

На правах рукописи

Воробьева Дарья Михайловна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ СЕТЕЙ
ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ, ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ**

2.2.15 — Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

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, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Официальные
оппоненты: **Канаев Андрей Константинович**,
доктор технических наук, профессор,
Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I, кафедра
электрической связи, профессор

Ковтуненко Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
Уфимский университет науки и технологий,
кафедра телекоммуникационных систем, доцент

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

Защита состоится 09 декабря 2026 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 19 октября 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном мире инфокоммуникационные технологии стали не просто инструментом коммуникации, а фундаментальной инфраструктурой, определяющей развитие экономики, науки и повседневной жизни. Расширяется состав услуг, предоставляемых пользователям, возрастает число «умных» устройств, для которых увеличиваются объемы данных, передаваемых сетью, ужесточаются требования к времени доставки данных. От стабильной работы сетей связи зависит функционирование «умных» городов, промышленной автоматизации, систем беспилотного транспорта и глобальных информационных платформ. За каждой простой, для современного общества, услуги: видеозвонок, онлайн-платеж или передача данных с одного устройства на другое – стоит сложная, многоуровневая система, построенная на принципах, которые разрабатывались десятилетиями.

На сегодняшний день, согласно данным мировых статистических порталов, общее количество подключенных «умных» устройств (датчики, счетчики, камеры, бытовая техника и др., подключенные к сети интернет) в мире превышает 20 миллиардов. В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ-T) и спецификациями консорциума 3GPP, сети пятого и последующих поколений должны обеспечивать сверхвысокую плотность подключения не менее 1 млн устройств на 1 км² и гарантировать задержку доставки данных не более 1мс для сервисов с критическими требованиями к задержке (URLLC – Ultra-Reliable Low-Latency Communications - сверхнадежная передача данных с малой задержкой). Удовлетворение этих требований невозможно без внедрения новых аппаратно-программных решений и изменения архитектуры сетей, что и обуславливает высокую актуальность настоящего исследования.

В диссертационной работе предложены и обоснованы новые системные решения для перспективных сетей связи. Разработаны и исследованы модели и методы с использованием алгоритма кластеризации DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise – пространственная кластеризация приложений с шумом на основе плотности), позволяющие увеличить число обслуженных узлов с помощью подвижного головного узла кластера для неоднородных сетей интернета вещей, сформировать кластеры в сетях туманных вычислений, разместить облачные агенты для обеспечения требований по качеству обслуживания услуги голографической видеоконференцсвязи и использования алгоритма DBSCAN.

Степень разработанности темы. Существует целый ряд работ теоретического и экспериментального характера в области сетей интернета вещей, передачи данных в сетях связи пятого, шестого и последующих поколений, облачных технологий, технологий туманных вычислений, голографической видеоконференцсвязи. Определяющий вклад в исследования, посвященные данной тематике, внесли российские и зарубежные ученые: К.Е. Самуйлов, А.Е. Кучерявый, А.К. Канаев, А.С. Мутханна, Р.В. Киричек, А.Н. Волков, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.Б. Гольдштейн, С.С. Владимиров, А.С. Ковтуненко, А.В. Прокопьев, W. Heinzelman, A. Salim, I.F. Akyildiz, A. Ateya, M.T. Vega, N.Al-Qadami, Y.Al-Naggar.

Указанные авторы в своих работах исследуют вопросы, связанные с организацией, построением и функционированием современных и перспективных сетей связи для предоставления новых услуг, включая концепции «Интернета вещей» (ИВ), туманных и облачных вычислений, телеприсутствия, голографических коммуникаций, тактильного интернета и др.

Их исследования, в том числе, направлены на решение задач связанных с построением архитектур сетей связи будущего, применение алгоритмов кластеризации при построении таких сетей, повышению эффективности и стабильности сети, а также обеспечению требуемого качества обслуживания с учетом появляющихся новых услуг связи. Существенное внимание уделяется вопросам прогнозирования нагрузки на сеть, исследованию трафика новых услуг связи.

Все вышеперечисленные проблемы и задачи в условиях перехода к сетям высокой и сверхвысокой плотности, архитектуре туманных вычислений, голографическим коммуникациям невозможно решить без использования кластеризации сети.

Алгоритмы кластеризации стали широко применяться в области систем связи с момента появления сенсорных сетей, которые в дальнейшем послужили технологической основой для построения ИВ. Однако все они, как правило, использовались для однородных или для относительно простых неоднородных сетей ИВ. Что же касается неоднородных сетей ИВ с мультимодальным распределением узлов, то до настоящего времени такие исследования не проводились. Это же относится как к сетям туманных вычислений, представляющим собой новейшее развитие теории и практики граничных вычислений в сетях связи, так и к проблемам распределения ресурсов в сети при предоставлении услуги голографической видеоконференцсвязи.

Именно это и определяет цель, задачи, объект и предмет данной диссертационной работы.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются современные и перспективные сети связи, а предметом – модели и методы кластеризации.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы состоит в исследовании и разработке моделей и методов кластеризации в неоднородных мультимодальных сетях Интернета Вещей, туманных вычислений и голографических коммуникаций на основе алгоритма кластеризации DBSCAN для современных и перспективных сетей связи.

Цель работы достигается последовательным решением следующих задач:

1. Анализ особенностей и выбор алгоритма кластеризации для сети Интернета вещей.
2. Разработка модели сети Интернета вещей с мультимодальным распределением узлов сети.
3. Разработка метода для сбора данных сети Интернета вещей с применения подвижных головных узлов.
4. Анализ и исследование свойств алгоритмов кластеризации в архитектуре с туманными вычислениями.

5. Разработка метода оптимизации туманных кластеров для повышения эффективности функционирования сети.
6. Разработка модели голографической видеоконференцсвязи.
7. Разработка метода выбора структуры сети голографических услуг с учетом применения облачных технологий.

Научная задача, решаемая в работе, состоит в разработке комплекса моделей и методов кластеризации для обеспечения требований по качеству обслуживания в области применения ряда современных технологий для предоставления услуг пользователям.

Научная новизна результатов состоит в следующем:

1. Разработаны и исследованы модель и метод для неоднородной сети интернета вещей, отличающиеся от известных тем, что неоднородная сеть интернета вещей представляет собой сеть с мультимодальным распределением узлов сети, а сбор данных с узлов интернета вещей осуществляется с помощью подвижных головных узлов кластеров, кластеризация при этом осуществляется на основе алгоритма DBSCAN, что в совокупности позволяет обеспечить прирост числа узлов, обслуженных подвижным головным узлом на 20% для реальных значений неоднородности сети.
2. Разработан и исследован метод формирования кластеров в сетях туманных вычислений, отличающийся от известных тем, что для кластеризации используется алгоритм DBSCAN с последующим перераспределением некластеризованных узлов с помощью динамического программирования, что позволяет уменьшить долю потерянных заявок на величину до 27%.
3. Разработаны и исследованы модель и метод размещения облачных агентов для обеспечения требований по качеству обслуживания услуги голографической видеоконференцсвязи, отличающиеся от известных модели и метода квазислучайного выбора размещения облачных агентов тем, что для кластеризации используется алгоритм DBSCAN, а для последующего перераспределения некластеризованных пользователей по кластерам – метод k -кратного выбора центра графа CDSh, что позволяет уменьшить задержку на величину до 37%.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость состоит в расширении области знаний для сетей интернета вещей за счет комплексного использования подвижных головных узлов и алгоритма кластеризации DBSCAN для неоднородных сетей интернета вещей с мультимодальным распределением узлов сети, для кластеризации в сетях туманных вычислений с использованием для этой цели алгоритма DBSCAN и последующего перераспределения некластеризованных узлов с помощью метода динамического программирования, а также для обеспечения требований по качеству обслуживания услуги голографической видеоконференцсвязи за счет применения облачных агентов и их размещения с использованием алгоритма DBSCAN с последующим перераспределением некластеризованных пользователей с помощью метода k -кратного выбора графа CDSh.

