

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре сетей связи и передачи данных.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Парамонов Александр Иванович

Официальные
оппоненты: **Никульский Игорь Евгеньевич**,
доктор технических наук, с.н.с.,
ПАО «Центральное научно-производственное
объединение «Ленинец», отдел 133, Главный
специалист, заместитель Главного конструктора

Степанов Михаил Сергеевич ,
кандидат технических наук, доцент,
Московский технический университет связи
и информатики, кафедра сетей связи и систем
коммутации, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов
имени Патриса Лумумбы»,
г. Москва

Защита состоится 29 ноября 2023 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 29 сентября 2023 года.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета 55.2.004.01,
д-р техн. наук, доцент

А.И. Парамонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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), которое включает в себя коммуникации между различного рода автоматическими устройствами. Развитие ИВ привело к тому, что уже сегодня количество подключенных к сети связи устройств превысило количество жителей на планете. Тенденция роста этого количества сохраняется, как в настоящее время, так и в обозримой перспективе.

Проникновение ИВ приводит к появлению сетей высокой плотности, в случаях, когда концентрация устройств в пространстве становится велико. Уже сегодня одно устройство на квадратный метр - далеко не предел. Более того, сети высокой плотности, образуемые в зданиях и сооружениях различного назначения, невозможно описать традиционными двумерными моделями. 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, 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, А. В. Рослякова, В. К. Сарьяна, Т.М. Татарниковой, О. И. Шелухина, С. В. Поршнева, 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 и предмет исследования. *Объектом исследования* является трехмерные беспроводные сети связи Интернета вещей высокой плотности, в том числе, а *предметом исследования* – модели и методы построения и выбора структуры сети Интернета вещей высокой плотности.

Цель работы и задачи исследования. *Целью* работы является 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 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 СПбГУТ.

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).

Публикации по теме диссертации. Материалы работы изложены в 12 публикациях, из них: 4 статьи в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданиях (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 и 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.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы – 159 страниц, из них основного текста 141 страница. Работа содержит 44 рисунка и 12 таблиц. Список литературы включает 111 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и определены ее ключевые особенности, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, указаны их теоретическая и практическая ценность, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ концепции и развития Интернета вещей (ИВ), анализ развития беспроводных сенсорных сетей, протоколов, применяемых для их построения, их областей использования. Рассматриваются основные задачи построения ИВ, функции самоорганизации беспроводных сетей ИВ, особенности современного состояния и формирования сетей высокой и сверхвысокой плотности. Также рассмотрены особенности формирования таких сетей в современном окружении, что приводит к построению трехмерных сетей, для описания которых не годятся двумерные модели. На рисунке 1 приведена статистика и прогноз количества устройств ИВ, подключенных к сетям связи.

Результаты анализа показывают актуальность решения таких задач как кластеризация, выбор головных узлов кластеров (ГУ) и задач поиска маршрутов в сетях ИВ с учетом особенностей трехмерных сетей высокой плотности. Решению этих задачи и посвящены следующие главы работы.

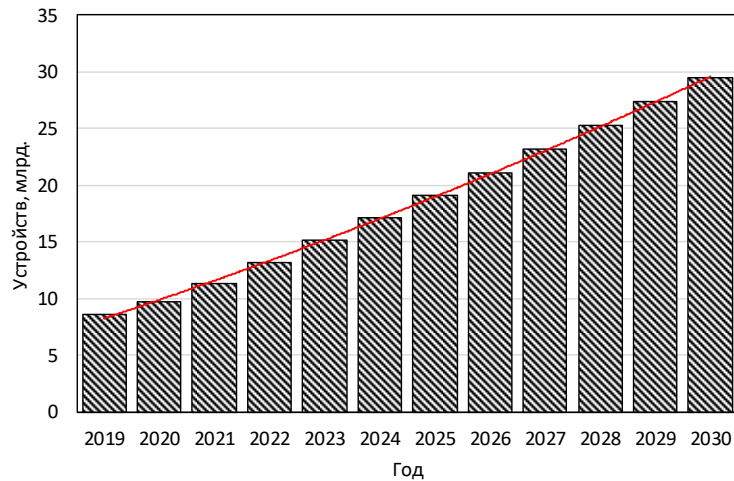


Рисунок 1 – Статистика и прогноз количества устройств ИВ до 2030 г.

