

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

Воробьева Дарья Михайловна

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

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук , профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ.	12
1.1 Сети связи, структура их построения	12
1.2 Представление современных услуг связи как информационной системы	14
1.3 Программно-конфигурируемые сети связи (SDN).....	16
1.3.1 Архитектура программно-конфигурируемой сети	22
1.3.2 Протокол OpenFlow	24
1.4 Задачи выбора структуры информационной системы.....	25
1.5 Выводы к главе 1	28
ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ.....	30
2.1 Анализ особенностей сети Интернета вещей	30
2.2 Классификация услуг Интернета вещей	32
2.2.1 Услуги интернета вещей как информационная система	38
2.3 Кластеризация в сетях Интернета вещей	41
2.3.1 Архитектура кластерной беспроводной сенсорной сети	42
2.3.2 Алгоритмы кластеризации.....	43
2.4 Модель сети интернета вещей с мультимодальным распределением узлов и метод применения подвижных головных узлов для сбора данных	48
2.4.1 Модель сети с подвижными узлами	50
2.4.2 Постановка задачи	55
2.4.3 Метод выбора параметров движения головных узлов	58
2.4.4 Эффективность метода.....	67
2.5 Выводы к главе 2	69
ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ	71
3.1 Анализ возможностей SDN в части выбора структуры обмена данными.....	71

3.2 Модели облачных и туманных вычислений в SDN	72
3.3 Кластеризация в сетях туманных вычислений	74
3.4 Анализ методов кластеризации в сетях туманных вычислений	76
3.4.1 Архитектура туманных вычислений	79
3.4.2 Кластеризации в сетях туманных вычислений	80
3.4.3 Метод оптимизации туманных кластеров	84
3.4.4 Эффективность метода оптимизации туманных кластеров	90
3.5 Выводы к главе 3	91
ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦСВЯЗИ	93
4.1 Услуги видеоконференцсвязи, показатели качества	95
4.1.1 Программные решения для видеоконференцсвязи	96
4.1.2 Программно-аппаратные решения для видеоконференцсвязи	102
4.2 Голографическая связь, видеоконференцсвязь, требования к ресурсам	103
4.3 Метод выбора структуры сети голографических услуг	110
4.3.1 Выбор структуры сети	112
4.3.2 Эффективность метода	122
4.4 Выводы к главе 4	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	134
ПРИЛОЖЕНИЕ	149

ВВЕДЕНИЕ

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-Т) и спецификациями консорциума 3GPP (Third Generation Partnership Project), 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 1 мс для сервисов с критическими требованиями к задержке (URLLC) [1]. 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, позволяющие увеличить число обслуживаемых 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: А.Е. Кучерявый, А.С. Мутханна, Р.В. Киричек, А.Н.Волков, М.А. Маколкина, А.И. Парамонов, А.Б.Гольдштейн, С.С.Владимиров, 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ

1.1 Сети связи, структура их построения

От первых телеграфных линий и аналоговых телефонных станций до современных цифровых платформ — таков путь эволюции сетей связи. Сегодня каналы для передачи данных — это сложные интеллектуальные системы, которые постепенно уходят в «облака». Сетевые функции перестают зависеть от «железа» (маршрутизаторов и серверов) и становятся программными. Сеть связи превращается в гибкую цифровую среду, где роль программного обеспечения (ПО) сравнялась с ролью оборудования.

Любая сеть связи независимо от ее масштаба и назначения строится из трех базовых компонентов:

- Линии передачи — физическая среда, обеспечивающая распространение сигналов (медные кабели, оптическое волокно, радиоканалы).
- Узлы коммутации — оборудование, осуществляющее маршрутизацию и коммутацию потоков данных (маршрутизаторы, коммутаторы, АТС).
- Оконечное оборудование — абонентские устройства, инициирующие и принимающие передачу (компьютеры, телефоны, серверы, датчики).

Топология сети определяет схему соединения узлов и характер физических и логических связей между ними. Коммутация определяет способ установления соединения и передачи данных между абонентами.

В реальных телекоммуникационных системах наблюдается комбинирование различных топологических решений: сети доступа строятся по принципу «звезды», тогда как на транспортном уровне преобладают кольцевые и смешанные структуры.

Они также имеют многоуровневую организацию, что позволяет эффективно управлять трафиком и ресурсами.

Сети доступа представляют собой нижний уровень иерархии, обеспечивающий физическое подключение абонентского оборудования к инфраструктуре оператора связи [2]. К сетям доступа относятся: медные телефонные линии (xDSL), волоконно-оптические линии доступа (FTTx), сети радиодоступа (базовые станции сотовой связи, Wi-Fi), спутниковые терминалы. Основная функция сетей доступа — агрегация трафика от абонентов и передача его на вышестоящий транспортный уровень.

Транспортный уровень выполняет функцию магистральной передачи больших объемов данных между территориально распределенными узлами. Для построения транспортных сетей применяются следующие технологии:

- PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) — плезиохронная цифровая иерархия;
- SDH (Synchronous Digital Hierarchy) — синхронная цифровая иерархия;
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) — плотное волновое мультиплексирование;
- OTN (Optical Transport Network) — оптические транспортные сети;
- Ethernet (10G, 40G, 100G, 400G).

Указанные технологии обеспечивают эффективное уплотнение каналов и передачу трафика на большие расстояния с высоким уровнем надежности.

Над физической инфраструктурой надстраиваются системы управления, традиционно разделяемые на два класса:

- OSS (Operations Support Systems) - управление сетью (мониторинг оборудования, сбор статистики, управление отказами).
- BSS (Business Support Systems) - поддержка бизнес-процессов (биллинг, обслуживание клиентов, взаиморасчеты).

В новых моделях стираются традиционные границы между системами управления сетью (OSS) и поддержки бизнеса (BSS). Архитектура выстраивается вокруг следующих функциональных уровней [3]:

- Уровень сетевых ресурсов — физическая и виртуализированная инфраструктура, генерирующая первичные данные о своей работе.
- Аналитическая платформа — система сбора и обработки информации о состоянии сети и поведении пользователей на основе технологий Big Data.
- Уровень оркестрации — интеллектуальное ядро, принимающее решения о способах предоставления услуги на основе аналитических данных.
- Уровень клиентского опыта — интерфейсы взаимодействия с пользователем, обеспечивающие персонализированное предоставление сервисов.

Таким образом, современные сети связи эволюционируют от жестких иерархических структур к гибким, программно-определяемым, самообучающимся системам. Сеть перестает быть исключительно транспортной средой для доставки трафика и трансформируется в распределенную информационную платформу, осуществляющую сбор, обработку данных и формирование персонализированных сервисов на их основе. Классические принципы построения (топология, коммутация, иерархия) сохраняются, но дополняются новыми технологическими решениями.

1.2 Представление современных услуг связи как информационной системы

В своевременном мире инфокоммуникационные технологии стали не просто инструментом коммуникации, а фундаментальной инфраструктурой, определяющей развитие экономики, науки и повседневной жизни. 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 датчика Интернета вещей (ИВ) — стоит сложная, многоуровневая система, построенная на принципах, которые разрабатывались десятилетиями [1].

Развитие сетей связи прошло несколько этапов: от первых телеграфных линий и аналоговых телефонных станций до современных цифровых платформ. Основой их построения стала эталонная модель взаимодействия открытых систем (OSI), которая стандартизировала правила взаимодействия между оборудованием разных производителей. Классическая архитектура подразумевает иерархическую структуру, где физические линии (медь, оптика, эфир), узлы коммутации и логические протоколы (такие как TCP/IP) образуют единое целое, обеспечивающее передачу информации с заданным качеством. [4, 5, 6]

Развитие современных сетей связи неразрывно связано с внедрением облачных технологий: от виртуализации отдельных функций (NFV) до полного переноса сетевой логики в облачные среды.

Современные технологии построения сетей связи:

Программно-конфигурируемые сети (SDN) — технология, разделяющая плоскость управления и плоскость передачи данных, что позволяет централизованно управлять потоками трафика через облачные контроллеры. Применение SDN снижает зависимость от вендорного оборудования и упрощает масштабирование сетей [7, 8, 9].

Интернет вещей (ИВ) — миллионы устройств (датчики, счетчики, камеры, бытовая техника) подключаются к сети и обмениваются данными без участия человека. Это требует новых подходов: сеть должна одновременно обслуживать огромное количество устройств, многие из которых работают от батареек и передают данные редко, но регулярно.

Виртуализация сетевых функций (NFV) — замена специализированных аппаратных устройств (брандмауэров, балансировщиков нагрузки) виртуальными экземплярами, запускаемыми на стандартных серверных мощностях. Такой подход, согласно исследованиям ETSI, сокращает капитальные затраты операторов на 30–40% [10, 11].

Облачные архитектуры радиодоступа (Cloud RAN) — децентрализация обработки трафика базовых станций с переносом вычислительных мощностей в дата-центры. Это обеспечивает гибкое распределение нагрузки в сетях 5G и снижает энергопотребление периферийного оборудования [12].

Периферийные (граничные) вычисления (Edge Computing/MEC) — перенос обработки данных на границу сети, приближение вычислительных ресурсов к источникам информации. Данный подход критически важен для приложений, требующих сверхмалых задержек (промышленная автоматизация, автономный транспорт, дополненная реальность) [12].

Таким образом, современное развитие сетей связи характеризуется внедрением технологий 5G, которые предполагают не только рост скорости, но и кардинальное изменение архитектуры с использованием виртуализации сетевых функций (NFV) и программно-конфигурируемых сетей (SDN). Это позволяет операторам гибко управлять ресурсами, быстро разворачивать новые сервисы и предоставлять новые услуги связи.

1.3 Программно-конфигурируемые сети связи (SDN)

Современные телекоммуникационные сети сталкиваются с быстрым ростом числа устройств и объемов данных. Классическая архитектура сети, разработанная в 1960-х, не отвечает новым требованиям. В связи с этим появляются следующие проблемы [9]:

- рост количества пользователей и трафика, приводит к перегрузке сетевых устройств;
- огромное количество протоколов (более 700) и их стеков, число которых с каждым днем только увеличивается;
- устаревают протоколы, особенно протоколы транспортного и сетевого уровней;
- настройка сети с большим количеством узлов требует много времени;
- и другие.

Таким образом, большое количество проблемных факторов ведет к усложнению сетевого оборудования и структуры самих информационных сетей и, как следствие, удорожанию сетевого оборудования. А переход к архитектуре программно-конфигурируемых сетей позволяет перевести сетевые элементы под контроль настраиваемого ПО (контроллера). Идеология SDN позволяет упростить сетевые устройства до предела, сделать их «слабыми», а значит, и дешевыми.

Программно-конфигурируемые сети (SDN от англ. Software Defined Networks) – это технология построения архитектуры компьютерных сетей, в основе которой лежит перенос функций управления (маршрутизаторов, коммутаторов) в отдельные программные приложения, которые функционируют на отдельном сервере. Таким образом, производится физическое разделение уровней управления и передачи данных.

В основе концепции SDN лежит открытый стандарт OpenFlow — стандарт протокола взаимодействия контроллера сети (устройства управления) и коммутаторов сети. В 2011 г. был сформирован консорциум Open Networking Foundation (ONF) в целях развития технологий SDN и протокола OpenFlow.

Фонд открытых сетевых технологий (с англ., ONF - Open Networking Foundation) – одна из первых некоммерческих организаций, целями которой было продвижение и стандартизация принципиально нового подхода к передаче данных.

