, так и в обозримой перспективе [4].

Проникновение ИВ приводит к появлению сетей высокой плотности, в случаях, когда концентрация устройств в пространстве становится велико [4]. Уже сегодня одно устройство на квадратный метр - далеко не предел [5]. Более того, сети высокой плотности, образуемые в зданиях и сооружениях различного назначения, невозможно описать традиционными двумерными моделями [6]. Это сети в жилых или офисных многоэтажных зданиях, а также сети промышленных предприятий, обслуживающие различные технологические объекты и процессы.

Эффективность функционирования сетей высокой плотности в большей степени, чем сетей малой плотности, зависит от применяемых методов построения сети, выбора ее логической структуры. Для управления сетями с большим количеством устройств требуется применение иерархических структур, позволяющих локализовать группы (кластеры) с относительно небольшим количеством устройств. Однако для решения данной задачи также приходится оперировать большими количествами. Также следует учитывать, что решение этих задачи используются вычислительные средства контроллеров с относительно невысокой производительностью.

Для построения и обеспечения функционирования сетей интернета вещей высокой плотности требуется совершенствование моделей и методов, применяемых в этих задачах. Роль методического обеспечения в сетях 5G существенно выше, чем в сетях предшествующих поколений, поскольку в них большее внимание уделяется задачам распределения ресурсов [7], а также задачам управления.

Поэтому, можно заключить, что количественные изменения в сетях интернета вещей приводят к необходимости разработки моделей и методов, позволяющих учитывать особенности сетей высокой плотности, а также сетей, размещенных в трехмерном пространстве, при решении задач выбора логической структуры этих сетей, т.е. в задачах кластеризации, выделения головных узлов сети, а также в задачах маршрутизации трафика.

Степень разработанности темы. К области выбранной темы относятся работы, посвященные задачам построения современных и перспективных сетей связи (5G и последующих поколений), а также сетей интернета вещей, тактильного интернета. Во многих современных работах исследуются особенности сетей с большим количеством устройств (пользователей).

В частности, построению сетей ИВ посвящены рекомендации Международного Союза Электросвязи (МСЭ), 3GPP. Большинство рекомендаций и работ направлены на решения, направленные на возможность

обслуживания трафика ИВ, а также на исследование особенностей обслуживания пользователей в сети NR.

Авторы работ по данной тематике рассматривают различные варианты построения, а также решения задач управления сетями ИВ.

Среди работ, посвященных данной тематике, отечественных и зарубежных авторов следует выделить работы А. Е. Кучерявого, А. И. Парамонова, Р. В. Киричка, Е. А. Кучерявого, К. Е. Самуйлова, С. Н. Степанова, Т. М. Татарниковой, А. В. Рослякова, О. И. Шелухина, С. В. Поршнева, В. К. Сарьяна, Р. Я. Пирмагомедова, С. Д. Андреева, Д. А. Молчанова, С. I. F. Akyildiz, A. J. Das, J. H. Lee, S. Adibi и многих других.

Их работы направлены на решение задач математического описания и построения сетей 5G и последующих поколений, а также сетей ИВ и тактильного интернета. Большинство задач сводится к повышению эффективности функционирования ресурсов сети и обеспечению качества предоставления услуг. Исследования упомянутых и многих других авторов позволили расширить модельно-методический аппарат описания сетей интернета вещей.

Существенное внимание в указанных работах уделяется исследованию трафика услуг связи, в том числе, экстремального трафика, обусловленного массовым срабатыванием устройств. В большинстве работ решаются важные задачи управления сетями ИВ, однако, они не учитывают особенностей сетей с высокой плотностью, влияющих на их выполнимость (сложность), а также на необходимость решения в условиях малого объема статистики.

Особенности сетей ИВ высокой плотности, такие как: большое количество устройств, их высокая плотность, распределение устройств в трехмерном пространстве, а также недостаток данных учтены при решении задач, изложенных в данной работе.

Объект исследования — трехмерные беспроводные сети связи Интернета вещей высокой плотности, в том числе.

Предмет исследования — модели и методы построения и выбора структуры сети Интернета вещей высокой плотности.

Цель работы и задачи исследования — повышение эффективности решения задач построения и управления в беспроводных сетях интернета вещей высокой плотности путем разработки модельно-методического аппарата, учитывающего особенности этих сетей.

Для достижения поставленной цели в работе последовательно решаются следующие задачи:

1. Анализ развития и основные задачи построения сетей Интернета вещей;
2. разработка модели и метода кластеризации трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности;
3. разработка моделей сети интернета вещей с использованием точечных процессов;
4. разработка метода выбора головных узлов сети интернета вещей высокой плотности, размещенной в трехмерном пространстве;
5. разработка метода маршрутизации в сети ИВ высокой плотности, размещенной в трехмерном пространстве.

Научная задача, решаемая в работе, состоит в разработке модельно-методического аппарата для сетей связи высокой плотности, повышающего эффективность задач управления такими сетями, за счет принятия во внимание особенностей этих сетей и рационального выбора адекватных им методов решения.

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработанная модель и метод кластеризации трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности отличаются от известных тем, что в них использованы положения теории фракталов для решения задачи кластеризации, что обеспечивает повышение эффективности решения этой задачи.

2. В отличие от известных методов, предложенный метод выбора головных узлов кластера использует алгоритм поиска k -кратного центра графа, который позволяет произвести выбор не только одного, но и k -головных узлов, а также позволяет учесть требования к точности решения и вычислительной сложности. Решением является близкий к оптимальному выбор алгоритма поиска k -кратного центра графа.

3. В разработанном методе многокритериальной оптимизации маршрута в трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности используется реляционный анализ, позволяющий принимать решения при малом объеме статистики, а также позволяет использовать требуемое количество критериев (параметров).

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость работы состоит в расширении модельно-методического аппарата описания трехмерных сетей Интернета вещей высокой плотности. Полученные результаты позволяют:

- модифицировать известные модели точечных процессов, для моделирования сетей интернета вещей высокой плотности в трехмерном пространстве;
- применять элементы теории фракталов при решении задачи кластеризации сетей интернета вещей высокой плотности;
- использовать многокритериальную оптимизацию в задаче выбора головных узлов сети интернета вещей высокой плотности;
- применять метод Серого реляционного анализа при решении задачи маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в работе результаты могут быть положены в основу алгоритмов и протоколов управления сетью высокой плотности, а именно при разработке протоколов кластеризации, выбора головных узлов сети и протоколов маршрутизации.

Полученные результаты также могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений, готовящих специалистов

соответствующей специальности при чтении лекций и проведении практических и лабораторных занятий.

Результаты работы внедрены в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Методики планирования трехмерных сетей Интернета вещей высокой плотности», в ФГБУ НИИР при разработке вклада в Сектор стандартизации МСЭ-Т, а также при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по курсу «Математические модели в сетях связи», «Математическое моделирование устройств и систем», «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» в СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

Методология и методы исследования. Выполненные в работе исследования основаны на положениях теории массового обслуживания, теории вероятностей и математической статистики, теории графов, теории фракталов, методах аналитического имитационного моделирования дискретных событийных систем. Имитационное моделирование разработанных методов кластеризации, выбора головных узлов и маршрутизации выполнено с использованием программного обеспечения Mathcad, Python.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанный метод кластеризации сети интернета вещей высокой плотности, размещенной в трехмерном пространстве с применением теории фракталов, имеет большую эффективность, по сравнению с известными методами, что выражается в меньшей, минимум на 18% вероятности ошибок кластеризации.

2. Разработанный метод выбора головных узлов кластера, обеспечивает большую эффективность путем оптимального многокритериального выбора алгоритма поиска k-кратного центра графа, что дает выигрыш в условной стоимости принятия решения от 8 до 53% по сравнению со случайным выбором алгоритма.

3. Разработанный многокритериальный метод маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности, размещенной в трехмерном пространстве, с использованием Серого реляционного анализа, обеспечивает

большую эффективность, по сравнению с однокритериальными методами. При этом эффективность разработанного метода составляет до 53%, в зависимости от состояния сети.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных автором в диссертационной работе научных и практических результатов подтверждается обоснованным выбором предмета и объекта исследований, исходных данных при постановке задач исследования, принятых допущений и ограничений, а также соответствием результатов аналитического и имитационного моделирования, проведенных лично автором, согласованностью с данными, полученными другими авторами и апробацией результатов на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических и научно-методических конференциях DCCN (International conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications) (Санкт-Петербург, 2020, 2022 г. г.).

Публикации по теме диссертации. Материалы работы изложены в 12 публикациях, из них: 4 статьи в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий (перечень ВАК при Минобрнауки России), 2 статьи в изданиях, включенных в международные базы цитирования (SCOPUS); 6 статей в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту научной специальности. Работа соответствует пунктам 4, 12, 14 паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

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

1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

1.1 Развитие концепции Интернета вещей

В литературе можно найти упоминания о различных событиях, явившихся началом развития Интернета вещей [3], однако большинство авторов расходятся во мнениях и точную дату и место, вероятно, установить очень сложно. Это действительно так, поскольку с момента возникновения возможности передачи информации на расстояние появилось желание передавать данные о тех событиях и явлениях, которые представляют интерес. Это получило отражение в развитии телеметрии, первые упоминания о которой относятся к середине XIX века.

Вероятно, именно телеметрия и послужила основой для широкого распространения технологий ИВ, стимулом которого стало развитие радиоэлектронных технологий и вычислительной техники. Повышение технологичности устройств получения и передачи данных, а также снижение их стоимости привели к широкому распространению данной технологии во всех сферах деятельности человека.

Толчком к развитию ИВ послужило сближение возможностей, обеспечиваемых современными технологиями и потребностей, обусловленным современным состоянием общественных отношений и деятельности человека.

По оценкам авторитетных аналитиков общее количество устройств ИВ, подключенных к сетям связи, неуклонно растет, и оно уже превысило количество жителей на земле. На рисунке 1.1 приведены статистические данные до 2023 года и прогноз до 2030 года по данным Statista [4]. Рост количества устройств ИВ, подключенных к сетям связи происходит (по закону близкому к линейному) со среднегодовым приростом 1,9 млрд. устройств.

К 2030 году ожидается, что количество устройств ИВ будет составлять около 30 млрд, что приблизительно в четыре раза превысит численность населения земли. Известны и иные прогнозы [4], согласно которым их количество будет существенно больше.

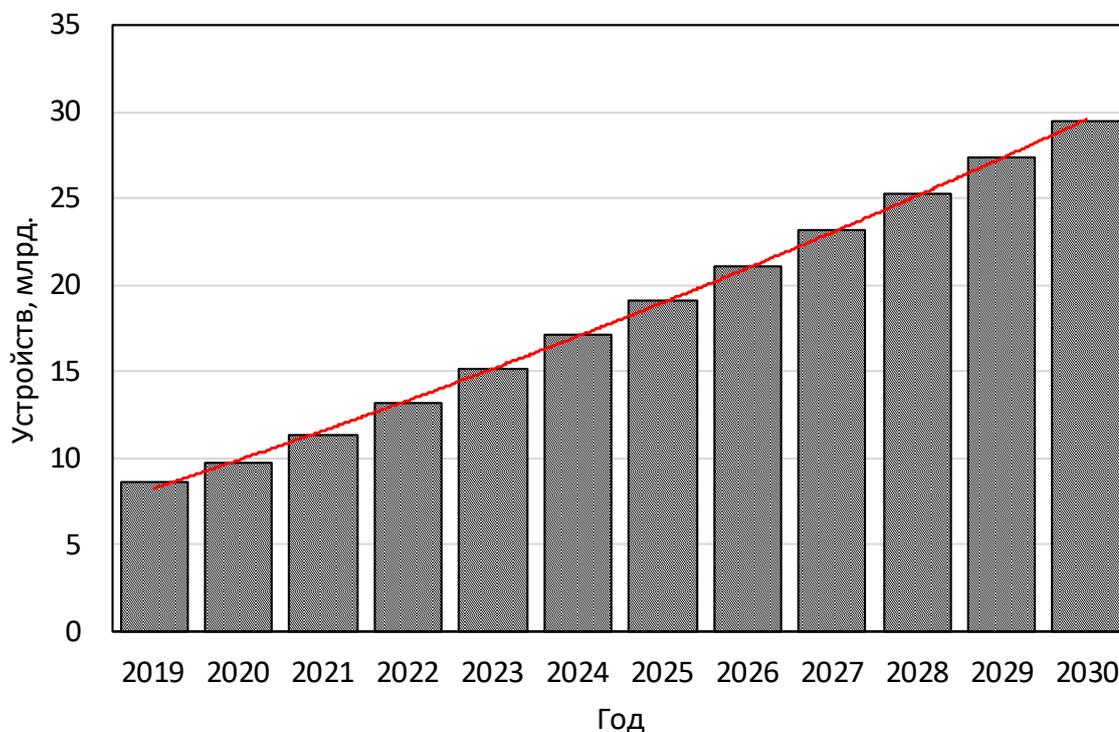


Рисунок 1.1 – Статистика и прогноз роста количества подключенных к сети устройств ИВ до 2030 г

По определению, которое дает МСЭ в документе МСЭ-Т У.2060 [1], Интернет вещей – «это глобальная инфраструктура для информационного общества, которая обеспечивает возможность предоставления более сложных услуг путем соединения друг с другом (физических и виртуальных) вещей на основе существующих и развивающихся функционально совместимых информационно-коммуникационных технологий (ИКТ)».

Цель создания данной инфраструктуры – это повышение доступности информации в глобальном смысле, что в рекомендации У.2060 [1] иллюстрируется, как показано на рисунке 1.2.

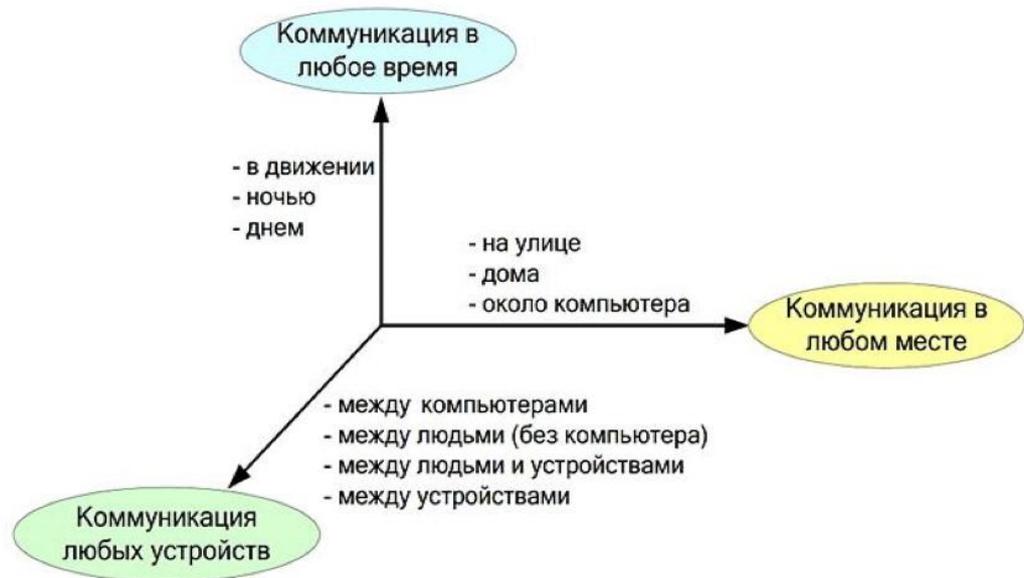


Рисунок 1.2 – Концепция Интернета вещей

Рассмотрев основные направления развития телекоммуникаций, можно сделать вывод, что ИВ будет интенсивно развиваться в долгосрочной перспективе. Основными качествами этого процесса следует считать:

- увеличение количества устройств, подключенных к сетям связи, которое приводит к возникновению сетей высокой плотности;
- проникновение технологий ИВ в различные сферы деятельности человека, что влечет за собой развитие технических возможностей этих устройств и повышение требований к показателям функционирования сети, построенных на их основе;
- развитие сетей ИВ выражается в создании как локальных специализированных сетей, так и проникновении этих технологий в глобальные сети.

В качестве наиболее существенной особенности сетей ИВ следует считать количество подключенных устройств, которое существенно превышает те количества, с которыми ранее приходилось иметь дело в сетях, где количества подключений определялось количеством абонентов (пользователей) и соизмеримо с количеством жителей [8].

1.2 Характеристики концепции Интернета вещей

Концепция Интернета вещей в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т имеет ряд основных характеристик сетей ИВ.

Связность. Любая вещь должна иметь возможность быть связанной с глобальной инфокоммуникационной структурой. Это позволяет иметь более широкие возможности в управлении и мониторинге устройств, а также открыть новые перспективы для различных отраслей промышленности и научных исследований.

IPv6 является протоколом связывания сетевого уровня, который обеспечивает уникальные идентификаторы для устройств, подключенных к сети Интернет. Каждому устройству, подключенному к сети, присваивается уникальный IPv6-адрес, который позволяет его идентифицировать и устанавливать связь с другими устройствами и ресурсами в сети.

Некоторые из примеров вещей, которые могут быть связаны с глобальной инфокоммуникационной структурой, включают в себя умные дома и умные города, где различные устройства в доме или городской инфраструктуре, такие как умные термостаты, световые приборы, камеры видеонаблюдения и датчики, могут быть подключены к Интернету и управляться удаленно.

Другим примером являются носимые устройства, такие как умные часы, которые могут синхронизироваться с Интернетом для получения и отображения информации о времени, погоде, новостях и других уведомлениях.

Кроме того, автомобили, оборудованные системами GPS, телематикой и другими электронными устройствами, также могут быть связаны с Интернетом и использоваться для обмена данными и управления устройствами на автомобиле.

Гетерогенность. Устройства сети Интернета Вещей могут быть использованы на различных программных и аппаратных платформах и в

различных сетях. Данные устройства должны иметь возможность взаимодействовать с помощью различных сетей с другими устройствами [9].

Устройства сети Интернета вещей (IoT) могут быть использованы в различных программных и аппаратных платформах и работать в различных сетях, таких как беспроводные сети, локальные сети, Wide Area Networks (WAN) и т.д. Устройства IoT, как правило, обмениваются данными, используя различные протоколы связи, такие как HTTP, MQTT, CoAP и т.д.

Для обеспечения взаимодействия между устройствами IoT используются протоколы и технологии, такие как RESTful API, WebSocket и Lightweight M2M. Эти технологии обеспечивают передачу данных между устройствами в режиме реального времени, а также обеспечивают стандартизированную коммуникацию между устройствами IoT.

Кроме того, для обеспечения безопасности передачи данных между устройствами IoT используются различные протоколы и методы, такие как Secure Sockets Layer (SSL), Transport Layer Security (TLS), Virtual Private Networks (VPN) и т.д. Эти протоколы и методы помогают защитить данные при передаче между устройствами IoT и обезопасить сеть в целом.

В целом, возможность взаимодействия между устройствами IoT через различные программные и аппаратные платформы и обеспечение безопасности передачи данных являются важными аспектами для успешного функционирования сети Интернет вещей и реализации своих потенциальных преимуществ.

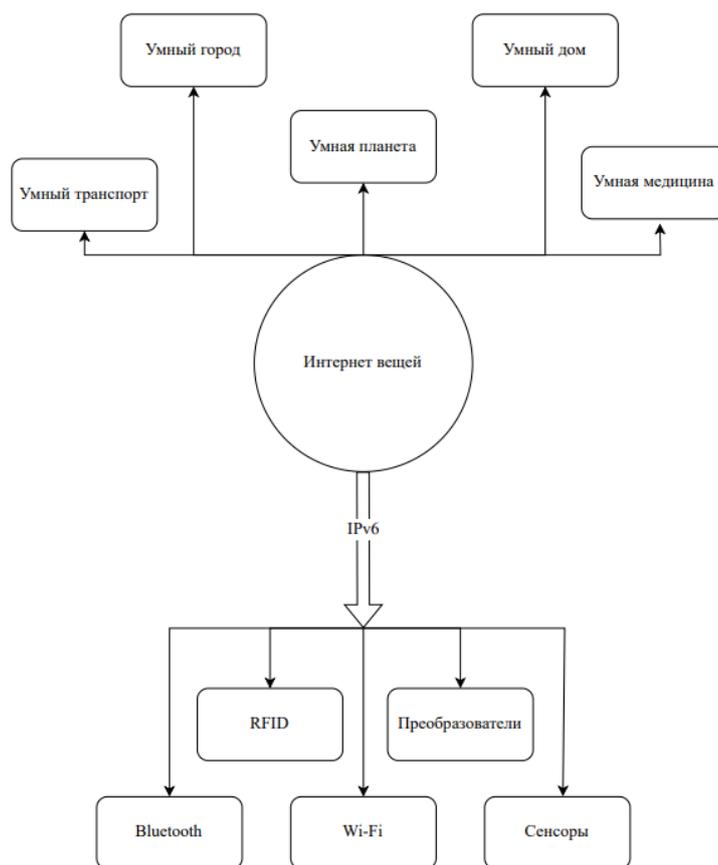


Рисунок 1.3 – Гетерогенность интернета вещей

Динамические изменения. Вещи в сети Интернета вещей (IoT) могут иметь различные статусы, которые могут меняться в зависимости от различных факторов, таких как время, местоположение и т.д. Ниже приведены некоторые общие характеристики статусов вещей в сети IoT:

- **Связанная вещь:** это вещь, которая подключена к Интернету и имеет активное сетевое соединение. Она может обмениваться данными с другими устройствами и сетями. Например, это могут быть умный дом, в котором множество устройств, таких как умные лампы, термостаты, дверные замки и т.д., связаны в сеть IoT и могут взаимодействовать друг с другом и с Интернетом.
- **Несвязанная вещь:** это вещь, которая не имеет подключения к Интернету или имеет проблемы с сетевым соединением. Например, это может быть датчик, который не может передать данные из-за отсутствия сетевого соединения.

- **Спящая вещь:** это вещь, которая находится в спящем режиме, чтобы сохранить энергию. Например, это может быть сенсор, который просыпается только тогда, когда срабатывает определенное условие, такое как изменение температуры или движение.
- **Активная вещь:** это вещь, которая активна и готова к работе. Она может обмениваться данными с другими устройствами и сетями. Например, это может быть камера видеонаблюдения, которая готова к записи и передаче данных.

Кроме того, характеристики вещей в сети IoT могут меняться в зависимости от времени, местоположения или других факторов. Например, может изменяться количество вещей в сети IoT, их расположение, состояние заряда батареи, уровень сигнала и т.д. Эти изменения могут влиять на работу сети и требовать соответствующей настройки и управления сетью, чтобы обеспечить ее правильную работу.

Обеспечение вещей услугами. Вещи являются элементом клиентской базы, и поэтому услуги, которые предоставляются той или иной вещью, должны предоставляться без ограничения по времени для физических и виртуальных устройств.

На данный момент услуги, предоставляемые вещами в сети IoT, могут зависеть от времени и конкретных характеристик вещи, но в целом желательно, чтобы они были максимально доступны для потребителей.

Огромная шкала вещей. В сетях Интернета Вещей количество устройств может достигать десятка триллионов устройств.

Прогнозируется, что количество устройств в сетях Интернета Вещей (IoT) будет продолжать расти и может достигнуть десятков триллионов устройств в ближайшее время.

Согласно отчету компании IDC, к 2025 году количество устройств IoT на планете достигнет 41,6 миллиарда, а в другом исследовании, проведенном компанией Juniper Research, прогнозируется, что к 2026 году число подключенных устройств IoT достигнет 83,8 миллиарда.

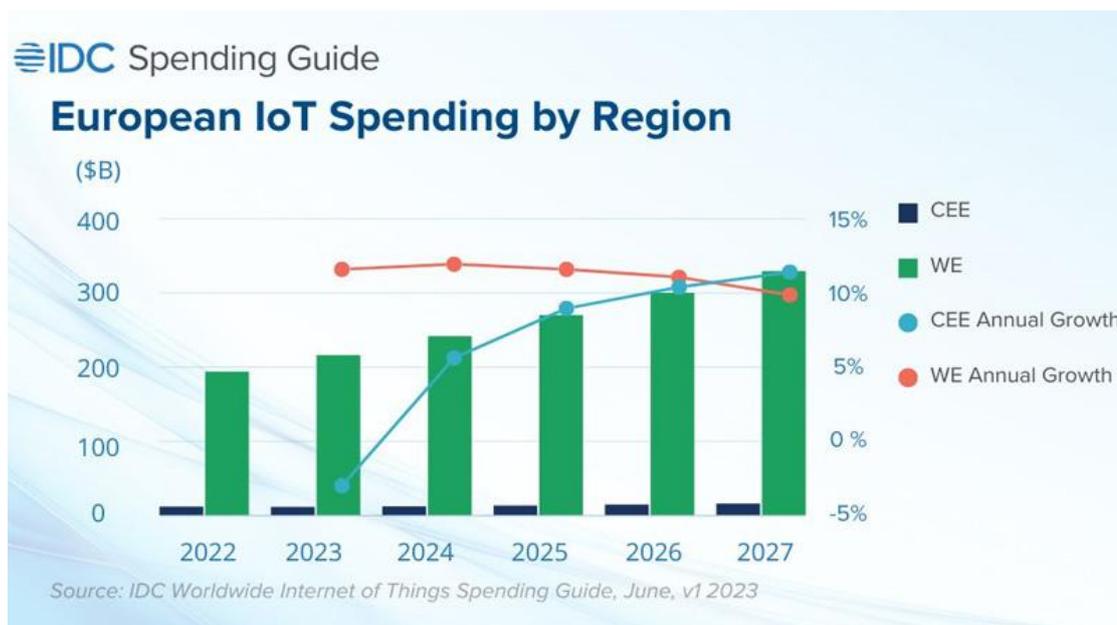


Рисунок 1.4 – Прогноз по европейскому рынку Интернета вещей (IoT) на ближайшие годы от IDC

Такое стремительное увеличение количества устройств IoT становится возможным благодаря расширению области применения технологий IoT. Сегодня устройства IoT широко применяются в таких сферах как промышленность, здравоохранение, городское планирование и управление, сельское хозяйство, транспорт и домашняя автоматизация, и это лишь некоторые из возможных областей применения.

1.3 История появления беспроводных сенсорных сетей

История появления беспроводных сенсорных сетей началась в конце 1970-х годов, когда разработчики начали экспериментировать с использованием беспроводного соединения для передачи информации от датчиков. Одним из первых примеров таких систем можно назвать созданный в 1980-х годах прототип беспроводного датчика температуры, который использовала фармацевтическая компания Merck.

Однако настоящий прорыв произошел в 1990-х годах, когда появились первые коммерческие беспроводные сенсорные сети. В 1993 году компания

Honeywell представила систему Inncom, которая использовалась для контроля температуры и освещенности в номерах отелей. Эта система включала беспроводные датчики, которые передавали данные на центральный компьютер.

Также, одним из первых примеров сенсорных сетей была система SOSUS. Эта система была разработана США во время холодной войны для обнаружения подводных лодок в океане. Она состояла из сотен гидрофонов, размещенных на дне океана, которые регистрировали звуковые волны, генерируемые подводными лодками.

Впоследствии, технологии беспроводных сенсорных сетей стали активно развиваться и стали доступны широкому кругу потребителей. Развитие микроэлектроники позволило создавать компактные, недорогие и энергоэффективные датчики и устройства связи, что способствовало развитию таких систем.

1.4 Протоколы для беспроводных сенсорных сетей

ZigBee. Основным протоколом беспроводных сенсорных сетей является ZigBee, который был разработан для обеспечения безопасной и надежной связи между устройствами, работающими на низкой мощности. Он использует малоэнергетичный радиопrotocol IEEE 802.15.4 и обеспечивает достаточно высокую скорость передачи данных на небольшие расстояния (до 100 метров). Этот протокол применяется во многих областях, включая умный дом, промышленность, логистику и медицину.

Однако ZigBee не является единственным и основным протоколом. Существуют и другие протоколы, такие как Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, Z-Wave, LoRaWAN и др. Каждый из них имеет свои особенности и применяется в разных сферах деятельности, в зависимости от требований к сети, таких как дальность действия, скорость передачи данных, энергопотребление, стоимость и т.д.

Bluetooth. Bluetooth был разработан для передачи данных между устройствами в коротком диапазоне, обычно до 10 метров, и может подключать до восьми устройств. В то же время, беспроводные сенсорные сети могут состоять из сотен или даже тысяч устройств, которые должны обмениваться данными в радиусе действия до нескольких сотен метров.

Кроме того, Bluetooth потребляет значительное количество энергии, что делает его менее эффективным для беспроводных сенсорных сетей, где широко используются батарейные и беспроводные устройства.

Тем не менее, есть случаи, когда Bluetooth все-таки применяется в беспроводных сенсорных сетях, например, в небольших системах мониторинга микроклимата или в системах мониторинга активности и здоровья людей. В таких случаях Bluetooth может быть идеальным выбором благодаря своей надежности и удобству использования, а также наличию различных профилей и уровней служб в стандарте Bluetooth, таких как Bluetooth Low Energy (BLE), которые могут быть оптимизированы для беспроводных сенсорных сетей.

Wi-Fi. Wi-Fi был создан для передачи данных между компьютерами и другими устройствами в локальных сетях и имеет довольно высокий уровень энергопотребления, поэтому он не оптимизирован для использования в беспроводных сенсорных сетях, в которых обычно используются батарейные устройства с низким уровнем энергопотребления.

Однако некоторые устройства в беспроводных сенсорных сетях могут использовать Wi-Fi для получения доступа к Интернету и передачи данных на большие расстояния, например, в городских сенсорных сетях или системах умного города. В таких случаях Wi-Fi может служить транспортным протоколом для передачи данных на серверы, где они обрабатываются и анализируются.

Одним из преимуществ Wi-Fi является его высокая скорость передачи данных и широкое распространение, благодаря чему существует большое количество устройств с поддержкой Wi-Fi, что делает его более доступным в экономическом плане, чем некоторые другие протоколы беспроводной связи.

Z-Wave. Z-Wave использует меньшую частоту - 868,42 МГц в Европе и 908,42 МГц в Северной Америке - что позволяет лучше проникать сквозь стены и другие препятствия, улучшать передачу сигнала и увеличивать диапазон покрытия. Благодаря этому протокол Z-Wave является хорошим выбором для систем умного дома и беспроводных сенсорных сетей, где требуется устойчивое и надежное соединение.

Z-Wave также имеет низкий уровень энергопотребления, что позволяет бесперебойную работу устройств на батарейной основе в течение нескольких лет. Это делает Z-Wave идеальным выбором для беспроводных сенсорных сетей, где батарейные устройства могут быть размещены на большом расстоянии от центрального устройства управления.

Одним из заметных преимуществ протокола Z-Wave является его способность обеспечивать устройствам умного дома и беспроводным сенсорным сетям устойчивое и надежное взаимодействие. Кроме того, благодаря наличию более чем 2000 сертифицированных устройств и простотой установки и настройки, Z-Wave может быть использован практически в любой системе умного дома или беспроводной сенсорной сети.

LoRaWAN. LoRaWAN использует модуляцию с дальним расширением для передачи данных на большие расстояния и в условиях, где доступность сигнала является проблемой.

Одним из главных преимуществ LoRaWAN является его дальность связи, которая может достигать нескольких километров в городских условиях и более 10 километров в открытой местности. Это делает LoRaWAN идеальным выбором для создания беспроводных сенсорных сетей, используя которые можно охватить большие территории, например, городские сети управления трафиком, водоснабжением, уходом за зелеными насаждениями и т.д.

Кроме того, LoRaWAN имеет низкий уровень энергопотребления, что позволяет устройствам работать в течение нескольких лет на батарейной основе. Это делает его идеальным для беспроводных сенсорных сетей, где батарейные устройства должны работать в течение длительного времени.

LoRaWAN также обладает защищенностью протоколов и поддерживает шифрование данных для защиты от несанкционированного доступа. Это делает LoRaWAN безопасным выбором для передачи конфиденциальных данных в беспроводных сенсорных сетях.

Таким образом, выбор протокола для беспроводной сенсорной сети зависит от требований проекта, функциональности и условий эксплуатации.

1.5 Применение беспроводных сенсорных сетей

Беспроводные сенсорные сети применяются в различных областях и сферах деятельности [10]. Некоторые из них:

Умный дом: Беспроводные сенсорные сети используются в умных домах для управления освещением, температурой, охранной сигнализацией, автоматическими дверями и др.

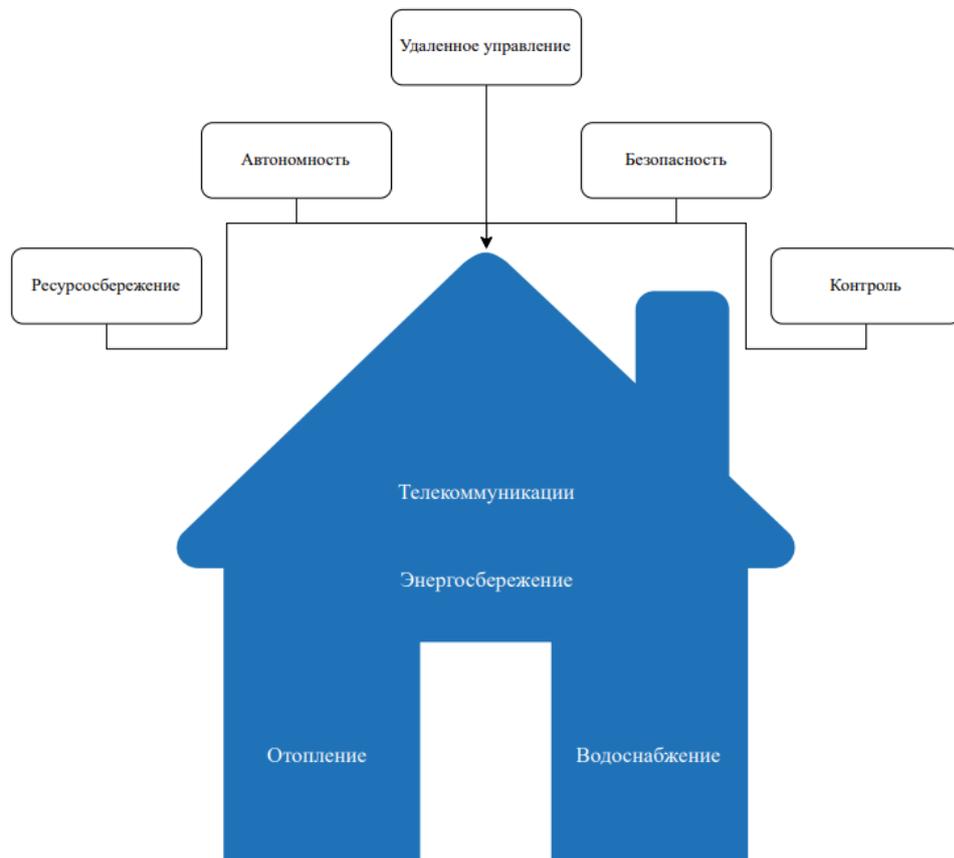


Рисунок 1.5 – применение IoT для умного дома

Примеры таких систем и устройств включают:

1. Освещение: Беспроводные сенсорные сети позволяют автоматически управлять освещением в доме на основе наличия людей в конкретной комнате или зоне, уровня естественного света и т.д. Это позволяет сократить расход энергии и увеличить комфорт в доме.

2. Климат-контроль: Беспроводные сенсорные сети также могут использоваться для управления температурой в разных комнатах дома на основе желаемого уровня комфорта в комнате и текущей погоды.

3. Охранная система: Беспроводные сенсорные сети часто используются для управления охранной сигнализацией в доме. Датчики могут контролировать окна, двери и другие точки доступа на предмет несанкционированного входа в дом.

4. Автоматические двери: Беспроводные сенсорные сети также могут использоваться для автоматического управления дверями в доме. Например, система может автоматически открывать дверь для гостей или жильцов, используя распознавание лица или кодовый замок.

5. Управление энергопотреблением: Беспроводные сенсорные сети могут использоваться для управления энергопотреблением в доме. Датчики могут контролировать энергопотребление разных устройств, таких как холодильник, кондиционер, стиральная машина, и т.д.

Таким образом, беспроводные сенсорные сети играют важную роль в создании умного дома, повышая комфорт и безопасность жильцов и снижая расходы на энергопотребление.

Промышленность: Беспроводные сенсорные сети применяются для мониторинга и управления производственными процессами в промышленности.

Одно из применений беспроводных сенсорных сетей в промышленности - это контроль качества продукции. Сенсоры могут использоваться для измерения физических характеристик продукции, таких как размер, вес, температура, влажность и т.д. Это помогает предотвращать дефекты продукции

на ранних этапах производства и обеспечивает более высокую точность и надежность в оценке качества конечного продукта.