Практическая значимость работы состоит в использовании предложенных моделей и методик, которые позволяют:

- при планировании неоднородной сети интернета вещей с мультимодальным распределением узлов обеспечить прирост числа обслуженных узлов на 20%,

- при планировании сетей туманных вычислений уменьшить долю потерянных заявок на величину до 27%,

- при планировании сетей связи с предоставлением услуги голографической видеоконференцсвязи уменьшить задержку на величину до 37%.

Полученные результаты могут быть использованы при планировании и проектировании современных сетей связи, а также в процессе обучения студентов и аспирантов профильных высших учебных заведений.

Результаты работы внедрены в учебный процесс в СПбГУТ.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы системного анализа, теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории математической статистики и методах аналитического имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель и метод для неоднородной сети интернета вещей с мультимодальным распределением узлов сети, в которой сбор данных с узлов интернета вещей осуществляется с помощью подвижных головных узлов кластеров, а кластеризация при этом осуществляется на основе алгоритма DBSCAN, что в совокупности позволяет обеспечить прирост числа узлов, обслуженных подвижным головным узлом на 20% для реальных значений неоднородности сети.

2. Метод формирования кластеров в сетях туманных вычислений с использованием для кластеризации алгоритма DBSCAN с последующим перераспределением некластеризованных узлов с помощью метода динамического программирования, что позволяет уменьшить долю потерянных заявок на величину до 27%.

3. Модель и метод размещения облачных агентов для обеспечения требований по качеству обслуживания услуги голографической видеоконференцсвязи с использованием для кластеризации алгоритма DBSCAN с последующим перераспределением некластеризованных пользователей по кластерам при необходимости с помощью метода k -кратного выбора центра графа CDSh, что позволяет уменьшить задержку на величину до 37%.

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, экспериментальных данных, проведенных лично автором, согласованностью с данными, полученными другими авторами и апробацией результатов на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции (АПИНО 2019), на V Всероссийской научно-практической конференции

«Цифровой мир: математика, технологии, связь!» (НГИЭУ 2026), на международной научно-практической конференции «Современная наука: актуальные проблемы и перспективы развития», посвященной памяти В.Д. Козлова (НГИЭУ 2026), на XXVI Международная научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи» (Республика Беларусь 2026) и на конференции 29th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks Control, Computation, Communications (Москва 2026).

Публикации по теме диссертации. По теме работы опубликовано 10 научных статей, из них: одна работа опубликована в трудах, индексируемых в Scopus, 4 работы опубликованы в рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, 5 работ в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие специальности. Работа соответствует пунктам 1, 3, 7, 8 паспорта специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены лично автором. Экспериментальные исследования проводились либо непосредственно автором, либо под его руководством и при непосредственном участии.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объём диссертации составляет 152 страницы машинописного текста. Работа содержит 28 рисунков, 2 таблицы и список из 112 наименований литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и определены ее ключевые особенности, сформулированы цель и задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, определена научная новизна результатов, указаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации работы.

В первой главе произведен анализ развития технологий построения сетей связи, который показал, что классическая архитектура сетей не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным сетям связи.

Показано, что проектирование современных инфокоммуникационных систем представляет собой комплексную научно-техническую задачу, охватывающую как физический, так и логический уровни построения сетевой инфраструктуры, а обеспечение эффективности функционирования современных сетей связи напрямую зависит от рационального выбора их логической структуры и механизмов управления трафиком. Именно это обуславливает необходимость решения задач, связанных с проектированием и разработкой новых методов и моделей построения структуры сети для предоставления современных услуг связи.

Во второй главе произведен анализ современных подходов к построению сетей Интернета вещей (ИВ), их особенностей и классификации предоставляемых услуг, а также рассмотрены алгоритмы кластеризации, применяемые для сетей связи.

Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием ИВ. По данным мировых статистических порталов прогнозируется, что к концу 2026 году этот показатель превысит 23-25 млрд (рис. 1).

В работе рассмотрена сеть ИВ, основу которой составляют беспроводные сенсорные сети (БСС), состоящие из множества сенсорных узлов. Самоорганизующейся сетью называется сеть, в которой число элементов сети не является постоянным и, в общем случае, может изменяться в пределах от 0 до N_{max} . В таких условиях широкое применение находят кластерные архитектуры (рис. 2).

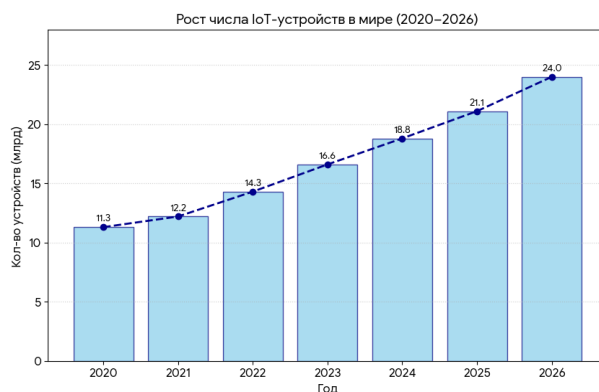


Рисунок 1– Рост числа IoT-устройств в мире (2020-2026)

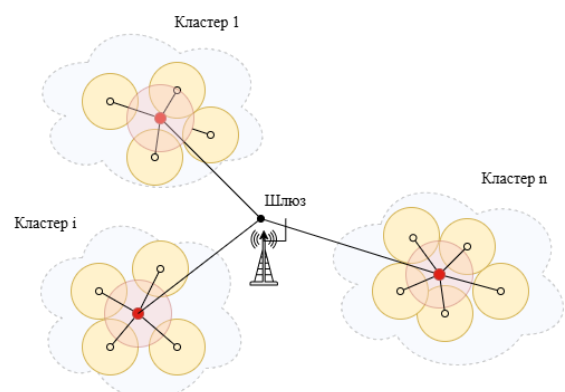


Рисунок 2 – Архитектура кластерной БСС

Разработана модель сети интернета вещей с мультимодальным распределением узлов, в которой для сбора данных применяются подвижные

головные узлы (ПГУ). При моделировании БСС полагали, что узлы сети размещены на плоскости, а зона обслуживания представляет собой прямоугольник, что описывается двумерным мультимодальным (смешанным) распределением с плотностью вероятности и функцией распределения:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^K \eta_i f_i(x, y), \quad F(x, y) = \sum_{i=1}^K \eta_i F_i(x, y) \quad (1)$$

где K – количество мод; η_i – численный коэффициент, такой, что $0 \leq \eta_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^K \eta_i = 1$; $f_i(x, y)$ – плотность вероятности i -й составляющей; $F_i(x, y)$ – функция распределения вероятности i -й составляющей.

На рис. 3 приведена возможная модель перекрестка, полученная при использовании смешанного распределения вида (1) при $K=4$, компонентами которого являются двумерные нормальные распределения с плотностью вероятности:

$$f_i(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-c}} e^{-\left(\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - 2c\frac{(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2}\right)} \quad (2)$$

где μ_x и μ_y – математические ожидания случайных величин x и y , соответственно; σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения (СКО) для случайных величин x и y , соответственно, c – коэффициент корреляции между x и y .