Согласно ONF программно-конфигурируемых сеть [13]: *«Динамичная, управляемая и адаптируемая сетевая архитектура, в которой разделены уровни управления сетью и передачи данных, что позволяет обеспечить программное управление сетью и абстрагирование/изоляция (уровня) сетевой инфраструктуры от (уровня) приложений и сетевых услуг/сервисов».*

Рабочая группа по инженерным задачам Интернет (с англ., IETF — Internet Engeneering Task Force), дает следующее определение в RFC 7426 [14]: Программно-конфигурируемая сеть: *«Подход к построению сетей, обеспечивающий прямое управление ресурсами и сетями, а также их распределение за счет добавления собственных средств обработки, администрирования и программного управления, посредством открытых сетевых и программных интерфейсов и абстрагирования от уровня сети».*

ONF определяет OpenFlow как интерфейс между двумя уровнями и благодаря протоколу, осуществляется перенос данных с одного уровня на другой. IETF предлагает свой элемент архитектуры сети SDN – PCE (Path Computation Element), задача которого вычислять маршруты LSP (Label Switch Path). Элемент может быть реализован как роутер, часть OSS-системы или как виртуальный элемент, поднятый в облачной среде. В целом принцип работы подхода IETF выглядит так: сетевой элемент при прокладке маршрута обращается к PCE, тот, зная всю сетевую топологию и статус сети, вычисляет оптимальный маршрут. Затем PCE возвращает узлу данные для LSP, которые передаются по сети с помощью сигнального протокола [9, 11].

В тоже время Международный союз электросвязи (с англ., ITU - International Telecommunication Union): определяет программно-конфигурируемых сети [15]: *«SDN технология построения сетей, которая позволяет реализовать централизованный, программируемый уровень управления и изоляцию (абстракцию) уровня данных, при этом уровни управления и данных разделены, благодаря чему*

операторы сетей связи могут напрямую управлять своими виртуальными ресурсами и сетями».

В настоящее время исследованиями в области программно-конфигурируемых сетей (SDN) в Международном союзе электросвязи (МСЭ-Т) занимаются две ключевые Исследовательские комиссии (ИК): ИК 13 и ИК 11.

ИК 13 («Архитектуры и функциональные требования к SDN, ИИ в сетях связи») курирует вопросы SDN через свои рабочие группы. В частности, Рабочая группа 3/13 «SDN и сети будущего» действует в рамках исследовательских вопросов 11 и 14:

- ИВ 11 — Развитие сетевых технологий и услуг, ориентированных на пользователя, и взаимодействие с перспективными сетями, включая SDN;
- ИВ 14 — Сети SDN и функционирование перспективных сетей с учетом оказываемых услуг.

Кроме того, прикладные аспекты SDN (QoS, безопасность, мобильность) в рамках ИК 13 также рассматриваются Рабочей группой 2/13 «Облачные вычисления и основные возможности».

ИК 11 отвечает за разработку эталонных архитектур сигнализации SDN, требований к сигнализации и протоколов SDN (включая протоколы взаимодействия), а также за тестирование на соответствие и взаимодействие.

Дополнительный интерес к концепции SDN проявляют ИК 15 (транспорт в SDN) [7] и ИК 17 (безопасность в SDN).

На данный момент, основные рекомендации исследовательских групп:

- Y.3300 «Framework of software-defined networking» - Структура Программируемых сетей;
- Y.3301 «Functional requirements of software-defined networking»;
- Y.3302 «Functional architecture of software-defined networking»;

- Y.3320 «Requirements for applying formal methods to software-defined networking»;
- Y.3321 «Requirements and capability framework for NICE implementation making use of software-defined networking technologies»;
- Y.3011 «Framework of network virtualization for future networks» - структура виртуализации сетевых функций для сетей будущего;
- Y.3100 «Terms and definitions for IMT-2020 network» - Термины и определения для сетей 5G/IMT-2020;
- Y.3111 «IMT-2020 Network Management Framework» - Структура управления сетью IMT-2020;
- Y.3110 «IMT-2020 Network Management Requirements» - Требования к управлению сетью IMT-2020;
- Y.3100-series Supplement 44, «Standardization and open source activities related to network softwarization of IMT-2020»;
- Q.3745 «QoS management protocol for time constraint applications over SDN» - Протокол управления QoS для приложений поверх SDN, требовательных ко времени;
- Q.4061 «Framework of SDN controller testing» – Структура тестирования контроллера SDN;
- Q.3963 «The compatibility testing of SDN-based equipment using OpenFlow protocol» - Тестирование на совместимость оборудования SDN использующих протокол OpenFlow;
- и другие.

SDN применяются в коммутации, виртуализации облачных приложений и средств безопасности сетевых решений. Чаще всего программно-конфигурируемые сети применяются в следующих местах:

- в сетях центров обработки данных (ЦОД);
- облачные технологии;
- сети провайдеров;
- корпоративные сети;
- локальные сети (домашние);
- средства обеспечения безопасности.

Основные преимущества внедрения программно-конфигурируемых сетей в компаниях со сложной ИТ-инфраструктурой:

- снижение стоимости эксплуатации компьютерных сетей и, как следствие, увеличение прибыли за счет сокращения расходов на управление;
- повышение производительности: с коммутаторов снимаются нагрузки по обработке плоскости управления. Программно-конфигурируемая сеть позволяет этим устройствам направить все свои ресурсы на ускорение перемещения трафика;
- ускорение реализации и тестирования новых сервисов: программные средства SDN позволяют администраторам добавлять новые функции к уже имеющейся сетевой архитектуре;
- упрощение процесса администрирования, так как на централизованном контроллере SDN системный администратор может наблюдать сеть в едином представлении, что способствует повышению удобства управления, обеспечению безопасности и выполнению других задач;
- повышение безопасности: SDN предоставляет возможность администратору четко видеть все потоки трафика, поэтому он будет гораздо легче замечать вторжения, определять приоритеты различных типов трафика, разрабатывать правила реагирования сети при заторах и проблемах с оборудованием;

— применение облачных технологий: в облаках данные и приложения размещены на компьютерах, которые взаимодействуют по сети, и данная технология способна дать требуемый облакам уровень «интеллектуальности» сетей.

1.3.1 Архитектура программно-конфигурируемой сети

Существуют две независимые модели развития архитектуры SDN [9]. Одна из них продвигается консорциумом ONF, другая – IETF. Трехуровневая модель SDN консорциума ONF представлена на рис. 1.1.

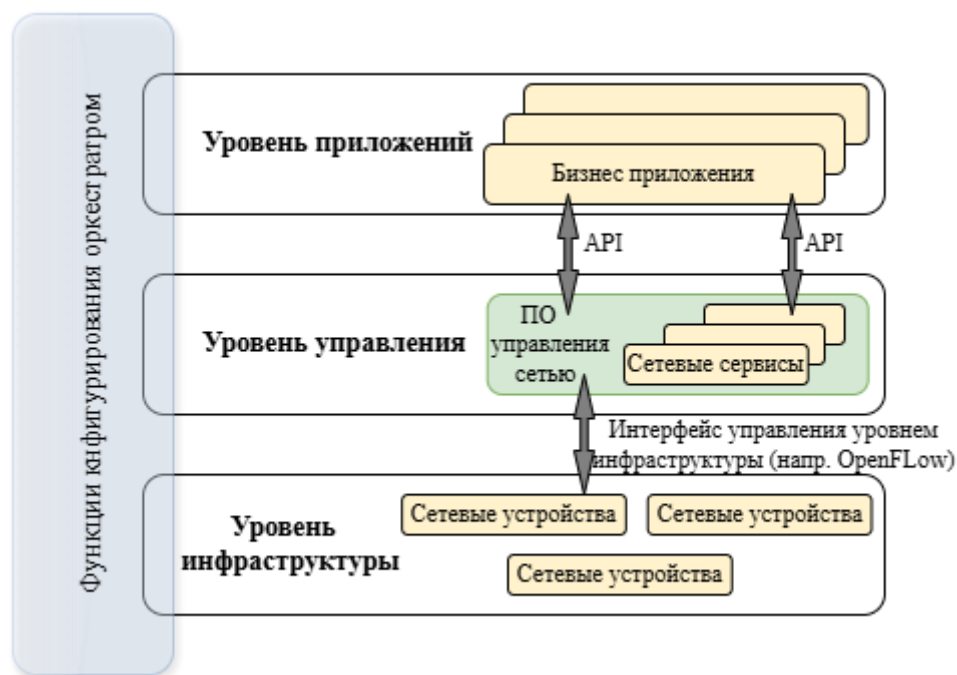


Рисунок 1.1 - Трехуровневая модель SDN консорциума ONF

Жесткое разделение уровней управления и передачи данных, связь между ними через открытые API (например, OpenFlow). Это дает централизацию, программируемость и гибкость.

— Уровень инфраструктуры (Data Plane). Состоит из физических и виртуальных сетевых устройств (коммутаторы, маршрутизаторы). Задача только пересылать пакеты по инструкциям сверху.

- Уровень управления (Control Plane). Состоит из программных контроллеров (SDN-контроллер). «Мозг» сети. Централизованно управляет всеми устройствами, обеспечивает форвардинг трафика на инфраструктурном уровне с помощью открытого интерфейса OpenFlow, постоянно осуществляет мониторинг всей сети и принимает решения о маршрутизации (рис.1.2).



Рисунок 1.2 - Управление сетью в традиционной сети и сети SDN

- Уровень приложений (Application Plane). Совокупность бизнес-приложений и сетевых сервисов (безопасность, балансировка и т.д.). Которые напрямую взаимодействуют с SDN-контроллером, запрашивая необходимые ресурсы посредством API, решает высокоуровневые задачи по управлению сетью. Через API «объясняют» контроллеру, что нужно сети (например, «выдели виртуальную сеть»). Отделены от оборудования.

— Функции конфигурирования оркестратором. Вертикальная сквозная в модели представлена не как уровень архитектуры SDN, а как среда определения и контроля уровней управления и инфраструктуры.

1.3.2 Протокол OpenFlow

Суть концепции программно-конфигурируемых сетей заключается в выносе управления на отдельное устройство. Протокол OpenFlow – это один из множества инструментов реализации разделения двух плоскостей (Control Plane и Data Plane) [7,8].

OpenFlow – протокол взаимодействия между сетевыми устройствами (OpenFlow-коммутаторами) программно-конфигурируемой сети SDN и централизованным контроллером.

На данный момент развития протокола OpenFlow он имеет уже несколько версий. Последняя выпущенная консорциумом ONF версия – это версия 1.5.1. Первая версия протокола является широко используемой, однако имеет проблемы с масштабируемостью и большое количество ограничений. Версии 1.1 и 1.2 считаются переходными, и практически никто из производителей не реализует их поддержку. Наиболее перспективной считается версия 1.3, отличается своей многофункциональной поддержкой по сравнению со своими предшественниками (включена поддержка MPLS-тэгов, счетчиков, Provider Backbone Bridging (PBB) и еще некоторых полезных функций OpenFlow 1.4 уже реализует возможность мониторинга и конфигурирования оптических портов коммутатора (частота, мощность излучения). В версию OpenFlow 1.5 добавили еще больше функций (например, выходные Таблицы потоков и другое).

Протокол является полностью открытым, однако его разработки контролируются закрытой группой, состоящей примерно из 150 компаний,

формирующих ONF. Разработки ведутся в скрытом режиме, и их результат виден только после публикации новой версии в качестве стандарта.