Беспроводные сенсорные сети также используются для мониторинга состояния оборудования и предотвращения возможных аварий. Датчики могут контролировать состояние и эффективность различных машин и систем в реальном времени, а затем передавать полученные данные в центральную систему управления. Это позволяет операторам быстро реагировать на проблемы и принимать меры по устранению неисправностей до того, как произойдут сбои в работе оборудования.

Другое применение беспроводных сенсорных сетей - это управление и оптимизация производственных процессов. Сенсоры могут контролировать различные параметры производственных процессов, такие как скорость ленты, температуру печи, уровень жидкости в резервуарах и т.д. Полученные данные могут использоваться для оптимизации эффективности и скорости производственных процессов, минимизации расходов на электричество и другие ресурсы, а также для сокращения времени обработки продукции.

Таким образом, беспроводные сенсорные сети представляют собой важный инструмент для промышленных предприятий, помогая снизить затраты и увеличить производительность, обеспечивая более безопасные и эффективные условия работы.

Здравоохранение: Беспроводные сенсорные сети используются для мониторинга показателей здоровья пациентов, следящих за состоянием сердечного ритма, давлением, уровнем кислорода в крови и т.д.

Благодаря этому технологическому решению, пациентам не обязательно находиться в больничной палате, чтобы поддерживать постоянный контроль за своими жизненно важными показателями.

С помощью беспроводных датчиков, которые часто оснащены специализированными приборами, пациенты могут контролировать свои сердечные ритмы, уровень кислорода в крови, температуру тела и боли. Полученные данные передаются в центральную систему управления

медицинскими услугами для анализа. Это позволяет врачам своевременно реагировать на неблагоприятные изменения в здоровье пациентов и оказывать нужную помощь.

Беспроводные сенсорные сети также используются для мониторинга детей, страдающих от болезни дыхательных путей или недостатка веса. В таких случаях родители могут использовать специализированные датчики для контроля над дыханием и сердечным ритмом своих детей, а также для определения веса и температуры тела.

Таким образом, беспроводные сенсорные сети действительно представляют собой новую эру для мониторинга здоровья, открывая возможности для более детального контроля и управления показателями здоровья пациентов в режиме реального времени без необходимости постоянного пребывания в больнице.

Транспорт: Беспроводные сенсорные сети используются для мониторинга и оптимизации транспортных систем.

Одним из способов использования беспроводных сенсорных сетей является контроль над движением транспорта. Системы мониторинга движения позволяют установить датчики, которые собирают информацию о потоке транспорта и передают ее на сервер. Эта информация может быть использована для определения потенциальных пробок и управления светофорами, что поможет снизить время в пути, и уменьшит конфликты между транспортными потоками.

Беспроводные сенсорные сети также могут быть использованы для сбора данных о состоянии дорог и инфраструктуры. Например, датчики могут мониторить состояние дорожного покрытия, замерять скорость ветра, температуру и влажность. Эти данные могут использоваться для определения состояния дорог и для улучшения технического обслуживания.

Таким образом, беспроводные сенсорные сети являются действенным инструментом для мониторинга и управления транспортными системами, позволяющим повысить эффективность и безопасность дорожного движения.

Охрана окружающей среды: Беспроводные сенсорные сети применяются для контроля над качеством воздуха, водой, загрязнением почвы, уровнем шума и др. Эти сети состоят из множества небольших беспроводных устройств, называемых сенсорами, которые используются для сбора и передачи данных об окружающей среде, таких как температура, влажность, уровень загрязнения и т.д. Данные могут быть анализированы и использованы для мониторинга и управления системами очистки воздуха, воды, для предотвращения загрязнения почвы, управления и сокращения шумового загрязнения и т.д.

Спорт и фитнес: Беспроводные сенсорные сети могут использоваться для отслеживания физической активности, здоровья и фитнеса. Они могут использоваться для контроля сердечного ритма, количества пройденных шагов, измерения калорий, сбора данных об упражнениях и т.д.

Такие сети обычно состоят из небольших устройств, которые можно носить на теле и которые собирают данные с помощью встроенных сенсоров, таких как акселерометры, гироскопы и пульсометры.

Собранные данные могут быть переданы на сервер, где они обрабатываются и анализируются для выявления трендов и паттернов в физической активности и здоровье. Эта информация может быть полезна для улучшения фитнес-результата, контроля за здоровьем и предотвращения развития некоторых заболеваний.

Беспроводные сенсорные сети имеют огромный потенциал для улучшения качества жизни и повышения эффективности различных сфер деятельности. Они могут помочь в решении многих проблем и повышении безопасности, эффективности и комфорта для людей.

1.6 Функции самоорганизации сетей связи

Самоорганизующаяся сеть - это сеть, которая может изменять свою структуру и конфигурацию, чтобы лучше соответствовать требованиям

окружающей среды и обеспечить эффективную передачу данных. В такой сети узлы могут взаимодействовать между собой и принимать решения в автономном режиме, без участия центрального управления [11].

Такие сети могут быть реализованы с помощью различных технологий, таких как беспроводные сети, сенсорные сети, управление трафиком в локальных сетях (LAN) и т. д. Важными свойствами таких сетей являются масштабируемость и гибкость, что делает их особенно привлекательными для применения в сложных и динамичных средах.

Самоорганизация является важной функцией современных сетей связи, позволяющей им адаптироваться к изменяющимся условиям, быстро и эффективно обслуживать большое количество пользователей и обеспечивать надежность связи.

Некоторые из функций, обеспечиваемых самоорганизацией сетей связи, включают:

1. Автоконфигурация: сети связи могут автоматически настраивать свои параметры, такие как IP-адреса, маршрутизация, настройки безопасности и т.д., без участия операторов связи. Это позволяет ускорить процесс настройки сети и уменьшить вероятность ошибок.

2. Адаптивность: сети связи могут быстро адаптироваться к изменению условий, таким как увеличение трафика или отказ устройств. Например, сеть может перенаправить трафик на более широкие каналы, когда происходит увеличение трафика, что обеспечивает более эффективное использование ресурсов сети.

3. Распределенная обработка информации: самоорганизация позволяет выполнять обработку информации на каждом узле сети, минимизируя количество обработки на центральных серверах и уменьшая задержки в передаче данных.

4. Координация: сети связи могут автоматически координировать работу различных устройств и узлов сети для оптимизации использования ресурсов и обеспечения надежности связи.

5. Обнаружение и устранение ошибок: сети связи могут самостоятельно обнаруживать и устранять ошибки, такие как обрывы соединения или неполадки в оборудовании. Например, сети могут проводить диагностику и перенаправлять трафик через альтернативные пути в случае обрыва соединения.

6. Оптимизация ресурсов: сети связи могут оптимизировать использование ресурсов, например, путем динамической регулировки пропускной способности каналов связи в зависимости от количества трафика и т.д.

7. Управление нагрузкой: сети связи могут оптимизировать использование ресурсов и обеспечить балансировку нагрузки, например, распределяя трафик между различными каналами связи или увеличивая пропускную способность тех каналов, которые находятся под наибольшей нагрузкой.

Функции самоорганизации сетей связи важны для обеспечения надежности, эффективности и гибкости работы сетей, в условиях быстро меняющейся технологической среды.

1.7 Трехмерные сети интернета вещей высокой плотности

Как было отмечено выше, развитие ИВ ведет к росту количества устройств, подключенных к сети. Ввиду того, что эти устройства часто локализованы в некоторой целевой области пространства, это приводит к их высокой концентрации, т.е. к росту их количества из расчета на единицу объема. Если ранее подобные сети описывали плоскими (двумерными) моделями, то сейчас это не всегда возможно, так как устройства могут размещаться и взаимодействовать в трехмерном пространстве, причем третье измерение (высота) может быть весьма существенным с точки зрения организации взаимодействия между ее узлами [12]. Например, гетерогенная сеть ИВ может включать в себя элементы, размещаемые на воздушных, в том

числе, высотных и космических платформах. Трехмерные сети ИВ также имеют место и в различных строениях: многоэтажных зданиях и сооружениях, на промышленных объектах и возможно, в иных случаях. Основным признаком того, что сеть необходимо рассматривать, как трехмерную является распределение ее узлов в пространстве. Если область обслуживания такова, что ее «высота» соизмерима с другими двумя измерениями, то такую сеть следует рассматривать как трехмерную, например, в области высотной застройки, рисунок 2, сети ИВ, организованные в высотных зданиях, можно рассматривать как трехмерные сети.



Рисунок 1.6 – Модель потенциально возможной площадки для размещения трехмерных сетей ИВ

Особенностями сети высокой плотности является то, что в зоне связи произвольно взятого узла сети может оказаться достаточно много узлов сети, которые своей активностью оказывают влияние на его работу. Это влияние проявляется в снижении пропускной способности сети. Практически, это накладывает ограничения на интенсивность, производимого узлами сети трафика.

Наряду с отрицательными свойствами имеют место и положительные качества. Благодаря высокой плотности узлов велика вероятность, найти узел рядом с произвольно выбранной точкой пространства. Это качество позволяет

строить сеть той структуры, которая, по каким-либо соображениям требуется. Это свойство также позволяет упростить некоторые процедуры. Например, в ряде случаев, найти кратчайший путь в такой сети может быть проще, так как кратчайшее расстояние определяется по прямой, следовательно, узлы, входящие в него тоже вероятнее всего будут расположены вблизи этой прямой. Разумеется, такие упрощения не всегда возможны. Не всегда возможно получить данные о координатах узлов сети, поэтому, необходимо иметь методы, позволяющие выбирать структуру сети и управлять ею в условиях большого количества узлов.

Трехмерная сеть может иметь различную структуру, в частности, это может быть регулярная структура в виде различного рода решеток [13] или произвольная структура. Однако, в большинстве случаев, структура такой сети связана со структурой окружения, в котором она создается.

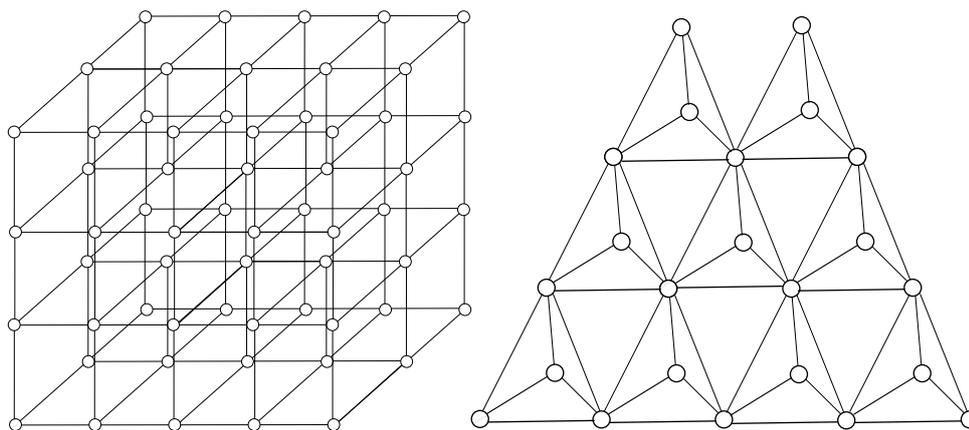


Рисунок 1.7 – Примеры моделирования структуры сети высокой плотности

Для построения таких сетей требуется создание модельно-методического аппарата, позволяющего решать задачи моделирования и управления сетью с большим количеством устройств

1.8 Выводы

1. Возникновение и развитие Интернета вещей является продолжением развития сетей телеметрии и технологических связей, а его стимул — это развитие технологий телекоммуникаций и вычислительной

техники. Современное состояние этого процесса и его перспектива позволяют сделать вывод о большом количестве устройств, подключенных к сетям связи. Это приводит к необходимости выбора адекватного модельно-методического аппарата, позволяющего работать с такими количествами.

2. Концепция Интернета вещей определяет, что любые устройства или вещи теперь могут взаимодействовать между собой в любое время в произвольной точке пространства. Фактически, это констатирует возможность построения сетей произвольной структуры, обеспечивающих связность между ее узлами и возможность доставки необходимой информации. Для реализации этого положения также необходимы модели и методы, позволяющие реализовать формирование структуры сети ИВ с большим количеством устройств в произвольной области пространства.

3. Формирование физической и логической структур сети ИВ, а также управление распределением трафика в сети требуют применения моделей и методов, способных решать эти задачи в условиях большого количества узлов в заданное время. Для их разработки требуется учитывать особенности сетей высокой плотности, а также особенности распределения их элементов в зоне обслуживания, которая представляет собой трехмерное пространство.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что современное состояние и тенденции развития телекоммуникаций ведут к построению трехмерных сетей Интернета вещей высокой плотности. Как процесс развертывания этих сетей, так и процессы управления ими требуют разработки модельно-методического аппарата, направленного на решение задач выбора структуры сети и задач распределения трафика [14], в частности это задачи:

- кластеризации, обеспечивающие разделение большого количества узлов на меньшие группы с целью организации управления внутри групп;
- выбор головных узлов кластеров с целью формирования логической структуры сети;
- выбор маршрутов пропуска трафика с целью обеспечения эффективного использования ресурсов сети.

Таким образом, направленность работы, ее цель и круг задач, актуальны и являются шагом в совершенствовании модельно-методической базы построения сети Интернета вещей.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СЕТЕЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

2.1 Задачи построения трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности

Реализация сетей ИВ с большим количеством узлов в относительно малых объемах приводит к высокой концентрации устройств в пространстве, что создает сложности как с точки зрения реализации сети, так и с точки зрения ее моделирования и анализа. Эти сложности, в первую очередь, определяются слишком большим количеством устройств [5]. При организации ad hoc сети, ею необходимо управлять, т.е. находить и поддерживать маршруты доставки трафика [15]. Эта задача достаточно легко решается при относительно малом количестве узлов с помощью известных алгоритмов маршрутизации [17, 18], однако при большом количестве узлов, она существенно усложняется.

Например, даже при размере сети 1000 узлов, для построения матрицы маршрутизации придется использовать таблицу 10^6 ячеек, т.е. примерно 4 Мбайт оперативной памяти, а процесс поиска пути будет пропорционален 10^6 операций, выполняемых процессором узла. Учитывая, что процессоры (контроллеры) устройств сети ИВ, во многих случаях, имеют относительно невысокие вычислительные возможности и объем оперативной памяти не велик, то решение такой задачи для них является весьма сложной проблемой, а с учетом того, что 1000, это далеко не предел, задача существенно усложняется.

Для работы с такими сетями необходимо создавать иерархическую структуру, в которой выделять кластеры, представляющие собой отдельные ad-hoc сети, взаимодействующие через шлюзы. В качестве шлюзов могут, в ряде случаев, выступать энергонезависимы узлы, возможно имеющие большую пропускную способность. Такие узлы часто бывают жестко привязаны к инфраструктуре. Такие сети называют инфраструктурными [19]. Достоинством таких сетей является относительно стабильная структура, по сравнению с ad

нос сетями, где все узлы подвижны. Таким образом, задача кластеризации является одной из основных задач построения сети ИВВП.

Рассмотрим сеть ИВ с точки зрения размещения ее в пространстве. Во многих случаях при моделировании наземных сетей беспроводной связи, когда узлы взаимодействуют друг с другом в зоне прямой видимости или эквивалентной по размерам области пространства, применяются геометрические модели, оперирующие элементами сети на плоскости, т.е. применяются двумерные модели.

В случае ИВВП такие модели не всегда применимы из-за того, что в таких сетях узлы могут располагаться не только на плоскости, но и в любой точке окружающего пространства. В общем случае можно рассматривать неограниченные области пространства [20], например, наземные узлы на транспортных средствах, воздушные на БПЛА и высотных летательных аппаратах, космические на искусственных спутниках земли, рисунок 2.1. Вероятно, что такая сеть неоднородна и имеет специфику на каждом из упомянутых уровней.

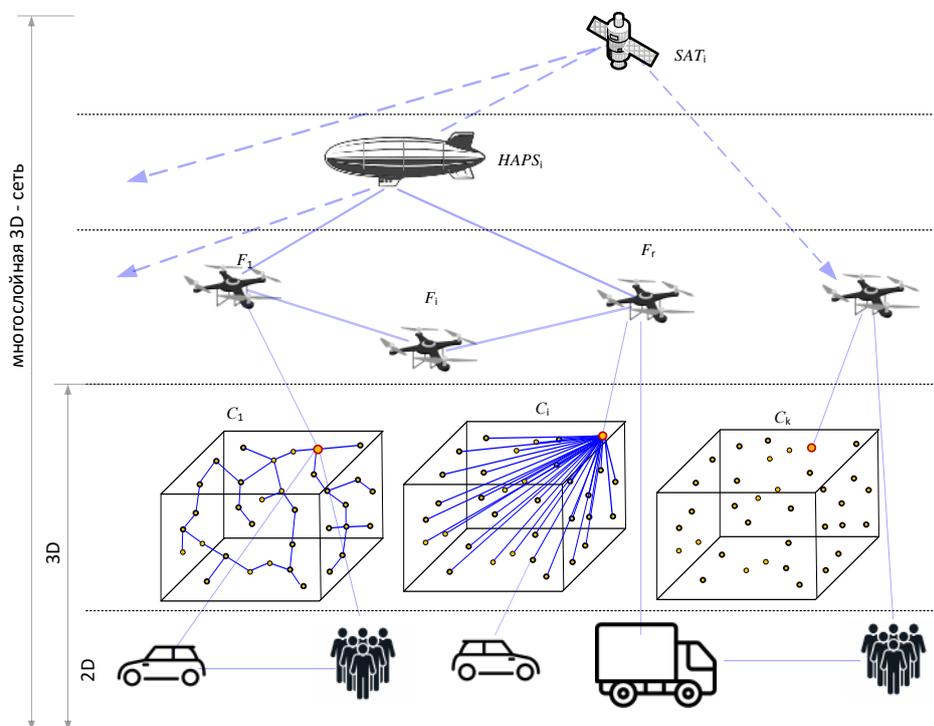


Рисунок 2.1 – Модель трехмерной многоуровневой ИВВП

Неоднородность такой сети определяется различными факторами, такими как: плотность узлов определенного уровня в пространстве, особенности узлов каждого из уровней, особенности окружения, в котором расположены узлы, расстояния между узлами, интенсивность трафика и др. Например, узлы размещенные на транспортных средствах находятся в окружении дорожной инфраструктуры, носимые (нательные) узлы размещены в пространстве жизни людей, узлы на БПЛА находятся в воздушном пространстве и т.п.

Уровни такой сети очень сильно отличаются с точки зрения технических средств обеспечения связи, поэтому узлы каждого из уровней также существенно отличаются. Наряду с этим имеет место различие в характере обслуживаемого трафика. Как видно из рисунка 2.1 узел более высокого уровня является шлюзом между сетями более низких и более высоких уровней. Таким образом, в таких узлах имеет место значительный транзитный трафик.

Для управления такой сетью необходимо выбрать узлы, которые будут выполнять роль шлюзов (головные узлы кластеров). Обеспечение связи между кластерами может быть отдельной задачей и для этого могут потребоваться дополнительные узлы [21, 22], в качестве которых для наземной сети могут быть использованы узлы, размещенные на БПЛА. Задача этих дополнительных узлов – обеспечить досягаемость связи между узлами различных кластеров, если они находятся на удалении, превышающем дальность связи.

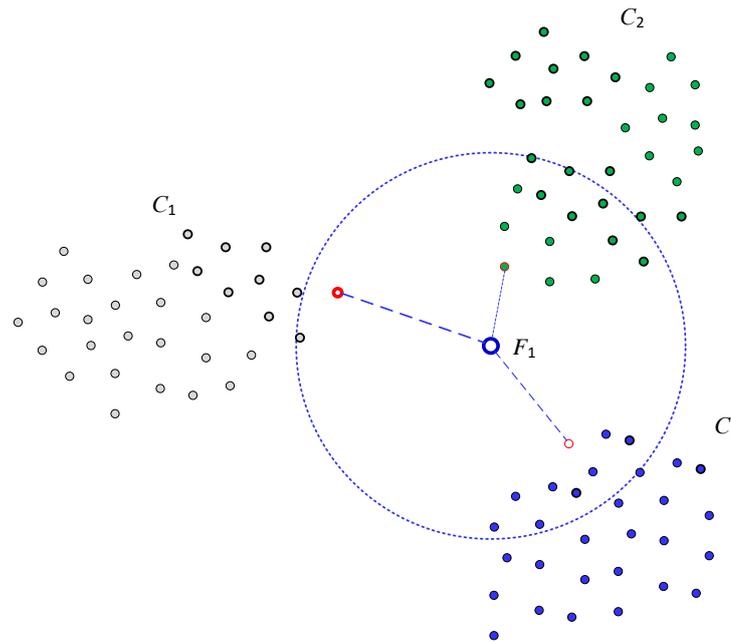


Рисунок 2.2 – Обеспечение связности между кластерами

Необходимость такого решения зависит от взаимного расположения узлов кластеров и характеристик средств обеспечения связи.

Несложно заметить, что кластеры могут быть определены различным образом. Приведенный на рисунке 2.2 пример демонстрирует случай, когда кластеры явно выражены и могут быть легко определены различными алгоритмами. Однако на практике такая выраженность кластеров далеко не всегда имеет место. Выделение кластера можно рассматривать как многокритериальную задачу оптимизации, точное решение которой может быть получено только перебором всех вариантов, что не реализуемо на практике. Для решения задач кластеризации разработано множество алгоритмов, которые позволяют получить близкие к оптимальным решения.

Поскольку получаемые решения не являются единственно возможными, различные алгоритмы применимы в тех или иных задачах, например [21-25].

Решение задачи кластеризации даже и использованием известного алгоритма может оказаться сложным из-за большого количества кластеризуемых элементов (узлов сети). Таким образом, выбор метода и кластеризация также являются одной из основных задач построения сети ИВВП.

Решение задачи кластеризации зависит от структуры сети. Структура сети определяется количеством узлов сети и связей между ними. Если допустить, что все узлы одинаковые, а связи зависят от их взаимного размещения, то структура сети определяется распределением узлов в пространстве. Очевидно, что это распределение может быть различно. Узлы могут группироваться или быть равномерно распределены в пространстве. Группировки узлов могут иметь одинаковый или различный характер и т.д. Однозначно описать структуру достаточно сложно.

Задача моделирования трехмерной сети ИВВП также является одной из основных задач описания изучаемых сетей. Для моделирования сетей беспроводной связи используют математические модели точечных процессов [6]. Большинство таких моделей разработаны для плоских случаев, описания различных картографических элементов и нуждаются в модификации для случая трехмерных моделей.

Одной из характеристик геометрических структур является фрактальная размерность (ФР), которая отражает особенности геометрических фигур. ФР не является универсальной характеристикой, однако позволяет описать особенности сети, которые нельзя описать иными методами [26, 27]. Применение ФР, как дополнительной характеристики, может дать возможность повысить эффективность применяемых методов.

Таким образом, в результате рассмотрения задач построения и моделирования сетей ИВВП можно сделать вывод о том, что к таким задачам следует отнести:

- задачи кластеризации сети с учетом особенностей сетей в трехмерном пространстве и высокой плотности устройств;
- задачи выбора головных узлов кластеров и задачи обеспечения связности между кластерами;
- задачи моделирования сети ИВВП с использованием трехмерных точечных процессов и с учетом фрактальной размерности.

2.2 Фрактальная размерность

2.2.1 Понятие фрактальной размерности

Понятие фрактальной размерности было введено Бенуа Мандельбротом в 1967 году в его статье о самоподобии, в которой он описал «дробную» размерность [28].

Фрактальная размерность — это численный показатель, характеризующий фрактальные структуры или множества путем количественной оценки их сложности как отношения изменения детализации к изменению масштаба. Теоретически и эмпирически можно оценить несколько типов фрактальной размерности.

Понятие «фрактальные размерности» используется для характеристики различных объектов, начиная от абстрактных и заканчивая практическими явлениями, такими как: турбулентность, потоки жидкости, городская инфраструктура, физиология человека, медицина, тенденции рынка, временные ряды и др.

Фрактальные размерность изначально использовалась как показатель, описывающий геометрические формы, для которых детали казались более важными, чем общая картина.

Фрактальная размерность отличается от привычной топологической размерности, но может и совпадать с ней. Она совпадает с топологической размерностью для обычных геометрических форм. Она равна нулю для множеств, описывающих точки; единице для множеств, описывающих линии; двум для множеств, описывающих поверхности и трем для трехмерных множеств.

Однако, для фрактальных множеств (фигур) это не так. Если теоретическая фрактальная размерность множества превышает его

топологическую размерность, то считается, что это множество имеет фрактальную геометрию.

Например, если рассмотреть линии на плоскости, то для прямых линий фрактальная размерность будет равна единице, а для кривых она будет больше единицы и меньше двух. Таким образом, фрактальной, размерностью можно характеризовать кривую. Она дает представление и численную оценку того, насколько кривая отличается от прямой или от плоскости. Если она в данном примере близка к двум, то это значит, что кривая настолько сложна, что почти полностью заполняет собой плоскость.

Подобный пример можно привести и для поверхности, фрактальная размерность для которой принимает значения больше двух и меньше трех.

Численно фрактальная размерность определяется следующим образом.

$$f_d = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg n(\delta)}{\lg \delta} \quad (2.1)$$

Если фрактальная размерность определяется в трехмерном топологическом пространстве, то δ - это радиус шара, а $n(\delta)$ - минимальное количество шаров, необходимых для покрытия множества.

Приведенное выше определение является определением фрактальной размерности Хаусдорфа [29].

Существуют и иные определения фрактальной размерности, которые получили названия корреляционная размерность, информационная размерность, размерность Миньковского, размерность Хигути, размерность Ляпунова и некоторые другие [29].

Многообразие определений связано с активными исследованиями в этой области, в которых исследователи находили различные аспекты данного явления.

Среди наиболее общих определений можно выделить размерность Реньи, которая определяется как

$$f_R = \frac{1}{\alpha - 1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\lg \sum_i^{n(\delta)} p_i^\alpha}{\lg \delta} \quad (2.2)$$

При $\alpha=0$ (2.2) сводится к размерности Хаусдорфа (2.2), при $\alpha=2$ – к корреляционной размерности, при $\alpha=1$ следует применить правило Лопиталья, тогда (2.2) сводится к информационной размерности.

Если значение (2.2) не зависит от α , имеет место однородная фрактальное множество, если зависит, то мультифрактальное множество.

Таким образом, для однородных фракталов значения фрактальной размерности, полученные различными способами, должны быть равны.

2.2.2 Фрактальная размерность сети

Сеть (сеть связи) представляет собой множество узлов связи, объединенных между собой множеством линий связи. Таким образом, сеть можно рассматривать как множество и применять к нему методы оценки фрактальной размерности.

Выбор способа оценки фрактальной размерности зависит от того каким образом задана сеть связи. Например, нужно определить является ли географическое (геометрическое) положение узлов сети существенным фактором, влияющим на основные характеристики сети.

Можно представить проводную сеть, в которой свойства линий связи в пренебрежимо малой степени зависят от географического положения узлов. В таком случае метрикой, определяющей свойства сети, будут метрики, основанные на свойствах линий связи.

Однако в случае сетей ИВВП имеют место сети беспроводной связи, в которых пространственное взаимное расположение узлов сети имеет существенное влияние на показатели функционирования.

Следует заметить, что в случае сетей беспроводной связи, несмотря на зависимость от положения узлов сети, получить данные об их расположении может быть слишком сложной задачей. В таких случаях сеть придется описывать параметрами линий связи.

Известны два основных способа оценки фрактальной размерности сети – это метод подсчета ящиков (box-counting) и метод выращивания кластера (cluster growing).

Первый из этих методов схож с методом оценки размерности Миньковского. Для его реализации требуется информация о распределении узлов сети в пространстве, т.е. необходима информация о координатах узлов сети.

Второй метод сводится к построению связного фрагмента сети (компоненты графа, описывающего сеть). При этом достаточно знания лишь параметров (параметра) линий связи между узлами сети, например, уровня сигнала или отношения сигнал/шум.

В работе [26] приводится методика оценки фрактальной размерности для окружения сети, с целью оценки его влияния на свойства беспроводной сети связи. В качестве окружения рассматриваются различные варианты городской застройки.

Для моделирования сетей ИВВП, размещенных в зданиях и сооружениях следует рассматривать трехмерные модели как сети, так и ее окружения. Для моделирования могут быть использованы трехмерные фракталы.

Из литературы можно видеть, что аналитики относят к фрактальным сетям такие сети как WWW, нейронная сеть человеческого мозга, метаболическую сеть, сеть взаимодействия белков в организме [30].

Одной из отличительных особенностей фрактальной сети является ее иерархический характер и повторяемость (схожесть) структур на различных уровнях иерархии.

В сети ИВВП для управления сетью также должна создаваться иерархическая структура, которая может иметь несколько уровней. Структура

же сети на одном из уровней может быть схожа с другими уровнями. Это дает основание предположить, что такие сети могут иметь фрактальные свойства. По крайней мере, фрактальная размерность ИВВП может служить численной характеристикой ее структуры.

2.2.3 Анализ методов кластеризации

Методы кластеризации исследуют схожие закономерности, скрытые в данных. Целью этих методов является поиск оптимального разделения для множества независимых объектов на группы (кластеры) по максимуму «внутрикластерного» сходства и «межкластерного» различия [31, 32].

Идентификация произвольных форм, адаптируемость к высокой размерности и устранение зашумленных экземпляров — универсальные проблемы, которые широко изучались в кластерном анализе. Однако неоднородная плотность и слабая связанность также влияют на качество кластеризации.

Неоднородная плотность объектов приводит к тому, что кластер с неравномерной плотностью может быть разделен на части, а разреженные кластеры легко принять за шум (случайные объекты, не относящиеся к кластерам), а слабая связность приводит к тому, что трудно определить соседние кластеры. Хотя разработаны многочисленные методы кластеризации, основанные на разных принципах разработаны, этого еще недостаточно для эффективного решения многих проблем, используя близость только физическое расстояние или плотность.

Кластеризация на основе разделения и на основе соединения — это два широко используемых метода для связывания независимых точек [33]. Кластеризация на основе разделения находит центры кластеров и назначает элементы ближайшие к ним с помощью измерения расстояний. Известные алгоритмы, k-means (k-средних) и k-medoids (k-медиод) находят оптимальные

центры кластеров, постоянно изменяя центр масс каждого кластера. Однако эти алгоритмы не могут идентифицировать неэллипсоидальные кластеры и имеют низкую устойчивость к шуму.

Кластеризация путем нахождения пиков плотности (CDP) улучшает стратегию поиска центров кластеров на основе представления о том, что центры кластеров характеризуются высокой плотностью локально. CDP позволяет выявлять кластеры произвольной формы и шумовые элементы, но правило ассоциации может привести к неверному назначению граничных элементов, когда различные кластеры, сильно отличающиеся размером, расположены близко друг к другу.

Кластеризация на основе связности достаточно точно идентифицирует произвольные формы путем непрерывного агрегирования объектов в областях с их высокой плотностью с ростом. Как правило, пространственная кластеризация на основе плотности с шумом (DBSCAN) группирует круговые окрестности связных объектов, плотность которых выше пороговой. Хотя такой подход сохраняет локальные детали формы кластера, он может легко принять разреженные кластеры как шум и даже разделяет весь кластер, когда объекты распределены неравномерно. Алгоритмы WaveCluster и CLIQUE наносит исходные объекты на сетку и объединяет связанные ячейки сетки в кластеры. Соединение объектов с применением сетки способствует экономии времени, но слабосвязанные кластеры могут быть неверно разделены, также имеются сложности с определением границ кластеров с низкой плотностью.

В качестве подхода поиска границ может быть использован метод локальной гравитационной кластеризации (LGC) . Он использует две метрики на основе среднего сдвига: центральность (CE) и координация (CO), чтобы измерить согласованность между локальными «силами притяжения» и направления среднего смещения соседей. Этот метод способен различать внутренние и граничные объекты кластеров, и формирует кластеры, соединяя граничные и непомеченные объекты. Однако внутренние объекты в разреженных скоплениях трудно обнаружить, так как среднее значение сдвига

имеет тенденцию смещаться в сторону плотных областей. Метрики на основе плотности такие как Reverse K-Nearest Neighbors (RKNN), обычно используются для обнаружения граничных точек кластера.

На рисунке 2.3 приведены примеры решения задач кластеризации на плоскости несколькими алгоритмами.

Были использованы такие алгоритмы как: k-means, Affinity Propagation, Mean Shift, Spectral Clustering, Ward, Agglomerative Clustering, DBSCAN, HDBSCAN, OPTICS, BIRCH, Gaussian Mixture.

С помощью этих алгоритмов решались шесть примеров кластеризации. Пример 1 – два вложенных кольца объектов; пример 2 – два серпообразных кластера; пример 3 – три кластера разного размера с разным количеством и плотностью объектов, расположенные вблизи друг друга; пример 4 – три кластера в форме эллипса; пример 5 – три компактно размещенных кластера; пример 6 – скопление объектов в одной области.

Из рисунка 2.3 видно, что ни один из алгоритмов не решил все задачи абсолютно верно.

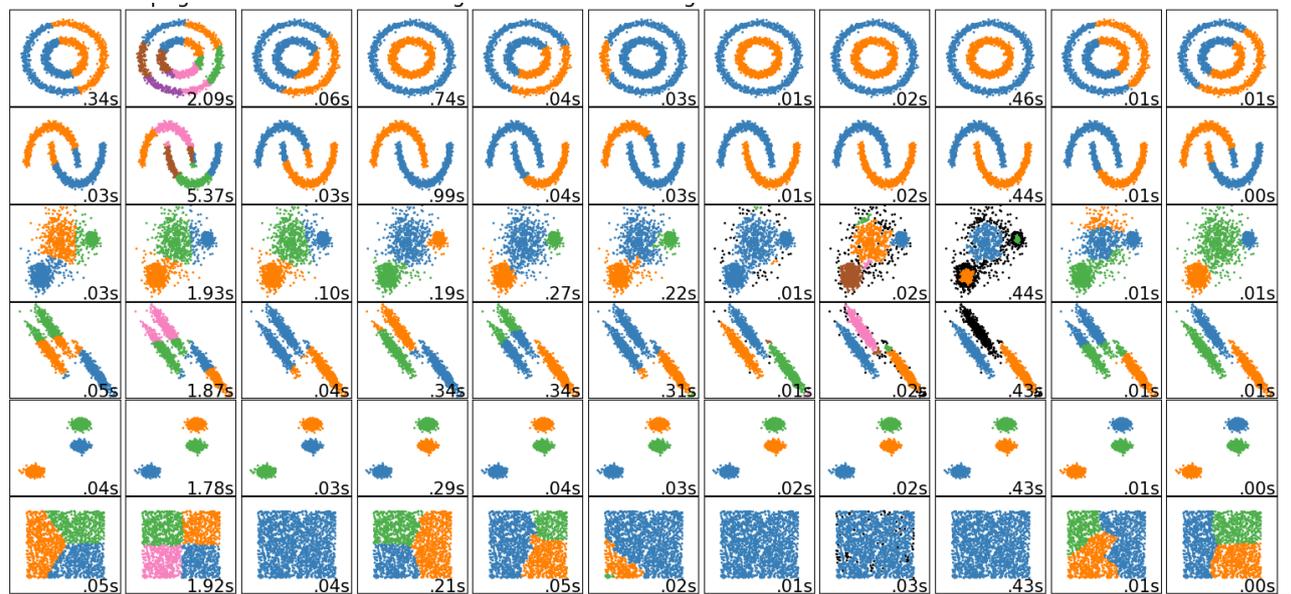


Рисунок 2.3 – Примеры решения задач кластеризации на плоскости

Результаты решения примеров кластеризации приведены в таблице 2.1. В таблице 2.1 использованы обозначения: « - » - задача не решена, «+» - задача решена, « * » - задача решена частично.

Самой простой задачей была кластеризация компактно расположенных кластеров (пример 5), ее выполнили все алгоритмы.

Таблица 2.1 – Сравнение алгоритмов

Пример	Результат решения задачи алгоритмом										
	k-means	Affinity Propagation	Mean Shift	Spectral Clustering	Ward	Agglomerative Clustering	DBSCAN	HDBSCAN	OPTICS	BIRCH	Gaussian Mixture
1	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
2	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	-
3	*	*	*	+	+	+	-	+	*	-	+
4	-	-	-	+	-	-	+	+	*	-	+
5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+

На рисунке 2.4 приведена иллюстрация результатов анализа на количество верно решенных задач кластеризации.