Во второй главе разработаны 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.

Полагаем, 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 демонстрирует возможный вариант размещения узлов в трехмерном пространстве.

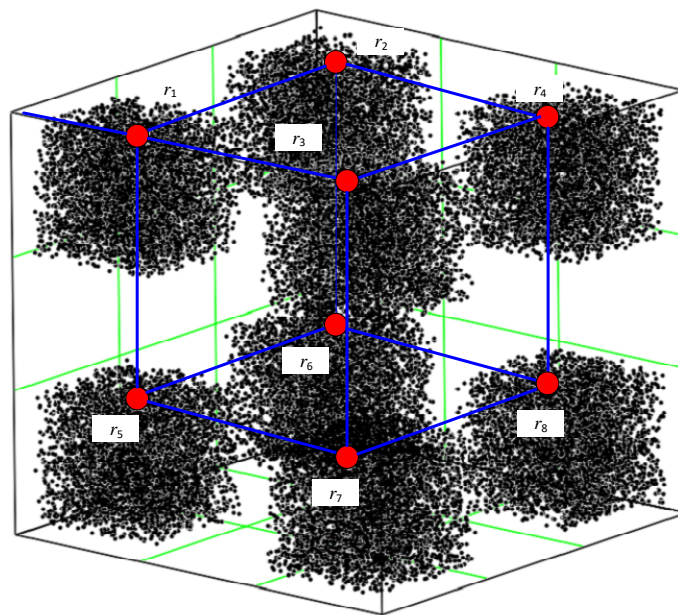


Рисунок 2 – Модель размещения узлов сети ИВ в трехмерном пространстве

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.

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.

Для решения этой задачи предлагается использовать метод, применяемый для оценки фрактальной размерности сети – метод «выращивания кластера».

Алгоритм метода кластеризации приведен на рисунке 3.