На сегодняшний день протокол OpenFlow поддерживается большинством производителей, выпускающих сетевое оборудование. В сфере телекоммуникаций представлены коммутаторы с функцией OpenFlow от таких компаний, как Cisco, Juniper, Brocade, Huawei и ряда других. OpenFlow стал первой широко признанной и активно эволюционирующей реализацией концепции SDN, находя применение как в проводных, так и в беспроводных сетях.

1.4 Задачи выбора структуры информационной системы

Можно рассматривать физическую и логическую структуры информационной системы. Физическая структура в большинстве случаев определяется географическими и демографическими особенностями, в то время как логическая структура может динамически изменяться, в зависимости от текущих потребностей пользователей. Возможность управления логической структурой в SDN в совокупности с облачными технологиями позволяют весьма эффективно управлять трафиком и услугами, например, за счет миграции сервисов или микросервисов. Такая возможность позволяет динамически перераспределять не только трафик, но функциональность, необходимую для предоставления услуг. Такая возможность позволяет существенно повысить показатели качества, за счет «приближения» точки предоставления услуги к пользователю и за счет разгрузки линий связи.

Таким образом, рассматривая физическую структуру, следует говорить о задачах выбора структуры сети связи, а именно линий связи и требований к их пропускной способности, а также платформ предоставления услуг их вычислительных возможностях с географической привязкой к потенциальным

пользователям услуг. В отличие от традиционных сетей, в данной задаче должна учитываться возможность динамического управления трафиком и распределения (миграции) сервисов. Данная структура должна содержать элементы, обеспечивающие эти отличия.

Потенциально, возможность миграции сервисов предполагает наличие вычислительных средств (облачных платформ), на которые может осуществляться миграция. Это увеличивает количество таких платформ, однако, при этом снижаются требования к производительности каждой из них, а также, потенциально, повышается надежность сети (предоставления услуг) и снижается трафик на линии связи. Иначе говоря, миграция сервисов, позволяет решать задачу повышения качества, за счет увеличения числа облачных платформ (объема вычислительных ресурсов) при неизменной или даже со снижением требований к пропускной способности сети. Такая возможность имеет особое значение для новых услуг с повышенными требованиями к величине задержки доставки данных (услуги телеприсутствия, виртуальная и дополненная реальности, голографическая связь).

Рассматривая логическую структуру следует говорить о задачах динамического управления трафиком и перераспределения (миграции) сервисов в сети. Эти задачи должны эффективно управлять трафиком руководствуясь текущим состоянием сети и спросом на услуги, т.е. трафиком пользователей. Следует заметить, что динамическая миграция сервисов может быть весьма эффективным инструментом повышения эффективности использования ресурсов сети. Например, в сети, обслуживающей значительную географическую территорию, такую как Российская Федерация, расположенная на 11 часовых поясах, следует ожидать периодических изменений использования различных услуг в различных географических областях из-за естественного изменения активности пользователей. Данный пример является примером прогнозирования трафика. В задачах управления трафиком и миграцией

сервисов методы прогнозирования имеют первостепенное значение, поскольку эффективность решений, в большинстве случаев определяется точностью построения прогнозов. Также можно говорить и о задаче управления трафиком земных станций связи с космическими аппаратами в перспективной гибридной сети, включающей низкоорбитальную спутниковую компоненту.

Упомянутый выше прогноз – это прогноз периодических изменений трафика, наряду с такими изменениями в современных сетях связи существует множество факторов, приводящих к формированию случайных процессов, поддающихся достаточно эффективному прогнозированию. Рассмотренные выше факторы позволяют использовать возможность динамического управления логической структурой сети для повышения эффективности использования ее ресурсов и качества предоставления услуг.

Таким образом, к задачам выбора структуры информационной системы следует отнести:

Задачи построения физической сети, такие как:

- распределение элементов сети связи (узлов доступа, коммутаторов, контроллеров, облачных платформ) с учетом географических и демографических особенностей;
- построение структуры линий связи между элементами сети с учетом требований к пропускной способности и структурной надежности.

Задачи построения логической сети, такие как:

- анализ трафика пользователей и построение прогнозов его изменения;
- выбор эффективной структуры распределения трафика (маршрутов) с учетом возможности перераспределения (миграции) сервисов;
- эффективное планирование предоставления современных услуг с учетом возможностей SDN.

1.5 Выводы к главе 1

Проведенный в первой главе анализ показал, что классическая архитектура сетей не удовлетворяет жестким требованиям, предъявляемым к современным инфокоммуникационным системам.

Современный этап развития телекоммуникаций характеризуется активным внедрением технологий сетей пятого (5G) и последующих поколений. Это предполагает не только рост скоростей передачи данных, но и кардинальную трансформацию сетевой архитектуры на основе концепций виртуализации сетевых функций (NFV) и программно-конфигурируемых сетей (SDN), позволяющих операторам гибко управлять ресурсами и оперативно разворачивать новые высокотехнологичные сервисы.

Установлено, что миграция сервисов обеспечивает повышение качества обслуживания (QoS) за счет масштабирования облачных платформ и наращивания объема вычислительных ресурсов без пропорционального роста требований к пропускной способности магистральной сети. Данный подход важен для услуг с ультрамалыми задержками доставки данных, таких как телеприсутствие, виртуальная и дополненная реальность (VR/AR), а также голографическая видеоконференцсвязь.

Таким образом, 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.

Вышеизложенное обуславливает необходимость решения задач, связанных с разработкой новых методов, алгоритмов и моделей построения сетевой инфраструктуры при предоставлении современных услуг связи.

ГЛАВА 2. МОДЕЛЬ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

2.1 Анализ особенностей сети Интернета вещей

За время, прошедшее с момента выхода первой рекомендации ITU-T [1] с обзором Интернета вещей, по настоящее время — это понятие (Internet of Things - IoT) прочно укрепилось в сознании специалистов в области телекоммуникаций. Вопросам развития ИВ посвящено множество работ, требованиям ИВ уделяется повышенное внимание при разработке новых технологий и стандартов телекоммуникаций. Сегодня уже существует весьма существенное количество автоматических устройств, подключенных к сетям связи с целью сбора данных и организации различных систем мониторинга и управления.

В рекомендациях МСЭ определено, что Интернет вещей (ИВ): *«Глобальная инфраструктура информационного общества, обеспечивающая возможность предоставления расширенных услуг благодаря взаимодействию (физических и виртуальных) вещей на основе существующих и развивающихся interoperable информационных и коммуникационных технологий»* [16].

Концепция Интернета вещей – это передачи данных между физическими объектами («вещами»), оснащенными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. Под вещами (things) понимается физический или виртуальный объект, который имеет идентификатор и подключен к сети. Вещь, которая не имеет никаких возможностей кроме коммуникации с другими вещами, называется устройством (device).

Сети ИВ могут строиться различным образом, как и в части использования различных технологий для организации радиоканалов, так и в части использования различных протоколов сетевого уровня для организации логической структуры сети и управления ею. И отличаются от традиционных сетей автономным

взаимодействием машин (M2M) без участия человека, массовым количеством маломощных устройств, необходимостью высокой энергоэффективности и обработкой данных преимущественно в реальном времени. ИВ ориентирован на сбор данных с датчиков и автоматизацию, а не на передачу контента пользователю.

Определим некоторые особенности сети Интернета вещей:

- Включает большое количество устройств.
- Гетерогенность. IoT-устройства имеют различные формы и функции. Они могут использовать разные протоколы связи, работать на разных источниках питания и служить разным целям.
- Генерирует большое количество типов данных, включая текст, изображения, аудио и показания датчиков.
- Чувствительность к задержке, т.к. многие приложения работают в режиме реального времени или с низкой задержкой.
- Энергоэффективность. Многие вещи работают на питании от батарей или других ограниченных источниках энергии.
- Безопасность. Из-за множества устройств может быть нарушена их уязвимостей на разных уровнях.
- Архитектура сети. Обработка данных происходит ближе к источнику данных, а не в централизованном дата-центра.

На сегодняшний день нам уже трудно представить повседневную жизнь без множества умных устройств: от фитнес-браслетов и умных колонок до систем умного дома и промышленных датчиков, которые взаимодействуют друг с другом. ИВ представляет собой сложную глобальную инфраструктуру, в корне отличающуюся от традиционных сетей связи. Главным отличием является полное взаимодействие устройств (M2M), которые предъявляют принципиально новые требования к сетевым технологиям.

2.2 Классификация услуг Интернета вещей

Последнее десятилетие характеризуется стремительным ростом числа устройств ИВ. Согласно данным мировых статистических порталов (IoT Analytics, Statista, Ericsson) по итогам 2025 года общее число активных IoT-устройств в мире достигло 21,1 млрд, что на 13% превышает показатель 2024 года и к 2026 году общее количество подключенных устройств в мире превысит 23-25 миллиардов (рис. 2.1) [17,18,19].

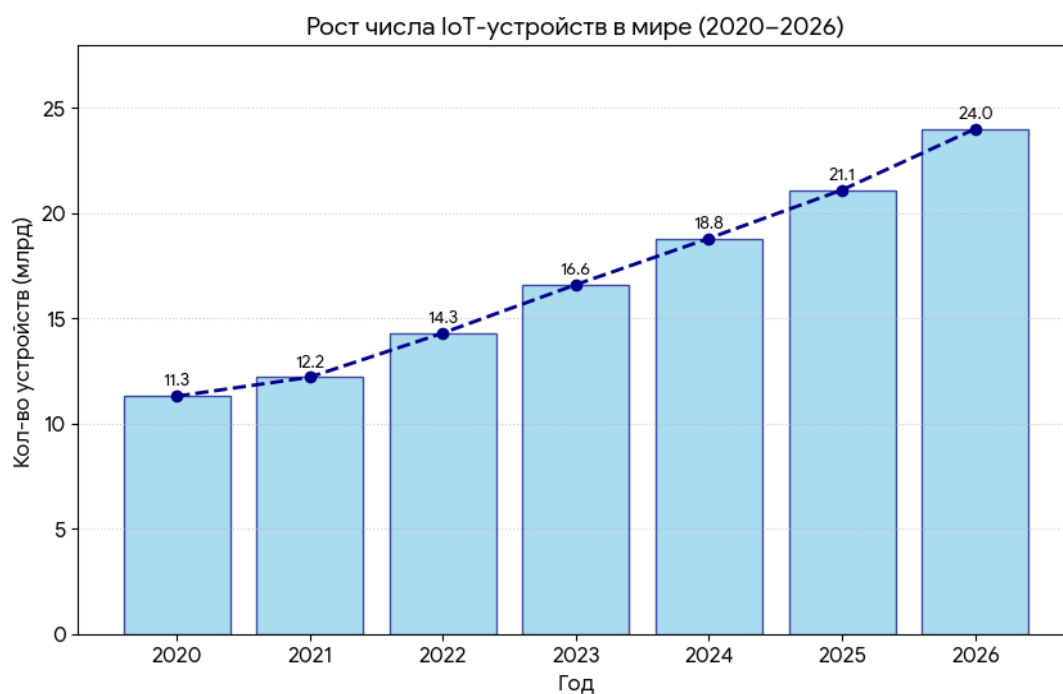


Рисунок 2.1 - Рост числа IoT- устройств в мире (2020-2026)

Рост объясняется действием нескольких ключевых факторов, среди которых прежде всего применение технологий искусственного интеллекта (требующих больших массивов данных с датчиков), а также активное внедрение IoT-решений в промышленности, энергетике и проектах «умных» городов. Таким образом, сектор

ИВ не только демонстрирует устойчивую положительную динамику, но и остается одним из наиболее быстрорастущих сегментов цифровой экономики, что и обуславливает высокую актуальность исследований в данной области.