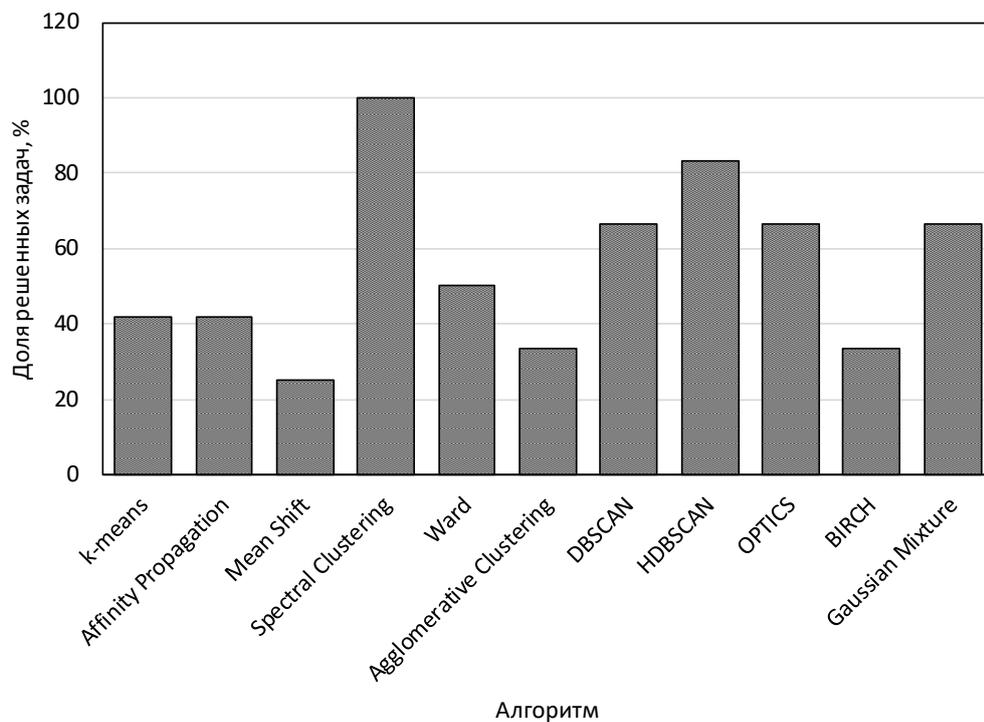


Рисунок 2.4 – Доля верно решенных задач кластеризации

Самыми сложными были задачи кластеризации кластеров в форме вложенных колец (пример 1), серпообразных кластеров (пример 2), их решили четыре алгоритма Spectral Clustering, DBSCAN, HDBSCAN и OPTICS.

Следующий по сложности был пример 3 (три кластера разного размера с разным количеством и плотностью объектов), его также верно решили четыре алгоритма, но еще четыре алгоритма приняли близкое к верному решение.

Пример 6 также оказался достаточно сложным, так как кластеры в нем сложно различимы.

Лидером из алгоритмов по возможности решения данных примеров можно выделить спектральный алгоритм (Spectral Clustering), он решил все поставленные задачи.

В таблице 2.2 приведены данные о времени, затраченном на решение данных задач. Задачи решались на компьютере с процессором Intel i7 12700K с 32 Гбайт оперативной памяти. Сравнение было реализовано с помощью библиотеки scikit-learn [34] на языке Python [35], при кластеризации 2000 объектов.

Таблица 2.2 – Время выполнения задач кластеризации

Пример	Время выполнения задачи алгоритмом, с										
	k-means	Affinity Propagation	Mean Shift	Spectral Clustering	Ward	Agglomerative Clustering	DBSCAN	HDBSCAN	OPTICS	BIRCH	Gaussian Mixture
1	0,34	2,09	0,06	0,74	0,04	0,03	0,01	0,02	0,46	0,01	0,01
2	0,03	5,37	0,03	0,99	0,04	0,03	0,01	0,02	0,44	0,01	0,00
3	0,03	1,93	0,10	0,19	0,27	0,22	0,01	0,02	0,44	0,01	0,01
4	0,05	1,87	0,04	0,34	0,34	0,31	0,01	0,02	0,43	0,01	0,01
5	0,04	1,78	0,03	0,29	0,04	0,03	0,02	0,02	0,43	0,01	0,00
6	0,05	1,92	0,04	0,21	0,05	0,02	0,01	0,03	0,43	0,01	0,00
Ср.	0,11	2,49	0,05	0,46	0,13	0,11	0,01	0,02	0,44	0,01	0,01

Как видно из таблицы 2.2 наиболее быстрыми алгоритмами являются DBSCAN, BIRCH и Gaussian Mixture, а наиболее медленным Affinity Propagation.

Из таблицы виден значительный разброс времени решения задач, как от задачи, так и от алгоритма. Как видно, самый успешный по решению задач спектральный алгоритм более чем от 19 до 99 раз уступает алгоритму DBSCAN в части решаемых обоими алгоритмами задач.

На рисунке 2.5 приведена иллюстрация результатов оценки среднего значения времени решения задачи кластеризации.

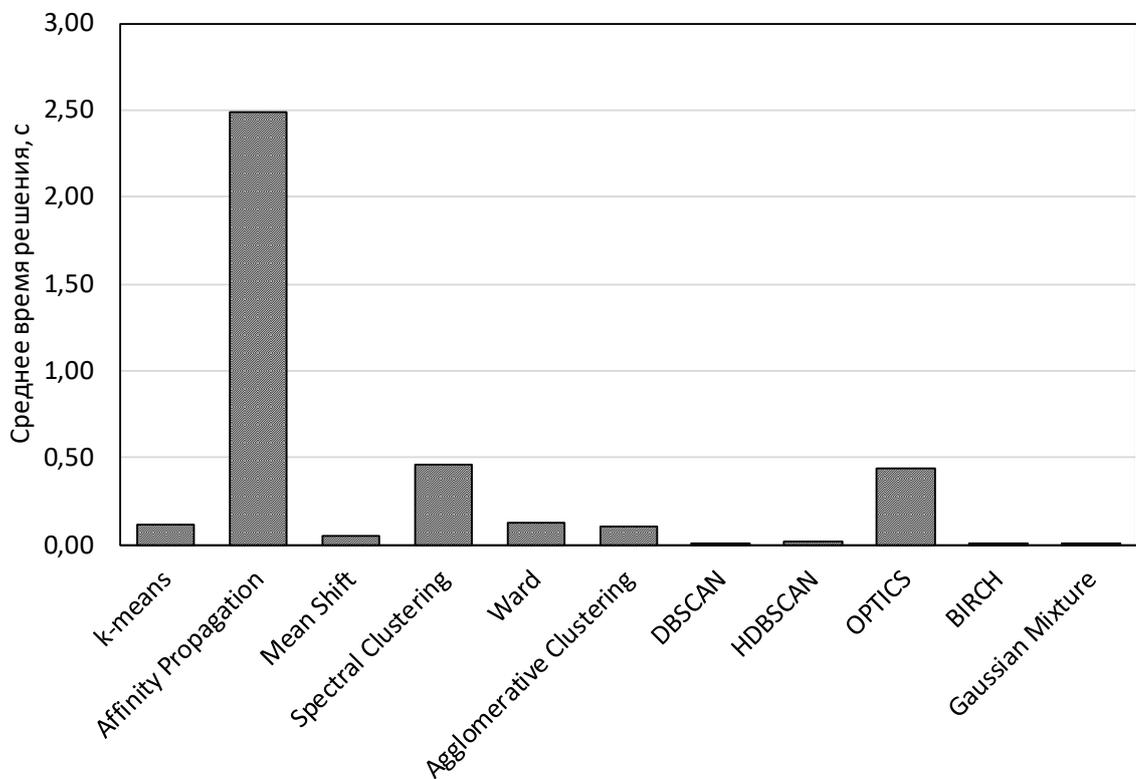


Рисунок 2.5 – Среднее время решения задач кластеризации

Также стоит отметить, что абсолютная величина времени решения задачи кластеризации относительно высоко. При реализации алгоритмов на микроконтроллерах, вычислительные возможности которых могут быть ниже, примерно на два порядка, время вычисления в ряде случаев может превысить десятки секунд, а с учетом меньшего объема оперативной памяти, оно может быть существенно больше.

Применимость рассмотренных алгоритмов для решения задач в трехмерных сетях ИВВП нужно рассматривать как с точки зрения их вычислительной сложности, так и с точки зрения достаточности исходных данных.

С точки зрения вычислительной сложности, наибольший интерес представляют наименее «сложные» алгоритмы, имеющие минимальное время решения задач, например, такие как DBSCAN, BIRCH, Gaussian Mixture. С учетом возможностей кластеризации, таблица 2.1 можно выделить такие алгоритмы как DBSCAN и Gaussian Mixture. Также следует заметить, что для решения этих задач требуются исходные данные о положении (локализации) узлов сети.

Также следует заметить, что данные алгоритмы основаны на общих принципах кластеризации по некоторой метрике, основанной на расстоянии или некотором показателе качества. Для решения задач кластеризации в сети ИВВП желательно учитывать особенности, характерные именно для сети связи. В качестве такой особенности может быть связность, т.е. возможность установления соединения между узлами сети.

Далее будет приведен метод кластеризации, реализованный с учетом данной возможности.

2.3 Моделирование и кластеризация трехмерной сети интернета вещей с применением метода оценки фрактальной размерности

2.3.1 Предварительные замечания

Развитие сетей Интернета вещей (ИВ) является одним из приоритетных направлений развития сетей связи. Уже сегодня количество подключенных к сетям связи устройств более чем вдвое превосходит численность населения земли. Большую долю этих устройств составляют устройства ИВ.

Большинство таких устройств используют беспроводный доступ к сети и подключаются как к сетям операторов подвижной связи, так и к различным локальным сетям. Для взаимодействия устройств ИВ разработаны различные протоколы [36, 37], большинство из которых ориентированы на сравнительно низкие скорости передачи данных и низкое энергопотребление. Большое количество устройств ИВ отражается на высокой их концентрации в пространстве. Это приводит к возникновению сетей высокой и сверхвысокой плотности [20, 38]. Обычно, к сетям высокой плотности относят сети с одним и более устройством на квадратный метр.

Такое определение не слишком точно отражает особенности этих сетей. Как правило, сети ИВ локализуются в некотором целевом пространстве, в зависимости от назначения. Например, это может быть многоквартирный жилой дом, цеха предприятия, офисные помещения, транспортные средства, сельскохозяйственные угодья и др. Далеко не всегда элементы сети ИВ сосредоточены на плоскости. Например, в многоэтажном здании элементы сети сосредоточены во всем его объеме, жилых и не жилых помещениях, лестничных клетках и т.д., т.е. в трехмерном пространстве [39, 40].

Наряду с приведенным примером, элементы сетей ИВ могут размещаться и на различного рода высотных средствах: высотных подвижных и неподвижных платформах, космических аппаратах. Как правило, такие элементы предназначены для сбора данных с элементов (узлов сети), размещенных на нижних уровнях.

Таким образом, в общем случае, сеть ИВ может представлять собой сложную иерархическую структуру, элементы которой размещены в трехмерном пространстве и обеспечивают связность конечных узлов с узлами сбора и обработки данных. При построении такой сети ее структура во многом определяется локализацией конечных узлов, их распределением в пространстве.

Обычно процесс построения сети связи включает в себя определение позиций размещения ее узлов, обеспечения их связности и методов

распределения трафика в образованной структуре. В таких случаях значительный интерес представляет структура сети.

Существуют различные способы описания структуры сетей связи, которые в случае сетей высокой плотности имеют свои особенности. В таких случаях оперируют не конкретными узлами, т.к. их положение может быть случайно, а законами их распределения в пространстве.

В частности, для описания структуры сетей может быть использовано понятие фрактальной размерности [29, 41].

Методы теории фракталов позволяют получить численные оценки, характеризующие структуру сети. Это чрезвычайно полезно в задачах планирования, поскольку численные характеристики позволяют производить сравнения и дают понимание, например, того какие методы маршрутизации трафика следует применить в той или иной сети.

2.3.2 Модель сети и ее фрактальная размерность

Будем полагать, что сеть состоит из n узлов, а дальность связи узла составляет r . Чаще всего, при организации сети в некотором строении дальность связи узлов ограничена не только расстоянием, но и препятствиями на пути распространения сигнала, такими как стены, междуэтажные перекрытия, шахты лифтов и др. Поэтому, распределение узлов в таких случаях является не равномерным, а узлы образуют кластеры, размер которых зависит от особенностей строения. Пример на рисунке 2.6 демонстрирует возможный вариант размещения узлов в трехмерном пространстве.

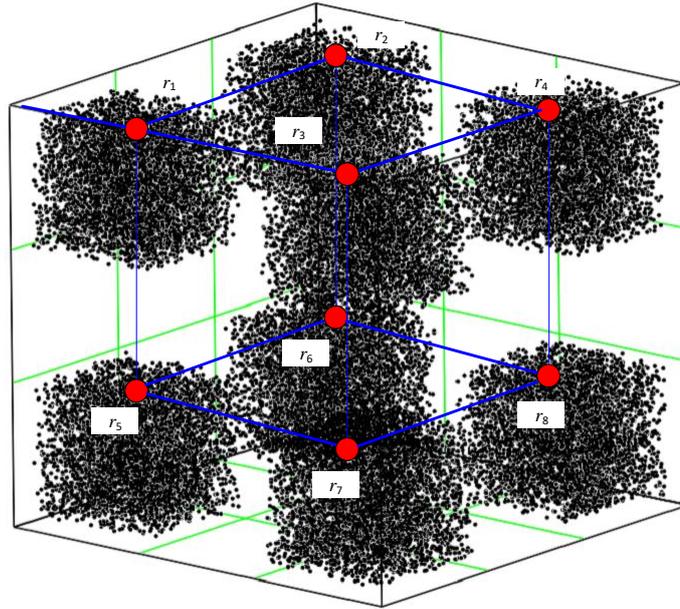


Рисунок 2.6 – Пример размещения узлов сети ИВ в трехмерном пространстве

Обеспечение связности кластеров может осуществляться как с использованием беспроводной технологии, отличной от той, которая используется для связи внутри кластера, так и с использованием проводных технологий. В последнем случае выделяется головной узел кластера, который является шлюзом с проводной сетью. Обычно, такие узлы отличаются наличием сетевого питания (не ограниченного запаса энергии), а сеть с их использованием называется инфраструктурной. На рисунке 2.5 приведены возможный вариант распределения инфраструктурных узлов в сети (инфраструктурные узлы выделены красным цветом).

Основной задачей построения сети является выделение кластеров в большом количестве узлов. Кластеры могут иметь различную форму, например, зависящую от формы помещения, а также плотность распределения узлов в них.

В работах [42, 43] предлагается характеризовать структуру сети с помощью параметра фрактальной размерности (ФР). Можно выделить два метода оценки ФР для сети: метод подсчета «ящиков» (BC box-counting) [28, 29] и выращивания кластера (CG cluster-growth) [44].

Определение ФР дается как [28]

$$N_r \propto \frac{1}{r^{d_f}}, \quad (2.3)$$

где N_r – количество m -мерных сфер, содержащих элементы; r – радиус m -мерной сферы; d_f – фрактальная размерность.

При устремлении r к нулю, ФР определяется как

$$d_f = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N_r}{\lg r}. \quad (2.4)$$

Метод ВС заключается в циклическом подсчете количества «ящичков», содержащих элементы сети при поэтапном уменьшении размера «ящичка», рисунок 2.7а.

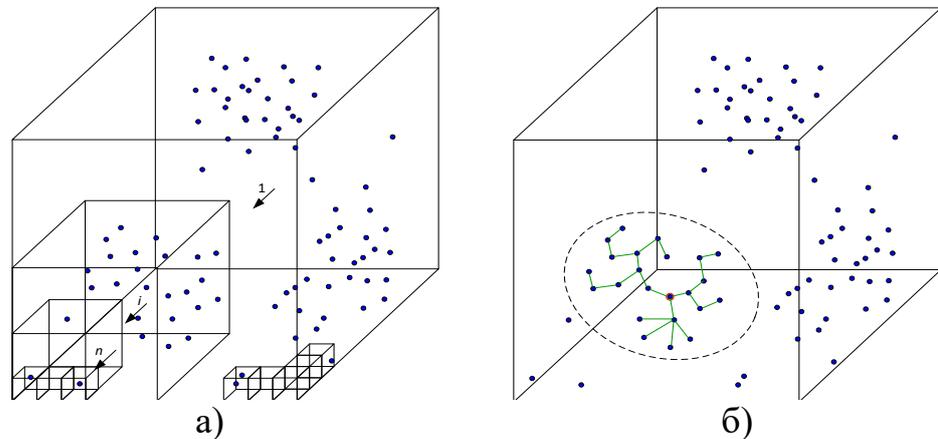


Рисунок 2.7 – Пример оценки фрактальной размерности сети двумя методами

Зависимость N_r от размера «ящичка» имеет логарифмический характер и аппроксимируется выражением

$$\lg N_r = d_f \lg \frac{1}{r} \quad (2.5)$$

При использовании метода СГ, рисунок 2.7б, выбирается случайный узел сети, задается максимальная длина связи r и строится кластер из узлов, находящихся в досягаемости (на расстоянии d не превышающим r). Далее r увеличивается, при этом размер кластера также увеличивается. В этом случае M_r – это масса кластера, равная количеству узлов сети в нем.

Зависимость M_r от r имеет вид

$$\lg M_r = d_f \lg r \quad (2.6)$$

Эти методы схожи по механизму оценки фрактальной размерности, однако метод ВС оперирует размерами области размещения узлов и требует некой их геометрической привязки, а метод CG оперирует только расстоянием между узлами. Следует заметить, что расстояние можно заменить и иной метрикой, например, величиной затухания сигнала или метрикой, полученной на основе уровня мощности сигнала или отношения сигнал/шум, что может быть удобно при рассмотрении беспроводной сети.

С точки зрения анализа сети связи метод CG позволяет произвести его более доступными средствами. Рассматриваемый в данном методе кластер характеризует связность сети, а процесс изменения его размера с изменением метрики r характеризует изменение ее связности. Процесс изменения связности также характеризует и фрактальная размерность, т.к. согласно (2.6) она определяется характером этой зависимости.

По характеру изменения зависимости (2.6) можно судить о структуре сети. Например, близкое к линейному изменение характерно для процесса роста сети в пределах области, выделяемой как кластер. Резкое изменение соответствует фазовому переходу в связанное состояние.

На рисунке 2.8 приведены иллюстрации процесса «выращивания кластера» в сети из 500 узлов. Для большей наглядности приведена не изометрическая проекция, а двумерное изображение, полученное как проекция узлов сети на горизонтальную плоскость.

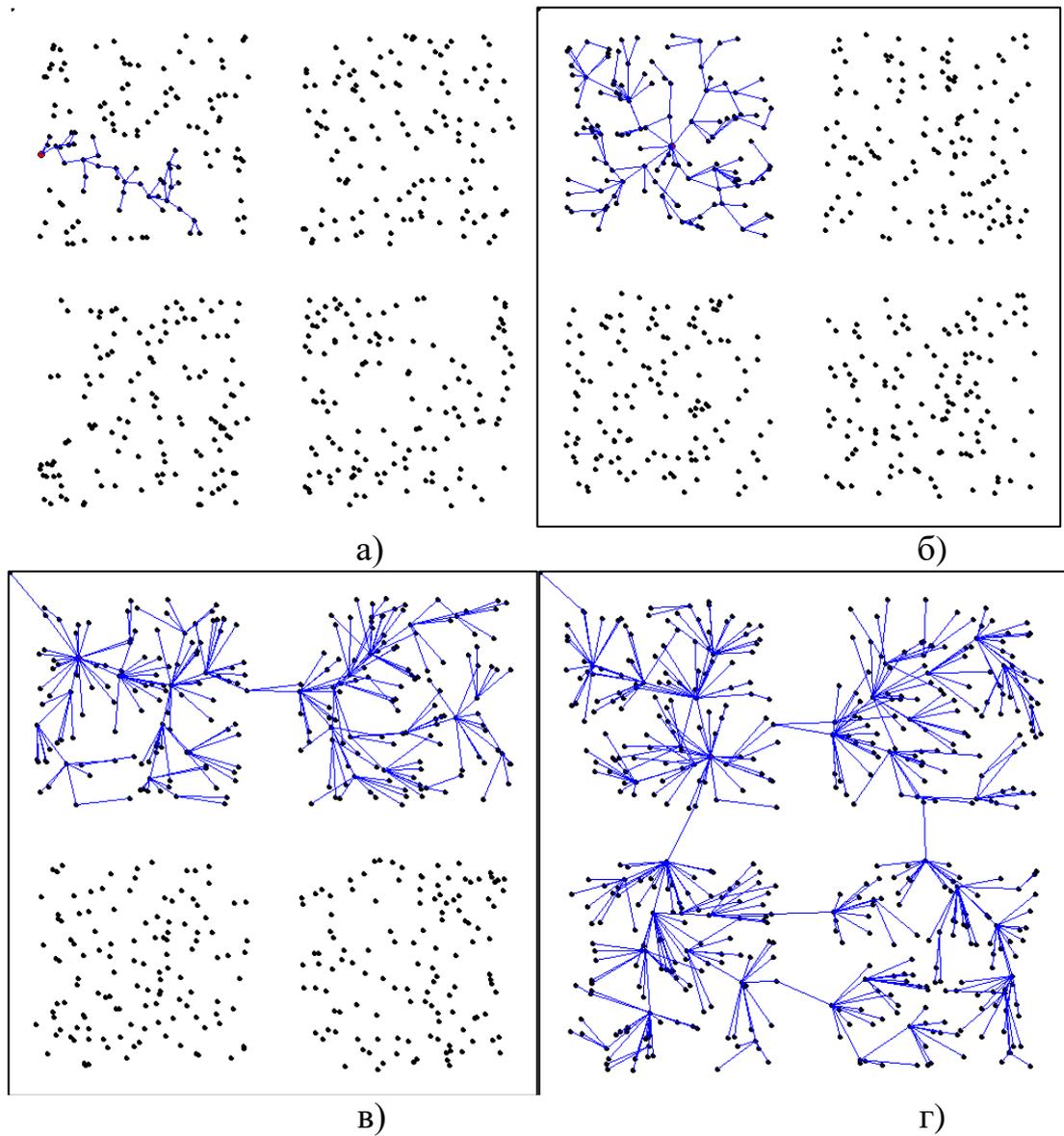


Рисунок 2.8 – Пример процесса «выращивания кластера» в сети

На рисунке 2.8а приведена исходная сеть на первой стадии выращивания кластера, на рисунках 2.8б – 2.8г - различные стадии развития процесса. Эти стадии целесообразно сопоставить с графиком зависимости количества узлов сети от величины r , приведенном на рисунке 2.9.

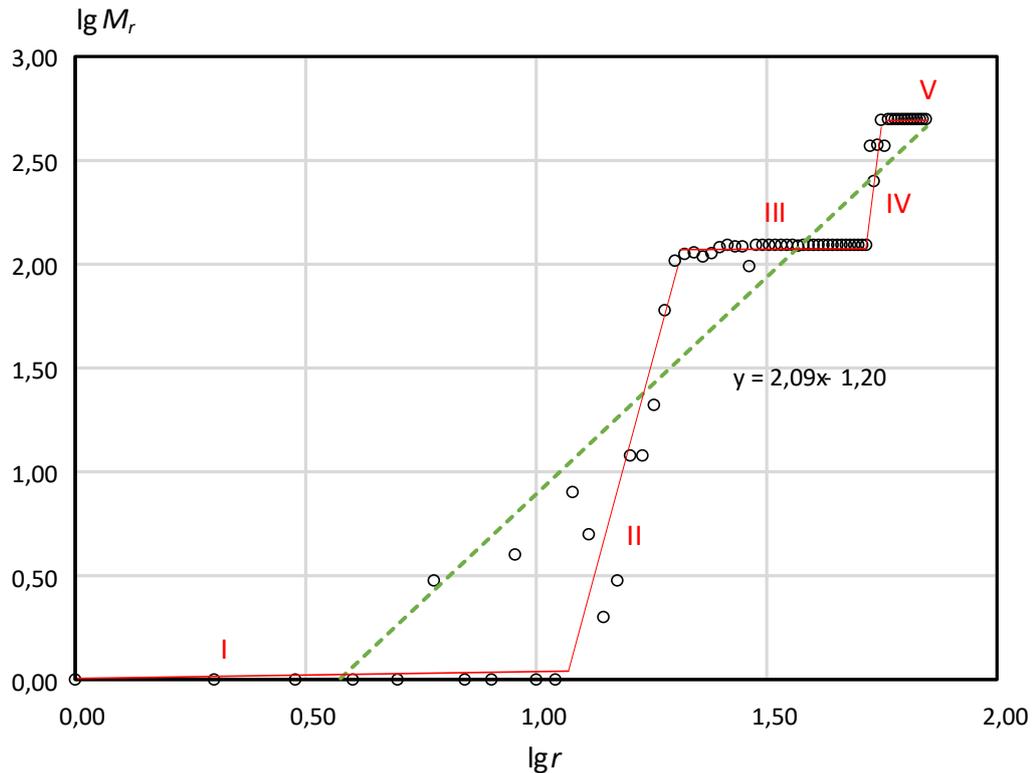


Рисунок 2.9 – Зависимость количества узлов от величины r

На рисунке 2.9 приведены данные, полученные методов выращивания кластера (точки). На полученном графике выделены 5 участков, в пределах которых построена кусочно-линейная аппроксимация (красная линия). Все полученные данные аппроксимированы линейной зависимостью (зеленая пунктирная линия). Рассматривая приведенный график, можно выделить 5 характерных участков, которые обозначены цифрами от I до V. На начальном этапе (участок I), который соответствует рисунку 3а, происходит медленный рост сети в пределах одной группы узлов. Участок II соответствует переходу группы узлов в состояние полной связности, что соответствует рисунку 2.7б. На участке III, в данном примере, рост размера сети не происходит. На участке IV происходит интенсивный рост размера сети из-за присоединения остальных кластеров, что соответствует рисункам 2.8в и 2.8 г. На участке V размер сети вновь не изменяется, т.к. сеть полностью связна.

Прямая пунктирная линия зеленого цвета описывает фрактальную размерность сети, ее наклон дает значение фрактальной размерности $d_f \approx 2,09$.

Если рассмотреть участки II и IV в отдельности, коэффициент наклона аппроксимирующей прямой на них составляет $\beta_1 \approx 10,70$ и $\beta_2 \approx 10,50$, соответственно. Эти участки соответствуют фазовому переходу структуры в связанное состояние.

Приведенный анализ показывает, что процесс изменения количества узлов в кластере (размер сети) позволяет сделать заключение о локализации кластера по изменению характера зависимости. В приведенном на рисунке 2.8 примере участок III свидетельствует о локализации первого кластера. Протяженность этого участка зависит от расстояния между кластерами. Таким образом, описанный метод оценки фрактальной размерности сети можно применить для ее кластеризации.

2.3.3 Метод кластеризации сети

Приведенный выше анализ показывает возможность использования метода оценки фрактальной размерности для кластеризации сети. Принцип предлагаемого метода заключается в выращивании кластера и контроля прироста количества узлов M_r . Уменьшение прироста количества узлов до достаточно малой величины M_0 , свидетельствует о выделении первого кластера. Все связанные узлы помечаются как узлы первого кластера и исключаются из дальнейшего рассмотрения. Далее процесс циклически повторяется из случайной позиции, до момента локализации следующего кластера. Процесс локализации кластеров повторяется, пока все узлы в заданной области не будут приписаны к своим кластерам.

Алгоритм метода кластеризации приведен на рисунке 2.10.

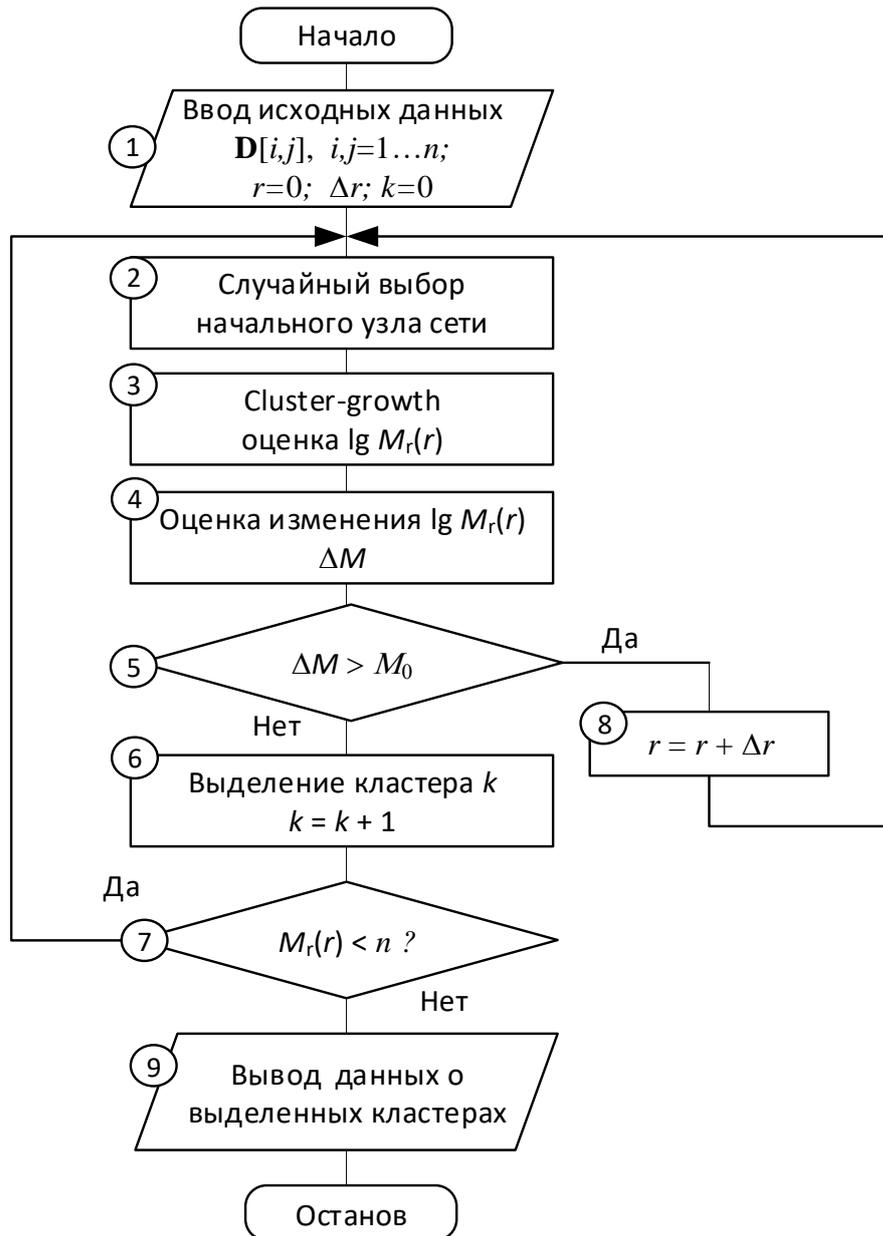


Рисунок 2.10 – Алгоритм метода кластеризации сети

Сеть описана матрицей \mathbf{D} размера $n \times n$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & K & d_{1n} \\ M & d_{ij} & M \\ d_{n1} & K & d_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Элементы матрицы d_{ij} представляют собой метрику, характеризующуюся достижимостью узла j из узла i . Как было отмечено выше, в качестве такой метрики может быть расстояние или иные метрики, полученные на основе уровня мощности сигнала или отношения сигнал/шум, затухания. Для примера приведем два возможных варианта метрики.

Если d_{ij} это расстояние, то для сети, размещенной в трехмерном пространстве, оно может быть вычислено как

$$d_{ij}^{(D)} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad (2.8)$$

где $x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j$ - координаты узлов i и j в трехмерном пространстве.

Если d_{ij} это уровень мощности сигнала, то в реальной сети он может быть измерен, а в модели вычислен на основе модели затухания и мощности передатчика

$$d_{ij}^{(P)} = p_j - a_{ij}, \quad (2.9)$$

где p_j – уровень мощности передатчика j -го узла (дБм), a_{ij} – затухание сигнала между узлами i и j (дБ).

Выбор метрики отражается на правиле формирования кластера, используемом методом CG. Кластер формируется, начиная со случайного стартового узла, присоединением новых узлов, если значение метрики (расстояния) до узла, принадлежащего кластеру, не более r . Во втором случае, при использовании уровня мощности, если значение метрики не менее r . Построение кластера может быть реализовано поиском в глубину [45].

Величина Δr является приращением, r при построении зависимости размера сети от величины метрики, она подбирается эмпирически.

Исходными данными (шаг 1) для данного алгоритма являются данные о количестве узлов сети n матрица \mathbf{D} содержащая значения метрики, величина шага изменения Δr , счетчик числа кластеров k .

Далее (шаг 2) случайным образом выбирается узел, который используется в качестве стартового для следующего шага алгоритма.

На следующем шаге выполняется построение кластера с текущей величиной метрики r . Результатом является логарифм количества узлов в построенном кластере, которое может принимать значения от 0 до $\lg n$.

На шаге 4 производится оценка изменения количества узлов в кластере по сравнению с предыдущим циклом. Изменение является случайным, а его величина зависит от Δr и распределения метрики в матрице \mathbf{R} , поэтому,

принятие решения на следующем шаге 5 о том, что прирост размера сети мал, делается по нескольким последовательным результатам.

На шаге 5 принимается решение о выделении кластера или дальнейшем продолжении его локализации. Кластер выделяется, если прирост размера сети не превышает величины M_0 , в противном случае значение метрики увеличивается на величину Δr (шаг 8) и процесс возвращается к шагу 2.

Если критерий выполняется, то на шаге 6 производится выделение узлов локализованного кластера и исключение их из дальнейшего рассмотрения. Количество локализованных кластеров k увеличивается на единицу.

На следующем шаге производится проверка количества узлов сети, не отнесенных не к одному кластеру, если оно не ноль, то процесс выделения кластеров повторяется, т.е. производится переход к шагу 2.

В противном случае процесс кластеризации завершен, на шаге 9 производится вывод результатов кластеризации и процесс останавливается.

Сравнение предложенного алгоритма с алгоритмами FOREL, k -средних [14,15] и DBSCAN [47] по требованиям к исходным данным приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнение алгоритмов кластеризации

Алгоритм	Необходимость задания параметров		
	Количество кластеров	Размер кластера	Плотность узлов в кластере
FOREL	-	+	-
k -средних	+	-	-
DBSCAN	-	-	+
Предлагаемый алгоритм	-	-	-

Из приведенной таблицы видно, что предлагаемый алгоритм требует наименьшего количества исходных данных, что позволяет его применять в случаях с неизвестным количеством кластеров, их размеров и формы, а также при различной плотности узлов в кластерах. Наиболее близким из приведенных

алгоритмов можно считать DBSCAN, однако для его применения в условиях различной плотности узлов в кластерах требуется его модификация.

К недостаткам предложенного алгоритма следует отнести необходимость наличия достаточно четкой границы между кластерами с малой плотностью узлов. Ввиду того, что такая граница, как правило, имеет место в зданиях и сооружениях в виде стен и междуэтажных перекрытий, которые вносят существенное затухание при распространении радиосигнала. Этот метод может найти применение в задачах построения сетей интернета вещей высокой плотности в трехмерных объектах [46].

Для сравнительного анализа алгоритмов были выбраны несколько тестовых примеров, в которых задавались различные группы узлов, отличающиеся формой, распределением узлов и плотностью. Для их численного сравнения подсчитывалось количество ошибок кластеризации. Под решением задачи кластеризации понималось выделение (кластеризация) заданных групп узлов, а под ошибкой понималось отнесение узлов одной группы к разным кластерам. На рисунке 2.11 приведены численные оценки в доле ошибок кластеризации.

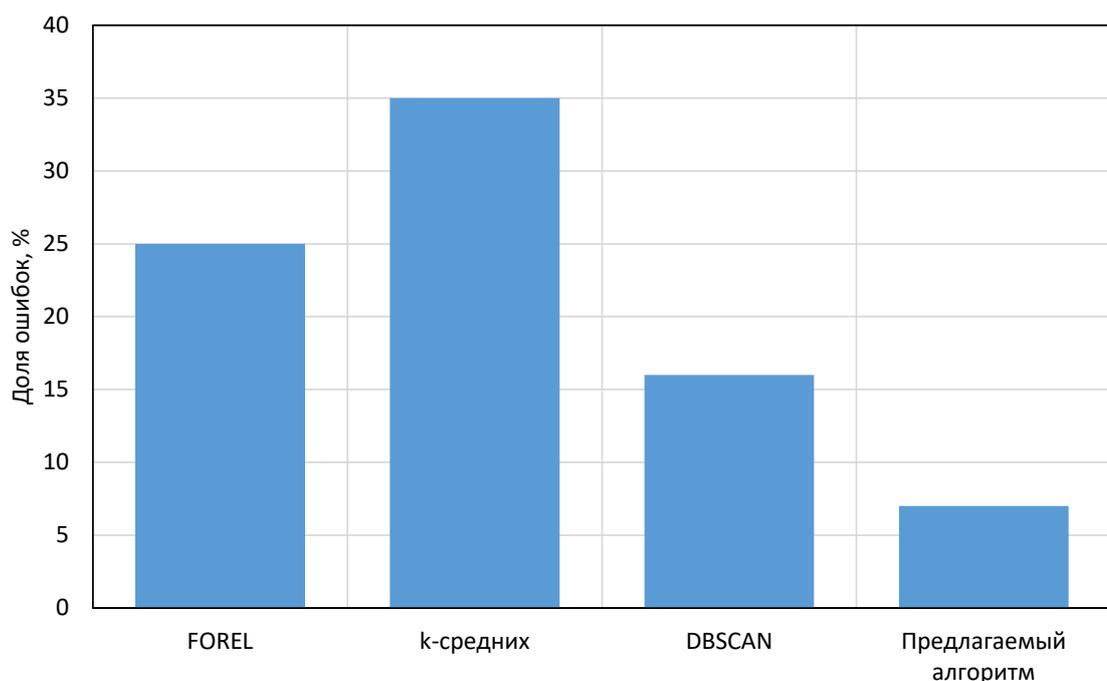


Рисунок 2.11 – Сравнение алгоритмов кластеризации

Следует заметить, что ввиду того, что для алгоритмов FOREL и k -средних следует задавать исходные данные, такие как размер кластера и количество кластеров, то доля ошибок для них получена усреднением результатов при случайном выборе количества кластеров и их размера.