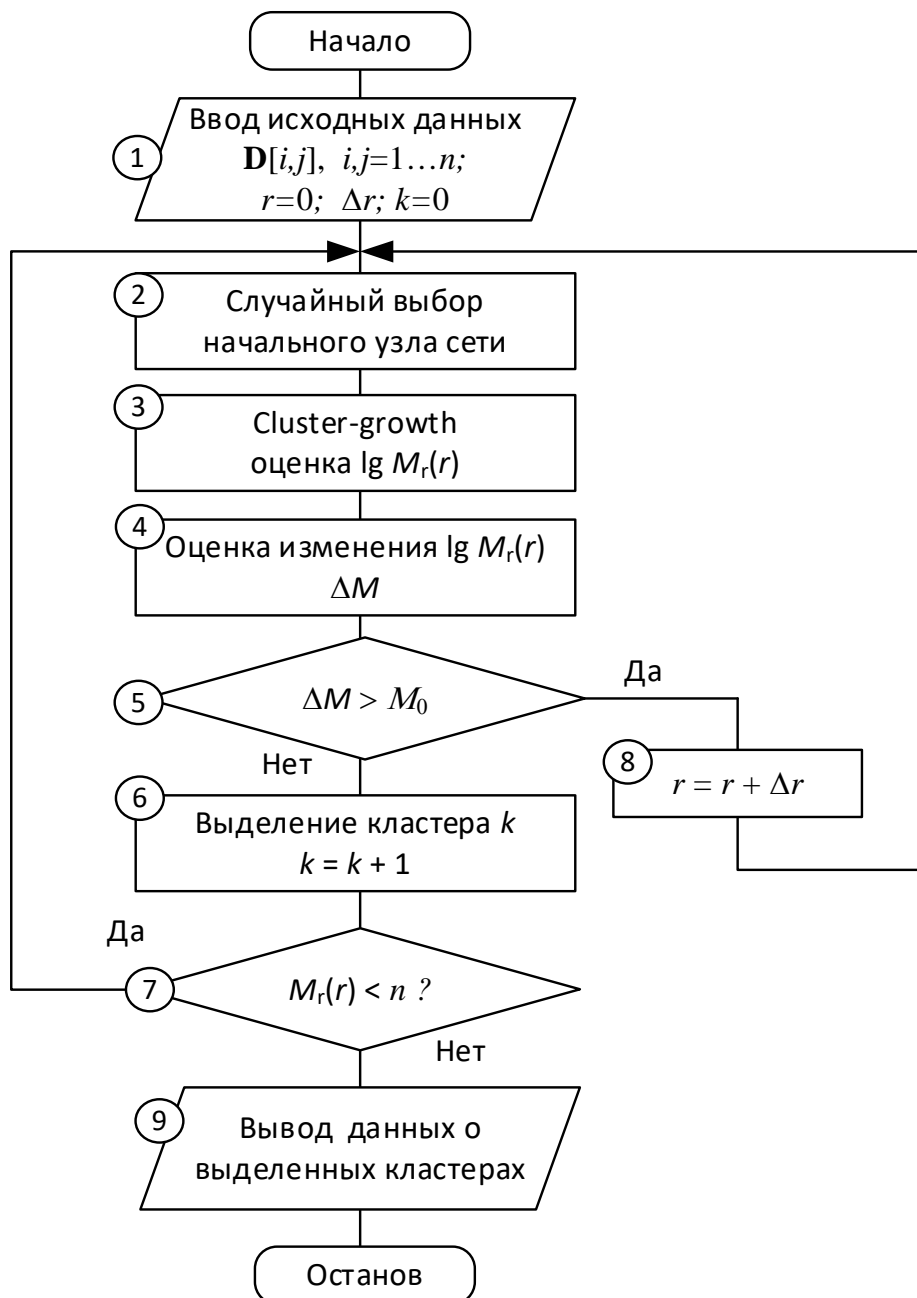


Рисунок 3 – Алгоритм метода кластеризации сети

Сеть описана матрицей \mathbf{D} размера $n \times n$ $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & d_{ij} & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix}$. Элементы матрицы

d_{ij} представляют собой метрику, характеризующую достигаемость 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.

Сравнение предложенного алгоритма с алгоритмами FOREL, k -средних и DBSCAN. 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 4 приведены численные оценки в доле ошибок 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%.

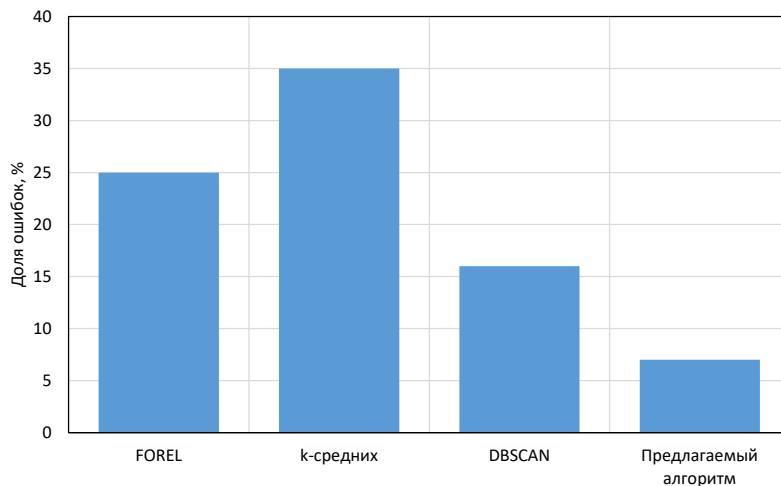


Рисунок 4 – Сравнение алгоритмов кластеризации по доле ошибок

В третьей главе разработан метод выбора головных узлов кластера, обеспечивающий 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. Модель сети приведена на рисунке 5.