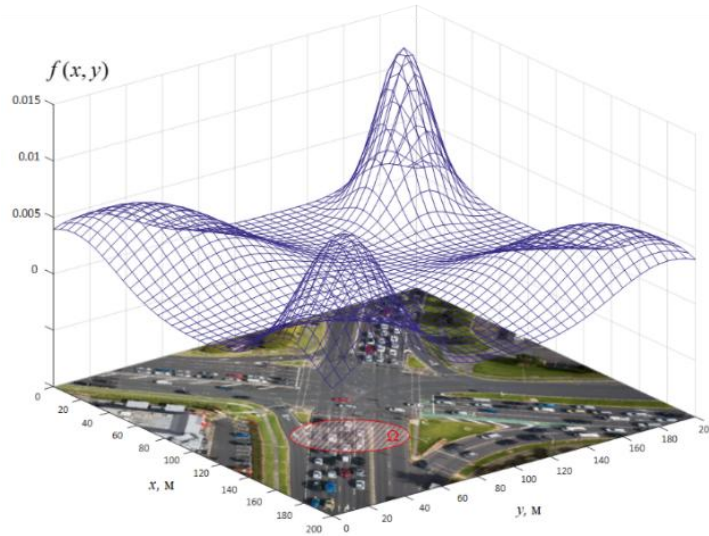


Рисунок 3 – Модель сети в границах перекрестка на основе двумерных нормальных распределений

Случайные величины x и y представляют собой координаты узлов сети (например, автомобилей). Изображенное на рисунке смешанное распределение позволяет судить о вероятности p нахождения узла в заданной области рассматриваемой зоны обслуживания:

$$p = \iint_{\Omega} f(x, y) dx dy \quad (3)$$

Величина вероятности (3) пропорциональна доле (числу) узлов в заданной области. Среднюю величину плотности узлов в заданной области Ω можно оценить как:

$$\bar{\rho} = \frac{pn}{S(\Omega)} \quad (4)$$

где $S(\Omega)$ – площадь области Ω ; n – общее количество узлов в зоне обслуживания.

На рис. 4 приведены результаты генерации случайных узлов сети на основе модели, построенной с помощью смешанного распределения.

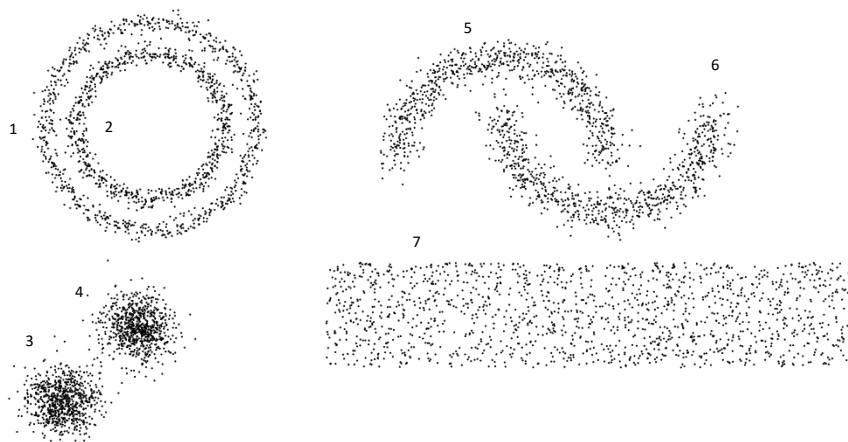


Рисунок 4 – Модель сети в границах перекрестка на основе двумерных равномерных распределений

Если рассматривать сеть автотранспорта, то области, обозначенные как 1 и 2, могут соответствовать площади, области 3 и 4 – перекресткам, 5, 6 и 7 – участкам дорог и парковкам.

Для выделения структурных элементов зоны обслуживания были проведены сравнительные эксперименты с 11 алгоритмами кластеризации на различных типах исходных данных. Сравнение выполнялось по двум критериям: способность выделять структурные элементы и время выполнения. Результаты показали, что наибольшее соответствие требованиям задачи показал алгоритм DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise – пространственная кластеризация приложений с шумом на основе плотности), который позволяет работать с шумом, выполняется почти в 6 раз быстрее OPTICS и отличается небольшим коэффициентом вариации времени выполнения. На рис. 5 приведен результат кластеризации исходных данных алгоритмом DBSCAN.



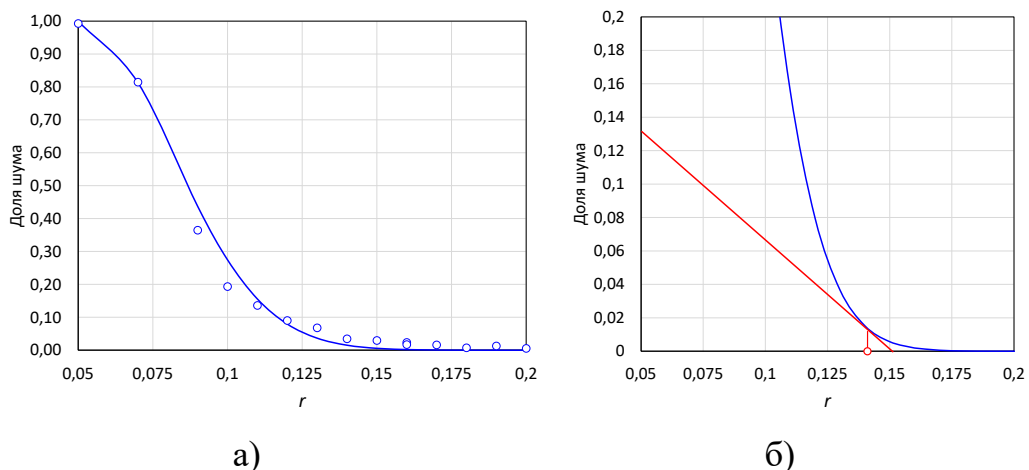
Рисунок 5 – Результат кластеризации алгоритмом DBSCAN

Результат, полученные при многократной кластеризации случайной выборки с разной величиной радиуса поиска r (параметра алгоритма) показан на рисунке 6а. Для аппроксимации полученной зависимости использована функция Гаусса (синяя кривая):

$$O(r) = \frac{1}{c\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(r-r_0)^2}{2c^2}} \quad (5)$$

Параметры кривой c и r_0 выбраны методом наименьших квадратов.

Оптимальная величина r определена с помощью метода «локтевой точки» (рис. 6б), т.е. точки перегиба кривой, в которой угол наклона касательной к ней равен $\pi/4$. На основе полученных данных определялась локтевая точка – значение радиуса, при котором дальнейшее его увеличение перестает давать значительный эффект.



а) б)
Рисунок 6 – Определение величины r

Поскольку алгоритм DBSCAN не может выделять кластеры с различной плотностью элементов, а области, где плотностью существенно меньше заданной определяются как шум, необходимо организовать серию этапов кластеризации для различных ее значений.

Следующей задачей, при использовании DBSCAN являлся выбор величины плотности, для определения которой необходимо задать минимальное число узлов

в окрестности основных точек m . Алгоритм предлагаемого метода приведен на рисунке 7.

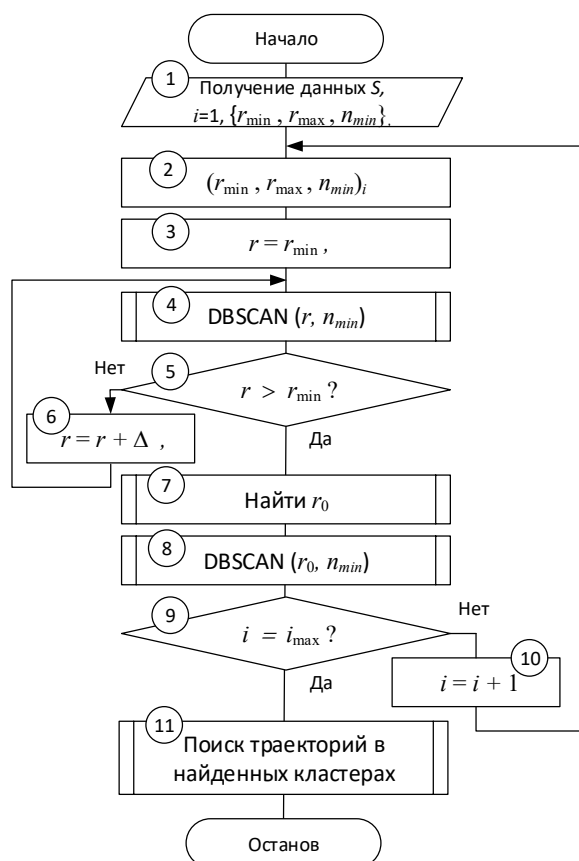


Рисунок 7 – Алгоритм метода (процесса) выбора параметров движения ПГУ

Алгоритм предназначен для выбора траектории движения ПГУ с использованием алгоритма DBSCAN. Сначала вводятся исходные данные — координаты узлов сети S , инициализируются счетчик циклов i и массивы граничных значений r и n_{min} . Затем для каждого i -го набора параметров (r, n_{min}) последовательно перебираются значения радиуса r , начиная с минимального, и для каждого запускается алгоритм DBSCAN. После перебора всего диапазона r по результатам кластеризации оцениваются доли отброшенных узлов и методом локтевой точки определяется оптимальное значение r_0 , выполняется алгоритм DBSCAN. Если рассмотрены не все наборы параметров, счетчик i увеличивается и процесс повторяется. На последнем шаге выбирается траектория движения ПГУ.