Полученные результаты демонстрируют выигрыш предлагаемого алгоритма, в среднем, на 18%.

2.4 Выводы

1. При построении трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности необходимо учитывать значительное количество узлов сети, что может привести к вычислительной сложности решения различных задач, связанных с выбором логической структуры.

2. Для построения трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности необходимо иметь модельно-методический аппарат, позволяющий определить особенности структуры. В качестве такого аппарата могут быть использованы методы теории фракталов.

2. При построении сетей с большим количеством узлов необходимо иметь возможность выделения групп узлов, для организации иерархической структуры сети и обслуживания в ней трафика.

3. Для кластеризации узлов сети предлагается метод и алгоритм, построенные на основе метода анализа фрактальной размерности сети.

4. Предложенный метод позволяет произвести кластеризацию узлов сети, когда они имеют достаточно выраженное распределение по группам, что, например, имеет место в многоэтажных зданиях и строениях.

5. Достоинством метода является возможность кластеризации групп узлов, имеющих различную форму и плотность. По сравнению с рядом распространенных методов кластеризации он показал на тестовых примерах выигрыш на 18 % по доле ошибок кластеризации.

3. ВЫБОР ГОЛОВНЫХ УЗЛОВ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, РАЗМЕЩЕННОЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

3.1 Структура сети интернета вещей высокой плотности

Понятие интернета вещей является довольно широким и охватывает широкий спектр объектов, которые могут быть включены в это понятие и войти в него [1]. В данной работе будут рассмотрены только технические аспекты взаимодействия между элементами ИВ, т.е. физические элементы являющиеся элементами сети связи. Такую сеть часто называют беспроводной сенсорной сетью БСС (WSN). Однако термин БСС все же предполагает, что сеть является сетью датчиков (в первую очередь), здесь чаще используется термин ИВ, так как он является более общим. Рассматриваемые сети не обязательно должны быть сетями датчиков, это могут быть сети актуаторов, вычислительных устройств и любые иные беспроводные сети автоматических устройств.

Традиционно выделяют три основных типа структура сети ИВ – это структура звезды, древовидная структура и ad hoc (mesh), рисунок 3.1.

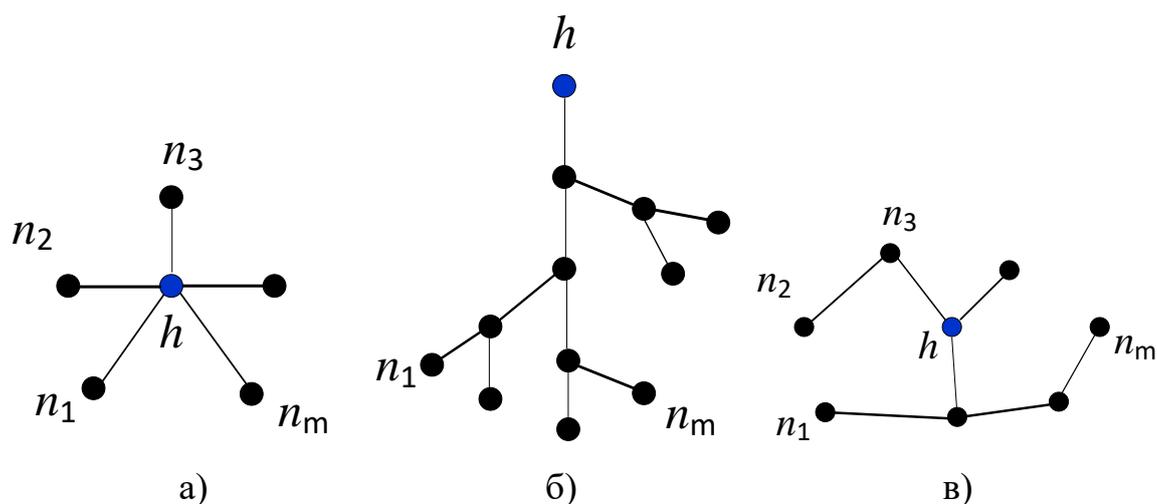


Рисунок 3.1 – Типовые структуры сети

Структура звезды самая простая с точки зрения реализации, то ее возможности ограничены дальностью связи узла, наиболее гибкой является структура связанной сети, т.е. ad hoc. В этой структуре узлы сети могут

выполнять функции транзита сообщений и могут быть выстроены различные маршруты. Это дает возможность существенно расширить зону обслуживания сети, так как она не ограничена дальностью связи. Однако практические ограничения все же имеются, так как слишком большая длина маршрута (большое количество транзитных участков) приводит к росту задержки доставки, снижению скорости передачи [48] и росту вероятности потерь. К тому же при подвижных узлах, протяженный маршрут с большей вероятностью разрушится, чем короткий [49]. Значительную сложность создает большое количество узлов сети, так как это непосредственно влияет на вычислительную сложность задач, решаемых при управлении сетью.

Для упрощения задач управления целесообразно производить кластеризацию сети, т.е. разделение всего множества узлов на группы (кластеры), в которых выделяется один узел, который называют головным узлом (ГУ) [24, 50]. Все узлы кластера передают данные только через ГУ. Такое решение упрощает управление сетью, так как многие задачи могут решаться на уровне отдельных кластеров, которые имеют в своем составе существенно меньше узлов, и на уровне головных узлов. Такая структура может быть многоуровневой.

Головные узлы кластеров выполняют больше работы по передаче трафика, чем члены кластеров и расходуют гораздо больше энергии. В случае, когда при построении сети можно использовать стационарные (неподвижные) узлы, имеющие сетевое питание (на батарейное) их удобно использовать в качестве ГУ, в таком случае говорят об инфраструктурных сетях. В противном случае используют различные алгоритмы выбора и периодической замены ГУ с целью экономии расхода энергии.

В любом из случаев ГУ является критически важным элементом сети, так как он обслуживает несколько маршрутов передачи данных. Выбор ГУ влияет на качество обслуживания трафика. В частности, если размеры кластера превышают дальность связи узлов, то в нем также необходимо создавать маршруты. Тогда выбор ГУ должен быть таким, чтобы обеспечить, по

возможности, близкие условия для всех членов кластера или гарантировать наименьшее качество обслуживания.

На рисунке 3.2 приведен пример многоуровневой кластеризации.

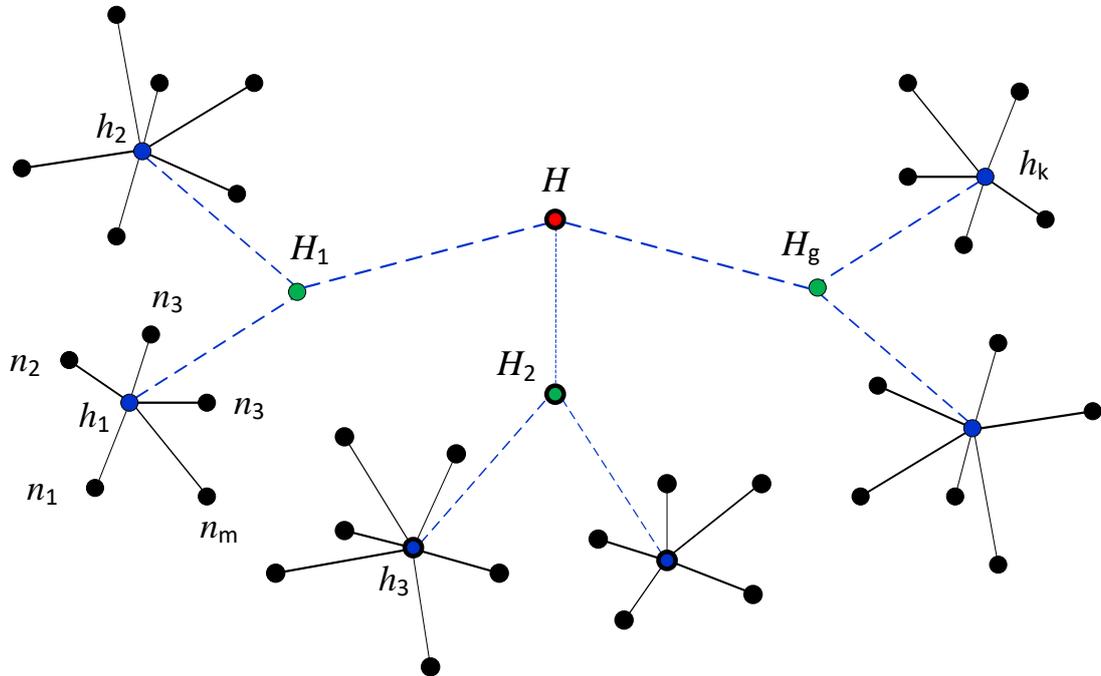


Рисунок 3.2 – Многоуровневая кластеризация

На нижнем уровне создаются кластеры из конечных узлов сети, на следующем их ГУ этих кластеров. Теоретически, уровней кластеризации может быть множество. Практически их количество ограничено возможностями ГУ, которые должны обслуживать большое количество узлов на низ лежащих уровнях.

3.2 Методы выбора головных узлов

3.2.1 Задачи выбора ГУ и кластеризации

Выборы головного узла кластера (ГУ) — это процесс выбора узла внутри кластера, который играет роль ведущего узла. ГУ кластера хранит информацию, относящуюся к его кластеру. Эта информация включает в себя список узлов в кластере и путь к каждому узлу.

Обязанность ГУ состоит в том, чтобы поддерживать связь со всеми узлами собственного кластера. Однако ГУ должен иметь возможность общаться и с узлами других кластеров, может быть напрямую или через соответствующий ГУ или шлюзы. Связь осуществляется в три этапа. Первый из ГУ кластера получают данные, отправленные его членами, во-вторых, он может сжимать данные и передает данные на шлюз или другой ГУ. Правильно выбранный ГУ может снизить потребление энергии и увеличить срок службы сети.

Выбор конкретного узла в качестве головы кластера — очень важная, но сложная работа. Можно учитывать различные факторы для выбора лучшего узла в качестве ГУ кластера. Факторы выбора включают расположение узла по отношению к другим узлам, подвижность, энергия, безопасность и пропускная способность узла.

Очень часто узлы БСС имеют ограниченный запас энергии и ресурсов. Процесс выбора увеличивает общие накладные расходы сети. Таким образом, процесс выбора также должен учитывать ограничения по обработке и энергопотреблению узлов.

Все методы выбора ГУ имеют некоторые общие черты, например, они могут учитывать запас энергии, подвижность узла и так далее.

Поскольку сетью не управляет стационарная инфраструктура, она сталкивается с рядом проблем, такими как частые отключения каналов, скрытые узлы, изменение топологии из-за подвижности, больше помех и ограниченная пропускная способность из-за общей среды распространения, а также высокое энергопотребление на мобильных устройствах. Все сетевые функции, такие как формирование топологии сети, множественный доступ и маршрутизация данных по наиболее подходящим путям, должны выполняться распределенным образом. Эти задачи особенно сложны из-за ограниченной полосы пропускания, предлагаемой в беспроводном канале.

Сети ИВ, часто, работают без поддержки какой-либо фиксированной инфраструктуры или централизованного администрирования (т. е. сети без

инфраструктуры) и являются полностью самоорганизующимися и самоконфигурируемыми.

В качестве отступления следует отметить, что возможно и использование инфраструктурных элементов, в таком случае сеть будет гибридной или инфраструктурной. Такой сети характерны свойства как ad hoc сети, так и сети с жесткой инфраструктурой. Наличие инфраструктурных элементов позволяет существенно повысить функциональные возможности сети.

В одноранговой сети все узлы сети соединяются динамически и произвольным образом, образуя сеть, в зависимости от их дальности связи и положения. Узлы могут связываться напрямую со всеми узлами в пределах дальности связи. Поскольку дальности связи ограничены, два узла могут не иметь возможности общаться напрямую, и они должны полагаться на другие узлы для пересылки своих пакетов.

Различные типы одноранговых сетей, таких как мобильная одноранговая сеть (MANET), беспроводная ячеистая сеть (WMN), беспроводные сенсорные сети (WSN) и автомобильные одноранговые сети (VANET) и т. д.

В частности, при проектировании одноранговой сети важную роль имеют возможности и ограничения, которые физический уровень накладывает на производительность сети. Каждый из узлов имеет беспроводной интерфейс и обменивается данными друг с другими узлами с использованием радиосвязи или иной беспроводной технологии. Портативные компьютеры и персональные цифровые помощники, которые взаимодействуют друг с другом напрямую, являются одними из примеров узлов в одноранговой сети. Узлы в одноранговой сети часто являются мобильными, но могут также состоять из стационарных узлов, таких как точки доступа в Интернет.

Ad-hoc сеть не использует никакого централизованного администрирования [10]. Это делается для того, чтобы сеть не разрушилась только потому, что один из мобильных узлов выходит из зоны действия передатчика других. Узлы должны иметь возможность входить/выходить из

сети по своему усмотрению. Из-за ограничения дальности передачи узлов может потребоваться несколько переходов для достижения других узлов.

Каждый узел, желающий участвовать в сети ad hoc, должен быть готов пересылать пакеты другим узлам, т.е. выполнять функции транзита. Таким образом, каждый узел может действовать как хост и маршрутизатор для приема и пересылки пакетов, и он может произвольно перемещаться, покидать сеть или отключаться. Более того, новые узлы могут неожиданно присоединиться к сети.

Сеть использует преимущества беспроводной среды связи. Другими словами, в проводной сети физическая кабельная разводка априори ограничивает топологию соединения узлов, этого ограничения нет в беспроводной области, и при условии, что два узла находятся в пределах дальности связи, они могут реализовать мгновенную связь между собой. Эти характеристики делают ее нестабильной сетью, в которой связи между узлами часто разрываются.

В таких динамических топологиях каждый узел отвечает за установление соединений с соседними узлами и за ретрансляцию пакетов от имени других узлов, поэтому временные сети могут быть созданы без поддержки инфраструктуры или с ограниченной поддержкой. Благодаря этим свойствам сеть имеет большой потенциал применения в различных сценариях, таких как связь на поле боя и аварийное восстановление. Сценарии применения включают оказание помощи при стихийных бедствиях, связь между транспортными средствами в автоматизированных дорожных системах, аварийно-спасательные службы.

Характеристики подвижной сети ИВ. Сеть имеет несколько отличительных характеристик, которые сильно отличают их от обычных сотовых сетей.

- Динамические топологии: узлы могут свободно перемещаться с разной скоростью. Трудно предсказать движение узла и его траекторию. Поэтому топология сети может меняться случайным и непредсказуемым образом.

- Ограниченная пропускная способность: беспроводные каналы имеют меньшую пропускную способность, чем проводные сети. Однако в настоящее время некоторые стандарты предлагают более высокие скорости передачи данных, сравнимые со скоростями Ethernet. Кроме того, на пропускную способность беспроводной связи влияют условия окружающей среды, замирание, шум или помехи.

- Ограничение энергии. В БСС узлы могут оснащаться батареями с ограниченной емкостью. Узлы не имеют достаточной мощности передачи для достижения всех узлов в сети. Это ограничивает связь узлов только с ограниченным количеством соседних узлов.

- Ограничения среды: В беспроводной сети невозможно передавать и принимать одновременно. Все узлы сети используют общую среду распространения. Потеря сообщений, в основном, происходит из-за коллизий и иных помех.

- Ограниченная физическая безопасность. В сетях MANET пакеты данных передаются в радиоканале. Следовательно, злоумышленнику относительно легко получить доступ ко всем пакетам данных, работая в неразборчивом режиме и используя анализатор пакетов. Узлы также могут подвергаться преднамеренному глушению или атакам типа «отказ в обслуживании» (DoS).

Проблемы сети MANET. Проблемы, связанные с безопасностью, находятся на прикладном уровне, качество обслуживания — на транспортном уровне, маршрутизация — на сетевом уровне, управление мощностью — на канальном/прикладном уровне.

- Уровень приложения. Уровень приложения, с которым взаимодействует пользователь, зависит от прикладной задачи. Все остальные уровни используются для создания бесшовного интерфейса для сетевых нужд прикладного уровня. Функции других уровней изменяются в зависимости от требований приложения. Определены номера идентификаций, таких как

партнеры по связи, качество обслуживания конфиденциальности, аутентификация пользователя, а также ряд иных ограничений.

Службы приложений, предоставляемые прикладным уровнем, включают передачу файлов, электронную почту и сетевые программные службы.

- Транспортный уровень. Транспортный уровень отвечает за установление сквозного соединения, сквозную доставку пакетов данных, управление перегрузкой и управление потоком. Транспортные протоколы помогают создавать сеансы связи между компьютерами и гарантируют надежное перемещение данных между компьютерами.

- Сетевой уровень. В сети источник и пункт назначения не находятся в зоне прямой передачи/приема друг друга. Переадресация с несколькими переходами используется для узлов, которые не находятся в зоне прямой связи. Такая непрямая связь через переадресацию с несколькими переходами называется маршрутизацией. За настройку и поддержку маршрутов от источника к любому желаемому пункту назначения отвечает сетевой уровень. Сетевой уровень нуждается в достаточной информации о топологии сети связи для обеспечения эффективных маршрутов. Есть две основные функции сетевого уровня: обнаружение маршрута и обслуживание маршрута. Обнаружение маршрута используется для поиска маршрута от источника к месту назначения, хотя обслуживание маршрута используется для поддержания существующего маршрута по мере изменения топологии в соответствии с мобильностью узла.

- Физический уровень. Физический уровень — это аппаратное обеспечение. Электронные компоненты физического уровня – это антенна и передатчик/приемник, например, в беспроводном узле. Основными функциями являются модуляция и кодирование физического уровня. Как правило, используются протоколы IEEE на физическом уровне:

- Канальный уровень: Ограниченная полоса пропускания беспроводного канала в сочетании с потерями при распространении радиоволн и широкополосным характером радиопередачи делают связь по

беспроводному каналу изначально ненадежной. Протоколы канального уровня используются для добавления избыточных битов информации к битам данных, чтобы защитить их от ошибок в канале. Протоколы прямой коррекции ошибок добавляют к данным контролируемую избыточность, чтобы обеспечить надежную передачу данных по ненадежным каналам. Типичные системы канального кодирования содержат исходный код для уменьшения избыточности данных, за которым следует канальный кодер, добавляющий контролируемую избыточность к сжатым данным.

По сути, протоколы маршрутизации обычно подразделяются на три разновидности: протокол маршрутизации на основе таблиц, протокол маршрутизации по требованию и протокол гибридной маршрутизации.

- Table Driven/Proactive: протоколы упреждающей маршрутизации периодически собирают информацию о маршрутизации и сохраняют ее в одной или нескольких таблицах маршрутизации. Различия между протоколами этого класса заключаются в структуре маршрутизации, количестве таблиц, частоте обновлений, использовании приветственных сообщений и наличии центрального узла.

- On-Demand / Reactive: Реактивные протоколы маршрутизации обнаруживают или поддерживают маршрут по мере необходимости. Это снижает накладные расходы, создаваемые проактивными протоколами. Стратегия затопления используется для обнаружения маршрута. Протоколы реактивной маршрутизации можно разделить на две группы: маршрутизация от источника и маршрутизация по цепочкам.

- Гибрид: эти протоколы обладают как реактивными, так и проактивными функциями. Проактивная стратегия используется для обнаружения и поддержки маршрутов к близлежащим узлам, в то время как маршруты к удаленным узлам

Проблема с маршрутизацией. Маршрутизация является наиболее фундаментальным исследовательским вопросом, и она должна обеспечивать ограничение потребляемой энергии, пропускной способности и мобильности

узлов. Вот некоторые из проблем с маршрутизацией в таких сетях: асимметричные каналы, накладные расходы на маршрутизацию, интерференция и динамическая топология.

3.2.2 Анализ известных алгоритмов выбора ГУ и кластеризации

Поскольку БСС состоят из малогабаритных сенсорных узлов, они сталкиваются с рядом ограничений, такими как ограниченная емкость батареи, малый объем памяти и малая дальность связи. Энергопотребление в БСС является непрерывным, так как энергия нужна для обнаружения данных, сбора данных и их передачи. Как правило, фаза передачи данных расходует наибольшее количество энергии. В среднем, на передачу одного бита данных на расстоянии 100 м расходуется столько же энергии как на выполнение 3000 инструкций [51].

Проблема энергоэффективности актуальна, потому что замена или перезарядка батареи достаточно сложны для сетей в больших масштабах или удаленных районах [52]. Кроме того, в сетях высокой и сверхвысокой плотности это может оказаться вообще неразрешимой задачей.

Кроме того, эффективная передача данных является еще одной проблемой.

В начале 2000-х Heinzelman et al. [53] представила энергоэффективный протокол связи, который был назван LEACH (Low Energy Algorithm for Clustering Hierarchy - низкоэнергетическая адаптивная кластерная иерархия).

LEACH решает задачу оптимизации энергопотребления с помощью метода кластеризации, когда выбираются несколько ГУ на основе ротации их роли в кластере. Полученные от членов кластера данные отправляются в соответствующий ГУ для агрегирования, а затем данные передаются в БС чрез ГУ [53]. Это был очень успешный метод, поскольку он помог решить проблему неравномерного расхода энергии узлами сети. ГУ тратили энергии гораздо больше, что приводило к их скорому отказу и как следствие к снижению срока жизни сети. Благодаря LEACH появилась возможность периодически менять

роли узлов в кластере, тем самым перераспределяя работу ГУ по всем узлам в течение срока функционирования сети.

Однако LEACH не решает всех проблем. Большинство распространенных проблем связаны с сетевыми дырами. Сетевая дыра проблема также называется проблемой горячей точки, где ГУ вблизи БС расходует энергию быстрее, чем в узлах далеко от БС в многоскачковой среде, так как большинство данные доходят до ЦД рядом с БС для агрегации и передача данных в БС [54, 55]. С другой стороны, изолированная проблема узла заключается в том, что узлы не присоединяются к какому-либо кластеру и не имеют пути для отправки данных на БС [56, 57].

Эти проблемы решаются путем предложения нескольких методов и такие методы, как неравная кластеризация, мобильные БС и эффективный метод отбора ГУ. Формирование неравных кластеров, в местах скопления вблизи БС имеют меньшее количество датчиков по сравнению с кластерами, удаленными от БС. Следовательно, ГУ вблизи БС использует меньшую энергию для общения с членами своего кластера, и он может общаться с другими ГУ, удаленными от БС, что позволяет сбалансировать нагрузку [58, 59].

Мобильная БС — это узел, который время от времени перемещается для сбора данных от головных узлов кластеров [60]. Оба метода тратят много энергии с точки зрения формирования кластеров и использование памяти для отслеживания местоположения мобильной БС.

Выше были упомянуты основные подходы к выбору ГУ кластеров. Следует отметить, что, как и в начале пути развития этих алгоритмов, основной задачей, как правило, остается задача обеспечения эффективного расхода энергии узлами. Наряду с этой задачей авторы алгоритмов пытаются учесть и иные факторы.

На рисунке 3.3 приведена схема общей классификации известных алгоритмов.

Как видно из приведенной схемы все алгоритмы можно разделить на две большие группы: не метаэвристические алгоритмы и метаэвристические.

Такое деление весьма условно, поскольку, подавляющее большинство алгоритмов, по сути, являются реализациями различных приближенных методов, т.е. практически все они опираются на эвристические предположения. Однако, если такие предположения имеют место только при постановке задачи, то будем считать метод не метаэвристическим. Если же предположение используется при работе алгоритма, то будем его относить к метаэвристическим.

Обе эти группы алгоритмов включают в себя методы выбора ГУ и методы формирования кластеров. Поскольку, в рамках данного раздела речь идет о ГУ, то на них будем акцентировать основное внимание.



Рисунок 3.3 – Общая классификация алгоритмов

Из схемы видно, что алгоритмы выбора ГУ зависят от параметров среды, которые они могут использовать (учитывать) при решении задачи.

На рисунке 3.4 приведена классификация не метаэвристических алгоритмов. Критерием классификации являются параметры, учитываемые алгоритмами.

Алгоритмы могут учитывать такие параметры как подвижность, количество транзитов, однородность сети и иные параметры.

Из приведенной классификации видно, что алгоритмов достаточно много, каждый из них отличается тем, что учитывает конкретную особенность сети связи. Большое количество известных алгоритмов дает возможность выбора конкретного метода для конкретной прикладной задачи.

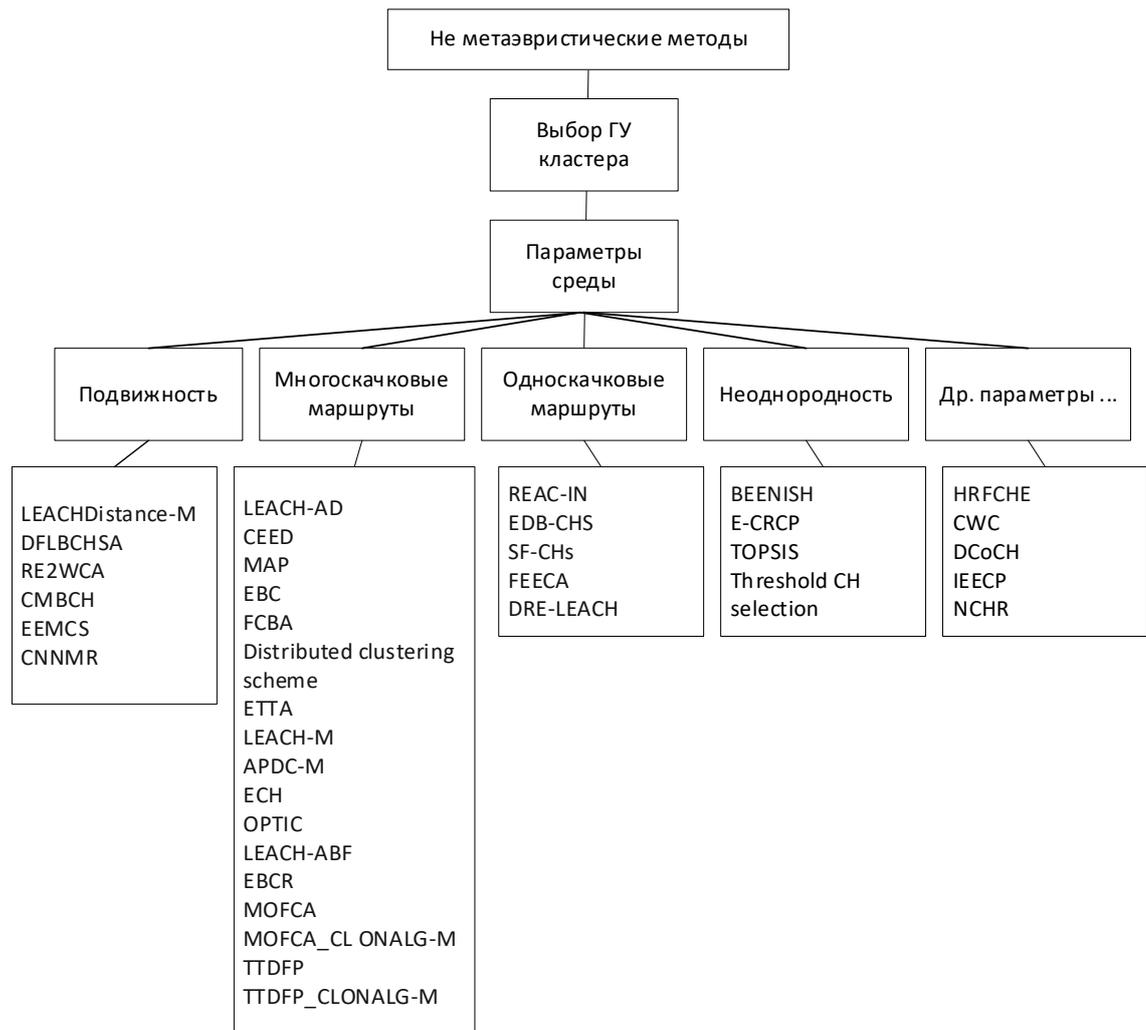


Рисунок 3.4 – Классификация не метаэвристических алгоритмов

Классификация не метаэвристических алгоритмов формирования кластера приведена на рисунке 3.5. Это простая классификация, в которой просто перечислены известные алгоритмы.

На рисунке 3.6 приведена классификация метаэвристических методов выбора ГУ кластера. Эта классификация также приведена по критерию

параметров среды. В ней рассмотрены те же параметры: как подвижность, количество транзитов, однородность сети и иные параметры.

В приведенной классификации также можно заметить, что методов достаточно много и каждый из них ориентирован на решение задач в рамках какого либо влияющего фактора.

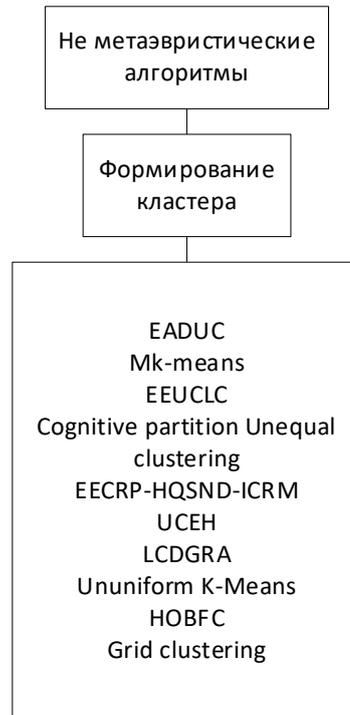


Рисунок 3.5 – Алгоритмы формирования кластера

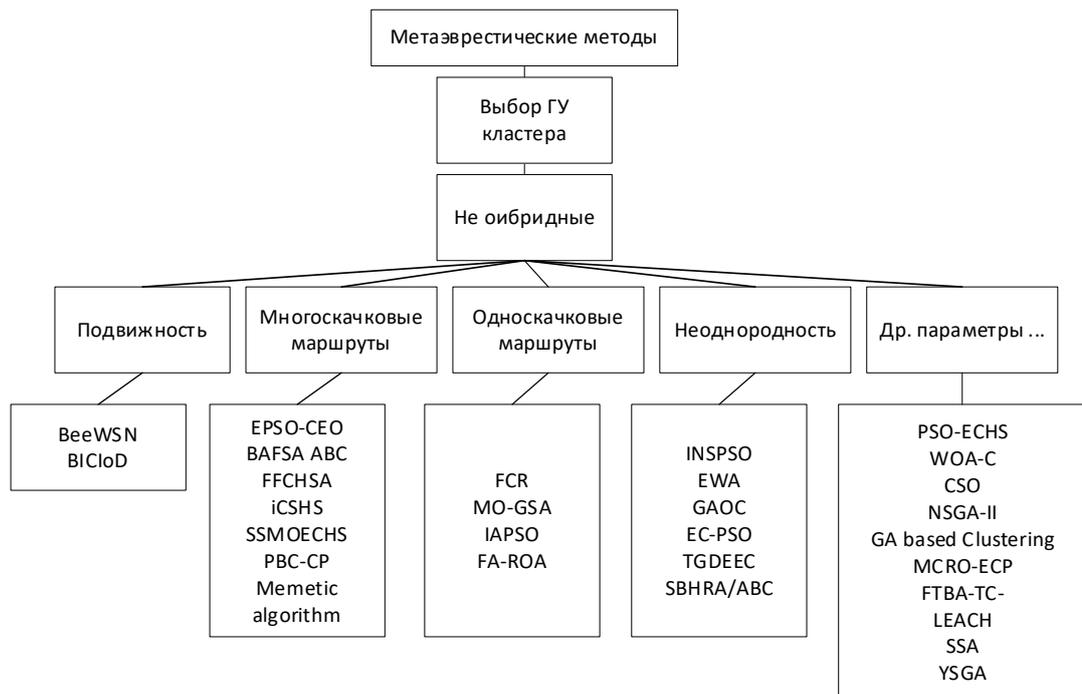


Рисунок 3.6 – Классификация метаэвристических методов

Приведенный анализ показал, что в настоящее время существует достаточно много алгоритмов выбора ГУ. Несмотря на их количество и достаточно разнообразный выбор, следует отметить некоторые проблемы, которые все же остаются при решении задачи выбора ГУ.

1. В контексте решения задач для сети высокой плотности с большим количеством узлов, важнейшей задачей является выполнимость (применимость) метода при большом количестве узлов. Практически все рассмотренные методы применимы при относительно небольшом количестве узлов сети.

2. Рассмотренные методы, в подавляющем большинстве, предлагают некоторый жесткий алгоритмический подход, который годится для их применения в некоторых конкретных условиях. При изменении этих условий метод теряет свою эффективность и требуется его замена иным методом.

3. Многие рассмотренные методы довольно сложно сравнить из-за отсутствия математической модели и численных оценок их эффективности. Большинство сравнений выполнялись с использованием методов имитационного моделирования. Такой подход довольно трудоемок и осложняет задачу выбора или замены применяемого метода.

Учитывая сказанное, можно сделать вывод, что представляет интерес разработка метода, позволяющего решать компромисс между требованиями к точности решения задачи и трудоемкости ее решения. Решению данной проблемы посвящен материал в следующем подразделе.

3.3 Применение моделей точечных процессов для сетей ИВВП в трехмерном пространстве

Точечные процессы – это случайные процессы, в которых случайные величины индексированы координатами. В общем случае, если заданы n случайных величин $X_i = \{x_1^{(i)}, K, x_n^{(i)}\}$, то их можно рассмотреть, как координаты

точки в n – мерном пространстве. Если определить m таких множеств $i=1, \dots, m$, то их можно рассмотреть как множество из m точек в n – мерном пространстве. В общем случае это абстрактные модели, которые можно использовать для решения различных прикладных задач.

В наибольшей степени были разработаны модели двумерных точечных процессов, которые широко применялись для моделирования различных географических объектов на картах, лесопосадок и иных областей произрастания различных растений [61]. Двумерные точечные процессы также нашли применение и в задачах моделирования сетей беспроводной связи [62].

Как было отмечено выше, абстрактная модель может быть построена для произвольного количества измерений, поэтому имеет смысл адаптировать те модели, которые были разработаны для двумерного случая для моделирования сетей ИВВП, размещенных в трехмерном пространстве.

Основной задачей моделирования сетей ИВВП в трехмерном пространстве является описание размещения узлов сети заданием их координат с учетом особенностей окружения, распределения пользователей и иных элементов, влияющих на структуру сети. Для решения этой задачи имеет смысл использовать модификации известных двумерных моделей в теории точечных процессов.

Можно предложить условную классификацию известных моделей двумерных точечных процессов, рисунок 3.7.

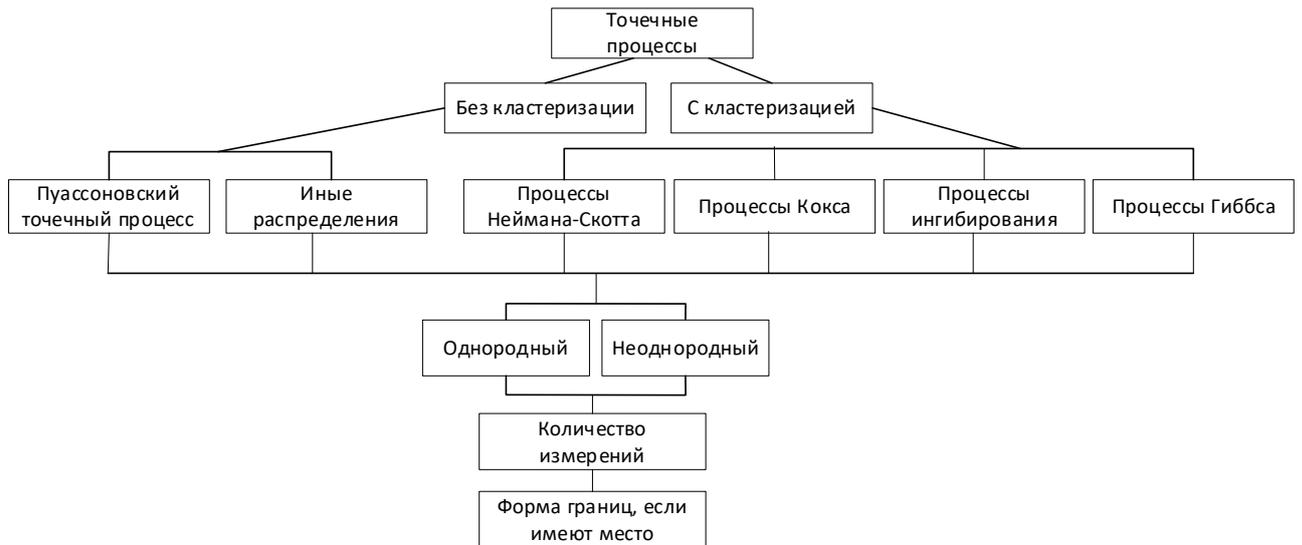


Рисунок 3.7 – Условная классификация точечных процессов

Данная классификация не претендует на полноту, однако она дает общие представления о тех моделях, которые в наибольшей степени получили распространение.