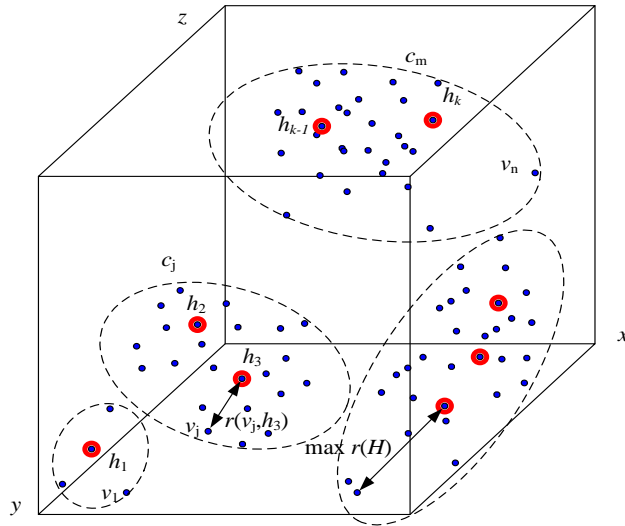


Рисунок 5 – Модель трехмерного кластера

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:

$$r(H) = \min \left(\max_{v \in V} [d(v, H)] \right), \quad H \in V \quad (1)$$

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. 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.

Оценки сложности ряда этих алгоритмов существенно лучше, чем у точного алгоритма.

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%.

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

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 6.

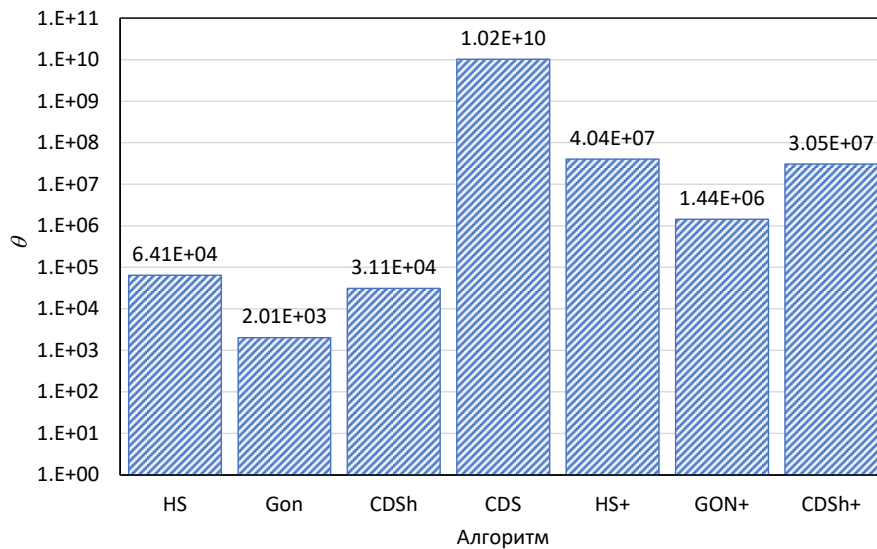


Рисунок 6 – Относительная сложность алгоритмов

Из рисунке 6 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 7 приведена статистическая зависимость решения 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

$$k_0 = \frac{k}{n} \quad (3)$$

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

Относительный размер решения определяется как

$$r_0(k) = \frac{r(k)}{r(1)} \quad (4)$$

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

Кривые соответствуют примерам решений для исходных данных из библиотеки ORLib и TSPLib.