При оценке эффективности исходили из того, что работа ПГУ характеризуется двумя основными параметрами: временем движения и числом опрошенных узлов сети.

На рис. 8 показано движение ПГУ, который на своем пути проходит через две области (два кластера) с высокой ρ_1 и низкой ρ_2 плотностью узлов.

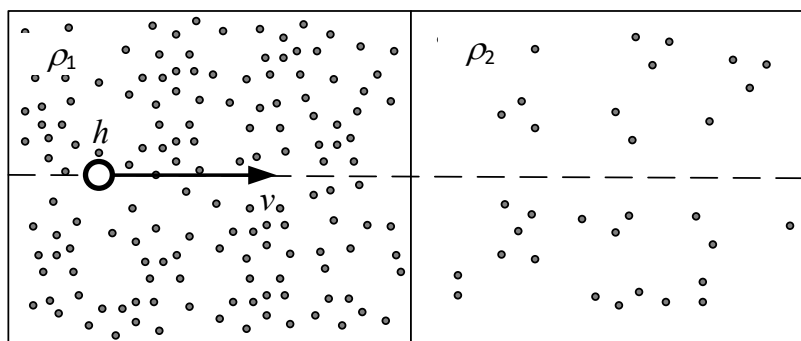


Рисунок 8 – Движение ПГУ через две области с разной плотностью узлов сети

В первом случае скорость узла выбрана из расчета на среднюю величину плотности, т.е. для $(\rho_1 + \rho_2)/2$, а во втором – индивидуально для каждой из областей.

Эффективность оценили коэффициентом изменения количества опрошенных узлов:

$$e = \frac{\eta_1(\rho_1, v_2) + \eta_2(\rho_2, v_2) - \eta_1(\rho_1, \tilde{v}) - \eta_2(\rho_2, \tilde{v})}{\eta_1(\rho_1, \tilde{v}) + \eta_2(\rho_2, \tilde{v})} \quad (6)$$

где $\eta(\rho, v)$ – количество обслуженных узлов; ρ_1 и ρ_2 плотности узлов в первой и второй областях; v_1 и v_2 оптимальные скорости движения, с учетом плотности узлов в них, $\tilde{v}$ – оптимальная скорость, выбранная для усредненного значения плотности узлов.

На рис. 9 приведена зависимость оценки эффективности от неоднородности сети. Эффективность метода возрастает с увеличением неоднородности сети.

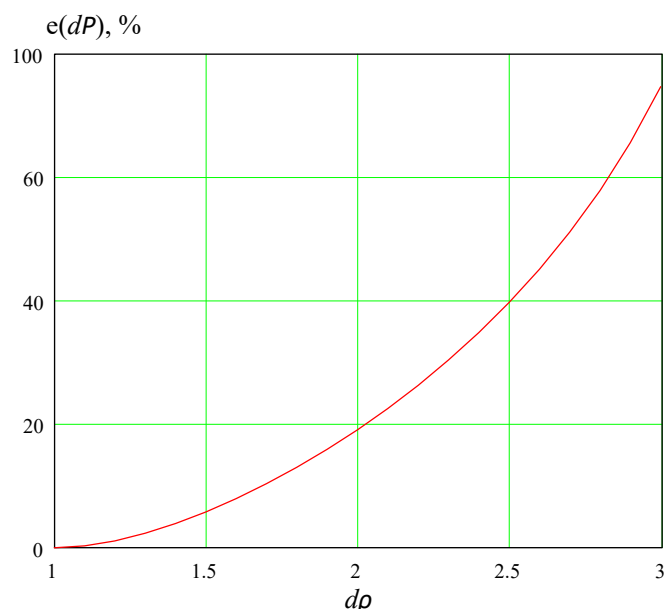


Рисунок 9 – Зависимость эффективности от неоднородности сети

Таким образом, решена задача повышения эффективности функционирования сетей ИВ за счет применения кластеризации и оптимального выбора параметров ПГУ в кластере в неоднородных сетях с мультимодальным распределением узлов.

В третьей главе разработан метод формирования туманных кластеров из узлов сети на основе алгоритма DBSCAN, учитывающий необходимые требования к качеству обслуживания (QoS).

Архитектура туманных вычислений представлена на рис. 10. Она включает три уровня: слой терминальных устройств (сбор и первичная обработка данных), слой тумана (физические устройства – маршрутизаторы, шлюзы, базовые станции, локальные серверы, обеспечивающие обработку и хранение на границе сети) и слой облака (высокопроизводительные ЦОД для сложных вычислений и долгосрочного хранения).

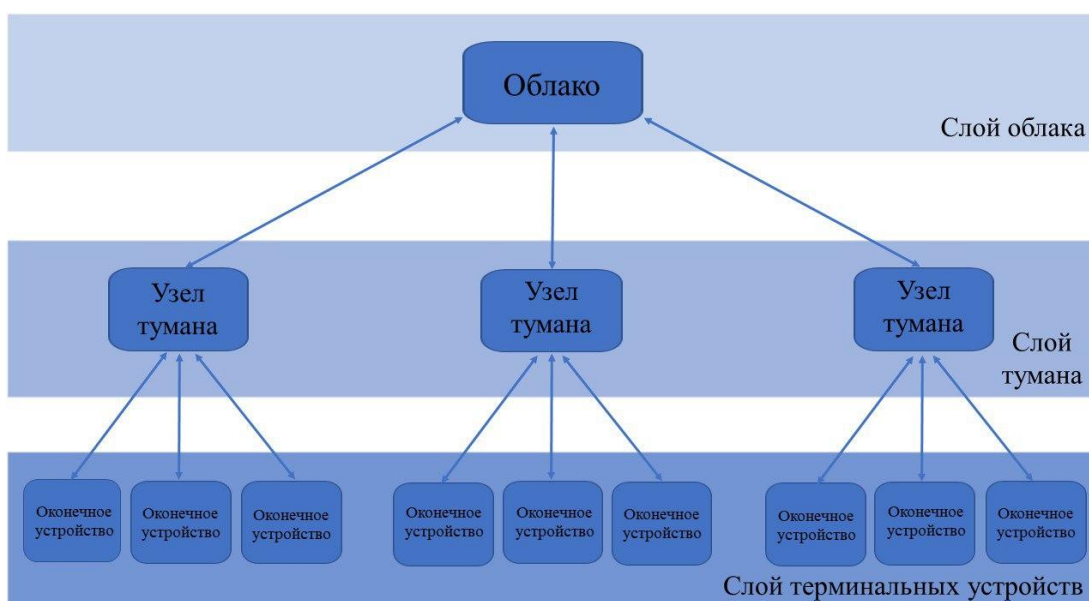


Рисунок 10 – Архитектура сети с туманными вычислениями

В туманных средах, где узлы сети могут быть расположены в пространстве неравномерно, целесообразно использовать кластеризацию с учетом их расположения, учитывая расстояние между туманными узлами. Проведенный анализ алгоритмов кластеризации в сетях туманных вычислений показал, что для таких сетей наиболее эффективными являются плотностные алгоритмы. Их преимущество заключается в выделении областей с высокой концентрацией узлов, а точки, где плотность низкая отмечаются, как шум (выбросы). Наиболее распространенным среди них является алгоритм пространственной кластеризации для приложений с шумами – DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). Плотность в этом алгоритме определяется заданным радиусом окрестности и минимально необходимым количеством точек в ней.