По применению ИВ можно выделить следующие крупные области: потребительский и промышленный ИВ, «умный» город, торговля и коммерция, телемедицина, «умное» сельское хозяйство. Под потребительским ИВ принято понимать различные системы «умный дом» и бытовые приборы, и устройства, которые подключены к сетям связи, например, чайник, холодильник, стиральная машина, робот-пылесос и др. [20, 21, 22, 23].

Рынок этой техники активно растет: по данным на 2025 год, продажи «умных» устройств в России выросли в среднем на 85% по сравнению с предыдущим годом [23].

Современные бытовые приборы и системы автоматизации уже вышли за рамки простого дистанционного управления и начинают играть роль интеллектуальных помощников. Примеры таких современных устройств представила на выставке CES 2026 компания Samsung: экосистема «Компаньон для дома». В ее основе лежат устройства, способные «видеть, слышать и предлагать», т.е. управление домом с помощью ИИ и голоса [21]:

- Холодильник Bespoke AI Family Hub с интеграцией Google Gemini может распознавать продукты, которые вы кладете или достаете, управлять списком покупок и предлагать рецепты на основе того, что есть внутри.
- Робот-пылесос Bespoke AI Jet Bot Steam Ultra использует ИИ для распознавания предметов и даже жидкостей, объезжая провода или убирая пятна в зависимости от настроек.

Сценарии автоматизации для комфорта и безопасности описывают разработчики из SberDevices, «умный дом» может решать множество рутинных задач [22]:

- Умное утро: чайник и toaster автоматически включаются через 10–15 минут после пробуждения, а свет имитирует рассвет.
- Безопасность: при обнаружении протечки система не только перекроет воду, но и включит сигнал тревоги через умные колонки. Специальные сценарии имитируют присутствие хозяев в доме, чтобы отпугнуть грабителей.

По данным исследования ученых из Университета Хохай и Иллинойского технологического института, использование IoT-датчиков и алгоритмов машинного обучения позволяет создать систему управления энергопотоками в доме [23]. Такой «умный дом» подстраивает работу приборов (стиральной машины, водонагревателя) под моменты, когда есть избыток «зеленой» энергии от солнца или ветра, и способен сократить расходы на электричество более чем на 60%.

Промышленный Интернет вещей предполагает более закрытые и защищенные системы, которые в круглосуточном режиме администрируются инженерно-техническим персоналом, это могут быть системы в сфере энергетики, нефте- и газодобывающей промышленности, автоматизация и контроль процессов на производстве и т.д. [24, 25, 26]. В России этот сегмент, по оценкам Telecom Daily, в 2026 году может достичь объема почти в 189 млрд рублей. [24].

В России активно внедряются комплексные IoT-решения для управления городским хозяйством. Лидером в этой сфере выступает госкорпорация «Росатом» с экосистемой «Умный город» [26]. В 2025 году Росатом реализовал порядка 40 проектов в 17 городах России. В Обнинске внедрение технологий искусственного интеллекта позволило автоматизировать до 80% диспетчерских операций и сократить время реагирования на инциденты в 6 раз (с 6 часов до 1 часа). Проекты 2025 года

позволили разгрузить улично-дорожную сеть. Расчеты показывают, что при оборудовании 1500 мест экономический эффект позволяет окупить затраты менее чем за два года и генерировать более 100 млн рублей в городской бюджет.

Под «умным городом» обычно понимают повышение эффективности управления городскими системами и качества жизни людей, за счет применения инновационных технологий и современных инженерных решений. Для роста конкурентоспособности крупных российских городов в сравнении с зарубежными предполагается создание безопасной и комфортной среды для жителей, а также формирование эффективной системы управления городскими службами. В связи с этим выделяют следующие основные направления «умного города»:

- Городское управление: вовлечение граждан в решение вопросов развития города, а также в обработку их жалоб и обращений. Планируется внедрение цифровых платформ управления на базе искусственного интеллекта.
- Энергетика: внедрение умных счетчиков, оптимизация энергозатрат и экономия энергоресурсов.
- Водоснабжение: оснащение датчиками утечек, мониторинг сетей, дистанционное снятие показаний со счетчиков и т.д.
- Теплоснабжение: внедрение системы мониторинга тепловых сетей, автоматизированный учет тепловой энергии, комплексное удаленное управление процессами теплоснабжения и т.д.
- Строительство: требуется комплексный подход к ремонту и обслуживанию зданий и сооружений с применением инновационных систем планирования работ и анализа заявок (т.к. в крупных городах много старой постройки).
- Безопасность: повышение общественной безопасности за счет внедрения интеллектуальных систем — видеонаблюдения, информирования граждан о

чрезвычайных происшествиях и авариях, контроля противопожарных систем на крупных общественных объектах и т.д.

- Транспорт: включает создание умной транспортной инфраструктуры: повсеместное внедрение устройств фото- и видеофиксации нарушений ПДД (не только в загруженных и опасных местах), систему мониторинга дорожного полотна для оптимального планирования ремонтов, интеллектуальное управление общественным транспортом (отслеживание маршрутов и загруженности, информирование жителей о времени прибытия, свободных местах, направлении движения, а также о происшествиях и мерах по их устранению). Кроме того, сюда относится увеличение количества парковок и улучшение их администрирования.
- Экология: существует множество проектов с применением дронов и искусственного интеллекта, позволяющих контролировать состояние окружающей среды в разных районах города: загазованность, пробы воды в реках, озерах, прудах, фонтанах, качество воздуха, наличие вредных примесей и т.д.
- Отходы: вывоз и переработка мусора (актуально для крупных городов). Необходимо внедрять новые системы вывоза и утилизации отходов, контролировать и предотвращать появление нелегальных свалок, обеспечивать своевременный вывоз мусора с общественных территорий.

Эти задачи зачастую объединяют в группы, так активно создаются приложения мониторинга в сфере ЖКХ. Такие системы предусматривают сбор данных с индивидуальных приборов учета электроэнергии, воды, газа и других ресурсов, а также наблюдение за техническим состоянием зданий: исправностью лифтов, работоспособностью противопожарных систем, отсутствием протечек, соблюдением температурного режима в помещениях и уровнем шума. Дополнительно сюда

включают организацию электронных собраний собственников многоквартирных домов и проведение голосований по хозяйственным вопросам. Удобным дополнением выступает автоматизированный контроль за исполнением заявок жильцов и устранением выявленных неисправностей [27].

В сфере торговли услуги ИВ дают существенные преимущества компаниям и расширяют их возможности по персонализации работы с клиентами, организации оптимизированных цепочек поставок, автоматизации процессов управления запасами и т.д. [28]. Одним из наглядных примеров использования ИВ в торговле являются «умные» полки, которые позволяют отслеживать запасы товаров, автоматически обновлять информацию о их наличии, и, соответственно, заказывать новую поставку товаров через интерфейс поставщиков. Также облегчает процесс инвентаризации и отслеживания местоположения товаров на складе, условий хранения, внедрение датчиков в ряд продуктов.

Следующий класс услуг связан с использованием ИВ в медицине, что привело к формированию отдельного направления — телемедицины. Сегодня многие крупные компании, включая транспортные и промышленные предприятия, регулярно отслеживают состояние здоровья своих сотрудников. Регулярный контроль состояния здоровья сотрудников предприятий - это постоянный мониторинг их самочувствия, который иногда незаметен для них самих, но с их согласия. Для этого применяются бесконтактные термометры для измерения температуры тела, а также магнитокардиографы (МКГ) и магнитоэнцефалографы (МЭГ), которые фиксируют электромагнитные сигналы, возникающие при мышечных сокращениях. Эти и другие датчики позволяют регулярно отслеживать работу организма. В случае обнаружения какого-либо отклонения, информация, поступающая с ЦОД, незамедлительно передается медицинским работникам для принятия решение: об оказании помощи или об отстранении человека от служебных обязанностей [29].

В сельском хозяйстве услуги ИВ незаменимы. ИВ позволяет удаленно контролировать большие сельско-хозяйственные территории, отслеживать влажность климата, температуру, засушливость почвы и т.д., что позволяет агрономам безошибочно определять сроки посадки, необходимость и объем полива, количество удобрений и др.

Также услуги ИВ можно классифицировать по интерфейсу подключения: интерфейс с низкопотребляющими сетями (ZigBee, 6LoWPAN, RPL, Bluetooth); интерфейс с беспроводной локальной сетью Wireless LAN (Wi-Fi); интерфейс с беспроводной местной сетью (WiMax), интерфейс с сотовой сетью (3G, 4G, 5G), проводной интерфейс (Ethernet).

Следующий способ классификации услуг ИВ по типу используемых устройств. В зависимости от метода связи IoT-устройства делятся на три основные категории:

Проводные подключаются через физический канал (чаще всего Ethernet или USB). Их преимущества — высокая надежность, устойчивость к помехам и высокая скорость передачи данных. Такие решения применяются там, где важны стабильность и минимальные задержки, например, на производственных линиях или в ЦОД.

Беспроводные устройства функционируют по радиоканалу с использованием технологий Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN, а также мобильных сетей 3G, 4G и 5G. Их главное достоинство — гибкость и мобильность. Однако они более чувствительны к помехам и требуют продуманных решений в области энергоснабжения. Примеры таких устройств — домашние датчики движения или умные счетчики в городской среде.

Носимые устройства такие, как фитнес-браслеты, умные часы, умные очки, гарнитуры виртуальной реальности.

2.2.1 Услуги интернета вещей как информационная система

На сегодняшний день разнообразие и количество услуг, реализованных на основе концепции ИВ, поражает воображение самого искушенного пользователя. Сложно назвать хотя бы одну сферу человеческой деятельности, в которой в настоящее время не использовались услуги и приложения ИВ [31].

Если рассматривать услуги ИВ в качестве информационной системы [32], то можно говорить о концепции передачи данных через сеть связи между различными физическими объектами или «вещами», которые оснащены встроенными датчиками и элементами для взаимодействия друг с другом, с человеком, со внешней средой. В данной концепции информационные системы играют важную роль, реализуя процесс сбора, обработки, анализе данных, получаемых через сеть связи с различных устройств ИВ.

Структуру информационной системы ИВ можно представить советующим образом (рис 2.2).