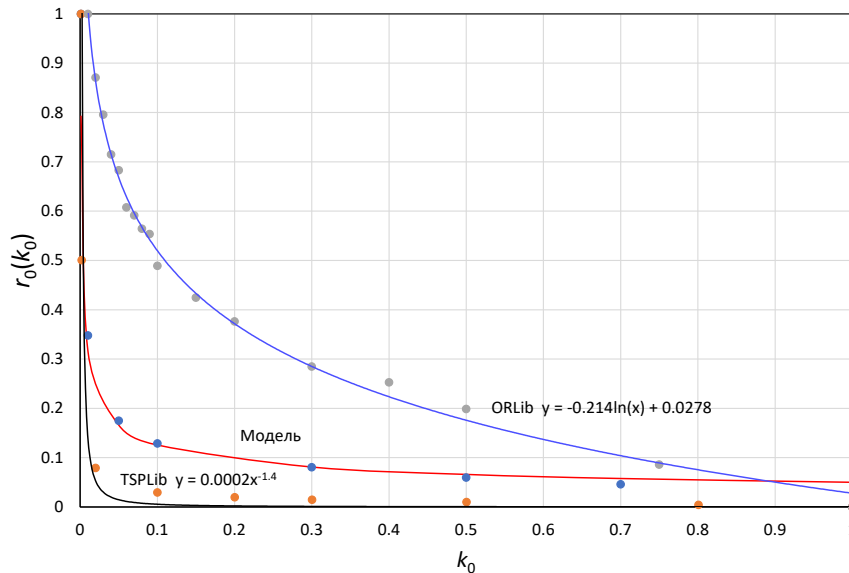


Рисунок 7 – Зависимости решения от кратности центра графа для различных примеров

Наряду с упомянутыми данными было проведено тестирование на данных, полученных с помощью имитационного моделирования сети трехмерными точечными процессами. В качестве моделей были использованы модифицированные точечные процессы Неймана-Скотта: процесс Матерна и процесс Томаса.

Полученная для упомянутых примеров зависимость находится между зависимостями, полученными для ORLib и TSPLib, и на рабочем участке достаточно хорошо описывается степенной функцией

$$r_0(k_0) = \eta k_0^{-\beta} \quad (5)$$

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

Приведенные на рисунке 7 зависимости демонстрируют уменьшение величины r_0 при увеличении кратности 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.

Введем условные единицы стоимости q_1 вычислительной операции, единицы качества решения q_2 , выражаемого в единицах (1) и ГУ сети q_3 . Тогда целевой задачей

будет минимизация суммарной стоимости решения. Целевая функция может быть записана как

$$Q(a_i, k) = \min_{A, k} [q_1 r(a_i, k) \mu(a) + q_2 N(a_i, k) + q_3 k \mid a_i \in A, i = 1 \dots T], \quad (6)$$

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 (6) 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 рис. 8 приведен вид целевой функции (6) 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.

В приведенном на рисунке 8 примере вид целевой функции 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.

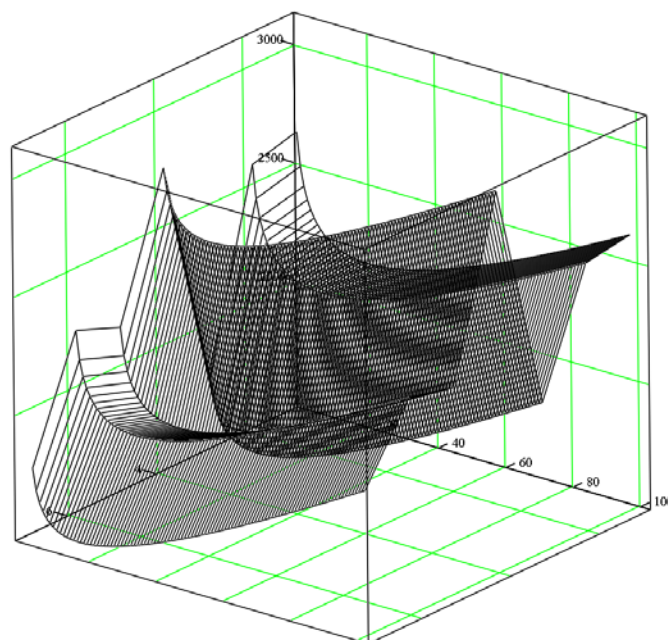


Рисунок 8 – Вид целевой функции

Эффективность предложенного метода оценивается разницей в условной стоимости принимаемых решений. 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, 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.