Как видно из приведенной классификации точечные процессы можно подразделить на одно кластерные и много кластерные (без кластеризации и с кластеризацией). Под кластеризацией здесь понимаются локальные скопления объектов (группы), которые можно легко выделить в общей группе объектов. Отсутствие кластеризации предполагает, что все объекты процесса образуют один кластер, в котором нет явных скоплений объектов.

Процессы без кластеризации применяются для моделирования однородных систем, где объекты образуют одно единственное поле, размещенное на плоскости или в пространстве. Распределение объектов может быть различным. Если параметры распределений неизменны, то имеют место однородные процессы, в противном случае – неоднородные.

Пуассоновский точечный процесс.

Первое место занимает Пуассоновский процесс. Он предполагает равномерное распределение объектов, т.е. каждая из координат представляет собой независимую случайную величину с равномерным распределением. Его координаты можно описать как

$$x_i = \text{uniform}(x_i^{(\min)}, K, x_i^{(\max)}), \quad f(x_i) = \frac{1}{x_i^{(\max)} - x_i^{(\min)}} \quad (3.1)$$

где $x_i^{(\min)}$ и $x_i^{(\max)}$ - минимальное и максимальное значения для координаты x_i ; $f(x)$ – плотность вероятности случайной величины.

Эта модель очень широко применяется, во-первых, из-за того, что многие явления, на практике, имеют подобный характер, а во-вторых, из-за того, что для Пуассоновского распределения возможно получить аналитические решения задач.

На рисунке 3.8 Приведена иллюстрация двумерной модели пуассоновского точечного процесса в области, ограниченной единичным квадратом. Процесс включает в себя 1000 объектов (точек).

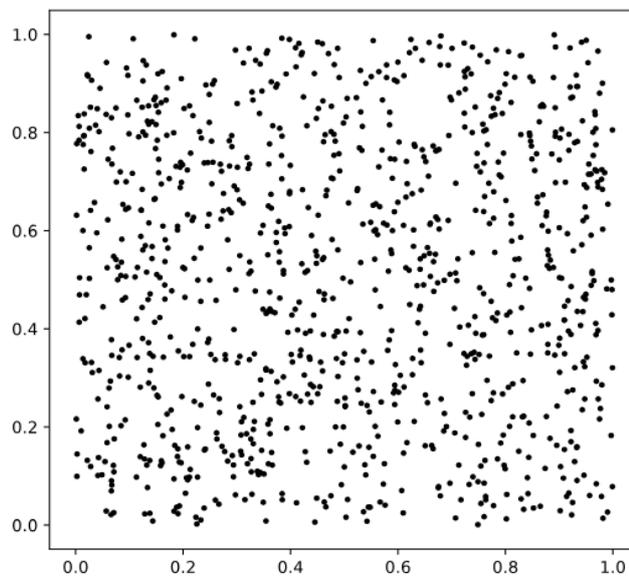


Рисунок 3.8 – Пуассоновское поле на прямоугольнике

Использование формулировки (3.1) не всегда удобно, а именно, тогда, когда область, в которой определен процесс, отличается от прямоугольника.

Пуассоновский процесс на круге проще задать через случайные радиус вектор r и угол α . Функции плотности вероятности этих случайных величин определяются как

$$f(r) = 2r, \quad f(\alpha) = \frac{1}{2\pi}. \quad (3.2)$$

При генерации случайных величин можно использовать выражения для вычисления угла и длины вектора

$$r_i = \sqrt{r_{\max} u}, \quad \alpha_i = 2\pi u, \quad u = \text{uniform}() \quad (3.3)$$

Связь с декартовыми координатами определяется выражениями

$$x_1^{(i)} = r_i \cos \alpha_i, \quad x_2^{(i)} = r_i \sin \alpha_i \quad (3.4)$$

На рисунке 3.9 приведена иллюстрация моделирования двумерного пуассоновского точечного процесса в области, ограниченной кругом. Процесс включает в себя 1000 объектов, равномерно, распределенных по площади круга.

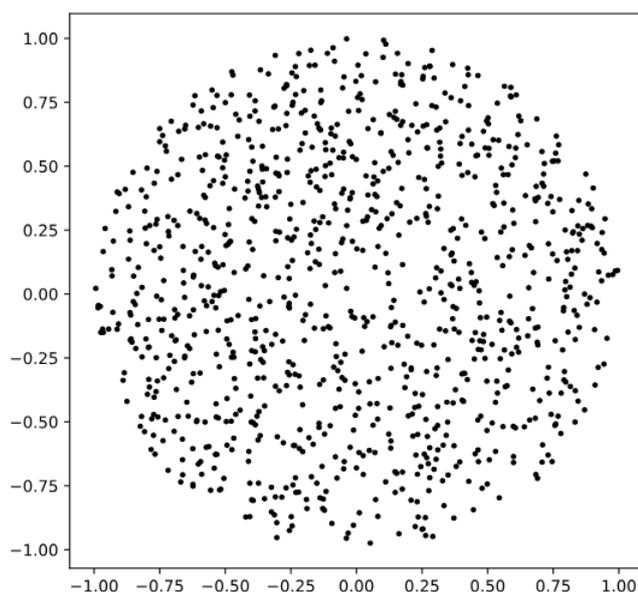


Рисунок 3.9 – Пуассоновское поле на круге

Представим модель пуассоновского поля в трехмерном пространстве. Координаты объектов в области, ограниченной кубом, можно получить как

$$x_i = \text{uniform}(x_i^{(\min)}, K, x_i^{(\max)}), \quad f(x_i) = \frac{1}{x_i^{(\max)} - x_i^{(\min)}} \quad (3.5)$$

где $x_i^{(\min)}$ и $x_i^{(\max)}$ - минимальное и максимальное значения для координаты x_i ; $f(x)$ – плотность вероятности случайной величины; $i=1, 2, 3$.

На рисунке 3.10 приведена модель трехмерного пуассоновского точечного процесса (пуассоновское поле) в области пространства, ограниченного кубом (в общем случае это может быть параллелепипед).

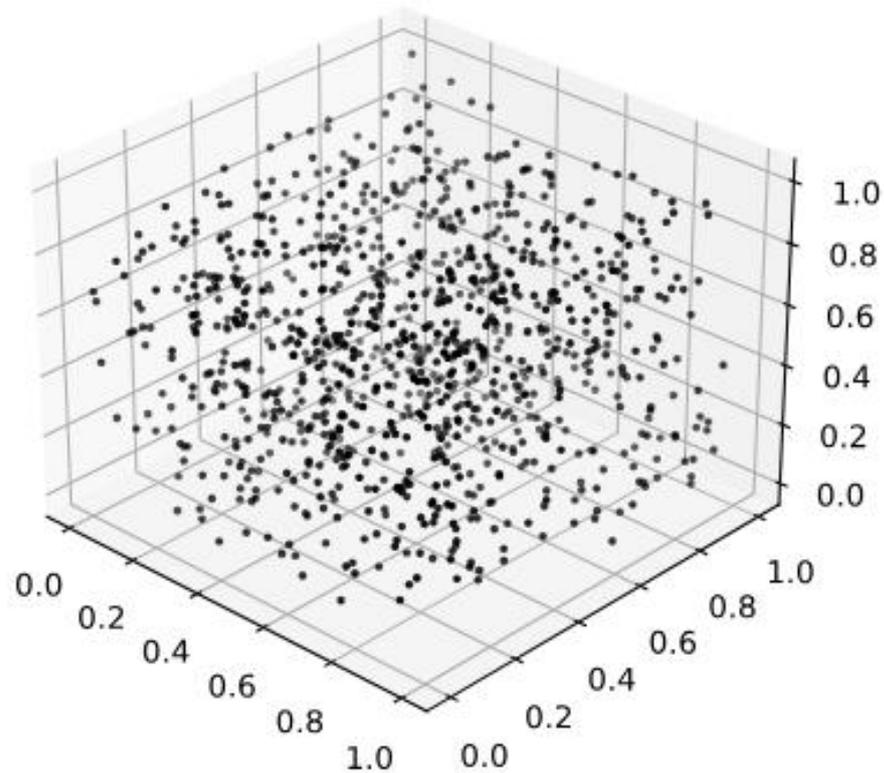


Рисунок 3.10 – Пуассоновский точечный процесс в трехмерном пространстве, ограниченный кубом

Аналогичным образом определим Пуассоновский точечный процесс в пространстве, ограниченном сферой.

На рисунке 3.11 приведена иллюстрация трехмерного пуассоновского точечного процесса в области пространства, ограниченной сферой. В области равномерно распределено 10000 объектов (точек).

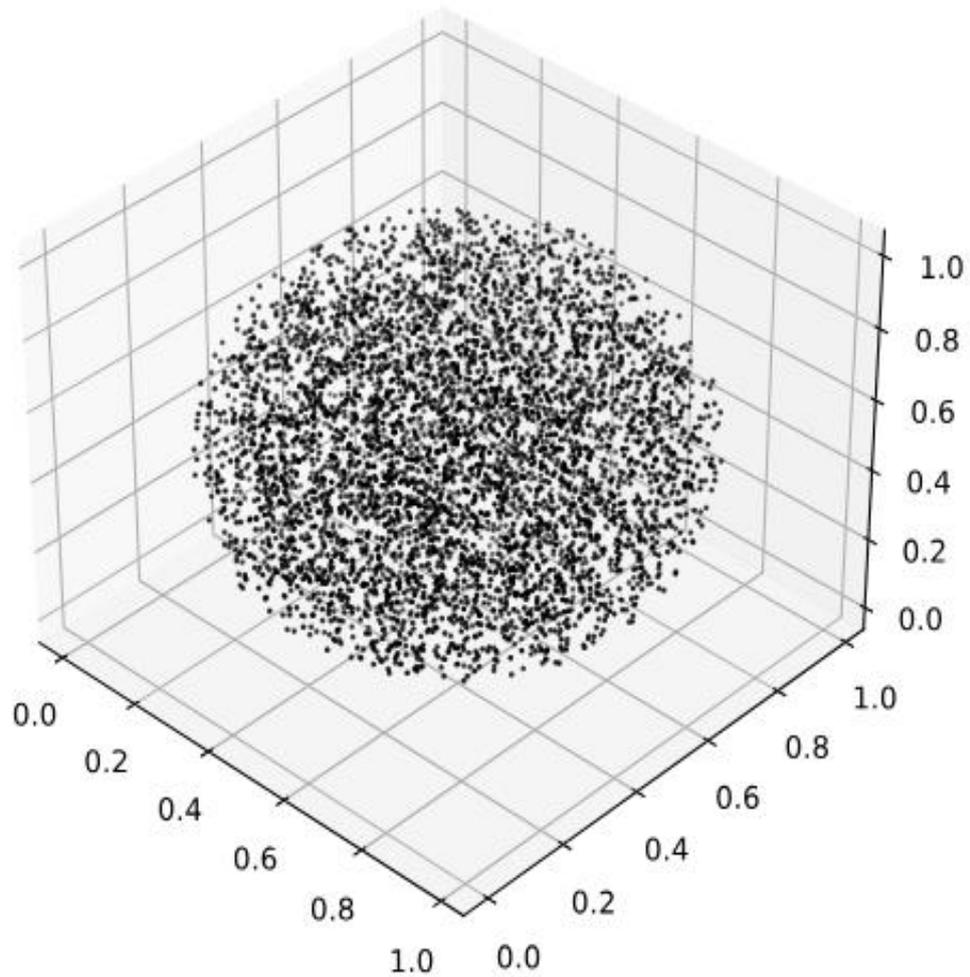


Рисунок 3.11 – Пуассоновский точечный процесс в трехмерном пространстве, ограниченный сферой

Получение точечного процесса, ограниченного сферой, можно определить через полярные координаты следующим образом.

$$\begin{aligned} \zeta &= 2u - 1, & \alpha &= 2\pi u, & r &= \sqrt[3]{u} \\ x &= r\sqrt{1-u^2} \cos \alpha, & y &= r\sqrt{1-u^2} \sin \alpha, & z &= ru \end{aligned} \quad (3.6)$$

Можно определить и иные поверхности, ограничивающие точечный процесс в трехмерном пространстве.

В большинстве практических случаев достаточно таких геометрических фигур как параллелепипед и сфера. С их помощью можно описать различного рода области пространства, ограниченные различными конструкциями и иными элементами инфраструктуры.

3.4 Точечные процессы Неймана-Скотта

Это кластерные процессы, которые описывают распределение объектов с образованием их скоплений. Среди этих моделей целесообразно выделить процессы Матерна и Томаса.

Точечный процесс Матерна можно представить как множество кластеров, возможно, различного (случайного размера), в пределах которых точечный процесс имеет свойства Пуассоновского процесса. Примеры двумерных точечных процессов Матерна приведены на рисунке 3.12.

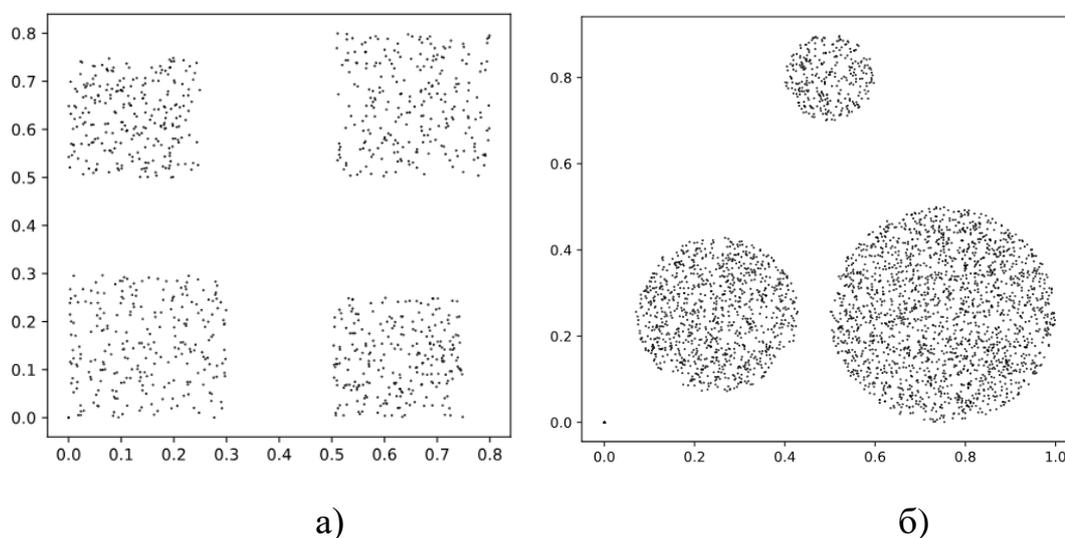


Рисунок 3.12 – Точечные процессы Матерна

На рисунке 3.12а процесс построен из четырех кластеров, форма которых определена квадратами различного размера. На рисунке 3.12б точечный процесс включает в себя три кластера, форма которых определена окружностями различного радиуса.

На рисунке 3.13 приведен пример точечного процесса Матерна в трехмерной модели.

В приведенном примере имеют место четыре кластера объектов, форма которых определяется сферами.

(Форма кластеров может быть задана и иными геометрическими фигурами.)

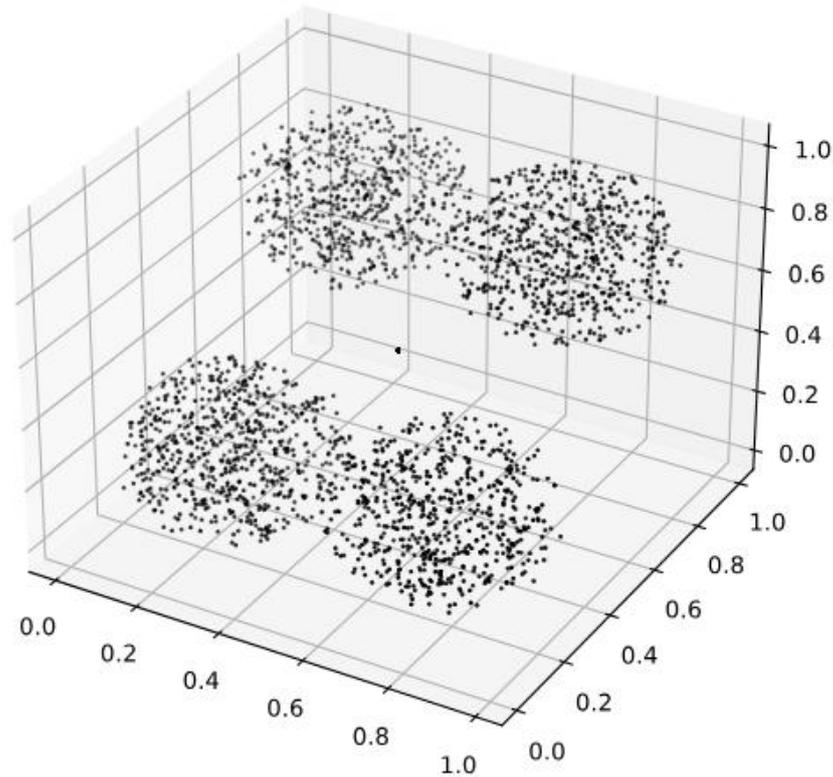


Рисунок 3.13 – Точечный процесс Матерна в трехмерном пространстве

Точечный процесс Томаса похож на процесс Матерна за тем исключением, что в пределах кластеров объекты распределены согласно нормальному закону распределения. В двумерной модели используется двумерное нормальное распределения.

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-c^2}} e^{-\frac{1}{2(1-c^2)}\left\{\frac{(x_1-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - c\frac{2(x_1-\mu_1)(x_2-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2-\mu_2)^2}{\sigma_2^2}\right\}} \quad (3.7)$$

где c – коэффициент корреляции, σ_1, σ_2 – среднеквадратические отклонения, μ_1, μ_2 – математические ожидания.

На рисунке 3.14 приведен пример двумерного точечного процесса Томаса. Данный пример показывает распределение 30000 объектов, которые представлены в виде трех кластеров. Распределение объектов в каждом из кластеров подчиняется двумерному нормальному закону распределения. Коэффициент корреляции между случайными координатами объектов равен нулю. Положение кластеров задается точками расстояния (математическими ожиданиями) двумерных случайных величин (координат), а «размер» кластеров

– дисперсией (разбросом) значений случайных величин, которые являются параметрами соответствующих распределений.

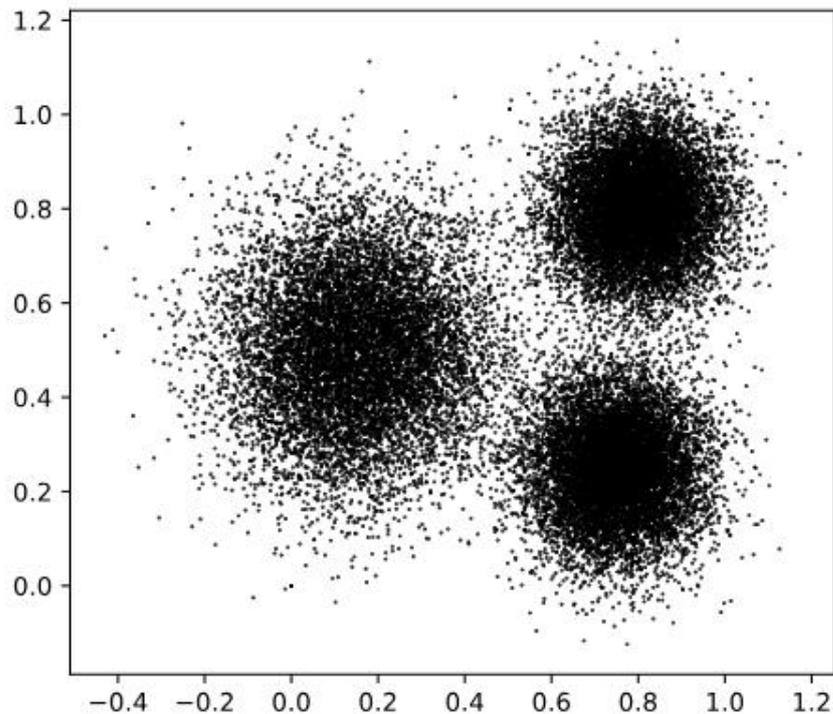


Рисунок 3.14 – Двумерный процесс Томаса

Плотность вероятности многомерного нормального распределения имеет вид.

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \mathbf{c}^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})^T \mathbf{c}^{-1}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})} \quad (3.8)$$

где \mathbf{x} – вектор размера n , \mathbf{c} – ковариационная матрица, $\boldsymbol{\mu}$ – вектор средних значений.

В общем случае, многомерное нормальное распределение позволяет получать многомерные точечные процессы, число измерений для которых превышает три. Однако в данной работе будем рассматривать сети, распределенные в трехмерном пространстве, и использовать для их описания трехмерные модели.

Пример трехмерного процесса Томаса приведен на рисунке 3.15.

На приведенном примере можно видеть четыре кластера объектов, образованные в трехмерном пространстве. Формы кластеров, в данном случае,

определяются трехмерными нормальными распределениями, в которых коэффициенты корреляции между случайными координатами объектов равны нулю (вырожденное распределения).

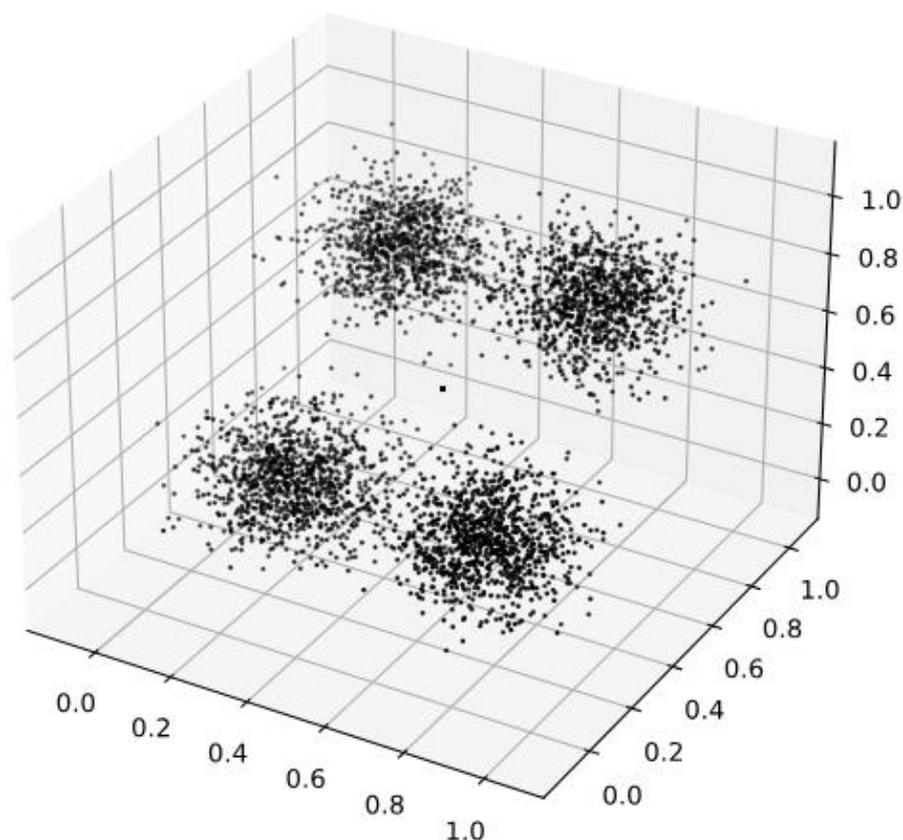


Рисунок 3.15 – Точечный процесс Томаса в трехмерном пространстве

Процессы ингибирования – это процессы, в которых точки не могут быть расположены близко друг к другу. Для их моделирования могут использоваться различные методы, снижающие вероятность генерации точек рядом друг с другом.

Опишем общий алгоритм формирования кластерных процессов. Он состоит из следующих шагов.

1. Определить заданный участок пространства (описать трехмерной геометрической фигурой).
2. Определить форму кластера (геометрическую фигуру), если это возможно, количество кластеров, распределение кластеров в заданном пространстве.
3. Получить распределение кластеров в заданном пространстве.

4. Определить распределение объектов в кластерах.
5. Получить распределение объектов в полученных кластерах.

Каждый из шагов этого алгоритма решается выбором генераторов случайных чисел с заданными законами распределения.

Приведенные выше примеры точечных процессов получены с помощью средств программирования python [35].

Все возможные варианты трехмерных точечных процессов не ограничиваются рассмотренными примерами, но они могут быть получены с использованием приведенного выше алгоритма.

3.5 Выбор головных узлов кластеров в трехмерных сетях Интернета вещей высокой плотности

3.5.1 Предварительные замечания

Предоставление услуг и обслуживание трафика интернета вещей (ИВ) уже в настоящее время занимает значительную долю ресурсов сетей связи, так как количество подключенных к сети устройств превышает количество пользователей-людей [63]. Для обеспечения функционирования сетей при росте количества подключенных устройств принимаются различные решения, в частности, применение технологий построения выделенных сетей ИВ, связанных с внешними сетями через шлюзы [64]. Для построения таких сетей применяются различные технологии организации беспроводных сетей. При организации таких сетей в зданиях и сооружениях возникают проблемы, связанные с высокой концентрацией устройств (плотностью) в пространстве.

Для возможности функционирования и управления такими сетями создается иерархическая структура, представляющая логическое и/или физическое разделение функций узлов сети. В частности, выделяются головные узлы, которые обеспечивают связь с определенными группами узлов

(кластеров). Такие узлы могут отличаться от других наличием сетевого питания (восполняемыми источниками энергии), производительностью и иными характеристиками. В таком случае сети называют инфраструктурными, т.е. использующими ресурсы, жестко связанные с окружающей средой.

В любом случае выбор головных или инфраструктурных узлов (ГУ) представляет собой одну из наиболее важных задач построения сети ИВ, т.к. он определяет ее структуру, следовательно, влияет на распределение трафика в сети и на качество ее функционирования [65].

Сети связи высокой плотности имеют ряд особенностей, которые предъявляют специфические требования к используемым методам и протоколам. В частности, большое количество устройств существенно усложняет решение задачи выбора структуры.

В данной работе предлагается метод выбора головных узлов сети ИВ высокой плотности, узлы которой размещены в трехмерном пространстве.

3.5.2 Модель сети и постановка задачи

Будем полагать, сеть ИВ состоит из n узлов $V = \{v_1, \dots, v_n\}$, которые распределены в трехмерном пространстве, рисунок 3.16. Будем также полагать, что в сети могут быть выделены кластеры узлов. В качестве метода кластеризации может быть использован, например, метод, описанный в работе [66].

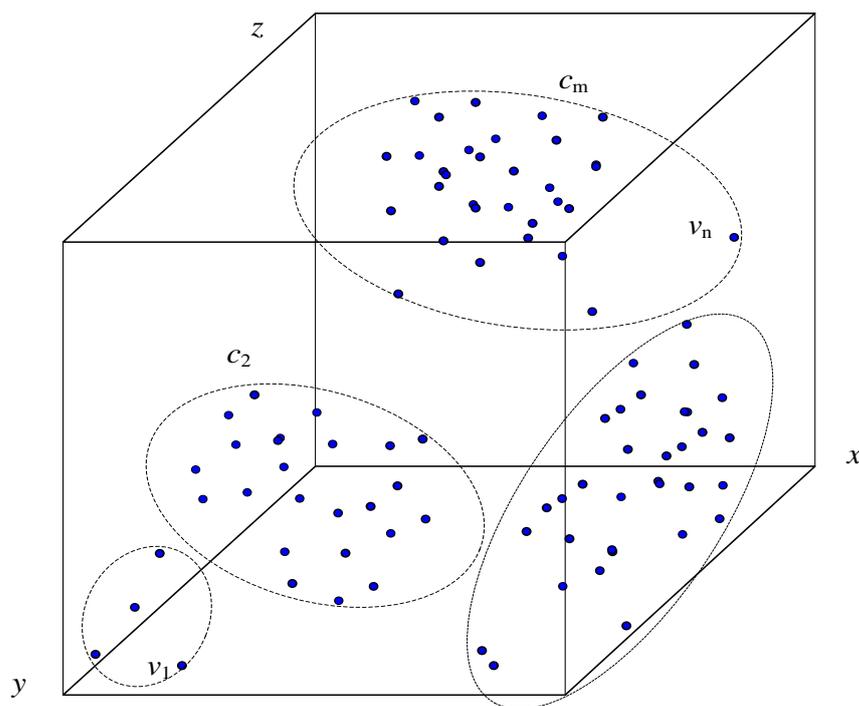


Рисунок 3.16 – Модель сети ИВ в трехмерном пространстве

Задачей построения сети является выбор позиций размещения ГУ в сети ИВ. В общем случае, в сети может быть несколько K кластеров $C = \{c_1, c_2, \dots, c_K\}$, они могут иметь произвольную форму и произвольное количество элементов, $i=1 \dots K$. В качестве критериев выбора позиции ГУ могут быть, например, расстояние (длина пути) от элементов кластера, покрытие элементов кластера (зона связи), количество обслуживаемых элементов (пропускная способность).

Если узлы в пределах кластера образуют связную ad-hoc сеть, то для их обслуживания можно использовать один или более ГУ, рисунок 3.17. Для упрощения задачи будем полагать, что позиция ГУ совпадает с позицией какого-либо узла кластера. Также будем полагать, что каналы передачи симметричны, т.е. характеристики каналов передачи в обоих направления можно считать идентичными.

ГУ являются центрами концентрации трафика, т.к. все узлы кластера осуществляют передачу данных через них. Поэтому для обеспечения качества функционирования сети при выборе позиций ГУ необходимо исходить как из минимума протяженности маршрута, так из обслуживаемого трафика. Определим требования к размещению ГУ следующим образом.

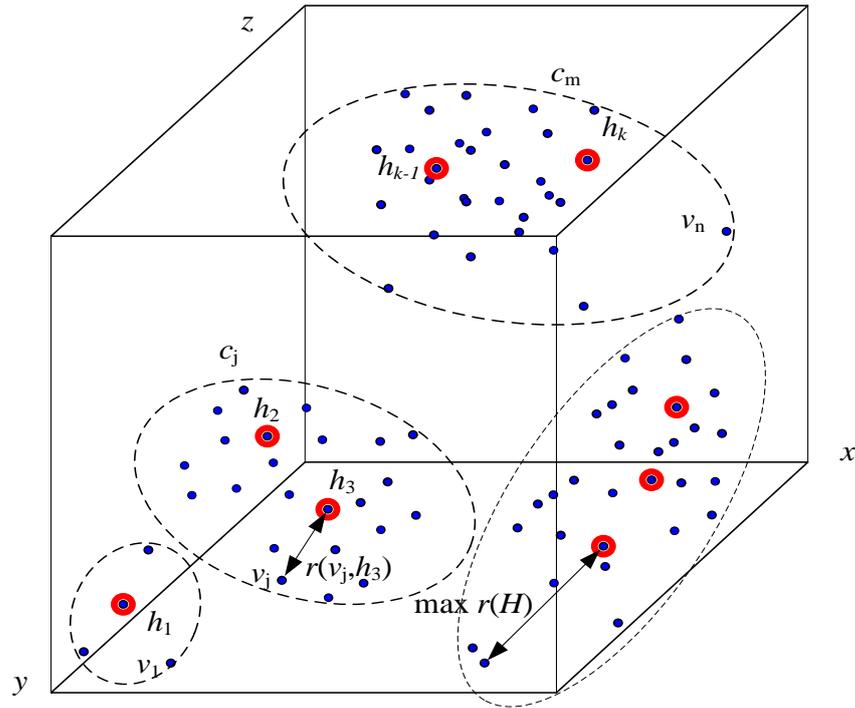


Рисунок 3.17 – Пример трехмерного кластера

Пусть $r(v_j, h)$ это расстояние между j -м узлом кластера и ближайшим ГУ. Положение ГУ h следует выбрать таким образом, чтобы минимизировать расстояние до максимально удаленного узла сети, т.е. обеспечить в худшем случае допустимое качество связи. Эту задачу можно рассмотреть, как задачу оптимизации, в которой целевая функция

$$r(h) = \min \left(\max_{v \in V} [d(v, h)] \right), \quad h \in V \quad (3.9)$$

Следует отметить, что выбора одного узла чаще всего недостаточно, в таком случае речь идет о выборе множества головных узлов $H = \{h_1, \dots, h_k\}$, $H \in V$.

3.5.3 Метод выбора головных узлов

Задача (1) - это задача поиска центра графа, образованного узлами кластера. Центр графа $h \in V$ – вершина, максимальное расстояние (длина кратчайшего пути) от которой до всех остальных вершин минимально. Задача ее поиска называется минимаксной [17, 67].

Задача поиска центра графа решается поиском всех кратчайших путей в графе, например, с использованием алгоритма Флойда-Уоршалла [17] и нахождением центра графа по этим данным [68]. Использование такого подхода вполне допустимо, если количество узлов кластера (вершин в графе) не слишком велико как с позиции вычислительной сложности, так и с позиции возможности обслуживания, производимого ими трафика.

Вычислительная сложность состоит в том, что поиск всех кратчайших путей требует время, определяемое кубом количества узлов (вершин) $O(n^3)$. Это решаемая задача, но при большом количестве узлов время ее решения может оказаться недопустимо большим.

В случае сети высокой плотности возможно прибегнуть к упрощению задачи за счет того свойства, что длина кратчайшего пути в такой сети близка к расстоянию между вершинами [69, 70]. Это логически следует из того, что кратчайшее расстояние между двумя точками определяется по прямой, проходящей через них, а в случае сети высокой плотности велика вероятность того, что транзитные узлы пути окажутся очень близко к этой прямой. В таком случае достаточно знать расстояния между узлами или их координаты.

Возможность обслуживания определяется производительностью ГУ и пропускной способностью маршрутов. Чаще всего одного ГУ недостаточно для обслуживания всех узлов сети. Тогда задачу можно нужно рассматривать как поиск нескольких узлов. Эта задача известна как задача поиска k -кратного (также в литературе используется название p -кратного) центра графа [17].

Целевую функцию для этой задачи можно записать как

$$r(H) = \min \left(\max_{v \in V} [d(v, H)] \right), \quad H \in V \quad (3.10)$$

где $H = \{h_1, \dots, h_k\}$, $H \in V$ это k -кратный центр графа, т.е. подмножество узлов (вершин графа) такое, которое минимизирует максимальное расстояние от всех вершин графа до ближайшей из вершин k -кратного центра. Для выбора вершин k -кратного центра при известных длинах кратчайших путей требуется рассмотрение C_n^k вариантов. Таким образом, требуемое для решения время

определяется как $O(C_n^k)$. Например, при $n=100$ и $k=10$ количество операций пропорционально величине $1,7 \cdot 10^{13}$.

Задача поиска k -кратного центра графа классифицируется как NP -сложная задача, решить которую даже при относительно не большом количестве вершин (100-200 вершин) за разумное время невозможно.

Альтернативой поиску центра графа может быть применение центроидных методов кластеризации, которые позволяют локализовать центры групп кластеров (групп узлов) путем минимизации суммарного расстояния до них от узлов кластера, например, алгоритм k -средних [71]. Однако сложность решения в этом случае также может оказаться существенной, она составляет не более $n^{O(Dk+1)}$ [72], где D -размерность пространства. В трехмерном пространстве для приведенного выше примера максимально возможное количество операций пропорционально $1 \cdot 10^{60}$. В [72] показано, что нижняя граница вычислительной сложности данного алгоритма составляет $2^{\sqrt{n}}$, что в данном примере составляет всего $1 \cdot 10^3$ операций. Разброс эти оценок очень велик. В этой же работе отмечено, что в большинстве случаев сложность составляет $O(n \ln n)$, однако, такая сложность не гарантируется этим алгоритмом.