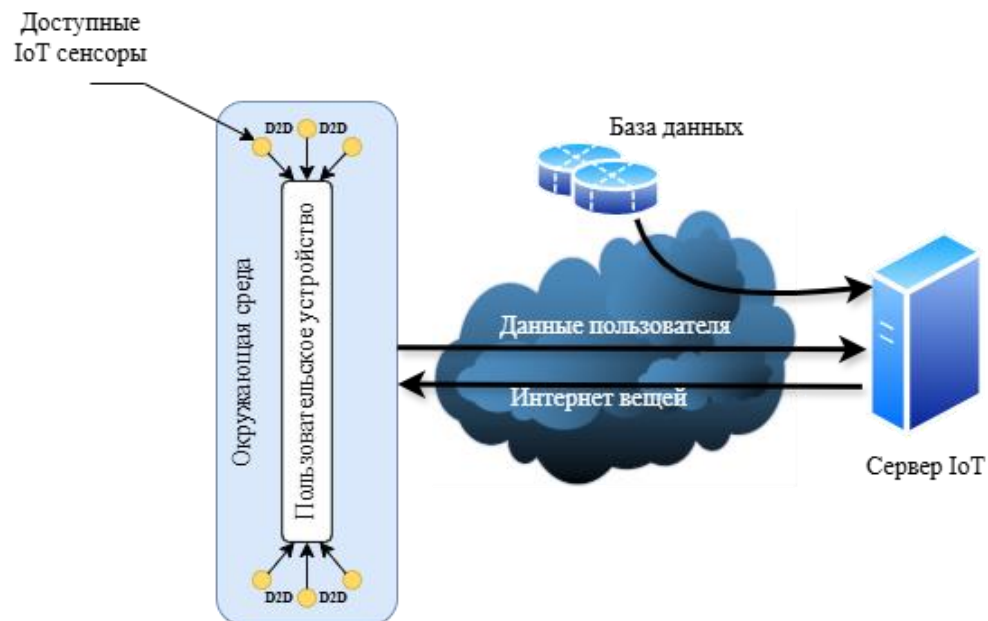


Рисунок 2.2 – Структура информационной системы ИВ

Основными элементами структуры информационной системы ИВ являются устройства, которые представляют собой физические объекты с датчиками (сенсорами) и исполнительными механизмами (актуаторами). Датчики измеряют различные параметры окружающей среды, такие как влажность, температура, свет, координаты и т.д., а актуаторы выполняют команды, которые изменяют состояние физического объекта, например, включают/выключают лампочку.

Следующий значимый элемент — это сеть связи, которая отвечает за своевременную доставку данных в зависимости от особенностей реализации услуги на сервер или в центр обработки. На сегодняшний день существует достаточно большое количество технологий передачи данных как проводных, так и беспроводных, которые участвуют в реализации различных услуг ИВ.

Системы обработки данных отвечают за хранение, анализ и обработку получаемой информации в виде пригодный для восприятия человеком или понятный другому устройству. На сегодняшний день это могут быть как облачные сервисы, так и локальные сервера.

Пользовательский интерфейс обеспечивает взаимодействие с устройствами ИВ, например, голосовые команды или мобильные приложения.

Рассмотренная структура информационной системы ИВ представляет собой модель, включающую четыре взаимосвязанных уровня: устройства с датчиками и актуаторами для сбора данных и воздействия на среду, сети связи для передачи информации, системы обработки и хранения данных (облачные или локальные), а также пользовательские интерфейсы для взаимодействия человека с системой. Эффективность функционирования сети ИВ напрямую зависит от работы каждого из этих компонентов — от точности измерений датчиков до своевременной

доставки данных через сеть и их корректной обработки для последующего представления пользователю.

2.3 Кластеризация в сетях Интернета вещей

За последнее десятилетие концепция ИВ внесла существенные изменения в структуру и организацию услуг в сетях связи. Сама идея ИВ предполагает кардинальные изменения в существующих технологиях и их взаимодействии, направленных на объединение в единую сеть практически всех объектов на планете. Основу ИВ составляют беспроводные сенсорные сети, которые представляют собой самоорганизующиеся сети, состоящие из множества сенсорных узлов, выполняющих многочисленные задачи по мониторингу, отслеживанию, контролю различных процессов, устройств и т.д. [33]. Довольно давно принято называть множество таких узлов «сенсорным полем», и как правило узлы на таком поле распределены случайным образом, поэтому часто его называют «пуассоновским сенсорным полем». Количество узлов, расположенных в рамках одного поля, может варьироваться в значительном диапазоне, так, например, в беспроводных сенсорных сетях, работающих по протоколу ZigBee, число узлов может достигать 64000 [34]. Исходя из такой особенности ИВ вытекает стремление к самоорганизации сети, т.к. построение иерархической сети в 64000 узлов, передающих небольшие объемы информации, не регулярно, но при этом связанных между собой выглядит нецелесообразным. 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} [5]. Таким образом, каждый из узлов такой сети должен иметь возможность работать и как конечный и как транзитный. Однако, беспроводная сенсорная сеть (БСС), которая содержит большое количество узлов, должна быть

структурирована, поскольку передача транзитной информации снижает заряд батареи, узлы, находящиеся в непосредственной близости от шлюза, несут большую нагрузку, что может привести к переполнению буфера и выхода из строя источника питания. С решением поставленной задачи поможет справиться разворачивание кластерных структур при построении БСС и сетей ИВ [34, 35, 36].

При кластеризации головной узел кластера периодически подвергается ротации, что позволяет при использовании различных алгоритмов выбора головного узла снижать общую сумму потребляемой кластером энергии и увеличивать жизненный цикл кластера.

2.3.1 Архитектура кластерной беспроводной сенсорной сети

На рисунке 2.3 представлена архитектура кластерной БСС. Оранжевым цветом выделены узлы, являющиеся головными в кластере, а желтым – члены кластера.

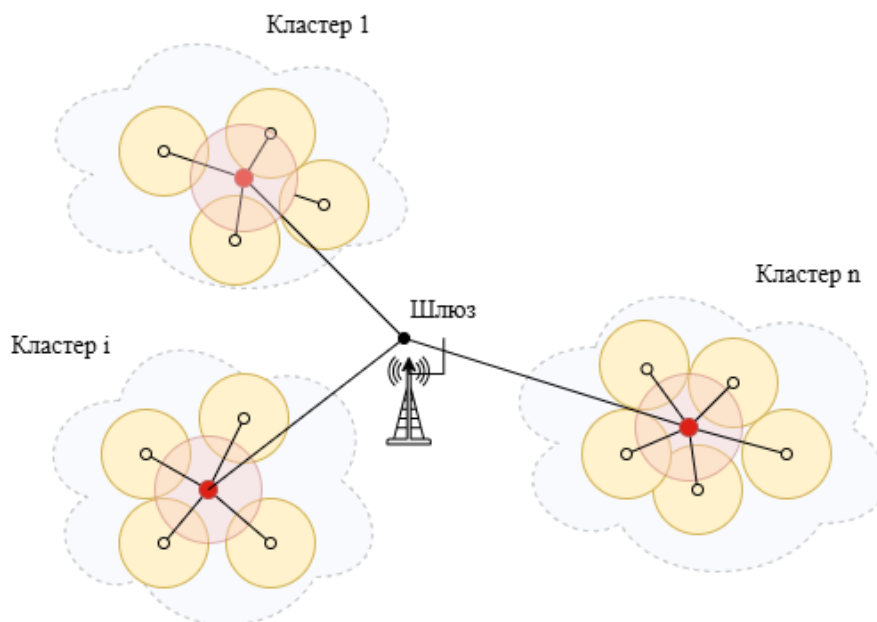


Рисунок 2.3 – Архитектура кластерной БСС

За последнее время состав услуг существенно расширился, и в кластере или зоне обслуживания могут находиться устройства различной мощности, и быть динамичными, т.е. передвигаться из кластера в кластер. Ряд устройств имеют ограниченные возможности, поэтому энергоэффективная маршрутизация играет важную роль в успешном развертывании таких сетей. Алгоритмы кластеризации организуют узлы сети в группы или кластеры, а конкретный назначенный узел, глава кластера, отвечает за свой кластер. Кластеризация в сетях ИВ позволит оптимизировать маршрутизацию и управление топологией за счет делегирования части функций главе кластера.

2.3.2 Алгоритмы кластеризации

В данном разделе представлен обзор различных алгоритмов кластеризации, проанализированы характеристики маршрутизации в различных областях ИВ и предложены подходящие алгоритмы кластеризации для каждой области.

Кластеризация – это разбиение элементов на некоторые группы в зависимости от их схожести. А алгоритмы кластеризации обеспечивают построение групп в соответствии с исходными параметрами.

Алгоритмы кластеризации можно разделить на три основных типа:

— Иерархические:

— Агломеративные (объединительные);

— Разделительные;

— Неиерархические:

— Алгоритмы теории графов;

— Алгоритм k-means;

- Плотностные алгоритмы;
- Нечеткие алгоритмы (нечеткой логики) - позволяют одной точке принадлежать сразу нескольким кластерам с разной степенью вероятности.

Различные алгоритмы кластеризации имеют свои преимущества и недостатки. Для того чтобы получить более эффективное решение, необходимо выбирать алгоритмы кластеризации, которые в наибольшей степени подходят для конкретной задачи [36].

Иерархические алгоритмы используются для группировки объектов в кластеры на основе их сходства. Этот метод применим в ситуациях, когда структура данных неизвестна заранее и требуется определить количество кластеров. Например, агломеративные алгоритмы (Например, метод Уорда (Ward, 1963) — это классический иерархический алгоритм), применяются для слияния нескольких уже имеющихся кластеров в один более крупный кластер. Разделительные алгоритмы делят все объекты на непересекающиеся группы. В каждом кластере должен быть хотя бы один объект, и ни один объект не может находиться в более чем одном кластере. Такой подход чаще всего используется при работе с большими наборами данных [37].

Неиерархические алгоритмы разбивают данные на группы сразу, без создания структуры дерева.

Алгоритм k-means (или метод k-средних), чаще всего используется при работе с большими наборами данных [38]. Исходным параметром для него является заданное пользователем случайное количество кластеров. Работа алгоритма начинается со случайного выбора числа кластеров. Далее алгоритм реализуется на двух шагах: распределение объектов выборки по кластерам; и пересчет центров кластеров.

Процесс продолжается до тех пор, пока центр кластера не перестанет менять свое положение.

GMM (от англ., Gaussian Mixture Model - смесь гауссовских распределений (или модель смеси нормальных распределений). Это вероятностный алгоритм, который предполагает, что данные состоят из нескольких групп, каждая из которых подчиняется нормальному (гауссовскому) распределению (в форме «колокола»). Если K-means просто рисует четкие границы, то GMM может находить кластеры, вытянутые в любые овалы (эллипсоиды) [39].

Неиерархические алгоритмы кластеризации также целесообразно использовать для беспроводных сенсорных сетей (БСС). В БСС часто важно не просто найти группы похожих данных, а продлить срок службы сети за счет энергоэффективности.

LEACH (от англ., Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy - адаптивная иерархия кластеризации с низким энергопотреблением)— этот алгоритм, используемый в беспроводных сенсорных сетях и показывает снижение энергопотребления в 7-8 раз по сравнению со случайным выбором узлов в кластере [40]. Алгоритм LEACH предусматривает случайный выбор сенсорного узла на роль головного в начале функционирования сенсорной сети и направлен на минимизацию энергопотребления сенсорных узлов.

HEED (от англ., Hybrid Energy – Efficient Distribution - гибридная энергоэффективная распределенная кластеризация) - этот алгоритм, используемый в беспроводных сенсорных сетях для того, чтобы продлить время жизни сети за счет равномерного распределения нагрузки между узлами и минимизации энергопотребления [41]. Использует гибридный критерий для выбора головного узла на основе анализа остаточной энергии и расположения близлежащих узлов.

Все эти алгоритмы направлены, в первую очередь, на максимизацию длительности функционирования сенсорных узлов и сети в целом.

К неиерархическим методам кластеризации также относят алгоритмы на основе плотности фрагментов сети (или плотностные методы). Они определяют области концентрации точек, а точки, которые расположены отдаленно, и не попадают в кластеры помечаются как шум. Такие алгоритмы могут определять кластеры произвольной формы, что важно при работе с пространственными данными.

FOREL (от англ., FORmal ELement — формальный элемент) — это классический алгоритм кластеризации, основанный на идее поиска областей наибольшего сгущения объектов и предполагает, что похожие объекты должны группироваться вокруг некоторого «центрального» элемента. Входным параметром является — радиус сферы поиска [42].