В четвертой главе разработан метод многокритериальной маршрутизации трафика в сети Интернета вещей высокой плотности, размещенной в трехмерном пространстве, с использованием Серого реляционного анализа, обеспечивающий большую эффективность, по сравнению с однокритериальными методами. При этом эффективность разработанного метода составляет до 53%, в зависимости от состояния сети.

Полагаем, 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 9.

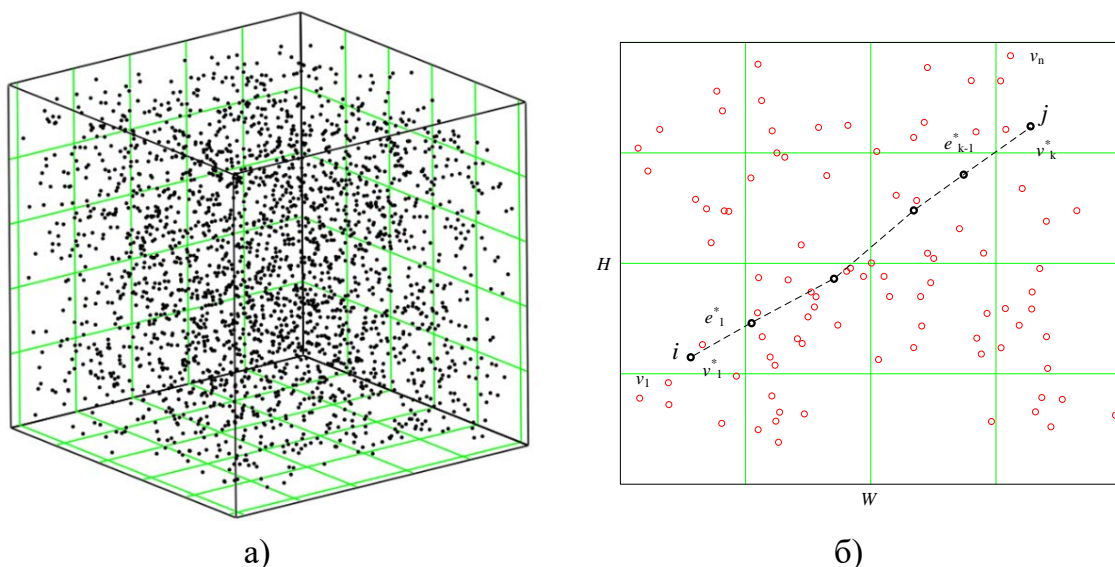


Рисунок 9 – Модель сети высокой плотности в трехмерном пространстве

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

$$d_{i,j} = \begin{cases} d(i,j) & d(i,j) \leq R \\ \infty & d(i,j) > R \end{cases} \quad (7)$$

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

Требуется найти путь $P_{i,j} = \{e_r, v_r^*, e_{r+1}, \dots, e_{k-1}, v_k^*\}$, $e_r \in E, v_r^* \in V, r = 1, \dots, k$ между вершинами i и j , $i, j = 1, \dots, n$ 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 $W_{i,j} = \{w_1, \dots, w_{k-1}\}$.

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

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

$$R_{i,j} = \arg \max_{R_{i,j} \in H} Q(W_{i,j}), \quad \varphi_z(\cdot) = true, \quad z = 1, \dots, S, \quad (8)$$

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

Задачу (8) можно решать, как задачу поиска кратчайшего пути в графе, с использованием известных из теории графов алгоритмов. Однако, для использования известных алгоритмом необходим метод, позволяющий учесть множество критериев. Применим для этой цели серый реляционный анализ (GRA – Gray Relational Analysis), разработанный Дэн Джулуном из Хуачжунского университета науки и технологий в Китайской Народной Республике.

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.