Число устройств в сети, подлежащих кластеризации, обозначим – n . В результате имеем набор из m кластеров, каждый из которых представляет множество M_j , содержащее m_j узлов сети, где $j=1, \dots, m$; m – число кластеров. Часть узлов сети, которые не принадлежит ни одному из кластеров, образуют так называемый «шум», т.е. $\sum_{j=1}^m m_j \leq n$. Равенство имеет место в случае, когда «шума» нет.

Качество обслуживания запросов (трафика) от пользователей характеризуется производительностью кластера μ_j , т.е. интенсивностью обслуживания заявок, которые направляются на кластер обслуживающих (туманных) устройств.

Производительность j -го туманного кластера μ_j определяется как сумма производительностей, входящих в него узлов μ_i :

$$\mu_j = \sum_{i=1}^{m_j} \mu_i, \quad (7)$$

где m_j — количество узлов, входящих в j -й кластер.

Туманный кластер принимает на обслуживание заявку, если у него есть свободный вычислительный ресурс, а если свободного ресурса нет, то заявка

помещается в буфер ожидания. Размер буфера ожидания ограничен, и если он заполнен, то заявка теряется.

Размер буфера ожидания выбирается из соображений ограничения среднего времени обслуживания:

$$B_j = T_0 \mu_j, \quad (8)$$

где T_0 – допустимое время обслуживания заявки.

Так как поток заявок, поступающих на обслуживание в кластер, формируется различными устройствами, которые, как правило, независимы друг от друга, то при достаточно большом количестве таких потоков, свойства результирующего потока стремятся к свойствам простейшего потока (рис.11).

В качестве модели кластера выбрана модель системы массового обслуживания с ожиданием вида М/М/1/В.

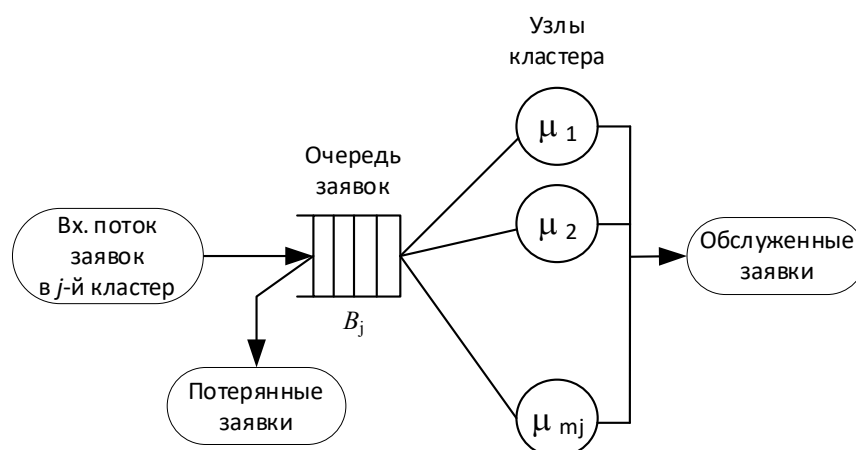


Рисунок 11 – Модель обслуживания заявок в j -м кластере

Тогда вероятность потери заявки составит:

$$p_j = \frac{1 - \rho_j}{1 - \rho_j^{B_j+1}} \rho_j^{B_j}, \quad (9)$$

где ρ_j – нагрузка на j -й кластер.

Качество обслуживания запросов туманными кластерами характеризовали интенсивностью потерянных заявок, которую для каждого из кластеров определена, как:

$$L_j = a_j p_j, \quad (10)$$

где a_j – интенсивность заявок в j -м кластере.

Общая интенсивность потерь заявок:

$$L = \sum_{j=1}^m L_j. \quad (11)$$

Далее задачу наилучшего распределения ресурсов по кластерам сформулирована как задачу минимизации интенсивности потерь заявок при фиксированном количестве обслуживающих устройств:

$$O = \min_{M_i} L, \quad \mu_j \in M, \quad (12)$$

где M_i – множество узлов i -го кластера; M – общее множество узлов.

Метод оптимизации туманных кластеров описан блок-схемой (рис. 12).

Этот метод заключается в выполнении кластеризации узлов сети с помощью алгоритма DBSCAN, при некоторых начальных значениях параметров алгоритма, с последующей ее минимальной корректировкой. Корректировка заключается в перераспределении узлов, отнесенных к шуму (т.е. не приписанных ни к одному из кластеров), и основана на минимизации функции (12). Если цель, заключающаяся в обеспечении показателей качества достигнута, то алгоритм завершается. Если цель не достигнута, то производится корректировка параметров алгоритма кластеризации и он снова выполняется.

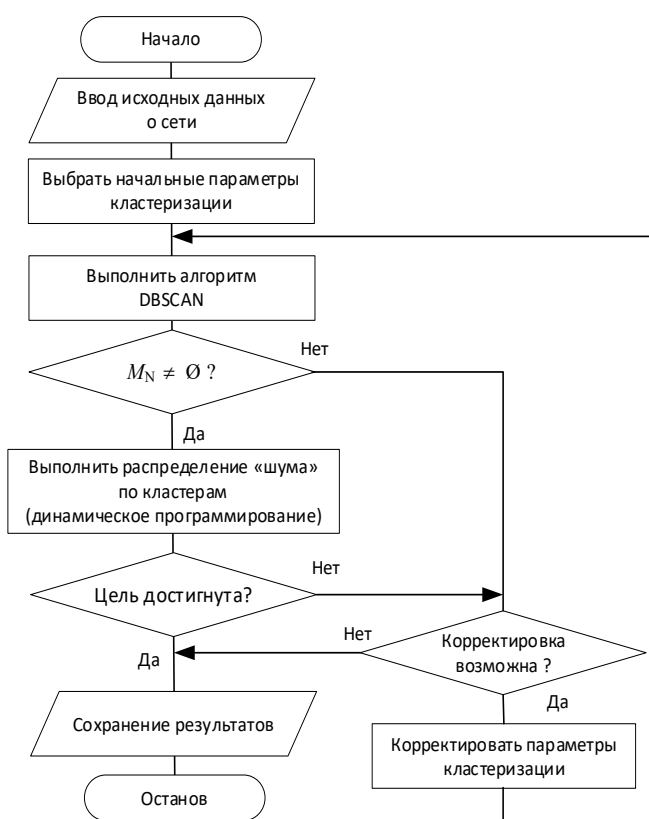


Рисунок 12 - Блок-схема метода

Эффективность метода оптимизации туманных кластеров достигается за счет перераспределения по кластерам некластеризованных узлов при наличии такой возможности.

Достижимый эффект описан разницей между значением (12), полученным без и с применением предложенного метода, т.е. интенсивностью потерь заявок:

$$e = 100 \frac{|L - L^*|}{L} \%, \quad (13)$$

где L – интенсивность потерь без использования предложенного метода, L^* – интенсивность потерь при использовании предложенного метода.

На рис. 13 приведены оценки эффективности метода, полученные для различных реализаций распределения узлов сети, которые отличались количеством выделяемых кластеров.