BIRCH (от англ., Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies - сбалансированное итеративное сокращение и кластеризация с использованием иерархий) — это мощный алгоритм для работы с огромными объемами данных, когда информации слишком много, чтобы она поместилась в оперативную память [43]. Алгоритм один раз проходит по данным и строит специальное дерево признаков кластеризации (Clustering Feature Tree). Когда дерево построено, применяют любой другой алгоритм, например, ту же агломеративную кластеризацию или k-means.

DBSCAN (от англ., density-based spatial clustering of applications with noise - алгоритм кластеризации, основанный на плотности объектов в пространстве, умеющий выделять шум) - алгоритм основанный на плотности пространственной кластеризация для приложений с шумами [44]. Плотность в этом алгоритме определяется количеством точек и расстояниями между ними. Для алгоритма DBSCAN основными параметрами на входе являются максимальное расстояние между точками и минимальное количество точек, которое может быть в одном кластере.

К числу к известным алгоритмам кластеризации, предназначенных для работы с пространственными данными, также относятся алгоритмы OPTICS и HDBSCAN.

OPTICS (от англ., Ordering points to identify the clustering structure -упорядочение точек для обнаружения кластерной структуры) – это алгоритм нахождения кластеров в пространственных данных на основе плотности [45]. По своей основной идее он похож на DBSCAN, но в отличие от него, алгоритм OPTICS рассматривает также точки, которые являются частью более плотного кластера. Алгоритм OPTICS тоже требует два параметра – максимальное расстояние между точками и число точек, необходимых для образования кластера. Алгоритм OPTICS может быть более сложным, чем DBSCAN, так как он содержит дополнительный шаг – упорядочивание точек по достижимости. Алгоритм OPTICS работает лучше DBSCAN при необходимости анализа кластерной структуры данных на различных масштабах плотности, тогда как DBSCAN хорошо подходит для кластеризации данных с четко определенными плотными областями и шумом.

HDBSCAN (от англ., Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise - иерархическая плотностная пространственная кластеризация приложений с присутствием шума) – это алгоритм кластеризации на основе плотности точек, который строит иерархическую структуру кластеров [46]. Он является расширением алгоритма DBSCAN. Преимуществом HDBSCAN является то, что ему необходимо задать всего один входной параметр – минимальное количество точек, которое должно присутствовать в кластере. Недостаток HDBSCAN – вычислительная сложность алгоритма, особенно при работе с большими объемами данных. Кроме того, он требует большего количества вычислений по сравнению с DBSCAN и OPTICS [47].

Affinity Propagation (метод распространения близости) – это алгоритм кластеризации, который, как и плотностные методы, является неиерархическим [48].

Вместо поиска областей с высокой плотностью, он основан на идее «передачи сообщений» между точками данных. В отличие от DBSCAN, используется, когда важно найти реальные объекты внутри групп, а не просто определить границы плотных зон.

Spectral Clustering (спектральная кластеризация) — это «интеллектуал» среди алгоритмов [49]. Если DBSCAN ищет соседей, а Mean Shift — холмы плотности, то этот метод использует теорию графов и линейную алгебру. Лучше находит кластеры сложной формы (кольца, вложенные структуры), но требует, чтобы вы заранее задали сколько кластеров нужно найти (параметр k). Из-за сложных вычислений с матрицами он очень медленный на больших данных.

Однако с развитием сенсорных сетей появились и другие задачи, требующие пристального внимания. Например, задача о качестве обслуживания, которое является важнейшей метрикой для любой сети, в том числе и сенсорной.

2.4 Модель сети интернета вещей с мультимодальным распределением узлов и метод применения подвижных головных узлов для сбора данных

Проникновение ИВ в различные сферы деятельности человека приводит к появлению разных форм реализации беспроводных сенсорных сетей (БСС). Такие сети могут отличаться масштабом (геометрическими размерами зоны обслуживания), числом узлов, интенсивностью трафика, размещением узлов в пространстве и характером их движения. От этих параметров зависит выбор технологии организации радиоканала и протоколов управления логической структурой сети [33, 50, 51].

Для различных приложений БСС требуется организация сетей со стационарными или подвижными узлами. Логическая структура БСС определяется правилами маршрутизации. В простейшем случае при построении сетей сбора данных

имеет место звездообразная структура, а все узлы сети находятся в зоне обслуживания головного узла, часто он же выполняет функции шлюза. В таком случае зона обслуживания ограничена зоной ГУ, которая, как правило, не превышает сотни метров.

Для преодоления ограничений применяются структуры с организацией транзитов, а также подвижных головных узлов (ПГУ), выполняющих функции сбора данных [52]. Использование ПГУ позволяет существенно расширить зону обслуживания БСС, а также увеличить связность сети [53]. Если выбрать траекторию движения ПГУ таким образом, чтобы он в течение определенного времени проходил в зоне связи каждого из узлов сети, то за этот интервал времени при правильном выборе скорости движения [54] можно обеспечить сбор данных с заданного числа узлов.

При этом длительность сбора данных будет зависеть от скорости движения ГУ, числа узлов сети и размеров зоны обслуживания. Требования к длительности сбора данных зависят от конкретных прикладных задач, решаемых сетью. Например, в сети контроля температуры окружающей среды и влажности почвы она может исчисляться минутами или десятками минут, а при мониторинге состояния атмосферы на наличие опасных веществ длительность сбора данных должна исчисляться секундами.

Очевидно, что для сокращения времени сбора данных следует увеличить количество ПГУ, при этом возникают задачи выбора как числа таких узлов, так и характера их движения в зоне обслуживания сети. От этих параметров зависит эффективность использования узлов. Слишком большое их число увеличивает стоимость сети, т.е. уменьшает ее эффективность. ПГУ, как правило, существенно дороже стационарного узла, так как требует наличия средств передвижения и затрат энергии на процесс перемещения, а также интерфейса с глобальной сетью. В предельном случае можно вообще отказаться от стационарных узлов, оставив только

ПГУ, оснащенные шлюзами, что сократит до минимума время сбора данных. Но в таком случае сеть будет иметь максимальную стоимость. В промежуточном варианте число ПГУ должно быть достаточным для обеспечения требуемой длительности сбора данных, однако длительность определяется не только числом, но и характером перемещения ПГУ.

Цель статьи – разработка модели и метода построения сети с ПГУ, позволяющих повысить эффективность использования ресурсов БСС.

2.4.1 Модель сети с подвижными узлами

В [55] показано, что скорость движения ПГУ, производящего сбор данных, зависит от плотности размещения узлов и требований к качеству сбора данных (вероятности пропуска узла). В этой же работе доказано, что может быть определена оптимальная скорость движения, при которой число опрошенных узлов сети максимально. Такая модель организации движения узла эффективна при равномерном распределении пользователей в зоне обслуживания, если они описываются пуассоновским полем [56].

В большинстве практических случаев модель пуассоновского поля применима только на ограниченных пространствах, в рамках которых распределение узлов сети можно считать равномерным. Но узлы распределяются по всей зоне обслуживания и чаще – неравномерно. Подобное распределение принято описывать мультимодальными законами [57], например, распределение людей на территории города или автомобилей на проезжей части дороги, водных растений или рыб в

акватории водоема. В таких случаях плотность объектов неравномерна в зоне обслуживания.

Большая плотность людей имеет место в жилых, офисных и общественных зданиях, плотность автомобилей больше у перекрестков, чем в центральной части дороги и т.д. Поэтому и большинство БСС также имеют неравномерную плотность узлов в зоне обслуживания. Следовательно, при выборе числа ПГУ и скорости их перемещения необходимо учитывать эту особенность. В противном случае использование ПГУ может оказаться неэффективным.

При моделировании БСС будем полагать, что узлы сети размещены на плоскости, а зона обслуживания представляет собой прямоугольник. Такое допущение позволяет упростить рассуждения, но следует отметить, что все они могут быть применимы для трехмерной модели.

Будем полагать, что узлы сети распределены в зоне обслуживания случайным образом. Размещение координат узлов может быть представлено двумерным мультимодальным распределением, описанным как смешанное (составное) распределение [56, 57, 58] с плотностью вероятности и функцией распределения

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^K \eta_i f_i(x, y), \quad F(x, y) = \sum_{i=1}^K \eta_i F_i(x, y) \quad (2.1)$$

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.

В общем случае в (2.1) могут быть использованы разные функции распределения. Их выбор определяется степенью близости модели к моделируемой системе. В данной модели предлагается использовать непрерывные случайные величины и соответствующие функции распределения, так как полагаем, что координаты x и y могут принимать любые значения. Для моделирования могут быть

использованы как ограниченные, так и неограниченные случайные величины. В последнем случае необходимо уточнять вероятность попадания случайной величины в моделируемую зону обслуживания, а параметры распределения выбирать таким образом, чтобы эта вероятность была достаточно велика.

На рисунке 2.4 приведена возможная модель перекрестка, полученная при использовании смешанного распределения вида (2.1) при $K=4$, компонентами которого являются двумерные нормальные распределения [61] с плотностью вероятности

$$f_i(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-c}} e^{-\left(\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - 2c\frac{(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2}\right)} \quad (2.2)$$

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 .

В данном случае при моделировании рассмотрены четыре примыкающие к перекрестку участка дорог, а в качестве объектов – автомобили, находящиеся на этих участках.

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

$$p = \iint_{\Omega} f(x, y) dx dy, \quad (2.3)$$

где Ω - выбранная область.

Разумеется, что построение распределений должно производиться на основе статистических данных о количестве автомобилей на различных участках дорог.

Приведенная в примере фотография является частным случаем и служит для пояснения данного подхода.

Форма («острота» и «высота») пиков зависит от СКО и коэффициентов η_i , соответствующих каждой из компонент распределения. Величина вероятности (2.3) пропорциональна доле (числу) узлов в заданной области. Плотность узлов в данной модели неравно мерно распределена в зоне обслуживания и повторяет распределение вероятности.