На рисунках 10а и 10б приведены иллюстрации примеров построения маршрута в сети при различных условиях моделирования с использованием маршрутизации по количеству транзитов (рисунок 10а) и с использованием предложенного метода (рисунки 10б, 10в и 10г).

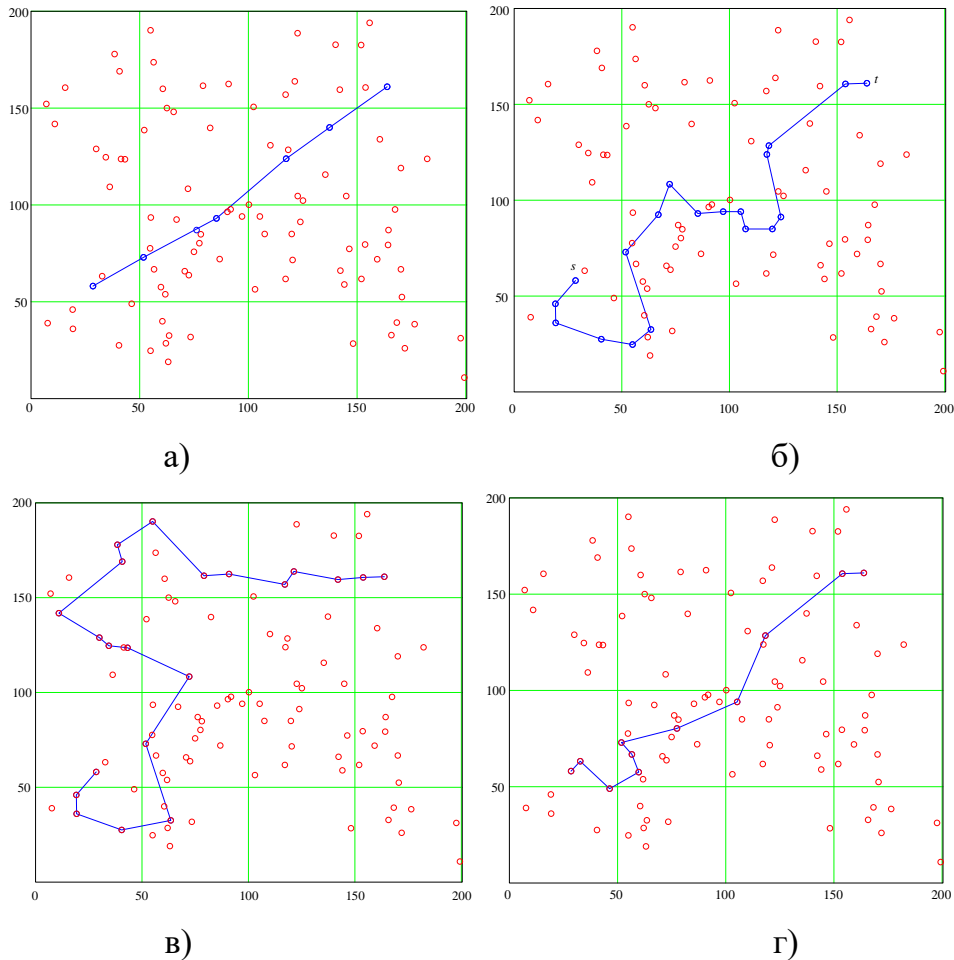


Рисунок 10 – Пример выбора маршрута по количеству транзитов (а) и с использованием предложенного метода (б, в, г)

Результат выбора маршрута, приведенный на рисунке 10б, 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 10в, 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 рис. 10г, 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.

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

$$q = \eta_1 \tilde{k} + \eta_2 \tilde{r} + \eta_3 \tilde{e} + \eta_4 \tilde{p} + \eta_5 \tilde{t} \quad (9)$$

где $\eta_1, \dots, \eta_5 \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^5 \eta_i = 1$, в данном случае все коэффициенты равны 0,2; $\tilde{k}, \tilde{r}, \tilde{e}, \tilde{p}, \tilde{t}$ – это нормированные, согласно (9) 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 (9) отражает насколько выбранный маршрут отвечает желаемым характеристикам при допущении, что они имеют равное значение.