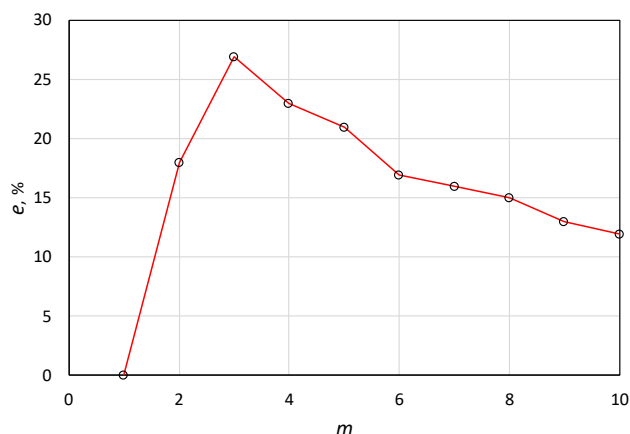


Рисунок 13 – Оценка эффективности метода при различном числе кластеров

Результаты проведенных экспериментов показали, что максимальное значение эффективности, определяемой по формуле (13), равно 27%. Минимальное значение (равное 0) соответствует одному кластеру, т.е. отсутствию кластеризации.

Следует отметить, что эффективность метода существенно зависит от характера распределения узлов, а именно от компактности скоплений узлов и расстояний между ними.

В четвертой главе рассматривается модель голографической видеоконференцсвязи (ВКС) и предлагается метод выбора структуры сети для обеспечения качества обслуживания голографической видеоконференцсвязи. Актуальность этого направления подтверждается практическими разработками в лаборатории «МегаНетЛаб 6G» СПбГУТ.

Видеоконференцсвязь стала неотъемлемой частью современного общества, особенно востребованной в период пандемии. На рис. 14 представлен график роста числа пользователей ВКС.



Рисунок 14 – Динамика роста числа пользователей ВКС

По оценкам различных экспертов, передача видеопотока голографической связи может потребовать пропускной способности от 1 до 10 Гбит/с. Требования к

качеству обслуживания трафика ВКС определены в рекомендации ITU-T Y.1541 для интерактивных потоковых услуг. Трафик ВКС включает видео- и звуковые потоки, которые должны быть синхронизированы. Например, при частоте 15 кадров/с и буфере 6 кадров задержка буферизации составляет 0,4 с, что в 4 раза превышает требования Y.1541 (100 мс). Это снижает качество интерактивного режима.

В лаборатории «МегаНетЛаб 6G» СПбГУТ завершились исследования по созданию голографического телемоста – системы, передающей реалистичное голографическое изображение собеседника в реальном времени.

Обеспечение качества ВКС может быть достигнуто путем использования облачных технологий и рационального распределения облачных агентов и назначения им пользователей. В работе полагаем, что для задач реализации услуги выделяется множество облачных агентов $A = \{a_1, \dots, a_n\}$, где n – их количество. С каждым из агентов a_i ассоциируется множество пользователей $U_i = \{u_1, \dots, u_{m_i}\}$, где m_i – число пользователей, ассоциированных с i -ым облачным агентом. Общее множество пользователей:

$$U = \bigcup_{i=1}^n U_i; U_i \cap U_j = \emptyset; i, j = 1, \dots, n; i \neq j.$$

Задержка между пользователем j и облачным агентом i определяется двумя составляющими: временем обслуживания в облачном агенте и сетевой составляющей (задержкой доставки данных по маршруту):

$$\tau_{ij} = \tau_S + \tau_N = \tau_S + \tau_T + \tau_P, \quad (14)$$

где τ_S – время обслуживания; τ_N – сетевая составляющая (задержка, вносимая сетью связи). Сетевая составляющая, в свою очередь, состоит из: времени передачи τ_T и времени распространения сигнала τ_P . Все составляющие, кроме времени распространения, являются возрастающими функциями зависящим от величины нагрузки, производимой пользователями.

Для приближенного описания зависимости задержки от нагрузки используем выражение, описывающее задержку в системе массового обслуживания (СМО):

$$\tau \sim \frac{\rho \bar{t}}{1 - \rho} \varepsilon(*), \quad (15)$$

где ρ – нагрузка (использование) вычислительных ресурсов или пропускной способности; $\varepsilon(*)$ – величина, зависящая от свойств трафика и свойств системы обслуживания; $\bar{t}$ – среднее время обслуживания (передачи). С учетом последнего выражение (14) может быть записано как:

$$\tau \sim \frac{\rho_a \bar{t}_a}{1 - \rho_a} \varepsilon(a) + \frac{\rho_L \bar{t}_L}{1 - \rho_L} \varepsilon(L) + \tau_P, \quad (16)$$

где a – свойства трафика облачного агента; L – свойства трафика в сети связи; ρ_a – использование (нагрузка) ресурса облачного агента; ρ_L – использование (нагрузка) линий связи; $\bar{t}_a$ – среднее время обслуживания заявки облачным агентом;

$\bar{t}_L$ – среднее время передачи заявки по линии связи; $\varepsilon(a)$ – коэффициент зависящий от свойств трафика облачного агента; $\varepsilon(L)$ – коэффициент, зависящий от свойств трафика в сети связи.

При описании структуры сети моделью случайного графа (рис.15) средняя интенсивность трафика на наиболее загруженные линии связи тем выше, чем меньше облачных агентов используется для обслуживания. На рисунке пример географически распределенной сети, где координаты x, y можно интерпретировать как условные единицы, выражающие расстояние.

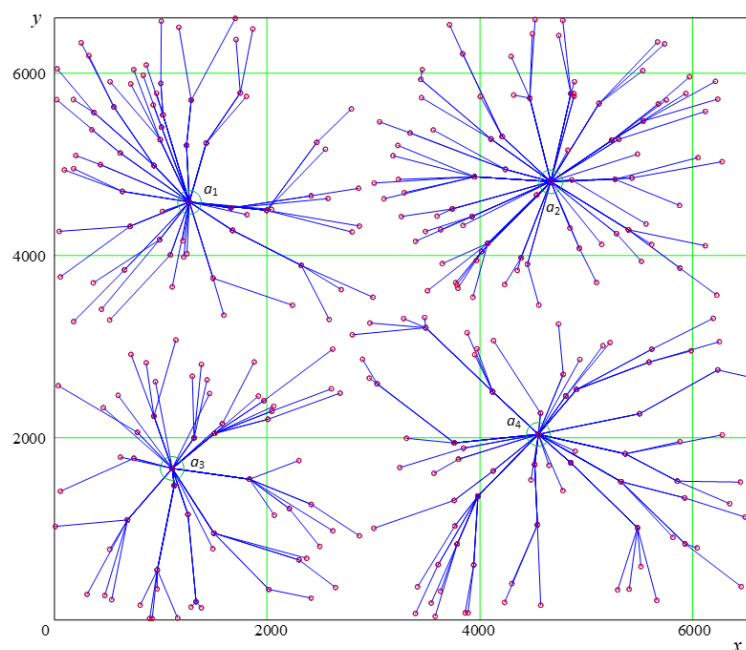


Рисунок 15 – Модель структуры сети

Наиболее загруженные линии связи – это линии между узлом, на котором размещен облачный агент, и другими узлами сети. Уменьшение задержки может быть достигнуто за счёт снижения нагрузки на облачные агенты и маршруты, а также за счёт сокращения расстояния между пользователем и агентом. Анализ показал убывающий характер зависимости средней величины задержки от числа облачных агентов (рис. 16).