Среднюю величину плотности узлов в заданной области Ω можно оценить как

$$\bar{\rho} = \frac{pn}{S(\Omega)}, \quad (2.4)$$

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

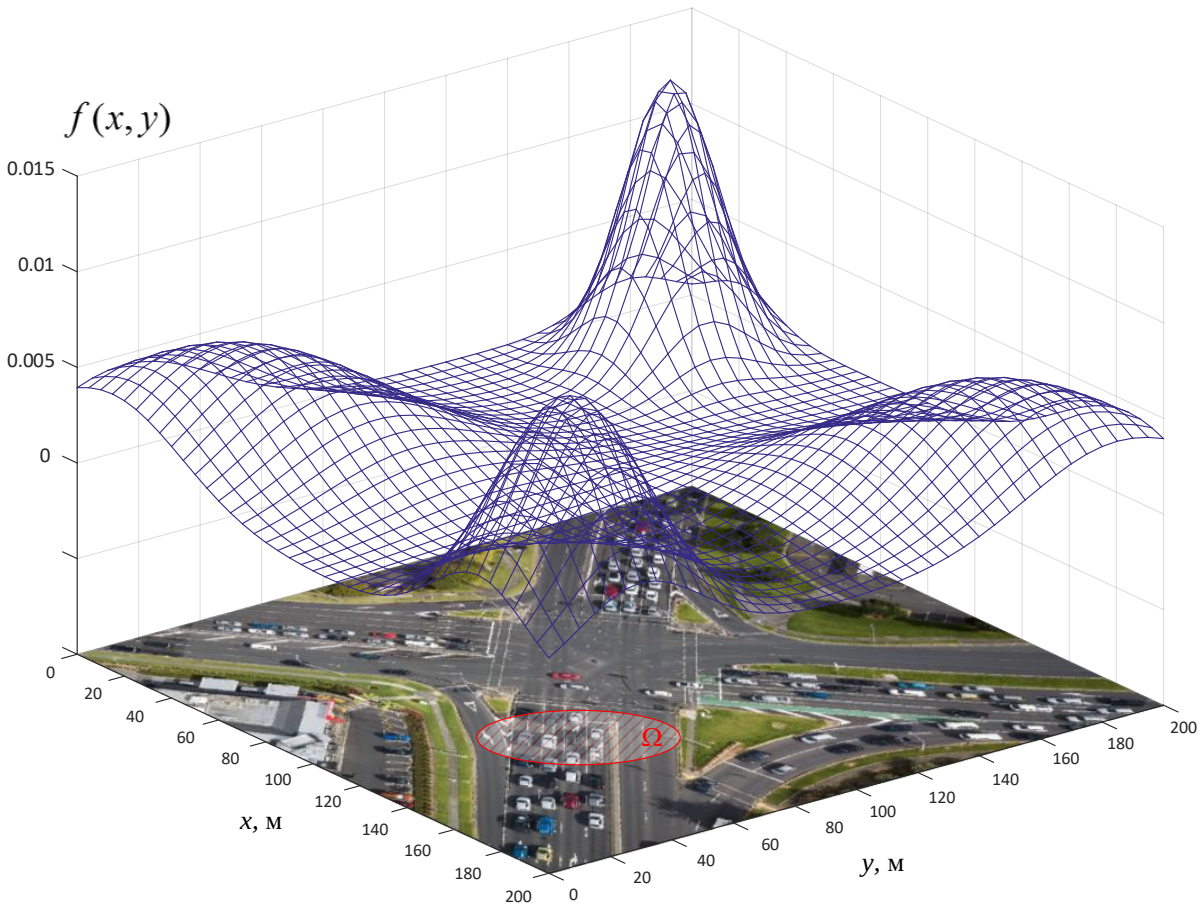


Рисунок 2.4 – Модель сети в границах перекрестка на основе двумерных нормальных распределений

Как правило, окружение в котором строится сеть имеет ряд структурных элементов, таких как здания, дороги, тротуары, мосты, тоннели, путепроводы, парковки и т.д. Эти элементы определяют особенности, возможно, и характер размещения узлов сети. Поэтому, для описания произвольных случаев может быть удобно использовать различные распределения в различных сочетаниях в рамках модели (2.1). При этом плотность пользователей может быть различна в областях, описываемых различными структурными элементами.

Сопоставляя предлагаемый способ моделирования с практическими приложениями, можно сделать следующие предположения. При описании сети узлов,

размещенных на транспортных средствах, зону автомобильной парковки можно описать равномерным распределением, область перекрестка – нормальным, площади и перекрестки с круговым движением – равномерным и т.д. Разумеется выбор распределения должен основываться на статистических наблюдениях.

2.4.2 Постановка задачи

На рис. 2.5 приведены результаты генерации случайных узлов сети на основе модели, построенной с помощью смешанного распределения, в качестве компонентов которого выбраны двумерные (нормальное и равномерное) распределения [62]. Модель демонстрирует несколько типовых элементов, которые могут быть в зоне обслуживания сети. Это области различной формы и разного распределения пользователей. 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. Будем называть такие области структурными элементами.

Для построения эффективной системы сбора данных с помощью подвижных ГУ необходимо соответствующим образом выбрать параметры движения в каждой из областей. Для этого, в первую очередь, нужно иметь возможность выделения областей в наборе исходных данных, т.е. выделения групп пользователей и определения геометрических (или географических) координат, необходимых для выбора параметров движения узлов.

Как было сказано выше, при выборе параметров движения первоочередной задачей является выделение областей однородных с точки зрения размещения узлов сети. Анализируя рис. 2.5, достаточно легко интуитивно выделить семь областей

(структурных элементов). Однако, во-первых, ситуация далеко не всегда очевидна, а во-вторых, необходим формальный метод, на основе которого задачу можно решить.

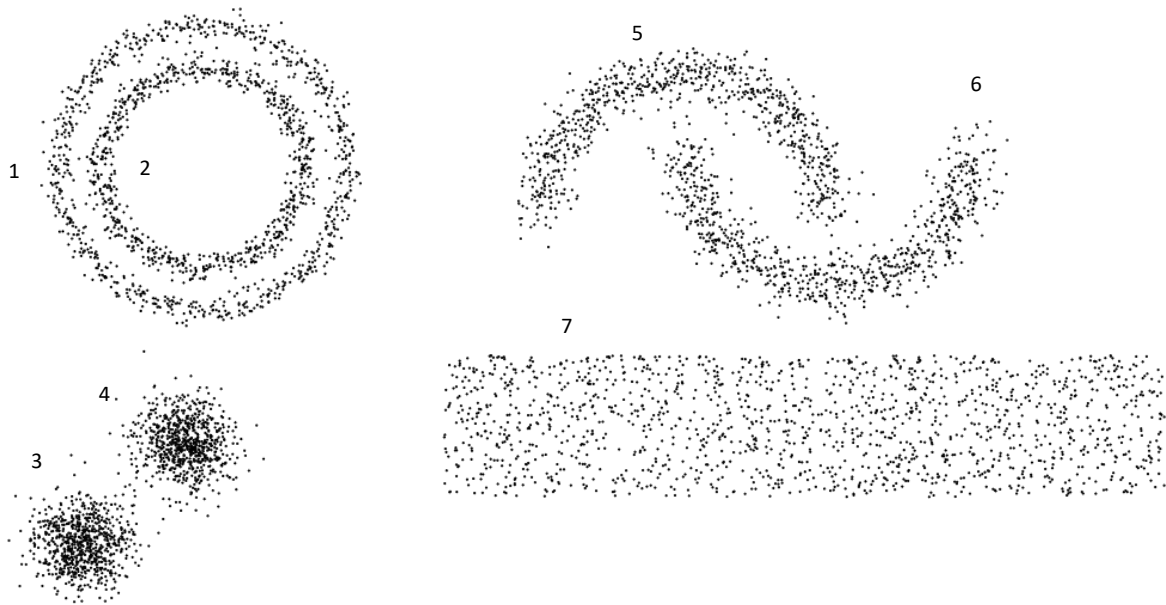


Рисунок 2.5 – Модель сети в границах перекрестка на основе двумерных равномерных распределений.

Данную задачу можно описать как задачу классификации или кластеризации [38, 63]. В случае, когда речь идет о сопоставлении узлов сети заданным структурным элементам, она является задачей классификации. Если в рамках одного структурного элемента может быть выделено несколько групп узлов и ставится цель выделения групп узлов, а не только их сопоставление структурным элементам, то данная задача становится задачей кластеризации. Применение методов кластеризации к задачам связи описано в [64, 65].

Пусть общее количество узлов n сети это множество $S = \{s_1, \dots, s_n\}$, в котором необходимо выделить подмножества $S_1, \dots, S_k$, такие, что, их пересечение равно

пустому множеству, при этом мощность дополнения множества S до объединения множеств M_i много меньше мощности множества S :

$$(M_1, \dots, M_k) \in S \quad (2.5)$$

$$\bigcap_{i=1}^k M_i = \emptyset \quad (2.6)$$

$$\bigcup_{i=1}^k M_i = B \quad (2.7)$$

$$S \setminus B = a \quad (2.8)$$

$$|a| \ll |S| \quad (2.9)$$

Практически выражения (2.5) – (2.9) можно интерпретировать как выделение в исходном множестве узлов k непересекающихся подмножеств, включающих в себя почти все узлы сети за исключением части узлов, входящих в множество a .

Будем полагать, что движение может быть описано скоростью и траекторией (маршрутом) движения узла. В работе [55] была получена модель, связывающая скорость движения узлов с качеством обслуживания и плотностью узлов сети.

В условиях поставленной задачи, кластеризация должна удовлетворять не только условиям (2.6) - (2.9), но и тому, что кластер должен быть, по возможности однородным с точки зрения распределения узлов. Наиболее приемлемым для данной задачи является критерий по плотности узлов, так как именно этот параметр определяет выбор параметров движения ПГУ.

В реальной ситуации невозможно создать «абсолютно непроницаемые границы» для узлов сети (автомобилей, пешеходов, животных и т.д.), а также абсолютно надежные устройства. Поэтому, следует ожидать, что некоторое количество узлов может находиться вне структурных элементов (дорог, зданий, водоемов и т.д.) и не выполнять возложенных на них функций. Координаты таких узлов могут иметь место в исходных данных, что создает дополнительные сложности

при решении задачи. Для исключения таких узлов введено условие (2.9), которое допускает, что не все n узлов должны быть включены в выделяемые k кластеров. По аналогии с другими случайными процессами назовем наличие таких узлов шумом.

Дополнительным условием выберем различие между плотностями узлов в выделяемых кластерах.

$$|\rho_i - \rho_j| \geq \varepsilon, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad i \neq j \quad (2.10)$$

Где ρ_i и ρ_j плотность узлов сети в соответствующих кластерах, ε -допустимое изменение плотности узлов. Условие (10) устанавливает минимальную величину различия плотности, при превышении которой область следует выделять в отдельную.

Решение задачи кластеризации позволяет выбрать области и скорости движения ГУ $v_1, \dots, v_k$ с помощью метода, описанного в [66]. Следующая задача – определение траекторий движения ГУ в границах выбранных кластеров.

2.4.3 Метод выбора параметров движения головных узлов

Будем полагать, что движение может быть описано скоростью и траекторией (маршрутом) движения узла. В работе [66] была получена модель, позволяющая произвести выбор траектории движения, основанный на использовании алгоритма FOREL для кластеризации узлов сети по критерию радиуса связи узла и последующей прокладки маршрута через центры найденных кластеров путем приближенного решения задачи коммивояжера. В данном случае такой метод не приводит к желаемому результату, так как критерий выделения кластеров не учитывает влияния распределения узлов на особенности движения.

На рис. 2.6 приведен результат кластеризации примера (рис. 2.5) с помощью алгоритма k-means (k-средних), в примере $k=7$. Объекты, отнесенные к разным

кластерам, выделены цветом. Приведенный пример наглядно показывает, что в результате кластеризации выделяются области, не совпадающие со структурными элементами. Один структурный элемент может быть разбит на несколько кластеров, а один кластер состоять из частей различных элементов. Такой результат работы алгоритма *k*-means ожидаем, поскольку алгоритм не учитывает особенностей размещения узлов. Алгоритм выбран лишь для примера неудачной для данной задачи кластеризации, подобные результаты дают и многие другие алгоритмы.