Для ее решения задачи поиска k -кратного центра были разработаны приближенные методы, которые отличаются друг от друга вычислительной сложностью и точностью решения. Точность решения будем характеризовать отличием получаемого решения (величиной ошибки) от истинного оптимального решения. Наиболее известны и эффективны такие алгоритмы как: Sh, HS, Gon, CDS, Greedy pure, Scoring – алгоритмы [73].

Эти алгоритмы (кроме CDS) позволяют получить, так называемые 2-приближенные (2-approximation solution). Под этим названием понимается то, что решение не более чем вдвое хуже оптимального. Формально это означает следующее. Если H^* – это 2-приближенное решение задачи, а целевая функция определена как (3.10) то

$$r(H^*) \leq 2r(H_{\text{opt}}), \quad (3.11)$$

где H_{opt} -оптимальное решение задачи $r(H_{\text{opt}}) = \min_H \left(\max_{H \in V} [d(v, H)] \right)$.

Наряду с выполнением условия (3.11) алгоритмы отличаются точностью получаемых решений и вычислительной сложностью. В таблице 3.1 приведены основные характеристики ряда алгоритмов: вычислительная сложность и статистические оценки точности решения.

Приведенные в таблице оценки получены на исходных данных из библиотек ORLib и TSPLib [73, 74]. Эти библиотеки содержат наборы данных по задачам дискретной оптимизации.

Библиотека ORLib содержит наборы данных для таких задач, как задачи маршрутизации, планирования производства, расписания занятий и другие.

Библиотека TSPLib содержит наборы данных по задачам коммивояжера. Наборы данных содержат числовые значения расстояний между городами и отражают различные примеры для тестирования алгоритмов решения задачи коммивояжера. Эти библиотеки широко используются для сравнения алгоритмов решения задач дискретной оптимизации. Знаком «+» обозначены модификации одноименных алгоритмов, которые заключаются в том, что модифицированный алгоритм выполняется n раз, начиная поиск из всех возможных начальных состояний.

Таблица 3.1 – Характеристики алгоритмов

Алгоритм			Вычислительная сложность
HS	1,532	0,175	$O(n^2 \lg n)$
Gon	1,503	0,122	$O(kn)$
CDSH	1,035	0,031	$O(n^2 \lg n)$
CDS	1,020	0,027	$O(n^4)$
HS+	1,258	0,110	$O(n^3 \lg n)$
GON+	1,304	0,120	$O(kn^2)$
CDSH+	1,017	0,025	$O(n^3 \lg n)$

Оценки сложности ряда этих алгоритмов существенно лучше, чем у точного алгоритма и упомянутого выше алгоритма k -средних.

Величины μ и σ - среднее значение и среднеквадратическое отклонение характеризуют соответствие получаемого решения оптимальному решению.

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \beta_i, \quad \beta_i = \frac{r(H_i^*)}{r(H_{opt}^{(i)})}, \quad i = 1, K, M \quad (3.12)$$

где M – количество вычисленных примеров, $H_{opt}^{(i)}$ - оптимальное решение для i -го примера, H_i^* - решение, полученное с помощью приближенного алгоритма (в данном случае $M=49$ - количество обработанных примеров).

Среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\beta_i - \mu)^2}, \quad i = 1, K, M \quad (3.13)$$

Полному соответствию имеет место при $\mu=1$, $\sigma=0$. Из таблицы видно, что точность решения тем выше, чем выше вычислительная сложность алгоритма. Например, CDS лишь на 2% проигрывает оптимальному решению, но имеет вычислительную сложность $O(n^4)$. Следует отметить, что алгоритм CDS является 3-приближенным решением, однако, обеспечивает более высокую точность решения.

Самый «легкий» алгоритм GON дает ошибку решения около 50% при вычислительной сложности $O(kn)$.

Модифицированные алгоритмы позволяют несколько повысить точность решения, однако повышают и вычислительную сложность в n раз.

Вычислительная сложность и время выполнения алгоритма могут иметь существенное значение, особенно в задачах управления сетью, когда для решения используются ресурсы относительно низко производительных вычислительных устройств (контроллеров). В таких случаях необходимо использовать наиболее приемлемый алгоритм и обеспечить при этом требования по качеству обслуживания трафика.

Как правило, качество обслуживания трафика связано с обратной зависимостью длиной маршрута, при этом можно говорить, как о метрическом расстоянии, так и о количестве транзитов, задержке и пропускной способности.

Ошибка, вносимая приближенным алгоритмом, проявляется в увеличении максимального расстояния между узлами сети и ИУ, следовательно, и к снижению качества обслуживания, по отношению к оптимальному решению.

Для оценки относительной сложности алгоритма введем коэффициент, отражающий количество операций, необходимое для уменьшения ошибки на 1%.

$$\theta = \frac{N}{100(2-\mu)}, \quad (3.14))$$

где численные значения μ взяты из таблицы 3.1, а величина θ получена как количество итераций для значения $n=1000$, а $k=100$. Полученные оценки приведены на рисунке 3.18.

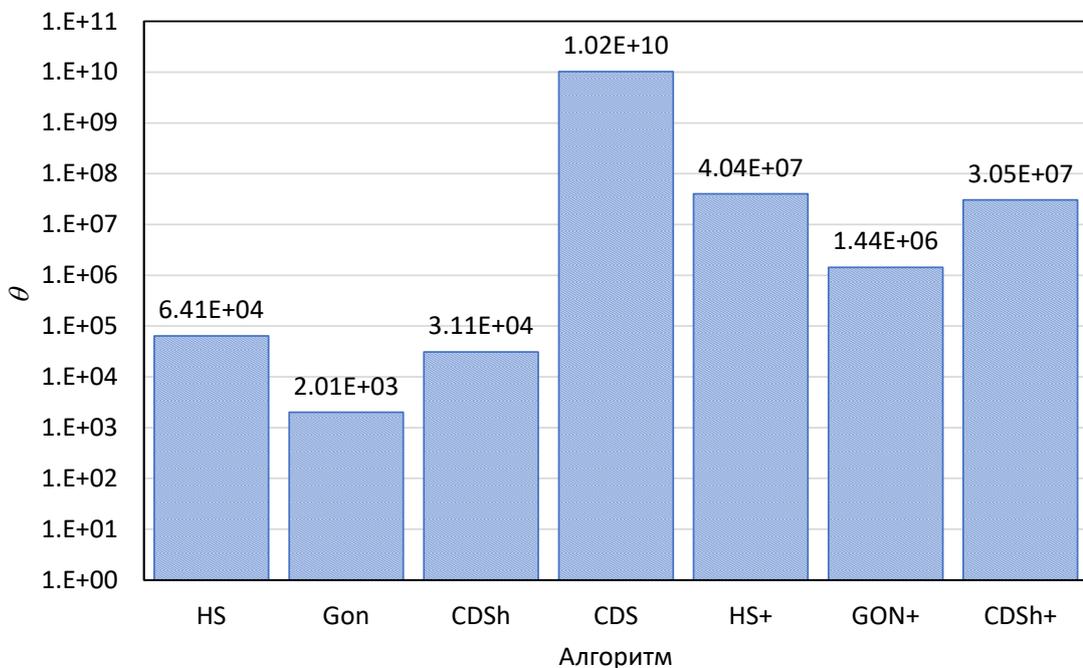


Рисунок 3.18 – Относительная сложность алгоритмов

Из рисунка 3.18 видно, что наименьшую относительную сложность в данных условиях имеет алгоритм GON, с ним сопоставимы алгоритмы CDsh и HS. Алгоритм CDS имеет существенно меньшую эффективность (на семь порядков).

На рисунке 3.19 приведена статистическая зависимость решения (значения функции (3.10)) от кратности центра, полученная на достаточно большом количестве примеров графов с количеством узлов от $n=100 \dots 1000$, при k от 1 до n для различных примеров. По осям графика отложены относительные значения количества вершин k_0 и размера решения r_0 . Относительная кратность центра графа определяется как

$$k_0 = \frac{k}{n} \quad (3.15)$$

где k – кратность центра графа, n – количество вершин в графе.

Относительный размер решения определяется как

$$r_0(k) = \frac{r(k)}{r(1)} \quad (3.16)$$

где k – кратность центра графа, $r(1)$ – размер решения для кратности центра равной единице (максимальное значение).

Синяя кривая соответствует примерам решений для исходных данных из библиотеки ORLib. На этом же рисунке приведена статистическая зависимость решения для примеров на исходных данных и библиотеки TSPLib – черная кривая.

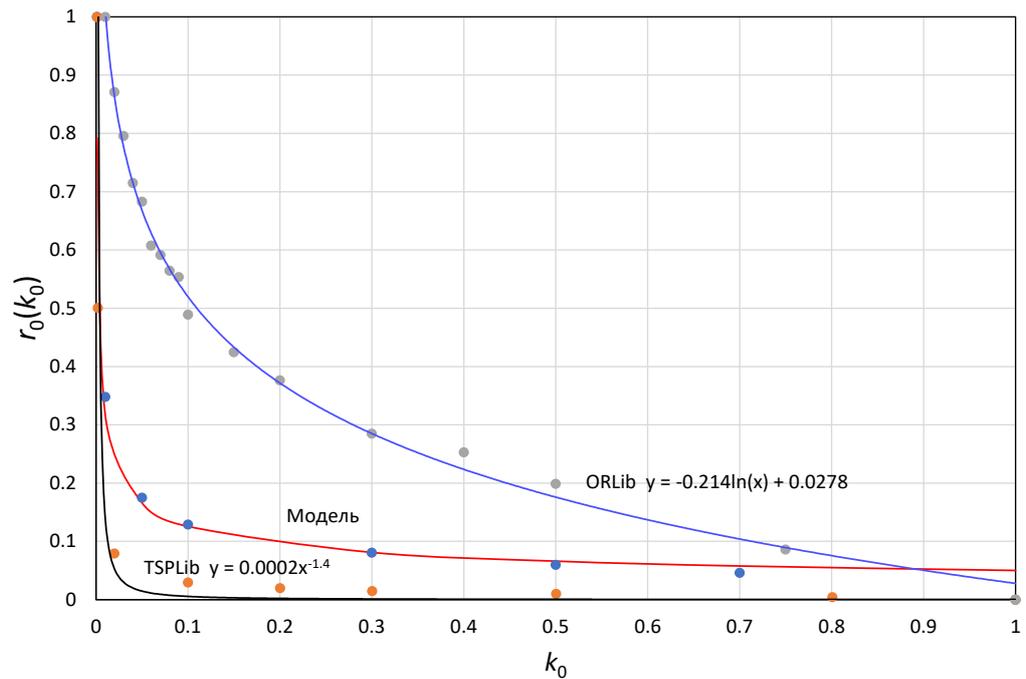


Рисунок 3.19 – Зависимости решения от кратности центра графа для различных примеров

Наряду с упомянутыми данными было проведено тестирование на данных, полученных с помощью имитационного моделирования сети трехмерными точечными процессами [75]. При выборе моделей точечных процессов сделано предположение о том, что узлы сети могут быть размещены неравномерно, как об этом говорилось выше. В качестве моделей были использованы модифицированные точечные процессы Неймана-Скотта: процесс Матерна и процесс Томаса.

Базовая модель точечного процесса Матерна двумерная и предполагает наличие случайных кластеров, имеющих форму кругов, в пределах кластеров объекты распределены равномерно.

В данной работе использован модифицированный вариант [76]. Используемая модель трехмерная, а кластеры определены в виде параллелепипедов, узлы в пределах кластеров также распределены согласно трехмерному равномерному распределению.

Базовая модель точечного процесса Томаса двумерная и предполагает наличие случайных кластеров, в пределах которых объекты распределены согласно двумерному нормальному закону распределения.

Модифицированная модель трехмерная, узлы распределены кластерами, в пределах кластеров имеет место трехмерное нормальное распределение. При моделировании использовалось вырожденное трехмерное нормальное распределение (коэффициенты корреляции по всем трем координатам равны нулю). Построенные модели приведены на рисунке 3.20.

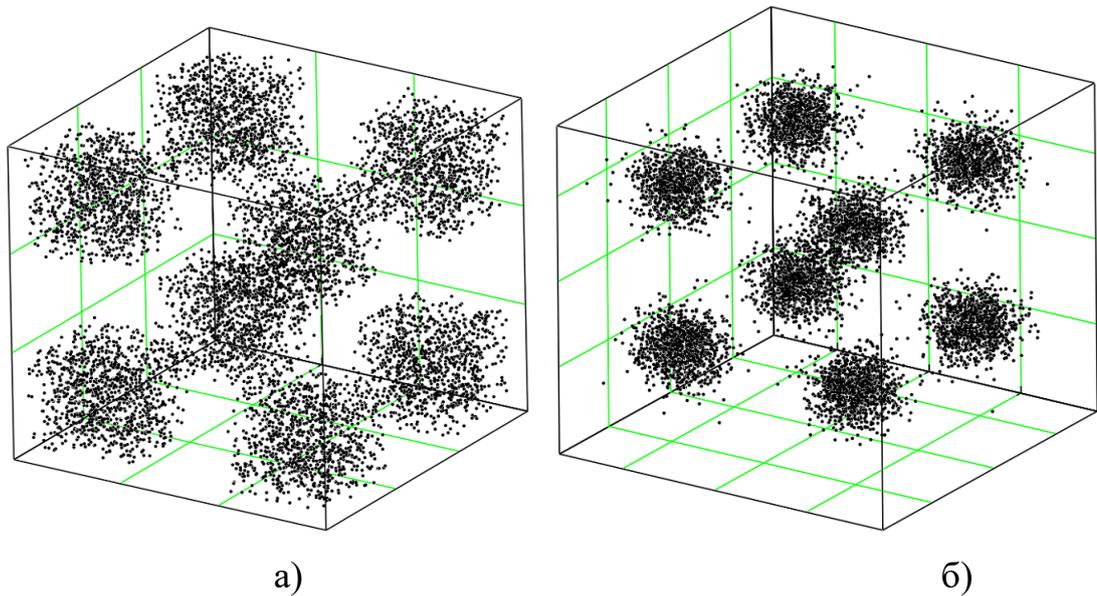


Рисунок 3.20 – Примеры моделирования сети с применением модифицированных точечных процессов Матерна (а) и Томаса (б), $n=1000$, $K=8$.

Полученная для упомянутых примеров зависимость изображена красной кривой на рисунке 3.19. Она находится между зависимостями, полученными для ORLib и TSPLib, и на рабочем участке достаточно хорошо описывается степенной функцией

$$r_0(k_0) = \eta k_0^{-\beta} \quad (3.17)$$

для приведенных примеров $\eta=0,05$, $\beta=0,4$.

Приведенные на рисунке 3.19 зависимости демонстрируют уменьшение величины r_0 при увеличении степени центра графа k_0 . Таким образом, можно предположить, что уменьшение размера решения при увеличении кратности

центра графа k можно использовать для компенсации ошибки получения этого решения, при использовании приближенных алгоритмов.

Если известны величина ошибки решения $\mu(a_i)$, вносимая приближенным алгоритмом a_i , количество операций, необходимых для его получения N и количество вершин в центре k , то можно сформулировать задачу оптимизации.

В общем случае это многокритериальная задача, в которой нужно найти компромисс между точностью решения, кратностью центра и временем (сложностью) получения решения. Для построения целевой функции предлагается метод скаляризации критериев [77], для реализации которого вводятся условные единицы стоимости величины решения, сложности его получения и вершин, включаемых в центр графа.

Введем условные единицы стоимости q_1 вычислительной операции, единицы качества решения q_2 , выражаемого в единицах (3.10) и ГУ сети q_3 . Тогда целевой задачей будет минимизация суммарной стоимости решения. Целевая функция может быть записана как

$$Q(a_i, k) = \min_{A, k} [q_1 r(a_i, k) \mu(a) + q_2 N(a_i, k) + q_3 k \mid a_i \in A, i = 1 \dots K, T], \quad (3.18)$$

где $A = \{a_1, a_2, \dots, a_b\}$ множество, состоящее из рассматриваемых алгоритмов поиска k -кратного центра графа; k – количество вершин в k -кратном центре графа.

Условная стоимость решения, согласно (3.18) определяется размером решения $r(a_i, k)$, а также количеством операций, необходимых для его получения $N(a_i, k)$, зависящими от выбранного алгоритма a_i и выбранного количества вершин k , а также и количества вершин k . Коэффициенты q_1 , q_2 и q_3 – это условные единицы стоимости решения (расстояния), вычислительных операций и ГУ, соответственно.

На рисунке 3.21 приведен вид целевой функции (3.18) для случая $n=1000$, $k=100$, $q_1=10$ у.е./м, $q_2=1 \cdot 10^{-9}$ у.е./цикл, $q_3=10$ у.е./узел.

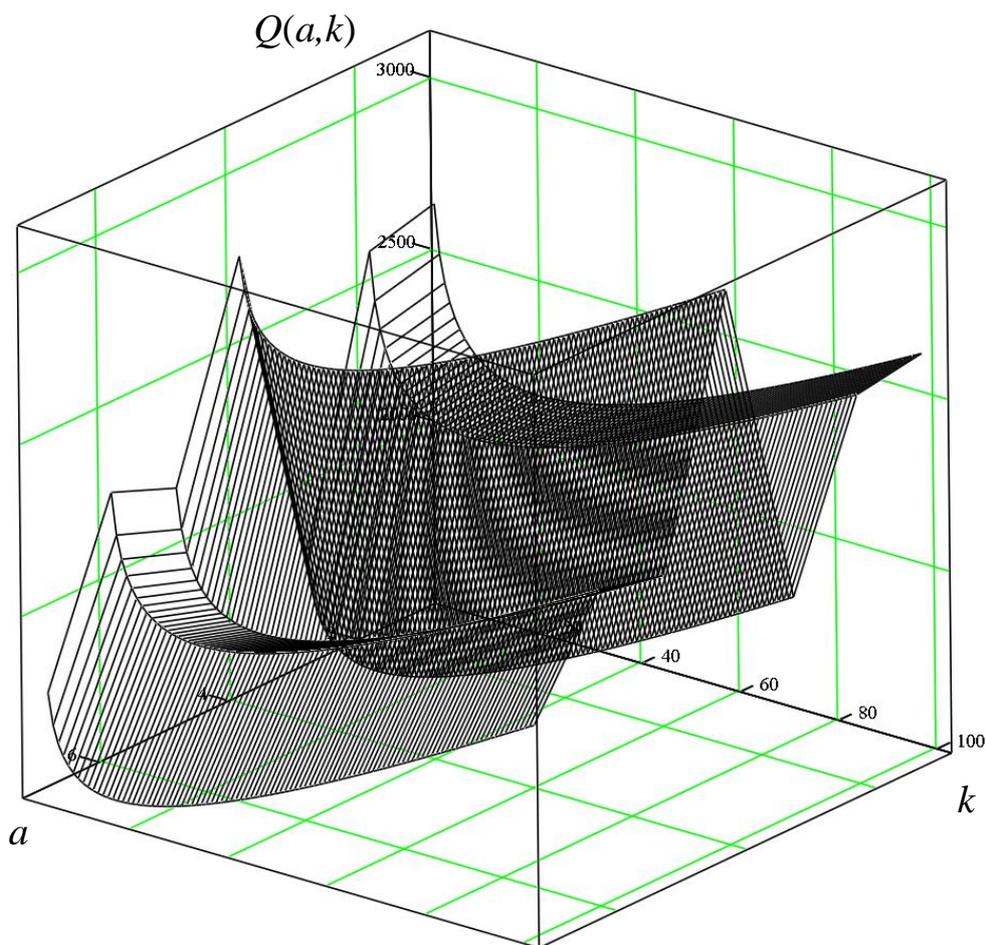


Рисунок 3.21 – Вид целевой функции.

В приведенном на рисунке 3.21 примере вид целевой функции достаточно наглядно демонстрирует существование экстремума (минимального значения). В общем случае это не выпуклая функция. Однако, количество рассматриваемых алгоритмов не слишком велико, а переменной k (кратности центра) эта функция выпуклая. Для поиска экстремума могут быть использованы эффективные методы оптимизации. В данной работе для поиска экстремума по k использовался метод дихотомии, для каждого из рассматриваемых алгоритмов.

Применение предложенного метода может быть адаптировано для решения различных задач благодаря возможности выбора соответствующих значений стоимости ресурсов.

Эффективность предложенного метода можно оценить разницей в условной стоимости принимаемых решений. Разумеется, эта разница зависит от

выбранных значений стоимости ресурсов. При принятых в примере значениях условной стоимости ресурсов она составляет от 8 до 53% по сравнению со случайным выбором алгоритма.

В частности, если для построения маршрутов в сети применять метод, предложенный в [48], то применение предложенного выше метода выбора размещения ГУ, дает возможность повысить минимальную скорость передачи данных в сети (для самого протяженного маршрута) на величину до 38%, в условиях приведенного выше примера и использования стандарта IEEE 802.11n, по сравнению с произвольным размещением ГУ.

3.6 Выводы

1. Для обеспечения функционирования сетей интернета вещей высокой плотности в трехмерном пространстве необходима организация иерархической структуры, для чего необходим выбор головных узлов, реализующих роль транзитных при передаче трафика от узлов сети ИВ во внешние сети.

2. Задача выбора головных узлов может быть описана задачей поиска k -кратного центра графа, для решения которой могут быть использованы алгоритмы получения приближенных решений. Качество решения в таком случае характеризуется его размером, численно равным расстоянию (метрике) между вершинами центра и самым удаленным узлом.

3. При выборе алгоритма решения задачи необходимо обеспечить компромисс между критериями точности, качества решения, и времени его получения (вычислительной сложности).

4. Предложенный метод обеспечивает достижение указанного компромисса путем решения задачи оптимизации, целевая функция которой получена методом скаляризации указанных выше критериев.

5. Эффективность предложенного метода составляет от 8 до 53% по сравнению со случайным выбором алгоритма решения задачи.

6. Предложенный метод может быть использован при выборе структуры сети ИВ и при реализации протоколов этого выбора. Благодаря возможности выбора параметров, он может быть адаптирован к различным требованиям со стороны системы управления сетью.

4. МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТИ ИВ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, РАЗМЕЩЕННОЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

4.1 Задачи маршрутизации в сетях ИВ

Маршрутизация трафика в сетях связи является одной из важнейших задач управления сетью. Адекватный выбор маршрута обеспечивает доставку между отправителем и получателем, обеспечивая при этом требования к качеству обслуживания. Маршрутизация трафика лежит в основе задач распределения ресурсов в сетях связи, следовательно, и задач обеспечения эффективного их использования.

Интернет вещей это технологическая революция, которая представляет будущее вычислений и коммуникации, она направлена на увеличение вездесущность Интернета за счет интеграции каждого объекта через встроенные системы связи, что приводит к появлению распределенных сетей устройств, взаимодействующих с человеком, а также другими устройствами.

По сравнению с традиционными сетями связи, у ИВ есть три новые цели, это более широкая взаимосвязь, более интенсивная восприятие информации и большее проникновение.

Сети ИВ – это сети малого радиуса действия, они содержат беспроводные датчики (WSN), устройства радиочастотной идентификации (RFID), Bluetooth и сети Zigbee. Различные устройства объединяются в сети для создания, сбора и обмена информацией.

Сети ИВ являются гетерогенными, так как, потенциально, могут объединять устройства (узлы), использующие различные технологии связи, или набор таких технологий. Неоднородность сети также проявляется в различиях размера, вычислительных возможностей, объема памяти и запаса энергии. Запас энергии устройства является одним из важнейших ресурсов, недостаток которого может привести к тому, что сеть перестанет функционировать.

Сети ИВ поддерживают различные типы связи, такие как устройство к устройству, устройство к человеку или человек к устройству.

Связь может быть внутридоменной или междоменной. Маршрут может иметь один или множество участков (скачков). В многоскачковом маршруте устройства передают информацию до достижения узла назначения. Схемы распределения потоков данных могут иметь различную направленность. Это направления точка-точка, точка к множеству точек и множество точек к точке. Из-за неоднородного характера сети ИВ требуются некоторые вычислительные возможности (интеллект) в процесс выбора маршрутов. Эти возможности обеспечивают способность устройств реагировать на особенности среды, в которой они находятся, работают и взаимодействуют с другими устройствами.

Многие беспроводные сети большого масштаба используют маломощные встроенные устройства для сбора данных и активации различных устройств. Часто эти устройства работают в условиях жесткого энергетического дефицита и передают данные по каналам с потерями.

Решения маршрутизации, должны быть энергоэффективным, масштабируемым и самодостаточным.

Протоколы маршрутизации подразделяются на проактивные, реактивные и гибридные [78] с точки зрения того, как они принимают решения о маршрутизации.

Проактивные протоколы всегда поддерживают информацию о маршрутизации в табличной форме, реактивные протоколы создают маршрут по требованию, тогда как гибридная маршрутизация использует как проактивный, так и реактивный алгоритмы маршрутизации.

Чаще всего, полагают, что реактивные протоколы больше подходят для динамически изменяющихся сетей, что приводит к необходимости постоянного обновления таблиц маршрутизации.

Иерархические протоколы делят сеть на относительно малые кластеры с узлом, работающим как головной узел. Некоторые алгоритмы используют

координаты местоположения (географического расположения) узла для получения более эффективной маршрутизации.

Некоторые алгоритмы используют много-путевую маршрутизацию, чтобы эффективно решать вопросы отказов узлов и обеспечивать повышение пропускной способности.

Основные проблемы, которые имеют место в процессах построения сети ИВ и маршрутизации.

1. Развертывание узлов. В отличие от традиционные сети, где известна топология, определить топологию в сети ИВ непосредственно перед развертыванием довольно сложно, также сложно сохранить ее в процессе эксплуатации сети.

2. Гетерогенные устройства. Сетевые устройства различается по типу, поддерживаемым сетевым стандартам, типу приложений. Также устройства могут отличаться запасом энергии.

3. Непостоянство (нестабильность) связи. Вынужденная экономия энергии приводит к непостоянству связи, т.е. узлы сети могут значительное время могут находиться в состоянии с низким потреблением энергии, в это время они не могут передавать данные. Вторым фактором является мобильность узлов, что приводит к необходимости перестроения логической структуры сети, что также приводит прерыванию связи.

4. Многоскачковые маршруты. Маршруты в сети могут иметь относительно большое количество транзитов из-за относительно малой дальности связи узла.

5. Отказоустойчивость. К отказам узлов могут привести как естественные технические отказы, так и исчерпание запаса энергии, внешние факторы, приводящие к изменению условий распространения сигнала. Отказоустойчивость обеспечивается за счет аппаратурной избыточности и протоколов, обеспечивающих перестроение логической структуры сети.

7. Безопасность. Проблемы безопасности в ИВ схожи с проблемами безопасности в сетях беспроводной связи с учетом дополнительных уязвимостей из-за ограниченного запаса энергии и специфики протоколов.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод о том, что маршрутизация в сетях ИВ это основная функция, обеспечивающая функционирование разнородной сети в условиях нестабильности параметров ее элементов. Поэтому при решении этой задачи требуется учитывать, по возможности, большее количество факторов, влияющих на работу сети и определяющих качество предоставления услуг.

4.2 Общие сведения о теории серых систем и серый реляционный анализ

Появление теории серых систем является результатом деятельности профессора Джулонга Дэна. В 1982 году была опубликована его статья под названием «Проблемы управления серыми системами», в журнале «Systems and Control Letters» [79]. Она стала основополагающей статьей, которая показала, что теория серых систем является новой ветвью исследований, наряду с исследованиями в области нечетких множестве и нечеткой логики. На сегодняшний день работы профессора Дэна цитировались более 50 тысяч раз. Профессор Дэн получил награду основателя теории серых систем на Международной конференции IEEE 2007 года по серым системам и интеллектуальным услугам.

Базовые принципы теории серых систем

В процессе разработки теории серых систем Д. Дэн установил шесть фундаментальных принципов, содержащих внутренние философские интенции, как изложено ниже.

Аксиома (Принцип информационных различий). «Различие» подразумевает наличие информации. Каждая часть информации должна нести какое-то «различие».

Когда мы говорим, что объект «А» отличается от объекта «В», мы имеем в виду, что существует некая информация об объекте «А», не верная для объекта «В».

Если информация «I» изменила наше понимание или впечатление о сложной материи, то часть информации «I» определенно отличается от того, что мы изначально понимали под сложной материей.

Аксиома (Принцип неединственности) Решение любой задачи с неполной и неопределенной информацией не является уникальным.

Из-за принципа неединственности, который является основным законом применения теории серых систем, можно более свободно воспринимать проблемы.

Стратегически принцип неуникальности реализуется через концепцию серой мишени. Эта концепция представляет собой объединение концепций неуникальной цели и концепции неограниченной цели. Например, с одной стороны, если выпускник средней школы не планирует поступать ни в какой ВУЗ, кроме одного конкретного ВУЗа, то его шансы на поступление в ВУЗ сильно ограничены. С другой стороны, если выпускник средней школы с такой же квалификацией, как и в предыдущем примере, готов подать заявление в несколько университетов, отличных от предпочитаемого им, у него будет больше шансов быть принятым в университет, потому что у него есть несколько целей, что, в свою очередь, приводит к повышению шанса достигнуть хотя бы одну из целей.

Принцип неуникальности можно рассматривать как всестороннее осознание того, что к каждой цели можно приблизиться, что любую имеющуюся информацию можно дополнить,

Аксиома (Принцип абсолютной серости.)

«Неполнота» информации абсолютная. Неполнота и недетерминированность информации имеют всеобщность.

Полнота информации относительна и временна. Это момент, когда первоначальный недетерминизм только что исчез, и вот-вот должен появиться

новый недетерминизм. Человеческое распознавание и понимание объективного мира со временем улучшилось благодаря постоянному дополнению информацией. При бесконечном поступлении информации бесконечными становятся познание и понимание мира человеком. То есть серость информации абсолютна и никогда не исчезнет.

Основное содержание теории серых систем

За почти тридцать лет развития теория серых систем превратилась в новую научную дисциплину со своей собственной теоретической структурой, состоящей из системного анализа, оценки, моделирования, прогнозирования, принятия решений, контроля и методов оптимизации. Его основное содержание содержит.

- Теоретическая система разработана на основе алгебраической серой системы, серых уравнений, серых матриц и др.
- Методологическая система, созданная на основе серых операторов последовательностей и генерации последовательностей.
- Система анализа и оценки, построенная на основе серых пространств инцидентности и оценок серых кластеров.
- Система моделей принятия решений, представленная многоатрибутными интеллектуальными серыми целевыми моделями принятия решений.
- Система комбинированных серых моделей, инновационно разработанная для получения новых и практически полезных результатов.
- Система моделей оптимизации, состоящая в основном из серого программирования, серого анализа ввода-вывода, серой теории игр и серого управления.

В таблице 4.1 приведено сравнение нескольких методов исследования.

Таблица 4.1 - Методы исследования неопределенности

Исследование неопределенности	Серая система	Вероятностная статистика	Нечеткая математика	Грубый набор
Объект исследования	Недостаток информации	Случайность	Обучаемость	Ограничения

Продолжение таблицы 4.1

Исследование неопределенности	Серая система	Вероятностная статистика	Нечеткая математика	Грубый набор
Базовое множество	Множество серых чисел	Канторово множество	Нечеткое множество	Приблизительное множество
Метод описания	Функция возможности	Функция плотности вероятности.	Функция принадлежности и.	Аппроксимация верхней и нижней границ.
Процедура	Оператор последовательности	Частота	Усечение множества	Деление
Требования к данным	Любое распределение	Известное распределение	Известная функция принадлежности и	Эквивалентное отношение.
Акцент	Намерение	Намерение	Расширение	Расширение
Цель	Закон реальности	Исторический закон	Когнитивное выражение	Приближенный подход
Характеристики	Мало данных	Большая выборка	Зависимость от опыта	Информационная форма

Серая система описывается серыми числами, последовательностями, уравнениями или матрицами. Серые числа иногда сравнивают с элементарными «атомами» или «клетками», их точные значения неизвестны. В приложениях серое число обозначает неопределенное число, которое принимает свое возможное значение в пределах интервала или общего набора чисел. Существует несколько типов чисел серого, как описано ниже. Часто серые числа обозначают знаком \otimes .

1. Серые числа только с нижней границей $\otimes \in [a, \infty)$.
2. Серые числа только с верхней границей $\otimes \in (-\infty, b]$.
3. Интервал серых чисел $\otimes \in [a, b]$

4. Непрерывные и дискретные серые числа. Серые числа, которые принимают только конечное число или счетное число потенциальных значений называются дискретными. Если серое число потенциально может принимать любое значение в пределах интервала, то оно называется непрерывным.

5. Черные и белые числа: Черные числа представлены в виде $\otimes \in (-\infty, \infty)$, т.е. когда для числа не определены, не нижняя, не верхняя границы. Если $\otimes \in [a, b]$, $a = b$, то число называют белым.

6. Существенные и несущественные серые числа: первое обозначает серое число, которое временно не может быть представлено белым числом; второе это серое число, которое может быть представлено белым числом, полученным либо опытным путем, либо определенным методом.

Модели серого реляционного анализа

Любая техническая система включает различные виды влияющих на ее состояние факторов. Результат взаимодействия этих факторов определяет тенденцию развития и поведение системы. Факторы могут быть первичными или вторичными. Первичные факторы оказывают доминирующее влияние на развитие систем. Такие факторы положительно влияют на развитие систем и должны быть усилены. И наоборот, вторичные факторы оказывают меньшее влияние на развитие систем. Они, как правило, создают препятствия для развития систем и, следовательно, должны быть ослаблены.

Регрессионный анализ, дисперсионный анализ и анализ основных компонентов являются наиболее часто используемыми методами проведения системного анализа. Однако эти методы имеют следующие недостатки:

1. Для получения надежных выводов необходимы большие выборки.
2. Имеющиеся данные должны удовлетворять некоторым типам распределений вероятностей; предполагаются линейные отношения между факторами и поведением системы, в то время как между факторами не может быть обнаружено никаких взаимосвязей. Как правило, эти требования трудно обеспечить.

3. Объем вычислений велик и обычно выполняется с использованием компьютеров.

4. Иногда количественные выводы не резонируют с результатами качественного анализа, в результате чего законы, управляющие развитием системы, искажаются или понимаются неверно.

На самом деле, когда доступных данных мало, применять такие традиционные методы статистики для их анализа чрезвычайно сложно.

Это связано с тем, что малый объем данных не удовлетворяют требованиям моделирования при использовании традиционных методов.

Модель серого реляционного анализа (GRA Gray Relational Analysis) — это новый метод анализа систем удобный в тех случаях, когда статистические методы не применимы. Он может применяться при малых и больших объемах выборок и не имеет каких-либо требований к распределению вероятности. Кроме того, для его реализации требуется не большое количество вычислений.

Идея серого реляционного анализа состоит в том, чтобы использовать степень подобия геометрических кривых, представляющих последовательности данных, чтобы определить, являются ли их связи близкими. Чем более схожи кривые, тем ближе отношения между последовательностями, и наоборот.

Таким образом, исследования, основанные на ранних моделях GRA, опираются на коэффициенты отношения отдельных точек к абсолютной степени, относительной степени и синтетической степени исходной модели GRA, которая, в свою очередь, основана на интегральных или общих перспективах. Такие исследования также включают модели GRA, которые измеряют сходство на основе близости к модели, учитывающие сходство и близость соответственно.

Объекты сравнения находятся от анализа отношений между кривыми до анализа отношений между искривленными поверхностями, анализа отношений в трехмерном пространстве и анализа отношений между суперповерхностями в n -мерном пространстве.

4.3 Анализ методов поиска кратчайшего пути

Задача о кратчайшем пути — одна из хорошо изученных тем в компьютерных науках, особенно в области теории графов. Оптимальный кратчайший путь — это путь с критериями минимальной длины от источника до пункта назначения.

Интерес к исследованиям алгоритмов кратчайшего пути возрос из-за многочисленных и разнообразных прикладных проблем. Эти прикладные проблемы включают в себя протоколы сетевой маршрутизации, планирование маршрутов, управление трафиком, поиск в социальных сетях, компьютерных играх и транспортных системах, и это лишь некоторые из них.

Существуют различные типы графов, которые учитывают алгоритмы поиска кратчайшего пути. Общий граф — это математический объект, состоящий из вершин и ребер. Пространственный граф содержит вершины, положение которых интерпретируются как положения в пространстве. С другой стороны, пространственный граф содержит вершины, местоположения через конечные точки ребра. Планарный граф построен в двух измерениях без пересечения ребер.

Существуют также различные параметры, на основании которых можно определить кратчайший путь. Например, граф может быть статическим, где вершины и ребра не меняются с течением времени. Напротив, граф может быть динамическим, где вершины и ребра могут быть вновь введены, обновлены или удалены с течением времени. Граф содержит либо направленные или ненаправленные ребра. Веса ребер могут быть как отрицательными, так и неотрицательными.

Значения весов ребер могут быть действительными или целыми числами. Это зависит от типа выдаваемой проблемы.