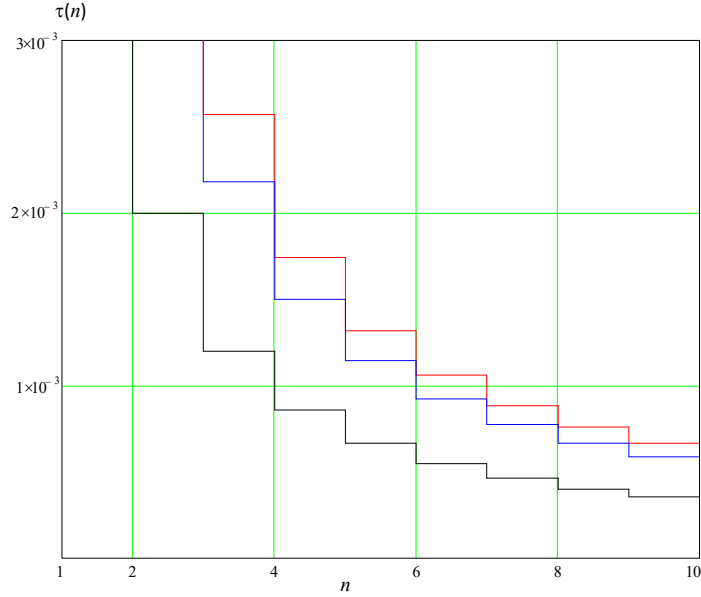


Рисунок 16 – Зависимость задержки от числа облачных агентов

Для решения задачи использовался метод кластеризации DBSCAN, где критерием выступала величина задержки между пользователем и облачным агентом. Так как указанный алгоритм не выделяет центров кластеров, то для выбора позиции агента a_i определялся центр графа кластера G .

Если для обслуживания трафика кластера достаточно одного облачного агента, то эта задача может быть решена с помощью алгоритма Флойда-Уоршелла. Упомянутый алгоритм находит все кратчайшие пути в графе и возвращает квадратную матрицу длин кратчайших путей $\mathbf{L}$ размерности m_r графа G , содержащего m_r узлов.

Номер вершины графа, соответствующий искомому узлу, определен как

$$i_r^* = \min_i \left\{ \max_j (\mathbf{L}_{i,j}) \right\}, \quad i, j = 1 \dots m_r. \quad (17)$$

Если одного облачного агента недостаточно для обслуживания трафика, производимого в кластере, то следует искать k -кратный центр графа, где k – число требуемых облачных агентов.

Для решения задачи использовался алгоритм, приведенный на рис. 17.

В данном алгоритме N – ожидаемое число кластеров, например, число населенных пунктов.

После ввода исходных данных, которые включают информацию о размещении пользователей на рассматриваемой территории и производимом ими трафике, на первом этапе решена задача кластеризации с использованием алгоритма DBSCAN. В результате выделено c кластеров по признаку плотности пользователей, т.е. группы пользователей, соответствующие населенным пунктам. Часть пользователей оказывается не кластеризована, их число m_{nc} (шум), к ним могут относиться пользователи, расположенные на значительном расстоянии от населенных пунктов (в зоне малой плотности).

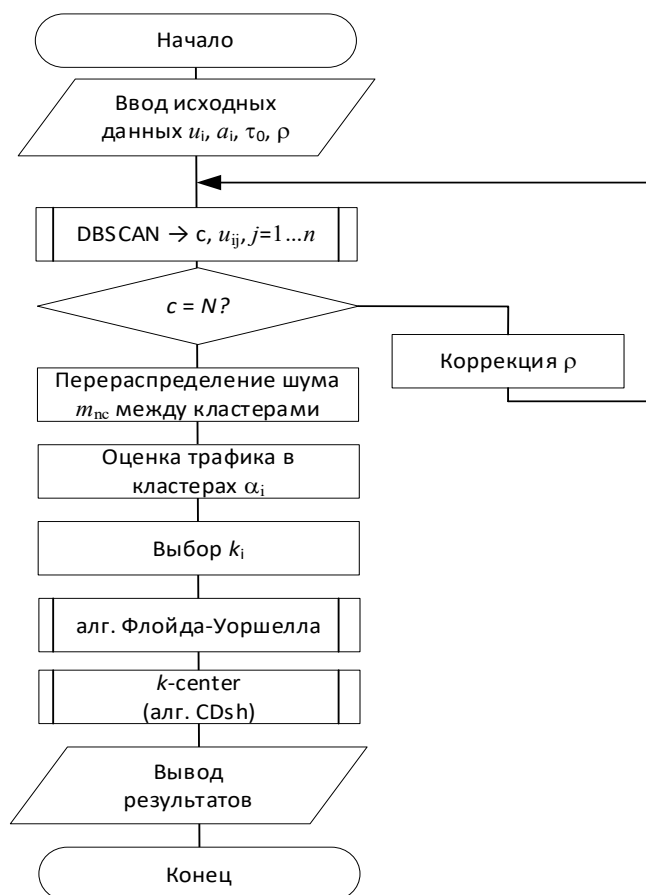


Рисунок 17 – Блок схема метода выбора позиций размещения облачных агентов

Для анализа выбрана гипотетическая сеть, включающая 1000 узлов (пользователей), которые распределены неравномерно по территории и образуют пять скоплений, имитирующих распределение пользователей в населенных территориях (рис. 18).

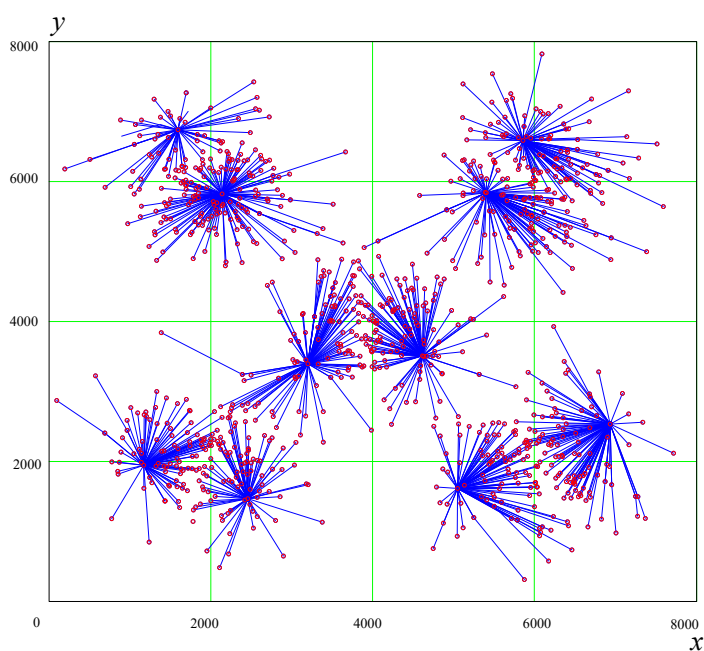


Рисунок 18 – Пример результата применения предлагаемого метода

Для каждого кластера выделялось по два агента с использованием алгоритма CDSH (связи между кластерами не показаны). В данном примере было размещено 10 облачных агентов.

Эффективность оценивалась изменением задержки по сравнению с квазислучайным распределением облачных агентов согласно выражению:

$$e = 100 \frac{\bar{\tau}^{\otimes} - \bar{\tau}^*}{\bar{\tau}^{\otimes}} \%, \quad (18)$$

где $\bar{\tau}^{\otimes}$ – средняя величина задержки, полученная в сети при использовании квазислучайного метода размещения облачных агентов; $\bar{\tau}^*$ – средняя величина задержки, полученная в сети при использовании предложенного метода размещения облачных агентов.

Результаты, которые приведены на рис. 19, были получены для сетей с различным числом пользователей (узлов) и различным числом скоплений (кластеров).

На рис. 20 приведены эмпирические гистограммы распределения задержки для маршрутов при построении сети предлагаемым методом (гистограмма 1) и квазислучайным методом (гистограмма 2).