Из полученных результатов (рисунок 11) 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 $\sigma^* \approx 0,36$.

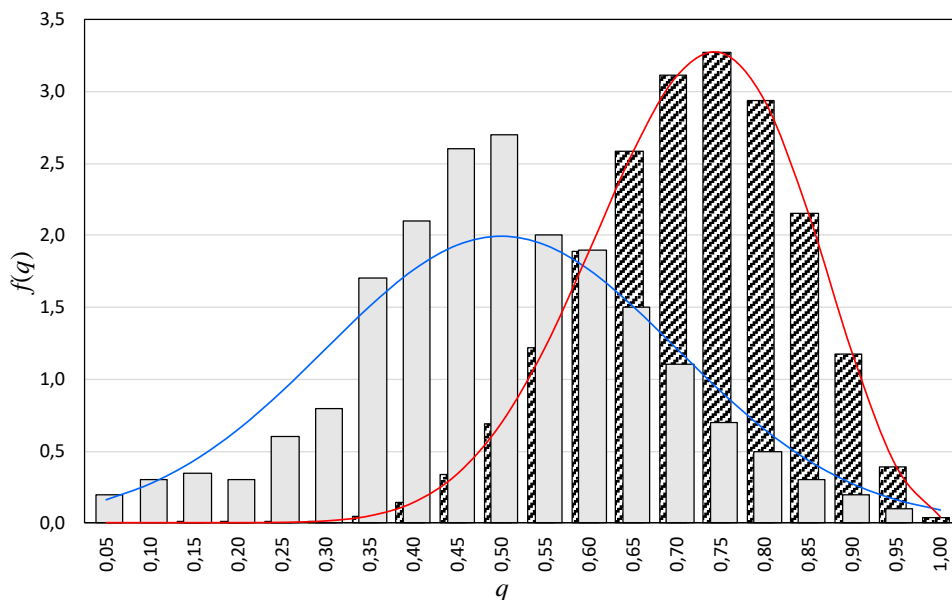


Рисунок 11 – Распределение показателя качества маршрута при использовании выборе по минимальному количеству участков (синяя кривая) и при использовании предложенного метода (красная кривая)

Применение t -критерия Стьюдена 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 11.

Оценим эффективность как разницу между средними значениями показателя q

$$e = 100 \frac{\bar{q}_* - \bar{q}_0}{\bar{q}_0} \% \quad (10)$$

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.

Предложенный метод несколько повышает количество среднее количество транзитов. Также отличается распределение длины пути, которое имеет более длинный хвост распределения.

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 меньше.

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.

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

В заключении диссертации перечислены основные результаты диссертационной работы.

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.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

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

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

3. Марочкина, А.В. Метод маршрутизации трафика в трехмерной сети Интернета вещей высокой плотности с применением серого реляционного анализа. / А.В. Марочкина, А.И. Парамонов // Труды учебных заведений связи. 2023. № 4. С. 75-85.

4. Марочкина А.В., Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.И. Выборнова, А.С. Мутханна, А.Ю. Матюхин, Р.А. Дунайцев, С.С. Владимиров, О.И. Ворожейкина, М.В. Захаров, В.Д. Фам, А.В. Марочкина, Л.С. Горбачева, Б.О. Паньков, Б.Н. Анваржонов // Электросвязь. 2022. № 1. С. 14-20.

Работы в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science

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

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

Публикации в других журналах и материалах научных конференций

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

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

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

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

11. Марочкина А.В., Разработка системы обработки естественной речи на основе нейрокогнитивных архитектур для реализации сервисов инфокоммуникационных услуг / К.Э. Есалов, А.В. Марочкина, А.С. Попонин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021). Сборник научных статей XI Международной научно-технической и научно-методической конференции в 4-х т. Санкт-Петербург, 2021. С. 375-379.

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