Большинство алгоритмов поиска кратчайшего пути можно разделить на две большие категории. Первая категория — это единый источник (вершина).

Цель поиска кратчайшего пути (SSSP) состоит в том, чтобы найти самый короткий кратчайший путь из одной вершины ко всем остальным вершинам. Вторая категория — это кратчайший путь для всех пар (APSP), где цель состоит в том, чтобы найти кратчайшие пути между всеми парами вершин графа. Вычисление кратчайшего пути может давать либо точное, либо приближенное решение.

Выбор того, какой алгоритм использовать, зависит от характеристик графа и решаемой задачи. Например, цель приближительных алгоритмов поиска кратчайшего пути - получение быстрых решений даже при наличии большого входного графа.

Специальный подграф, называемый гаечным ключом, также может быть создан из основного графа, который аппроксимирует расстояния, чтобы можно было найти кратчайший путь.

На рисунке 4.1 приведена общая классификация методов поиска кратчайшего пути [80]. Она направлена на то, чтобы позволить выбрать нужный алгоритм поиска кратчайшего пути, какой тип или категория алгоритмов поиска кратчайшего пути для использования в конкретном сценарии или домене приложения.



Рисунок 4.1 – Классификация методов поиска кратчайшего пути

Каждая ветвь описывает определенную категорию задачи поиска кратчайшего пути.

Как и на рисунке 1, предлагаемая таксономия классифицирует различные алгоритмы поиска кратчайшего пути на несколько высокоуровневых ветвей.

В статической ветви на рис. 1 перечислены алгоритмы, работающие с графами с фиксированными весами ребер. Веса могут обозначать расстояние, время в пути, стоимость или любые другие параметры. При условии, что веса фиксированы, некоторые статические алгоритмы выполняют предварительные вычисления над графом, пытаясь найти компромисс между временем выполнения и требованиями к предварительному вычислению и памяти.

Статические алгоритмы состоят из двух классических алгоритмов поиска кратчайшего пути, подпадающих под две основных категории: 1 - кратчайший путь из одного источника (SSSP) и 2 - кратчайшие пути между всеми парами вершин (APSP).

SSSP алгоритмы вычисляют кратчайший путь от заданной вершины ко всем другим вершинам. Алгоритмы APSP вычисляют кратчайшие пути между всеми парами вершин в графе.

Иерархические алгоритмы решают задачу о кратчайшем пути как задачу линейной сложности. Это может привести к повышению производительности в расчетах на порядки. Целенаправленные алгоритмы оптимизируют с точки зрения расстояния или времени к целевому решению. Алгоритмы предсказания расстояния включают этап предварительной обработки для ускорения времени нахождения кратчайшего пути. Алгоритмы предсказания расстояния могут быть точными или приближительными.

Вторая ветвь на рис. 4.1 объединяет алгоритмы, которые обрабатывают операции обновления или запроса на графе с течением времени. Операции обновления могут добавлять или удалять ребра из графа или обновлять веса ребер. Динамические алгоритмы включают как (APSP), так и (SSSP) алгоритмы. Алгоритмы, зависящие от времени, направлены на графы, которые меняются во времени предсказуемым образом. Стохастические алгоритмы поиска кратчайшего пути учитывают неопределенность, связанную с весами ребер, моделируя их как случайные величины.

Параметрические алгоритмы поиска кратчайшего пути вычисляют решения на основе всех значений определенного параметра. Алгоритмы поиска

пути для замены вычисляют решение, которое позволяет избежать указанное ребро для каждого ребра между исходной вершиной и конечной вершиной. Алгоритмы пути замены достигают хорошей производительности за счет повторного использования вычислений каждого ребра, которого требуется избегать.

Алгоритмы альтернативного пути также вычисляют кратчайший путь между вершинами, который позволяет избежать заданного пути. Отличительным фактором между обеими категориями является то, что для пути замены не требуется указать конкретную вершину или ребро. С другой стороны, альтернативные кратчайшие пути избегают указанного ребра.

Задача взвешенных областей находит приближенный кратчайший путь на взвешенном плоскостном делении.

Постановка задачи. Задано множество вершин V , начальная вершина s , конечная вершина d , где $s, d \in V$, и множество взвешенных ребер E над множеством V . Требуется найти кратчайший путь между s и d , который имеет минимальный вес.

Исходные данные алгоритма поиска кратчайшего пути — это граф G , состоящий из множества вершин V и ребер E . Граф определяется как $G = (V, E)$. Ребра могут быть направленными (дугами) или ненаправленными. Ребра имеют явные веса, где вес определяется как $w(e)$, где $e \in E$, или невзвешенный, где неявный вес считается равным 1.

При расчете сложности алгоритма размер множества вершин V будем обозначать как n , а размер множества ребер E как m .

4.3.1 Статические алгоритмы поиска кратчайшего пути.

Алгоритмы как для кратчайшего пути с одним источником (SSSP), так и для кратчайшего пути для всех пар вершин (APSP).

1. Кратчайший путь из одного источника (SSSP). Определение: Для графа $G = (V, E)$ и источника $s \in V$ вычислить все расстояния $\delta(s, v)$, где $v \in V$.

Самый простой случай для SSSP — это когда граф невзвешенный. Кормен и др. [81] предполагают, что можно использовать поиск в ширину, начав сканирование с корневой вершины и проверив все соседние вершины. Для каждой соседней вершины он просматривает непосещенные вершины до тех пор, пока не будет найден путь с минимальным количеством ребер от исходной до конечной вершины.

Алгоритм Дейкстры [82] решает задачу поиска кратчайшего пути с одним источником (SSSP) из заданной вершины в все остальные вершины графа. Алгоритм Дейкстры используется для ориентированных графов с неотрицательными весами. Недостатком является то, что алгоритм работает только с неотрицательными взвешенными значениями. Кроме того, это относится только к статическим графам.

Алгоритм Дейкстры выполняет поиск методом грубой силы, чтобы найти оптимальный кратчайший путь как таковой. Алгоритм Дейкстры следует последовательному приближению процедура, основанная на принципе оптимальности Беллмана Форда. Это означает, что алгоритм Дейкстры может решить уравнение динамического программирования.

2. Фредман и Тарьян [83] улучшили алгоритм Дейкстры, используя кучу Фибонначи (F-кучу). Эта реализация обеспечивает время работы $O(n \log(n) + m)$.

3. Еще одна линия оптимизации — улучшенная реализация очередей с приоритетами. Боас [84] и реализации основаны на стратифицированном бинарном дереве. Предлагаемый алгоритм позволяет манипулирование приоритетной очередью. Алгоритм имеет сложность времени обработки $O(\log \log n)$ и сложность хранения $O(n \log \log n)$.

4. Thorup [85] предлагает детерминированный алгоритм линейного пространства и времени путем построения иерархической структуры сегментирования, которая позволяет избежать операции сортировки. Структура сегментации представляет собой динамический набор, в который элемент

может быть вставлен или удален. Алгоритм Торупа [85] работает путем обхода дерева компонент.

5. Hagerup [86] улучшает алгоритм Торупа, достигая временной сложности $O(n + m \log w)$, где w — ширина машинного слова. Это делается через детерминированное линейное время и пространство.

6. Хан [87] предлагает алгоритм детерминированной сортировки целых чисел в линейном пространстве, который достигает временной сложности $O(m \log \log n \log \log \log n)$ для SSSP. Подход Хана [70] иллюстрирует возможность сортировки произвольно больших чисел путем сортировки по очень маленьким целым числам.

7. Беллман, Форд и Мур [88, 89, 90] разработали алгоритм SSSP, способный обрабатывать отрицательные значения, в отличие от алгоритма Дейкстры.

Алгоритм Дейкстры обеспечивает более быстрое решение, чем алгоритм Беллмана-Форда, но он не может обнаруживать отрицательные циклы или работать с отрицательными весами.

8. Карп [91] обращается к вопросу о том, содержит ли граф отрицательный цикл или нет. Он определяет понятие минимального среднего цикла и указывает, что нахождение минимального среднего цикла аналогично нахождению отрицательный цикл. Алгоритм Карпа достигает временной сложности $O(nm)$.

9. Йен [92] предлагает две модификации производительности по Беллману Форду и Муру.

4.3.2 Кратчайшие пути между всеми парами вершин (APSP)

Наиболее общий случай APSP — это граф с неотрицательными весами ребер. В этом случае алгоритм Дейкстры может быть применен отдельно для каждой вершины графа. Временная сложность будет $O(mn + n^2 \log n)$ [93].

Было предложено огромное количество алгоритмов, которые обрабатывают реальные веса ребер для всех пар кратчайших путей.

10 Алгоритм Флойда-Уоршалла [94, 95] находит все пары кратчайших путей (APSP) во взвешенный граф, содержащий положительные и отрицательные взвешенные ребра. Сложность алгоритма Флойда-Уоршалла равно $O(n^3)$, где n — количество вершин. Алгоритм Флойда-Уоршалла не может найти точные кратчайшие пути между парами вершин, потому что он не сохраняет промежуточные вершины при вычислении. Сильная сторона алгоритма заключается в том, что он может обрабатывать ребра с отрицательным весом и обнаруживать циклы с отрицательным весом. Главный недостаток заключается в том, что временная сложность для запуска алгоритма Дейкстры на всех вершинах (до преобразовать его из SSSP в APSP) будет $O(mn + n^2 \log n)$. Эта временная сложность ниже $O(n^3)$, если и только при $m < n^2$ (т. е. при разреженном графе).

Во многих исследованиях было предложено лучшее время работы по сравнению с алгоритмом Флойда-Уоршалла на действительных значениях.

11. Заметное усовершенствование было предложено Фредманом [96], которое основано на матрично-ориентированном подходе. Его подход основан на теореме, предложенной Ахо и Хопкрофтом [97] о сложности умножения матриц $N \times N$ с использованием метода умножения мин/плюс аналогично умножению кратчайших путей.

Он показывает, что $O(N^{5/2})$ сравнений достаточно для решения проблемы кратчайших путей для всех пар (APSP).

Алгоритм достигает сложности $O(n^3(\log \log n)/\log n^{1/3})$.

12. Дистанционные оракулы

Термин дистанционный оракул был предложен Торупом и Цвиком [98]. Он предлагает более быструю альтернативу алгоритмам SSSP и APSP. Это достигается путем предварительной обработки графа и создания вспомогательной структуры данных. Дистанционный оракул работает в два этапа, а именно, предварительная обработка и этап поиска.

Выше перечислены лишь наиболее известные статические алгоритмы поиска кратчайшего пути. Анализ остальных алгоритмов является отдельной задачей и в данной работе не приводится.

В таблице 4.2 – приведены основные данные о наиболее известных и эффективных статических алгоритмах поиска кратчайшего пути.

Таблица 4.2 – Алгоритмы поиска кратчайшего пути

Алгоритм	Сложность
Алгоритм Форда	$O(n^2 mL)$
Алгоритм Беллмана — Форда	$O(nm)$
-	$O(n^2 \log n)$
Алгоритм Дейкстры со списком.	$O(n^2)$
Алгоритм Дейкстры с модифицированной двоичной кучей	$O((m + n) \log n)$
Алгоритм Дейкстры с использованием фибоначчиевой кучи	$O(m + n \log n)$
-	$O(m \log \log L)$
Алгоритм Габова	$O(m \log_{m/n} L)$
-	$O(m + n \sqrt{\log L})$
Алгоритм Флойда-Уоршелла	$O(n^3)$

Из приведенного анализа можно сделать вывод, что максимальная сложность статического алгоритма поиска кратчайшего пути составляет $O(n^2 \log n)$. Разброс сложности алгоритмов не слишком велик, поэтому, следует обратить внимание на алгоритмы Беллмана-Форда, Дейкстры и Флойда-

Уоршелла. Это наиболее эффективные алгоритмы, первые два позволяют найти $n-1$ кратчайший путь, а третий n^2-n кратчайших путей.

Следует отметить, что общей чертой всех рассмотренных алгоритмов является поиск по одной метрике (весу ребер графа). Эти алгоритмы решают однокритериальную задачу оптимизации.

С точки зрения задач поиска маршрутов в сети связи, где линии связи (ребра) могут иметь множество характеристик, применение единственной метрики ограничивает возможности выбора.

4.4 Метод маршрутизации трафика в сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного анализа

4.4.1 Предварительные замечания

Интернет вещей (ИВ) стал неотъемлемой частью сетей связи, а количество устройств ИВ превысило количество жителей на земле. Сети ИВ становятся сетями высокой плотности [99], в которых в малом объеме сосредоточено большое количество устройств. Часто для таких сетей уже нельзя применять простые плоские модели, а следует прибегать к моделям в трехмерном пространстве [20, 39].

При организации сетей Интернета вещей высокой плотности с применением технологий и протоколов ad-hoc сетей требуется решить задачу построения логической структуры сети, которая бы в наибольшей степени эффективно решала задачу доставки данных. Под эффективностью здесь следует понимать достижение поставленной цели минимальными средствами. Целью является повышение вероятности доставки данных в заданный срок.

Эту задачу следует решать, снижая вероятности потерь и задержек на участках маршрутов доставки данных. Структура сети высокой плотности может быть весьма разнообразна и определяется выбором головных узлов кластеров [66] и маршрутов доставки данных до них. При этом различные

участки оказываются в неравных условиях. Некоторые из них обслуживают большую долю трафика, некоторые имеют большую протяженность, количество транзитов и др.

Логическая структура сети определяется выбираемыми в ней маршрутами, правила выбора в большинстве случаев заключается в количестве участков (транзитов, скачков) [100]. В некоторых случаях авторы предлагают использовать некоторые иные критерии, позволяющие повысить стабильность или иные качества соединения.

Наиболее распространенными протоколами маршрутизации в ad-hoc сетях являются протоколы OLSR [101] и AODV [102]. Это проактивный и интерактивный протокол, соответственно. Оба эти протокола осуществляют поиск маршрутов по массовой рассылке служебных сообщений узлам-соседям. По результатам рассылки может быть найдено множество маршрутов, выбирается один, который используется для передачи данных.

Критерием выбора, в упомянутых протоколах является количество участков (транзитных узлов) в маршруте. Однако не всегда такое правило позволяет выбрать лучший (наиболее качественный) маршрут. В большинстве случаев, качество маршрута определяется не единственным критерием.

В сетях с высокой плотностью устройств велика вероятность перегрузки узлов трафиком из-за высокой их концентрации в пространстве [103]. Во многих приложениях узлы сети оснащены автономными (не возобновляемыми) источниками энергии, которые имеют ограниченный ресурс. Узлы с малым запасом энергии не желательно использовать в качестве транзитных, так как это может привести к сокращению времени их функционирования, что в свою очередь, приведет к сокращению времени функционирования маршрута.

Высокий уровень взаимных влияний в сети высокой плотности приводит к росту вероятности потерь пакетов в различной степени на различных участках сети.

От протяженности участка маршрута зависит уровень сигнала, следовательно, скорость передачи данных и задержка. Без учета этого фактора

маршрут с меньшим числом участком может оказаться хуже маршрута с большим числом участков.

Выбор маршрута с учетом различных влияющих факторов является достаточно сложной задачей, для решения которой требуется решить задачу многокритериальной оптимизации. Решение осложняется еще тем, что объем исходных данных для его принятия ограничен и не достаточен для применения методов статистического анализа.

Целью данной работы является разработка метода, применимого для выбора маршрута в беспроводной сети высокой плотности, построенного на основе нескольких критериев с целью повышения эффективности функционирования сети связи.

4.4.2 Модель сети и постановка задачи

Будем полагать, что ad-hoc сеть состоит из n узлов, имеющих равные функциональные возможности. Модель сети задана неориентированным взвешенным графом $G(V, E)$. Где множество вершин $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ ассоциируется с узлами сети, а множество ребер $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ со связями между ними. Каждое из ребер характеризуется весом $W = \{w_1, \dots, w_m\}$. Будем полагать, что вес ребра задается вектором (набором из S). Полагаем, что сеть определена в трехмерном пространстве координатами узлов $V_C = \{(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_n, y_n, z_n)\}$.

Для иллюстрации фрагментов сети будем использовать проекцию узлов сети на горизонтальную плоскость, рисунок 4.2.

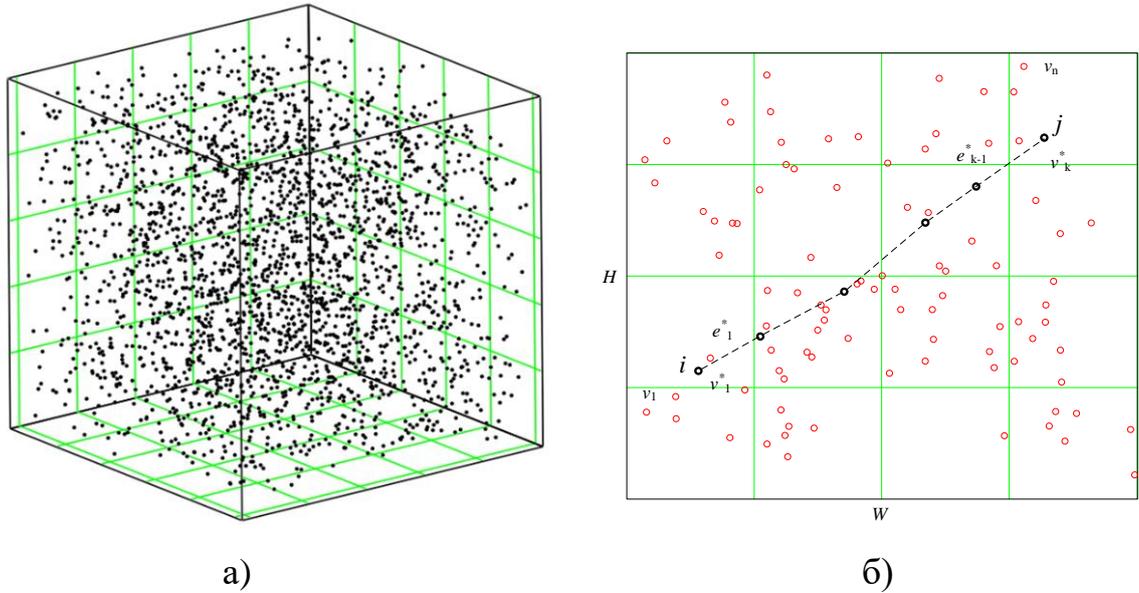


Рисунок 4.2 – Модель сети высокой плотности в трехмерном пространстве.

Полагаем, что ребро графа существует между парой узлов, если они находятся в зоне связи друг друга. Будем полагать, также, что зона связи представляет собой сферу радиуса R . Тогда, условие существования ребра может быть записано как

$$d_{i,j} = \begin{cases} d(i,j) & d(i,j) \leq R \\ \infty & d(i,j) > R \end{cases} \quad (4.1)$$

где $d_{i,j}$ – расстояние между узлами i и j .

Требуется найти путь $P_{i,j} = \{e_r, v_r^*, e_{r+1}, \dots, e_{k-1}, v_k^*\}$, $e_r \in E, v_r^* \in V, r=1, K, k$ между вершинами i и j , $i, j=1, K, n$ который характеризуется рядом показателей, определяющим его качество Q . Длина пути L определяется количеством входящих в него ребер или на единицу меньше количества входящих в него вершин $L=k-1$.

Качество пути определяется как некоторая функция от весов ребер, входящих в него $Q_{i,j}(W_{i,j}) = f(W_{i,j})$, где $W_{i,j} = \{w_1, K, w_{k-1}\}$.

Будем полагать, что вес задается вектором, состоящим из S показателей $w_r = (w_r^{(1)}, K, w_r^{(S)})$, $r=1, \dots, k-1$.

Тогда решение задачи выбора пути можно формально описать как решение задачи оптимизации целевой функции $Q(W_{i,j})$

$$R_{i,j} = \arg \max_{R_{i,j} \in H} Q(W_{i,j}), \quad \varphi_z(\cdot) = true, \quad z = 1, K, S, \quad (4.2)$$

где $H_{i,j} = \{h_1, K, h_N\}$ множество всех возможных путей между вершинами i и j ; $\varphi_i(\cdot)$ ограничения для показателей качества $W_{i,j} = \{w_1, K, w_{k-1}\}$.

Задачу (4.2) можно решать, как задачу поиска кратчайшего пути в графе, с использованием известных из теории графов алгоритмов [17, 45]. Однако, для использования известных алгоритмом необходим метод, позволяющий учесть множество критериев.

4.4.3 Метод многокритериального выбора пути

Решение задачи (4.2) заключается в выборе наилучшего, с позиции оценки его качества, пути. Для случая, когда качество пути определяется скалярными коэффициентами ребер, применимы классические методы теории графов, реализуемые алгоритмами поиска кратчайших путей [17]. В данном случае их нельзя применить напрямую, без приведения показателей качества ребер к скалярной форме. В общем случае задача (4.2) является многокритериальной.

Будем использовать пять показателей качества: количество участков, уровень сигнала (RSSI), остаточный запас энергии, коэффициент потерь и задержку. Определим правила агрегирования показателей участков. Будем исходить из тех соображений, что качество маршрута во многом определяется «наихудшим» участком (в зарубежной литературе часто используют фразеологизм - бутылочное горлышко). Наихудшим участком определяется пропускная способность (достижимая скорость передачи), следовательно, задержка также во многом определяется наихудшим звеном, надежность маршрута меньше, чем надежность самого ненадежного звена.

Исходя из сказанного выше, будем использовать в качестве значения для таких показателей как уровень сигнала, запас энергии, вероятность потерь

пакета и длина очереди, наихудшие показатели, имеющие место на участках маршрута. В таблице 4.3 приведены выбранные показатели и правила их вычисления.

Таблица 4.3 – Правила вычисления показателей

Показатель	Значения на участках	Значение для маршрута
w_1 (Количество участков)	1	k
w_2 (Уровень сигнала)	s_1, \dots, s_k	$\min(s_1, \dots, s_k)$
w_3 (Запас энергии)	e_1, \dots, e_k	$\min(e_1, \dots, e_k)$
w_4 (Коэффициент потерь)	p_1, \dots, p_k	$\max(p_1, \dots, p_k)$
w_5 (Размер очереди)	L_1, \dots, L_k	$\max(L_1, \dots, L_k)$

Применяемые на практике алгоритмы выбора маршрутов основаны на известных из теории графов алгоритмах выбора кратчайших путей, которые основаны на одном критерии – условной длине маршрута (стоимости или весе).

Для того, чтобы перейти к нескольким критериям необходимо реализовать метод преобразования вектора показателей к единичному коэффициенту, который позволит сделать выбор в пользу того или иного маршрута.

Следует отметить, что существенным моментом приведения коэффициентов к скалярной форме является то, что они являются случайными числами, т.е. оценками, полученными по конечным выборкам. Размер этих выборок может быть недостаточно велик, чтобы получить надежные статистические оценки, а также различными являются размерность и диапазон принимаемых значений.

Применим для этой цели серый реляционный анализ (GRA – Gray Relational Analysis) [105-108]. Серый реляционный анализ был разработан Дэн Джулуном из Хуачжунского университета науки и технологий в Китайской Народной Республике. Название «Серый» происходит из теории серых систем, разработанной тем же автором, т.е. систем с неполной информацией. Применение данного метода можно сравнить с применением методов нечетких

множеств в задачах управления, которые также позволяют принимать решения при малом объеме исходных данных.

Модель GRA удобна, когда по некоторым причинам применение статистических методов затруднено. Кроме того, вычислительная сложность метода не велика, он может быть реализован, практически, на любых вычислительных средствах. Идея GRA заключается в использовании степени подобия последовательностей данных для определения степени их сходства. Модель GRA также является популярным методом оптимизации по многим критериям. Перечисленные качества дают основания предположить возможность применения GRA для решения задачи маршрутизации.

GRA включает в себя следующие основные этапы: нормирование исходных данных, вычисление последовательности отклонений, вычисление серых реляционных коэффициентов (GRC), вычисление серых реляционных оценок (GRG) на основании которых может быть произведен выбор. Как вспомогательный этап, можно произвести ранжирование полученных оценок.

Этап нормирования параметра w заключается в следующем. Если увеличение значения параметра w приводит к повышению качества Q (например, для RSSI или SNR), или его уменьшение приводит к повышению качества Q , то нормализованное значение параметра определяется как

$$\bar{w}_{i,j} = \begin{cases} \frac{w_{i,j} - \min_j(w_i)}{\max_j(w_{i,j}) - \min_j(w_{i,j})} & \left| \uparrow w \rightarrow Q \uparrow \right. \\ \frac{\max_j(w_i) - w_{i,j}}{\max_j(w_{i,j}) - \min_j(w_{i,j})} & \left| \downarrow w \rightarrow Q \uparrow \right. \end{cases} \quad (4.3)$$

где w_{\max} и w_{\min} – максимально и минимально возможные значения параметра w , соответственно.

Последовательность отклонений для нормализованных данных

$$\delta_{i,j} = \max_i \bar{w}_{i,j} - \bar{w}_{i,j} \quad (4.4)$$

Серые реляционные коэффициенты γ_i оцениваются как

$$\gamma_{i,j} = \frac{\max_i \delta_{i,j} + \zeta \min_i \delta_{i,j}}{w_{i,j} + \zeta \max_i \delta_{i,j}} \quad (4.5)$$

где ζ коэффициент различия или идентификации $\zeta \in [0, 1]$, в большинстве случаев используется значение 0,5 [105].

На основе (4.5) вычисляются серые реляционные оценки

$$G_i = \sum_{j=1}^S \eta_j \gamma_{i,j} \quad (4.6)$$

где $\eta_j \in [0, 1]$ весовые коэффициенты, характеризующие значимость соответствующих параметров, характеризующих качество маршрута, $\sum_{j=1}^S \eta_j = 1$.

Значения этих коэффициентов могут быть получены методами экспертных оценок или иными методами. В рассмотренных примерах они были выбраны равнозначными $\eta_j = \frac{1}{S}$, $j = 1, \dots, S$.

Большинство известных алгоритмов поиска кратчайшего пути/путей (алгоритмы Дейкстры, Беллмана-Форда, Флойда-Уоршелла и др.) циклически выполняют трехместную операцию [17], которая в общем виде может быть записана как

$$d_{i,j} = \text{opt} \{d_{i,j}, d_{i,k} \otimes d_{k,j}\} \quad (4.7)$$

где $d_{i,j}$ - расстояние между вершинами i и j , opt – операция взятия минимума или максимума, а символ \otimes обозначает операцию, производимую с весовыми коэффициентами ребер.

С учетом описанного выше метода GRA трехместная операция будет иметь следующий вид

$$w_{i,j} = \text{GRA} \{w_{i,j}, w_{i,k} \otimes w_{k,j}\} \quad (4.8)$$

где $w_{i,j}$ - элемент матрицы показателей, GRA – операция выбора с использованием метода серого реляционного анализа, а символ \otimes обозначает операцию, производимую с весовыми коэффициентами ребер, согласно таблице 1.

4.4.4 Пример решения

Ниже приведен пример выбора варианта маршрута на основе данных о количестве транзитов, уровне сигнала, остаточной энергии, коэффициенте потерь пакетов и задержке. В качестве правил агрегирования показателей используются правила из таблицы 4.3. уровня сигнала используется наименьшее значение из тех, которые имеют место на участках маршрута. Аналогично, в качестве показателя остаточной энергии используется наименьший уровень, из тех, которые имеются в узлах маршрута. В качестве показателя задержки может принято среднее значение длины очереди в узлах маршрута или значение задержки, если его возможно измерить. Исходные данные приведены в таблице 4.4

Таблица 4.4– Исходные данные

N	Количество транзитов	RSSI, дБм	Запас энергии, %	Коэффициент потерь	Длина очереди
1	10	-58	0	0,009	9
2	10	-13	11	0,192	0
3	1	-32	29	0,009	5
4	8	-74	100	0,134	8
5	9	-38	82	0,481	15
6	1	-26	42	0,259	14
7	4	-64	77	0,344	8
8	9	-49	55	0,459	14
9	3	-57	26	0,334	9
10	1	-13	58	0,232	6
11	7	-54	87	0,265	17
12	8	-22	8	0,198	20
13	10	-35	12	0,275	10
14	10	-59	64	0,107	15

Продолжение таблицы 4.4

N	Количество транзитов	RSSI, дБм	Запас энергии, %	Коэффициент потерь	Длина очереди
15	4	-52	16	0,014	1

В таблице 4.5 приведены нормализованные данные, полученные с использованием выражения (4.3). Наименования полей отличаются от предшествующей таблицы так как они уже не имеют того натурального выражения, а лишь характеризуют соответствующую величину.

Таблица 4.5 – Нормализованные данные

N	Длина пути	Уровень сигнала	Запас энергии	Потери	Задержка
1	0,000	0,262	0,000	1,000	0,550
2	0,000	1,000	0,110	0,612	1,000
3	1,000	0,689	0,290	0,999	0,750
4	0,222	0,000	1,000	0,734	0,600
5	0,111	0,590	0,820	0,000	0,250
6	1,000	0,787	0,420	0,469	0,300
7	0,667	0,164	0,770	0,289	0,600
8	0,111	0,410	0,550	0,047	0,300
9	0,778	0,279	0,260	0,310	0,550
10	1,000	1,000	0,580	0,527	0,700
11	0,333	0,328	0,870	0,456	0,150
12	0,222	0,852	0,080	0,600	0,000
13	0,000	0,639	0,120	0,436	0,500
14	0,000	0,246	0,640	0,791	0,250
15	0,667	0,361	0,160	0,989	0,950

В таблице 4.6 приведены отклонения, вычисленные с помощью (4.4). Данные в этой таблице характеризуют разброс полученных параметров,

которые могут быть сравнимы из-за того, что построены по нормализованным данным.

Таблица 4.6 – Последовательность отклонений

N	Длина пути	Уровень сигнала	Запас энергии	Потери	Задержка
1	1,000	0,738	1,000	0,000	0,450
2	1,000	0,000	0,890	0,388	0,000
3	0,000	0,311	0,710	0,001	0,250
4	0,778	1,000	0,000	0,266	0,400
5	0,889	0,410	0,180	1,000	0,750
6	0,000	0,213	0,580	0,531	0,700
7	0,333	0,836	0,230	0,711	0,400
8	0,889	0,590	0,450	0,953	0,700
9	0,222	0,721	0,740	0,690	0,450
10	0,000	0,000	0,420	0,473	0,300
11	0,667	0,672	0,130	0,544	0,850
12	0,778	0,148	0,920	0,400	1,000
13	1,000	0,361	0,880	0,564	0,500
14	1,000	0,754	0,360	0,209	0,750
15	0,333	0,639	0,840	0,011	0,050

В таблице 4.7 приведены значения серых реляционных коэффициентов, вычисленных, согласно (4.5). Серые реляционные коэффициенты необходимы для сравнения полученных результатов.

Таблица 4.7 – Серые реляционные коэффициенты

N	Длина пути	Уровень сигнала	Запас энергии	Потери	Задержка
1	0,333	0,404	0,333	1,000	0,526
2	0,333	1,000	0,360	0,563	1,000
3	1,000	0,616	0,413	0,999	0,667
4	0,391	0,333	1,000	0,653	0,556
5	0,360	0,550	0,735	0,333	0,400
6	1,000	0,701	0,463	0,485	0,417
7	0,600	0,374	0,685	0,413	0,556
8	0,360	0,459	0,526	0,344	0,417
9	0,692	0,409	0,403	0,420	0,526
10	1,000	1,000	0,543	0,514	0,625
11	0,429	0,427	0,794	0,479	0,370
12	0,391	0,772	0,352	0,555	0,333
13	0,333	0,581	0,362	0,470	0,500
14	0,333	0,399	0,581	0,705	0,400
15	0,600	0,439	0,373	0,979	0,909

В таблице 4.8 приведены значения серых реляционных оценок, вычисленных, согласно (4.6). Количество оценок равно количеству сравниваемых наборов данных. Величина оценки характеризует насколько данный набор близок к желаемому результату. Для выбора лучшего варианта следует выбрать набор данных, соответствующий наибольшему значению оценки.

Таблица 4.8 – Серые реляционные оценки

N	GRG	Ранг
1	0,519	8
2	0,651	4
3	0,739	1
4	0,587	6
5	0,476	13
6	0,613	5
7	0,526	7
8	0,421	15
9	0,490	10
10	0,737	2
11	0,500	9
12	0,481	12
13	0,449	14
14	0,484	11
15	0,660	3

В данной таблице также приведены значения ранга оценки, которые показывают порядковый номер соответствующего набора данных, если эти наборы отсортировать в порядке от наиболее предпочтительных к наименее предпочтительным.

Данные результаты также могут быть полезны при использовании много-путевой маршрутизации, так как позволяют охарактеризовать группу известные маршруты степенью их предпочтительности.

Из таблицы 6 видно, что наилучшим вариантом является вариант 3, с серой оценкой 0,739.

На рисунках 4.3а и 4.3б приведены иллюстрации примеров построения маршрута в сети при различных условиях моделирования с использованием маршрутизации по количеству транзитов (рисунок 4.3а) и с использованием предложенного метода (рисунки 4.3б, 4.3в и 4.3г).

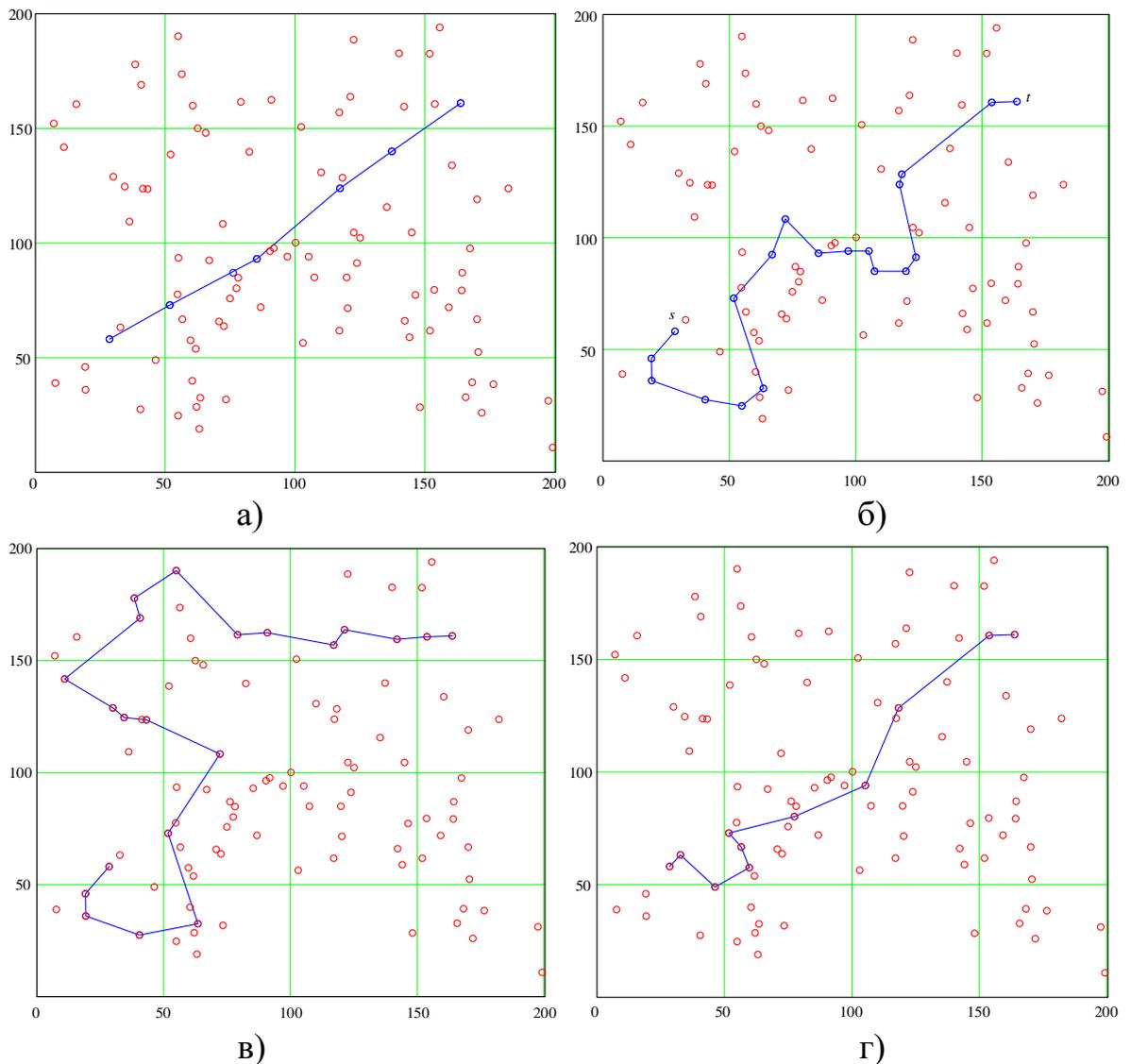


Рисунок 4.3 – Пример выбора маршрута по количеству транзитов (а) и с использованием предложенного метода (б, в, г)

Результат выбора маршрута, приведенный на рисунке 4.3б, получен при увеличении количества узлов с малым запасом энергии. При построении маршрута предпочтение было отдано узлам с относительно высоким запасом энергии, при этом длина маршрута существенно выросла с 5 до 18 участков. Результат, приведенный на рисунке 4.3в, получен при увеличении обслуживаемого узлами трафика (средней длины очереди) в условиях малого запаса энергии. Длина маршрута также возросла до 20 участков.