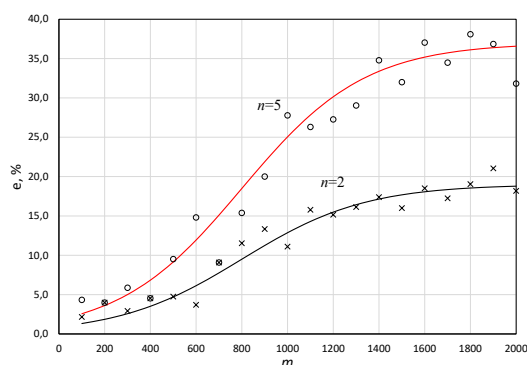


Рисунок 19 – Зависимость эффективности метода от числа пользователей и числа кластеров

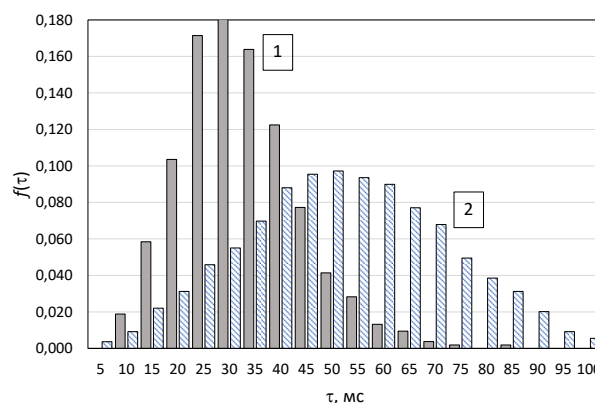


Рисунок 20 – Распределение задержки в структурах, построенных предлагаемым методом и квазислучайным методом

Из приведенных гистограмм наглядно видно, что разброс величины задержки при использовании предлагаемого метода меньше (среднее значение – 32,7 мс, среднеквадратическое отклонение – 28,51 мс, коэффициент вариации – 0,87), чем при использовании квазислучайного метода (среднее значение – 51,97 мс, среднеквадратическое отклонение – 48,32 мс, коэффициент вариации – 0,93). Полученные результаты демонстрируют то, что качество решения задачи предложенным методом выше, чем квазислучайным методом.

В заключении изложены результаты исследований, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Особенности сети ИВ являются большое количество IoT-устройств, гетерогенность сети, жесткие требования к энергоэффективности, чувствительность к задержкам, а также необходимость обработки данных в режиме реального времени. Эти особенности предъявляют новые требования к построению архитектуры ИВ.

2. Для организации эффективного использования подвижных головных узлов в сети интернета вещей необходимо выбирать параметры движения в зависимости от структуры сети, которая в значительной степени зависит от структуры окружения, в котором строится сеть.

3. Сеть ИВ имеет неоднородную структуру, в которой можно выделить области, определяемые структурными элементами окружения, как дороги, тротуары, тоннели, здания и др. Плотность сети в рамках этих элементов может быть различна.

4. Основной задачей организации движения ПГУ – выделение групп узлов сети в границах структурных элементов. Для решения данной задачи разработан метод выделения кластеров на основе алгоритма кластеризации DBSCAN. Метод позволяет выделять группы (кластеры) узлов сети с различной плотностью узлов. Выделение таких кластеров позволяет организовать сбор данных с помощью подвижных головных узлов, выбрав оптимальным образом скорость движения в каждом из этих кластеров.

5. Разработанный метода сбора данных сети ИВ с применением ПГУ дает возможность повысить эффективность использования подвижных головных узлов, которая зависит от неоднородности сети интернета вещей. Эффективность, определяемая приростом числа обслуженных узлов, тем выше, чем больше неравномерность сети, определяемая плотностью узлов в различных кластерах.

6. В сетях с туманными вычислениями, под управлением SDN, обоснована целесообразность применения методов кластеризации для эффективного управления потоками трафика, маршрутизацией и миграцией сервисов.

7. Проведенный анализ методов кластеризации показал, что выбор того или иного алгоритма кластеризации является нетривиальной задачей, поскольку от входных параметров и свойств алгоритмов зависит эффективность функционирования сети связи, использующей туманные вычисления.

8. Обзор известных плотностных алгоритмов кластеризации показал, что выбор алгоритма зависит от особенностей размещения узлов в пространстве, расстояний между узлами и наличия областей с высокой и с низкой концентрацией узлов.

9. Организация процесса сбора и обработки больших объемов информации в местах скопления конечных устройств должна учитывать стабильность сети, которая прямым образом влияет на качество обслуживания, задержку и надежность передачи данных в облачной структуре.

10. Разработанный метод формирования туманных кластеров из узлов сети на основе алгоритма DBSCAN, обеспечивает уменьшение доли заявок, не получивших обслуживание, на величину до 27% (по оценкам результатов эксперимента).

11. Предоставление услуг видеоконференцсвязи требует соблюдения показателей качества обслуживания трафика. Интерактивный характер услуги требует обеспечения временных параметров доставки пакетов. При предоставлении услуг голографической видеоконференцсвязи требования к ресурсам сети возрастают из-за более высокой интенсивности трафика.

12. Для реализации услуг видеоконференцсвязи, в том числе голографической, в сетях пятого и последующих поколений может быть реализована гибкая структура путем использования облачных технологий и делегирования функций предоставления услуги облачным агентам, размещаемым на элементах сети связи с учетом их производительности, трафика пользователей и задержки обслуживания.

13. Предложенный в работе метод выбора структуры сети голографической видеоконференцсвязи предполагает приближенное решение задачи оптимального распределения ресурсов путем выбора числа и позиций размещения облачных агентов на элементах сети связи. Задача решается в два этапа с использованием метода кластеризации DBSCAN и метода поиска k-кратного центра графа CDSH. Как показали результаты имитационного моделирования, данный метод позволяет получить лучшие решения по сравнению с квазислучайным выбором позиций для размещения облачных агентов. Эффективность метода в смысле величины задержки составила от 1,3 до 37%, в зависимости от числа пользователей и числа кластеров.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Воробьева, Д.М. Выбор скорости движения головного узла в гетерогенной беспроводной сенсорной сети с подвижными головными узлами / Д.М. Воробьева, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2020. – № 12. – С. 20-24.

2. Воробьева, Д.М. Модель сети Интернета вещей с мультимодальным распределением узлов и метод применения подвижных головных узлов для сбора данных / Д.М. Воробьева, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2021. – № 10. – С. 30-38.

3. Воробьева, Д. М. Анализ методов кластеризации в сетях туманных вычислений / Д. М. Воробьева // Электросвязь. – 2025. – № 7. – С. 40-47.

4. Воробьева, Д.М. Метод выбора структуры сети голографических услуг / Д.М. Воробьева, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2026. – № 3. – С. 2-9.

Публикации в других журналах и материалах научных конференций

5. Vorobeva, D. IoT Network Model with Multimodal Node Distribution and Data-Collecting Mechanism Using Mobile Clustering Nodes / D. Vorobeva, A. Muthanna,

A. Paramonov, O. A. Markelov, A. Koucheryavy, G. Ali, M. ElAffendi, A. A. Abd El-Latif // Electronics. – 2023. – Vol. 12, № 6. – Art. 1410.

6. Воробьева, Д.М. Обзор технологий и стандартов RFID систем / Д.М. Воробьева, Н.А. Верзун, А.М. Колбанёв, М.О. Колбанёв // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 1-11.

7. Воробьева, Д.М. Корреляционные алгоритмы антиколлизии для RFID систем / Д. М. Воробьева, Н. А. Верзун, А. М. Колбанёв, М. О. Колбанёв // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 82-91.

8. Воробьева, Д.М. Модель оценки времени доставки данных в беспроводных сенсорных сетях / Д. М. Воробьева, Т. Н. Астахова, М. О. Колбанёв, А. А. Шамин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019): сб. науч. ст. VIII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. : в 4 т. – СПб.: СПбГУТ, 2019. – Т. 1. – С. 90-93.

9. Воробьева, Д.М. Характеристики энергопотребления умных вещей / Д.М. Воробьева, Т.Н. Астахова, М.О. Колбанёв, А.А. Шамин // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019): сб. науч. ст. VIII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. : в 4 т. – СПб. : СПбГУТ, 2019. – Т. 1. – С. 93-97.

10. Воробьева, Д.М. Покрытие в беспроводных сенсорных сетях: анализ достижений и перспективные направления исследований / Д.М. Воробьева, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2020. – Т. 8, № 3. – С. 55-62.