Полученные результаты ожидаемы, они демонстрируют способность предложенного метода выбирать альтернативное решение, в данном случае, ценой увеличения длины маршрута.

Результат, приведенный на рисунке 4.3г, получен при увеличении потерь на участках маршрута в условиях предыдущего эксперимента, т.е. в еще более худших условиях. Как можно заметить, полученный маршрут близок к исходному (полученному только с учетом критерия длины), его длина снизилась до 10 участков. Такой результат можно объяснить тем, что условия оказались настолько плохи, что иных вариантов «улучшения» маршрута за счет увеличения его длины нет.

4.4.5 Эффективность метода

Для оценки эффективности предложенного метода необходимо определить само понятие эффективности и определить ряд условий, согласно которым будет возможно выбрать способ оценки.

Под эффективностью метода будем понимать его достоинства по отношению к однокритериальным методам маршрутизации, использующим в качестве критерия количество транзитных участков в маршруте.

По достоинствами метода будем понимать выигрыш в показателях качества, а именно: в коэффициенте потерь, величине задержки, потенциальной устойчивости маршрута.

Потенциальную устойчивость будем характеризовать минимальным запасом энергии в узлах маршрута.

Значения указанных показателей случайны, поэтому для их оценки необходимо провести серию имитационных экспериментов и сравнить полученные результаты.

Для оценки эффективности метода введем показатель, включающий в себя используемые для выбора параметры качества маршрута.

$$q = \eta_1 k^0 + \eta_2 p^0 + \eta_3 \vartheta^0 + \eta_4 \beta^0 + \eta_5 \rho^0 \quad (4.9)$$

где $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5 \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^5 \eta_i = 1$, в данном случае все коэффициенты равны 0,2;

$k^0, p^0, \vartheta^0, \beta^0, \rho^0$ - это нормированные, согласно (4.3) показатели качества маршрута, полученные в ходе моделирования: количество участков, минимальный уровень сигнала, минимальный запас энергии, коэффициент потерь пакетов и задержка, соответственно.

Значение для однокритериального метода обозначим как q_0 , а для предложенного метода как q^* .

В данном случае величина (4.9) отражает насколько выбранный маршрут отвечает желаемым характеристикам при допущении, что они имеют равное значение.

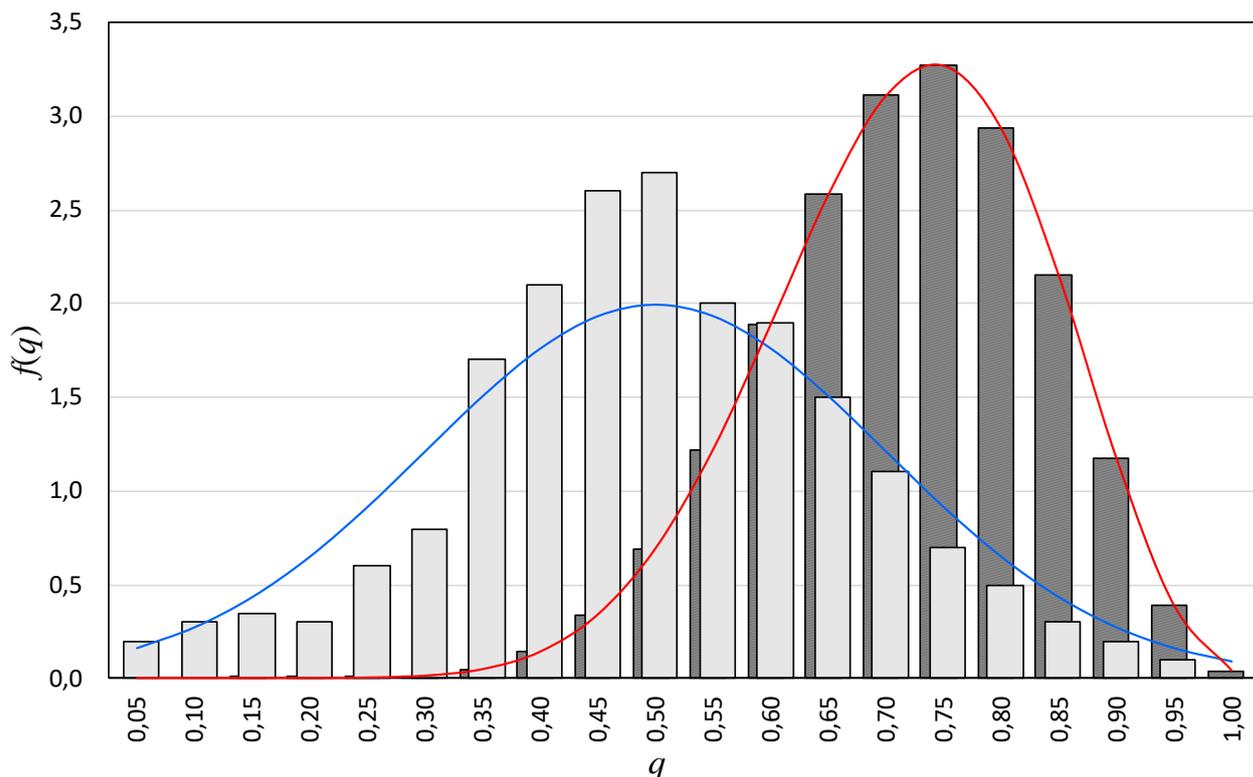


Рисунок 4.4 – Распределение показателя качества маршрута при использовании выборе по минимальному количеству участков (синяя кривая) и при использовании предложенного метода (красная кривая)

Из полученных результатов (рисунок 4.4) видно, что при использовании в качестве критерия минимума участков распределение q имеет дисперсию и меньшее среднее значение $\bar{q}_0 \approx 0,45$, $\sigma_0 \approx 0,2$. Распределение q при использовании предложенного метода имеет среднее значение $\bar{q}_* \approx 0,69$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_* \approx 0,36$

Применение t-критерия Стьюдена [109] подтверждает гипотезу о том, что средние значения статистически различны с доверительной вероятностью 0,95.

Полученные распределения аппроксимированы Нормальным распределением и Бета-распределением с соответствующими параметрами (синяя и красная сплошные линии), рисунок 4.4.

Оценим эффективность как разницу между средними значениями показателя q

$$e = 100 \frac{\bar{q}_* - \bar{q}_0}{\bar{q}_0} \% \quad (4.10)$$

По результатам проведенных экспериментов значение составляет $e=53,3\%$.

Такой результат можно интерпретировать как то, что более чем в половине случаев предложенный метод дает более приемлемое решение в части выбора маршрута, чем метод, основанный на выборе самого короткого маршрута.

На рисунке 4.5 приведено распределение длины пути, полученное по результатам экспериментов.

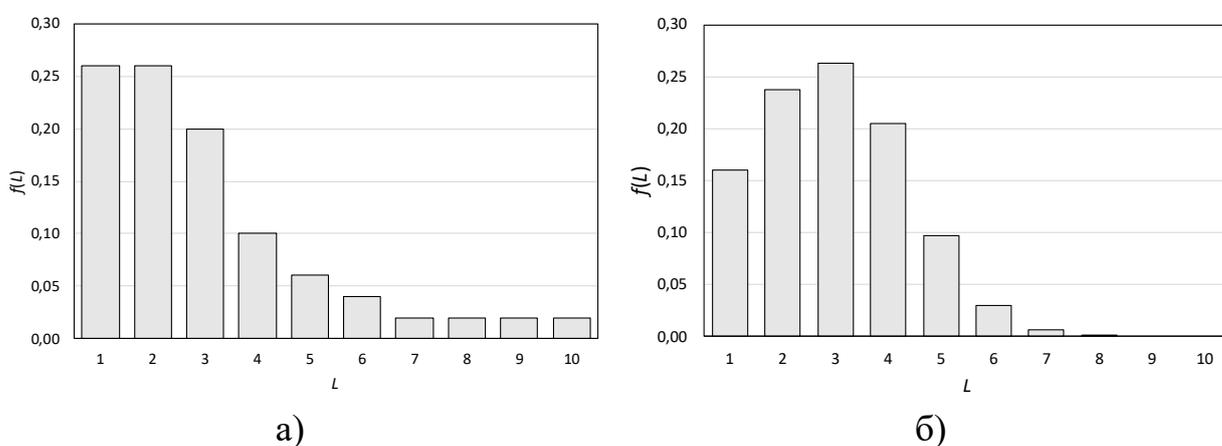


Рисунок 4.5 – Распределение длин путей

Средняя длина пути L при выборе по количеству транзитов (рисунок 4.5а) равна 2,96, при выборе предложенным методом 3,00 (рисунок 4.5б).

Предложенный метод [110] несколько повышает количество среднее количество транзитов (в данном случае на 1,4%). Также отличается распределение длины пути, которое имеет более длинный хвост. Максимальная длина пути в первом случае составил 8 участков, а во втором 10 участков. Максимальная длина пути в данном случае увеличилась на 25%.

Следует заметить, что эффективность метода зависит от степени влияния тех факторов, которые учитываются при выборе маршрута и их реальных значений. Например, если все узлы сети имеют равный запас энергии, то эффективность метода согласно определению (4.9) меньше.

4.5 Выводы

Согласно приведенному выше анализу, можно сделать вывод, что предложенный метод выбора маршрута с учетом нескольких параметров качества позволяет повысить эффективность функционирования сети и имеет преимущества, по сравнению с методами выбора маршрута по критерию минимума количества участков.

Предложенный метод дает возможность учесть существенные для конкретного случая параметры качества, набор которых может быть расширен по сравнению с использованным в данной работе. Следует отметить, что расширение набора параметров качества также потребует расширение набора правил их вычисления для маршрута.

Эффективность предложенного метода тем выше, чем шире набор значений используемых параметров в конкретной сети (расширяется выбор). При близости значений параметров для всех участков сети эффективность метода снижается из-за снижения возможности выбора. Следует отметить, что она не ниже эффективности метода выбора по одному критерию.

По результатам имитационных экспериментов эффективность метода составила 53%, по отношению к однокритериальному методу.

Недостатками предложенного метода являются необходимость получения исходных данных о показателях качества, а также необходимость выполнения дополнительных вычислений.

Предложенный метод маршрутизации может быть применен как при реализации протоколов одно или много-путевой маршрутизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны модели и методы повышения эффективности сети Интернета вещей высокой плотности, учитывающие особенности трехмерной сети интернета вещей высокой плотности.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Анализ развития и основные задачи построения сетей Интернета вещей показал, что в современное время и в обозримом будущем будет расти количество пользователей интернета вещей, а также будет расти количество сетей интернета вещей высокой плотности, размещаемых в многоэтажных строениях, как общего пользования, так и промышленные сети интернета вещей.

2. Разработаны модель и метод кластеризации трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности с использованием элементов теории фракталов, которые позволяют повысить эффективность решения задачи кластеризации сети.

3. Разработаны модели трехмерной сети интернета вещей высокой плотности на основе модифицированных моделей точечных процессов. Эти модели позволяют описывать сети интернета вещей высокой плотности при различном характере распределения узлов сети в трехмерном пространстве.

4. Разработан метода выбора головных узлов трехмерной сети интернета вещей высокой плотности, позволяющий повысить эффективность решения этой задачи за счет многокритериальной оптимизации выбора алгоритма поиска k -кратного центра графа.

5. Разработан метод маршрутизации трафика в трехмерной сети интернета вещей высокой плотности, с использованием Серого реляционного анализа, повышающий эффективность выбора маршрута за счет использования

нескольких критериев, а также позволяющий принимать решения при относительно малом количестве исходных данных.

Полученные в работе результаты обладают научной новизной и имеют практическую значимость при решении задач управления сетями интернета вещей высокой плотности.

Данные исследования рекомендуется применять для сетей высокой плотности.

Перспективы дальнейшего исследования - в практическом применении данных моделей и методов в сетях высокой плотности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендация ITU-T Y.2060 Обзор интернета вещей. 06.2012.
2. Рекомендация ITU-T Y.2061 Требования к поддержке приложений машинно-ориентированной связи в среде сетей последующих поколений. 06.2012.
3. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper, URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> [Дата обращения 19.08.2023].
4. Statista. Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2023, with forecasts from 2022 to 2030. URL: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>. [Дата обращения 19.08.2023].
5. Тонких Е.В. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь, 2020. - №1. С.44-48.
6. Бушеленков С.Н., Анализ и формирование структуры сети интернета вещей на основе моделей решеток. / Бушеленков С.Н., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2021. № 7. С. 23-28.
7. Кучерявый Е.А. Разработка и исследование комплекса моделей и методов распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи. / Кучерявый Е.А. // Диссертация на соискание уч. ст. д.т.н., М., 2018.
8. Марочкина А.В., Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия./ Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Мутханна А.С., Матюхин А.Ю., Дунайцев Р.А., Владимиров С.С., Ворожейкина О.И., Захаров М.В., Фам В.Д., Марочкина А.В., Горбачева Л.С., Паньков Б.О., Анваржонов Б.Н. // Электросвязь. 2022. № 1. С. 14-20.

9. Марочкина А.В. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети. / Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Маколкина М.А., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Дунайцев Р.А., Захаров М.В., Горбачева Л.С., Чан З.Т., Марочкина А.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 1-12.

10. Marochkina A., Analysis of the using of D2D Communications for the ad hoc Network Based on Subscriber Terminals. / Paramonov A., Tatarnikova T., Marochkina A. // Communications in Computer and Information Science. 2020. Т. 1337. С. 247-258.

11. Marochkina A., Ultra-Dense Internet of Things Model Network. / Marochkina A., Paramonov A., Tatarnikova T.M. // Communications in Computer and Information Science. 2022. Т. 1552. С. 111-122.

12. Марочкина А.В., Исследование функционирования сети интернета вещей с движущимися узлами. / Марочкина А.В., Парамонов А.И. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Т. 7. № 3. С. 31-36.

13. Марочкина А.В., Комплекс средств натурального моделирования сети интернета вещей высокой плотности. / Марочкина А.В., Парамонов А.И. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 2. С. 40-54.

14. Марочкина А.В., Исследование трафика и функционирования самоорганизующихся сетей связи. / Марочкина А.В., Парамонов А.И. // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019). сборник научных статей VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции : в 4 т.. 2019. С. 681-686.

15. Марочкина А.В., Оптимизация мобильного трафика методами машинного обучения. / Алексеева Д.Д., Марочкина А.В., Парамонов А.И. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 1-12.

16. Тонких Е.В., Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2020. № 1. С. 44-48.

17. Кристофидес, Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
18. Харари, Ф. Теория графов. / М.: Мир, 1973, 300 стр.
19. Alansari, Z. Internet of Things: Infrastructure, Architecture, Security and Privacy. / Alansari Zainab, Anuar Nor, Kamsin Amirrudin, Riyaz Belgaum, Mohammad, Alshaer Jawdat, Soomro Safeeullah, Miraz, Dr. // 2018, URL: https://www.researchgate.net/publication/326293549_Internet_of_Things_Infrastructure_Architecture_Security_and_Privacy [Дата обращения 19.08.2023].
20. Кучерявый А.Е., Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети. / Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Маколкина М.А., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Дунайцев Р.А., Захаров М.В., Горбачева Л.С., Чан З.Т., Марочкина А.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 3. С. 1-12.
21. Нуриллоев И.Н., Метод оценки и обеспечения связности беспроводной сенсорной сети. / Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2017. № 7. С. 39-44.
22. Нуриллоев И.Н., Обеспечение связности наземных сегментов летающей сенсорной сети с помощью БПЛА. / Нуриллоев И.Н., Киричек Р.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // В сборнике: Интернет вещей и 5G. 2016. С. 21-25.
23. Чистова Н.А., Метод выбора размеров цифровых кластеров сетей с ультрамалыми задержками / Чистова Н.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2021. № 4. С. 43-48.
24. Хуссейн О.А., Анализ кластеризации D2D-устройств в сетях пятого поколения. / Хуссейн О.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2018. № 9. С. 32-38.
25. Воробьева Д.М., Модель сети интернета вещей с мультимодальным распределением узлов и метод применения подвижных головных узлов для сбора данных. / Воробьева Д.М., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2021. № 10. С. 30-38.

26. Тонких Е.В., Свойства самоподобия сетевой структуры и ее моделирование для сети интернета вещей высокой плотности. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2020. № 8. С. 18-24.
27. Тонких Е.В., Планирование структуры сети интернета вещей с использованием фракталов. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2021. № 4. С. 55-62.
28. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы. М. Издательство компьютерных исследований. 2002. 665 с.
29. Федер, Е. Фракталы. М. Мир. 1991. 261 с.
30. Kim, JS. Fractality in complex networks: critical and supercritical skeletons. / Kim JS, Goh KI, Salvi G, Oh E, Kahng B, Kim D. // Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys. 2007 Jan;75(1 Pt 2):016110. doi: 10.1103/PhysRevE.75.016110. Epub 2007 Jan 29. PMID: 17358227.
31. Дюрэн, Б. Кластерный анализ. / Б.Дюрэн и П.Одедл // М. Статистика. 1977, 128 с.
32. Ким, Дж.-О. Мандель И.Д. Кластерный анализ. / Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка и др.// М.: Финансы и статистика, 1989.— 215 с.
33. Rodriguez MZ, Clustering algorithms: A comparative approach. / Rodriguez MZ, Comin CH, Casanova D, Bruno OM, Amancio DR, Costa LdF, et al. // (2019) PLoS ONE 14(1): e0210236. [https://doi.org/ 10.1371/journal.pone.0210236](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210236).
34. Machine Learning in Python. scikit-learn, URL: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> [Дата обращения 19.08.2023].
35. Python, URL: <https://www.python.org/> [Дата обращения 19.08.2023].
36. Vaigandla, Karthik & Radha, Krishna & Allanki, Sanyasi Rao. (2021). A Study on IoT Technologies, Standards and Protocols. 10.17697/ibmrd/2021/v10i2/166798.
37. Pathak, Abhishek D. and Tembhurne, Jitendra V., Internet of Things: A Survey on IoT Protocols (April 25, 2018). Proceedings of 3rd International Conference on Internet of Things and Connected Technologies (ICIoTCT), 2018 held

at Malaviya National Institute of Technology, Jaipur (India) on March 26-27, 2018, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3168575> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3168575>.

38. Кучерявый А.Е. Сети связи ожидает блестящее наукоемкое будущее. / Электросвязь. 2022. № 1. С. 3-5.

39. Парамонов А.И., Модель сети доступа интернета вещей на основе решетчатой структуры. / Парамонов А.И., Бушеленков С.Н. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 37-46.

40. Парамонов А.И., Анализ методов повышения эффективности сетей IoT. / Парамонов А.И., Бушеленков С.Н. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 2. С. 36-52.

41. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов. / Морозов А.Д. // Москва-Ижевск. Институт компьютерных исследований. 2002. 160 с.

42. Skums, P. Graph fractal dimension and structure of fractal networks: a combinatorial perspective / Pavel Skums, Leonid Bunimovich // arXiv preprint arXiv:1912.11385, 2019 - arxiv.org.

43. Нахли Ф.Х., Метод оценки фрактальной размерности сети связи. / Нахли Ф.Х., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2021. № 9. С. 28-34.

44. Song, Self-similarity of complex networks / Song, Chaoming, Havlin, Shlomo, Shlomo, Makse, A., Hernan // February 2005 Nature 433(7024):392—395 DOI: 10.1038/nature03248.

45. Берж, К. Теория графов и ее применения. / К. Берж // М. Издательство иностранной литературы. 1962. – 320 с.

46. НИР по мегагранту «Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» по заказу Минобрнауки.

47. Ester M., A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise / M. Ester, H.P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // KDD'96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining August 1996 Pages 226–231.

48. Бушеленков С.Н., Метод выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности. / Бушеленков С.Н., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2021. № 12. С. 14-20.
49. Дао Ч.Н., Метод выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами. / Дао Ч.Н., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2018. № 8. С. 37-44.
50. Чистова Н.А., Метод формирования цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг. / Чистова Н.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2020. № 7. С. 22-28.
51. Raj, Bryan & Ahmedy, Ismail & Idris, Mohd & Md. Noor, Rafidah. (2022). A Survey on Cluster Head Selection and Cluster Formation Methods in Wireless Sensor Networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. 10.1155/2022/5322649.
52. T. Bala, V. Bhatia, S. Kumawat, and V. Jaglan, "A survey: issues and challenges in wireless sensor network," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 53–55, 2018.
53. W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *IEEE Computer Society*, vol. 8, p. 8020, 2000.
54. R. Balamurali and K. Kathiravan, "Mitigating hot spot problems in wireless sensor networks using tier-based quantification algorithm," *Cybernetics and Information Technologies*, vol. 16, no. 1, pp. 73–79, 2016.
55. V. Pasupuleti and C. Balaswamy, "Efficient cluster head selection and optimized routing in wireless sensor networks using bio-inspired earthworm optimization algorithm," *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, vol. 11, no. 12-SPECIAL ISSUE, pp. 372–382, 2019.
56. N. A.-K. Hasan and F. A. Kadhim, "Solving isolated nodes problem in ZigBee Pro for wireless sensor networks," *Cihan University- Erbil Scientific Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 31–36, 2019.

57. K. Karunanithy and B. Velusamy, "CSDGP: cluster switched data gathering protocol for mobile wireless sensor networks," *IET Communications*, vol. 13, no. 18, pp. 2973–2985, 2019.
58. T. Han, S. Bozorgi, A. Orang, A. Hosseinabadi, A. Sangaiah, and M. Y. Chen, "A hybrid unequal clustering based on density with energy conservation in wireless nodes," *Sustainability*, vol. 11, no. 3, p. 746, 2019.
59. X. Du and F. Lin, "Designing efficient routing protocol for heterogeneous sensor networks," *24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference*, vol. 2005, pp. 51–58, 2005.
60. B. Karabekir, M. A. Aydin, and A. H. Zaim, "Energy-efficient clustering-based mobile routing algorithm for wireless sensor networks," *Electrica*, vol. 21, no. 1, pp. 41–49, 2021.
61. Cox, D. R. and Lewis, P. A. W.. "Multivariate Point Processes". Volume 3 Contributions to Probability Theory, Berkeley: University of California Press, 1972, pp. 401-448. <https://doi.org/10.1525/9780520375918-024>.
62. Андреев С.Д. Разработка и исследование моделей множественного доступа и алгоритмов управления потоками трафика для гетерогенных беспроводных сетей. / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М. 2018. – 438 с.
63. Кучерявый А.Е. Интернет вещей. / Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2015. № 1. С. 21.
64. Ding, K. Distributed Channel Allocation and Time Slot Optimization for Green Internet of Things. / Ding, Kaiqi & Zhao, Haitao & Hu, Xiping & Wei, Jibo. // *Sensors*. 2017, 17. 2479. doi: 10.3390/s17112479.
65. Harnessing the Internet of Things for Global Development. / Geneva, 2016 International Telecommunication Union, URL: <https://www.itu.int/en/action/broadband/Documents/Harnessing-IoT-Global-Development.pdf>.

66. . Марочкина, А.В. Моделирование и кластеризация трехмерной сети интернета вещей с применением метода оценки фрактальной размерности. / Марочкина А.В. // Электросвязь. 2023. № 6. С. 60-66.

67. Асанов М. О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы: учебное пособие / М. О. Асанов, В. А. Баранский, В. В. Расин. — 3^юе изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2020. — 364 с.

68. Захаров М.В., Методы построения сверхплотной сети e-health с использованием граничных вычислений. / Захаров М.В., Киричек Р.В. // СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК. 2020. № 1 (75). С. 145-147.

69. Махмуд, О.А.М. Исследование и разработка моделей трафика и методов выбора структуры сетей интернета вещей. / Махмуд О.А.М. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Санкт-Петербург, 2019.

70. Махмуд, О.А.М. Исследование и разработка моделей трафика и методов выбора структуры сетей интернета вещей. / Махмуд О.А.М. // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Санкт-Петербург, 2019.

71. Мандель И.Д. Кластерный анализ. / М. Финансы и статистика. 1988.-176 с.

72. Vattani, A. k-means Requires Exponentially Many Iterations Even in the Plane. / Andrea Vattani // Discrete Comput Geom (2011) 45: 596–616. DOI 10.1007/s00454-011-9340-1.

73. García Díaz, Jesús. Approximation Algorithms for the Vertex K-Center Problem: Survey and Experimental Evaluation. / García Díaz Jesús, Menchaca-Mendez Rolando, Menchaca-Mendez Ricardo, Pomares Hernandez Saul, Pérez Sansalvador Julio, Lakouari Noureddine // IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2933875.

74. ORLIB OR-Library is a collection of test data sets for a variety of Operations Research (OR) problems. URL: <https://www.brunel.ac.uk/~mastjib/jeb/info.html>.

75. An Introduction to the Theory of Point Processes: Volume I: Elementary Theory and Methods, Second Edition. / D.J. Daley, D. Vere-Jones // Springer Science & Business Media, 10 apr. 2006 г. - PP: 471.

76. Марочкина, А.В. Выбор головных узлов кластеров в трехмерных сетях Интернета вещей высокой плотности. / Марочкина, А.В. //Электросвязь. 2023. № 7. С. 36-42.

77. Sawaragi, Y. Theory of Multiobjective Optimization / Sawaragi, Y., Nakayama H., Tanino T. / Orlando, FL: Academic Press Inc, 1985. — ISBN 0126203709.

78. Bhattacharyya, Tamoghno & Pushpalatha, Dr. (2018). Routing protocols for internet of things: a survey. International Journal of Engineering & Technology. 7. 196. 10.14419/ijet.v7i2.4.13038.

79. Systems & Control Letters. URL: <https://www.journals.elsevier.com/systems-and-control-letters/open-access-articles> [Дата обращения 20.08.2023].

80. Madkour, Amgad & Aref, Walid & Rehman, Faizan & Rahman, Abdur & Basalamah, Saleh. (2017). A Survey of Shortest-Path Algorithms.

81. Cormen, T. H. Introduction to Algorithms. / T. H. Cormen, C. Stein, R. L. Rivest, and C. E. Leiserson.// McGraw-Hill Higher Education, 2nd edition, 2001.

82. Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, pages 269–271, 1959.

83. Fredman, M. Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms. / M. Fredman and R. Tarjan. // Journal of the ACM (JACM), pages 338–346, 1987.

84. Boas, P. v. E. Preserving order in a forest in less than logarithmic time. pages 75–84, 1975.

85. Thorup, M. Undirected single-source shortest paths with positive integer weights in linear time. *Journal of the ACM (JACM)*, pages 1–33, 1999.
86. Hagerup, T. Improved shortest paths on the word RAM. *Automata, Languages and Programming*, pages 61–72, 2000.
87. Han, Y. Improved Fast Integer Sorting in Linear Space. *Information and Computation*, pages 81–94, 2001.
88. Bellman, R. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958.
89. Ford, L. R. Network flow theory. Report P-923, The Rand Corporation, 1956.
90. Moore, E. F. The shortest path through a maze. *Proceedings of the International Symposium of Switching Theory 1957, Part II*, 1957.
91. Karp, R. A characterization of the minimum cycle mean in a digraph. *Discrete mathematics*, pages 309–311, 1978.
92. Yen, J. Y. An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1970.
93. Karger, D. Finding the hidden path: time bounds for all-pairs shortest paths. / D. Karger, D. Koller, and S. Phillips // *Proceedings 32nd Annual Symposium of Foundations of Computer Science*, pages 560–568, 1993.
94. Floyd, R. Algorithm 97: Shortest Path. *Communications of the ACM*, pages 344–348, 1962.
95. Warshall, S. A theorem on boolean matrices. *Journal of the ACM (JACM)*, (1), 1962.
96. Fredman, M. New bounds on the complexity of the shortest path problem. *SIAM*, pages 83–89, 1976.
97. Aho, A. V. *The Design and Analysis of Computer Algorithms*. / A. V. Aho and J. E. Hopcroft.// Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1st edition, 1974.
98. Thorup, M. Approximate distance oracles. / M. Thorup and U. Zwick. // *Journal of the ACM*, 52:1–24, 2005.

99. Кучерявый А.Е. Интернет вещей. / Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2015. № 1. С. 21.
100. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. / Олифер В.Г., Олифер Н.А. // СПб: Питер, 2016. – 992 с.
101. RFC 3626 Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). Network Working Group.
102. RFC 3561 Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. Network Working Group.
103. Парамонов, А.И. Метод выбора маршрута в сети интернета вещей / Парамонов А.И., Бушеленков С.Н. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. № 1. С. 34-44.
104. Берж К. - Теория графов и ее приложения. М.: ИЛ, 1962. 320с.
105. Liu, S.· Grey Systems Analysis. Methods, Models and Applications. / Sifeng Liu Yingjie Yang Jeffrey Yi-Lin Forrest // 10.1007/978-981-19-6160-1.
106. Patil, Amol & Gaurish, Walke & Mahesh, Gawkhare. (2019). Grey Relation Analysis Methodology and its Application. 4. 409-411. 10.5281/zenodo.2578088.
107. Wenguang Yang, Yunjie Wu, "A Novel TOPSIS Method Based on Improved Grey Relational Analysis for Multiattribute Decision-Making Problem", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2019, Article ID 8761681, 10 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8761681>.
108. Hsiao, Shih-Wen & Lin, Hsin-Hung & Ko, Ya-Chuan. (2017). Application of Grey Relational Analysis to Decision-Making during Product Development. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education. 13. 2581-2600. 10.12973/eurasia.2017.01242a.
109. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник и практикум для вузов / Н. Ш. Кремер. — 5-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 538 с.
110. Марочкина, А.В. Метод маршрутизации трафика в трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного

анализа. / Марочкина А.В., Парамонов А.И. // Труды учебных заведений связи. 2023. № 4. С. 75-85.

111. Марочкина А.В., Разработка системы обработки естественной речи на основе нейрокогнитивных архитектур для реализации ии сервисов инфокоммуникационных услуг. / Есалов К.Э., Марочкина А.В., Попонин А.С. // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. сборник научных статей: в 4х томах. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Санкт-Петербург, 2021. С. 375-379.

ПРИЛОЖЕНИЕ




 Утверждаю
 Заместитель генерального директора
 ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ»
 А.Б. Васильев
 15.09.2023

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Марочкиной Анастасии Вячеславовны на тему "Разработка моделей и методов построения трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности"

Настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Марочкиной Анастасии Вячеславовны "Разработка моделей и методов построения трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в ПАО "ГИПРОСВЯЗЬ" при разработке "Методики планирования трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности".

При разработке были использованы следующие новые научные результаты из диссертации А.В.Марочкиной:

- Метод выбора головных узлов кластера, обеспечивает большую эффективность путем оптимального многокритериального выбора алгоритма поиска k-кратного центра графа, что дает выигрыш в условной стоимости принятия решения от 8 до 53% по сравнению со случайным выбором алгоритма.

- Многокритериальный метод маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности, размещенной в трехмерном пространстве, с использованием Серого реляционного анализа, обеспечивает большую эффективность, по сравнению с однокритериальными методами. При этом эффективность разработанного метода составляет до 53% в зависимости от состояния сети.

Председатель комиссии:

Директора департамента



А.А. Иванов

Члены комиссии:

Главный специалист



Ю.А. Попова



МИНИСТЕРСТВО
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский
институт радио имени М.И. Кривошеева»
(ФГБУ НИИР)

Почтовый адрес: Казакова ул., д. 16, Москва, 105064
Телефон: (495) 647-17-77, факс: (499) 261-00-90
E-mail: info@niir.ru, <http://www.niir.ru>
ОКПО 56622156, ОГРН 1227700388827
ИНН/КПП 9709082715/770901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель генерального
директора ФГБУ НИИР, кандидат
технических наук


М.Ю. Сподобаев
2023 г.



№ _____

На № _____ от _____

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Марочкиной Анастасии Вячеславовны на тему «Разработка моделей и методов построения трехмерных сетей интернета вещей высокой плотности», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15– Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе:

Председатель комиссии – зам. директора НТЦ Анализа ЭМС С.Ю. Пастух, к.т.н.

Члены комиссии – зам. начальника отдела НТЦ Анализа ЭМС Е.В. Тонких, к.т.н.
начальник отдела НТЦ Анализа ЭМС Н.В. Варламов,

установила, что в диссертационной работе Марочкиной Анастасии Вячеславовны, ассистента кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М.А. Бонч-Бруевича на тему «Разработка моделей и методов построения трехмерных сетей интернета вещей высокой

плотности» получены новые научные результаты, которые внедрены в 2023 г. в рамках выполнения государственного контракта по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций администрации связи Российской Федерации в части, касающейся международно-правовой защиты интересов Российской Федерации в области электросвязи и радиосвязи в виде предложения (вклада) от имени администрации связи Российской Федерации (Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации) в Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

Этот вклад представлен на заседании Исследовательской комиссии 11 (ИК11) «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации испытаний и борьба с контрафактными устройствами электросвязи/ИКТ» МСЭ-Т, прошедшей в период с 10 мая по 20 мая 2023 года, с предложениями по обновлению проекта Рекомендации МСЭ-Т Q.UHD-T «Тестирование трехмерных сетей IoT сверхвысокой плотности (The testing of 3D ultra-high density IoT networks)» (вклад С189).

Вышеуказанный вклад определил позицию Администрации связи Российской Федерации на заседаниях ИК11 МСЭ-Т по тестированию сверхплотных сетей в трехмерном пространстве для сетей последующих поколений и является обеспечением разработки соответствующей рекомендации Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи.

Председатель комиссии

С.Ю. Пастух

Члены комиссии

Е.В. Тонких

Н.В. Варламов

Подписи С.Ю. Пастуха, Тонких Е.В., Н.В. Варламова заверяю.

Начальник отдела кадров ФГБУ НИИР



Е.П. Буянова

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

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

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232

Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159

<http://sut.ru>

E-mail: rector@sut.ru

ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635

ИНН 7808004760 КПП 784001001

ОКТМО 40909000

18.09.2023 № 02
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

проректор по научной работе,
канд.техн.наук



Брусиловский
Сергей Александрович

Акт

о внедрении научных результатов,
полученных в диссертационной работе Марочкиной Анастасии Вячеславовны
“Разработка моделей и методов построения трехмерных сетей Интернета вещей
высокой плотности”

Комиссия в составе декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем к.т.н., доцента Д. В. Окуневой, доцента кафедры сетей связи и передачи данных к.т.н. Р. А. Дунайцева и заведующей лаборатории кафедры сетей связи и передачи данных О. И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Марочкиной Анастасией Вячеславовной в диссертации Разработка моделей и методов построения трехмерных сетей Интернета вещей высокой плотности, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Математические модели в сетях связи» (Рабочая Программа регистрационный номер № 22.05/487-Д), раздел Программы:

- Использование моделирования при проектировании сетей связи,
- Модели теории графов.

2. При чтении лекций и проведении практических занятий для магистров по курсу «Математическое моделирование устройств и систем» (Рабочая Программа № 22.05/215-Д), раздел Программы:

-Использование математического моделирования при проектировании сетей связи и протоколов,

-Понятие оптимизации сетей связи.

3. При чтении лекций и проведении практических занятий для аспирантов по дисциплине «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (Рабочая Программа регистрационный номер № 21.05/780-Д), раздел Программы:

-Подходы к определению и формулировке задач.

-Методы исследования процессов, явлений и объектов.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Марочкиной Анастасией Вячеславовной в диссертационной работе:

1. Модель и метод кластеризации сети интернета вещей высокой плотности, размещенной в трехмерном пространстве с применением теории фракталов, который имеет большую эффективность, по сравнению с известными методами, что выражается в меньшей, минимум на 18% вероятности ошибок кластеризации.

2. Метод выбора головных узлов кластера, который обеспечивает большую эффективность путем оптимального многокритериального выбора алгоритма поиска k-кратного центра графа, что дает выигрыш в условной стоимости принятия решения от 8 до 53% по сравнению со случайным выбором алгоритма.

3. Многокритериальный метод маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности, размещенной в трехмерном пространстве, с использованием Серого реляционного анализа, обеспечивает большую эффективность, по сравнению с однокритериальными методами. При этом эффективность разработанного метода составляет от 0 до 53%, в зависимости от состояния сети.

Декан факультета ИКСС
к.т.н., доцент

Д.В. Окунева

Доцент кафедры ССиПД
к.т.н., PhD

Р.А. Дунайцев

Зав. лабораторией кафедры ССиПД

О.И. Ворожейкина