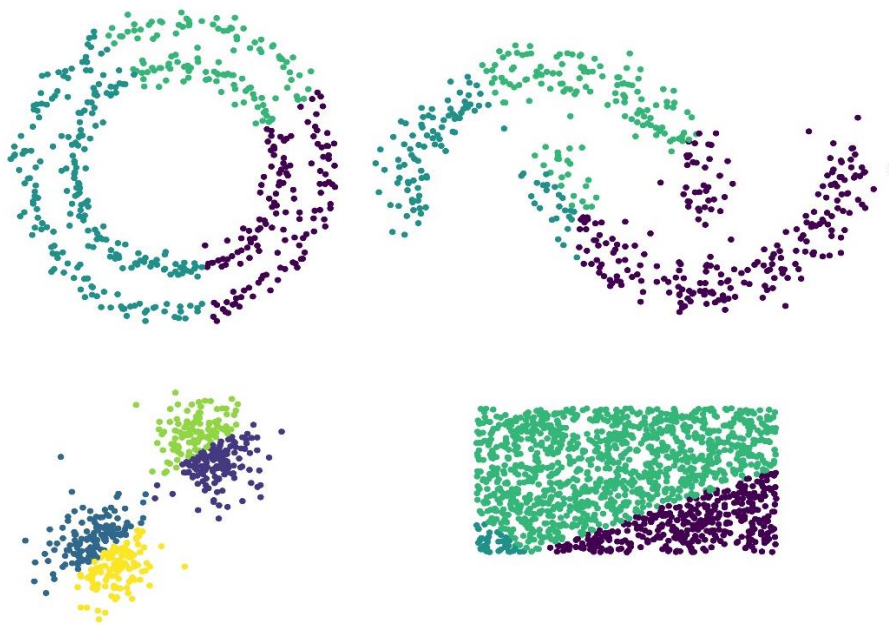


Рисунок 2.6 – Пример кластеризации *k*-Means

Для выбора пригодного алгоритма кластеризации были проведены эксперименты с 11 известными алгоритмами: MiniBatch *k*-means, FOREL, Affinity Propagation, Mean Shift, Spectral Clustering, Ward, Agglomerative Clustering, DBSCAN, OPTICS, BIRCH, Gaussian Mixture. Алгоритмы сравнивались по возможности выделения кластеров согласно поставленной задаче, т.е. в рамках структурных элементов, а также по времени выполнения. В качестве примеров с различными

параметрами генерировались исходные данные, используемые для проверки и диагностики следующих алгоритмов из библиотеки [67]: «вложенные круги», «две луны», «капли», равномерное распределение. Такой набор исходных данных представляет определенные сложности для задач кластеризации и позволяет описать возможности исследуемых алгоритмов. Результаты исследования алгоритмов кластеризации приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1- Результаты исследования алгоритмов кластеризации

Алгоритм	Выделение структурных элементов	Выделение «шума»	Среднее время выполнения, с	К. вариации времени выполнения
MiniBatch k-mens	-	-	0,06	1,21
FOREL	-	-	0,04	0,57
Affinity Propagation	-	-	8,31	0,42
Mean Shift	-	-	0,14	0,29
Spectral Clustering	Да	-	0,54	0,69
Ward	-	-	0,31	0,97
Agglomerative Clustering	Да	-	0,26	0,96
OPTICS	Да	Да	1,16	0,03
BIRCH	-	-	0,05	0,26
Gaussian Mixture	-	-	0,01	0,35
DBSCAN	Да	Да	0,02	0,49

Оценка среднего времени выполнения получена усреднением по набору из шести контрольных примеров, одинаковых для всех алгоритмов.

Как показывают полученные результаты, четыре алгоритма дают результаты близкие к ожидаемым. Это такие алгоритмы как Spectral Clustering, Agglomerativ

Clustering, Optics, DBSCAN. Они позволяют выделять структурные элементы, но только два из них дают возможность учитывать шум - OPTICS и DBSCAN.

Анализ рассмотренных алгоритмов показал, что в наибольшей степени требованиям задачи отвечает алгоритм DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise). Его название «Пространственная кластеризация приложений с шумом на основе плотности» достаточно полно отражает функциональные возможности алгоритма, которые также соответствуют требованиям решаемой задачи.

Время выполнения алгоритма DBSCAN почти в 6 раз меньше времени, необходимого для алгоритма OPTICS. К тому же DBSCAN имеет относительно небольшой по сравнению с другими алгоритмами коэффициент вариации времени выполнения, что также можно расценивать как положительное свойство (небольшой разброс времени выполнения для разных задач).

Алгоритм DBSCAN был разработан 1996 г. авторами Martin Ester, Hans-Peter Kriegel, Jörg Sander, Xiaowei Xu и опубликована [44], в 2014 г. алгоритм был удостоен награды «Проверено временем» конференции по интеллектуальному анализу данных, KDD [68]. Сегодня это наиболее эффективный и часто применяемый в задачах кластеризации и классификации алгоритм. На рис. 2.7 приведен результат кластеризации исходных данных алгоритмом DBSCAN.

Алгоритм DBSCAN позволяет выделить кластеры по признаку плотности узлов, что дает возможность определить группы узлов в границах структурных элементов. В приведенном примере были определены группы узлов во всех заданных структурных элементах (семь кластеров). Также выявлена группа узлов, находящихся на удалении от областей структурных элементов, определенных как «шум».

Краткое описание алгоритма. Все исходные объекты (в рамках задачи – это узлы, в описании алгоритма будем их называть точками) подразделяются на три типа:

основные (core points), достижимые по плотности (density reachable) и отбрасываемые, или шум (outliers).

Точка p называется основной, если в ее окрестности радиуса r находится не менее m точек (включая саму точку p). Говорят, что все эти точки прямо достижимы из p . Отношение $\rho = m/(\pi r^2)$ выражает плотность объектов в окрестности основной точки, отсюда и название алгоритма.



Рисунок 2.7 – Результат кластеризации алгоритмом DBSCAN

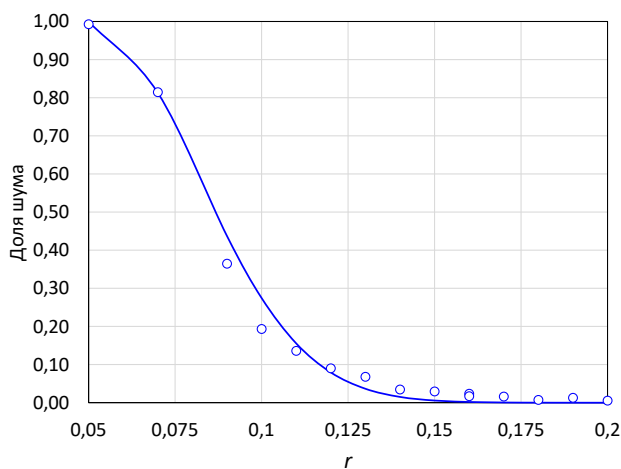
Точка q достижима из точки p по плотности если между ними можно проложить маршрут на графе, построенном на основных точках. Ребро в графе существует тогда, когда расстояние между точками не превышает r . Все точки, недостижимые из других точек, называются выбросами или точками шума.

Алгоритм позволяет выбрать кластеры в области скоплений исходных объектов, при этом условные границы кластера определяются недостижимостью соседних точек, т.е. малой плотностью объектов между скоплениями. Для решения

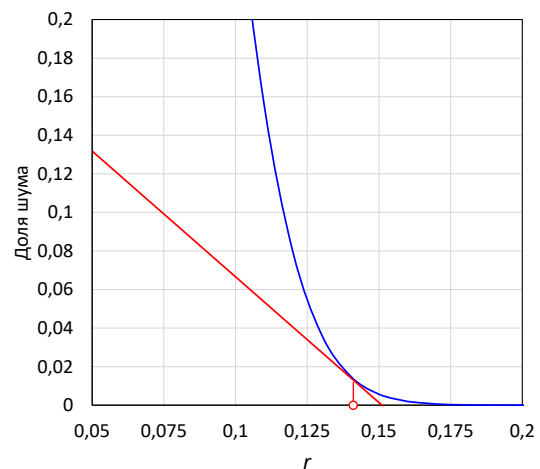
поставленной задачи необходимо выбрать такую плотность ρ , при которой выделяемые кластеры удовлетворяют условиям задачи, т.е. однородны и находятся в границах структурных элементов.

Исходя из логики работы алгоритма можно заметить, что при граничных значениях плотности, т.е. при $\rho \rightarrow 0$ будет выделен один кластер, включающий в себя все элементы (в этом случае не будет шума); при $\rho \rightarrow \infty$ кластеры не образуются, т.е. все элементы будут рассматриваться как шум. При промежуточных значениях количество кластеров будет возрастать по мере увеличения плотности. Задаем плотность радиуса r , минимальное количество узлов m будем считать постоянным. Для анализа будем подсчитывать количество отброшенных элементов (шум) при изменении r .

На рис. 2.8а приведены результаты, полученные при многократной кластеризации случайной выборки с разной величиной радиуса, показана зависимость доли отброшенных элементов от размера радиуса, статистические данные отмечены кружочками. Для аппроксимации полученной зависимости использована функция Гаусса (синяя кривая):



а)



б)

Рисунок 2.8 – Определение величины r

$$O(r) = \frac{1}{c\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(r-r_0)^2}{2c^2}} \quad (2.11)$$

Параметры кривой c и r_0 выбраны методом наименьших квадратов. Для выбора величины r использован метод локтевой точки (рисунок 2.8., б) [69], т.е. точки перегиба кривой, в которой угол наклона касательной к ней равен $\pi/4$. Данный метод часто применяется в задачах кластеризации, например, для выбора числа кластеров и использования метода k -means. Для функции Гаусса эта точка равна параметру c . При этом проводится несколько пробных операций кластеризации и для них вычисляется число отброшенных элементов, а затем определяется положение локтевой точки.

Следующей подзадачей, при использовании DBSCAN является выбор величины плотности, для определения которой необходимо задать минимальное число узлов в окрестности основных точек m . Алгоритм не может выделять кластеры с различной плотностью элементов, области с плотностью существенно меньше заданной будут определены как шум. Поэтому, если в зоне обслуживания ожидается различная плотность пользователей, то необходимо организовать серию этапов кластеризации для различных ее значений.

Алгоритм предлагаемого метода приведен на рисунке 2.9. Опишем данный алгоритм по шагам.

Запуск процесса (начало).

Шаг 1. Ввод исходных данных, т.е. множества координат узлов сети S и инициализация счетчика циклов i , а также массива граничных значений r и n_{min} .

Шаг 2. Выбор i -го набора граничных значений r и n_{min} .

Шаг 3. Задается начальное значение r (минимально, что что соответствует максимальной плотности).

Шаг 4. Выполняется алгоритм DBSCAN.

Шаг 5. Проверяется выполнение вычислений для всего диапазона значений r . Если нет, то переход к шагу 6, если да, то к шагу 7.

Шаг 6. Увеличим r на величину Δ .

Шаг 7. Проводится после выполнения алгоритма DBSCAN для ряда значений r . По результатам кластеризации оцениваются доли отброшенных узлов, и методом локтевой точки оценивается r_0 .

Шаг 8. Реализуется после получения величины r_0 , для которой выполняется алгоритм DBSCAN. Следует отметить, что результат кластеризации для значения r_0 мог быть получен на шагах 4-6, в таком случае этот шаг является формальным.

Шаг 9. Проверяется, что все наборы параметров r и n_{min} рассмотрены. Если нет, то переход к шагу 10, если да, то к шагу 11.

Шаг 10. Увеличение счетчика i на единицу, т.е. выбор следующего набора параметров. Если да, то переход к следующему шагу 11.

Шаг 11. Выбирается траектория движения ГУ.

Останов.

Последний шаг 11 включает в себя задачу выбора траектории движения узла. Отметим, что в рамках данной статьи рассматривались задачи, прикладной областью которых является городская инфраструктура и такие структурные элементы как элементы дорог, зданий и сооружений. Геометрические размеры этих объектов, как правило, не превышают зоны связи ГУ (сотни метров). Поэтому решение задачи в большинстве случаев очевидно, например, движение вдоль осевой линии дороги, по границе тротуара, вдоль стены здания, по коридору и т.д.

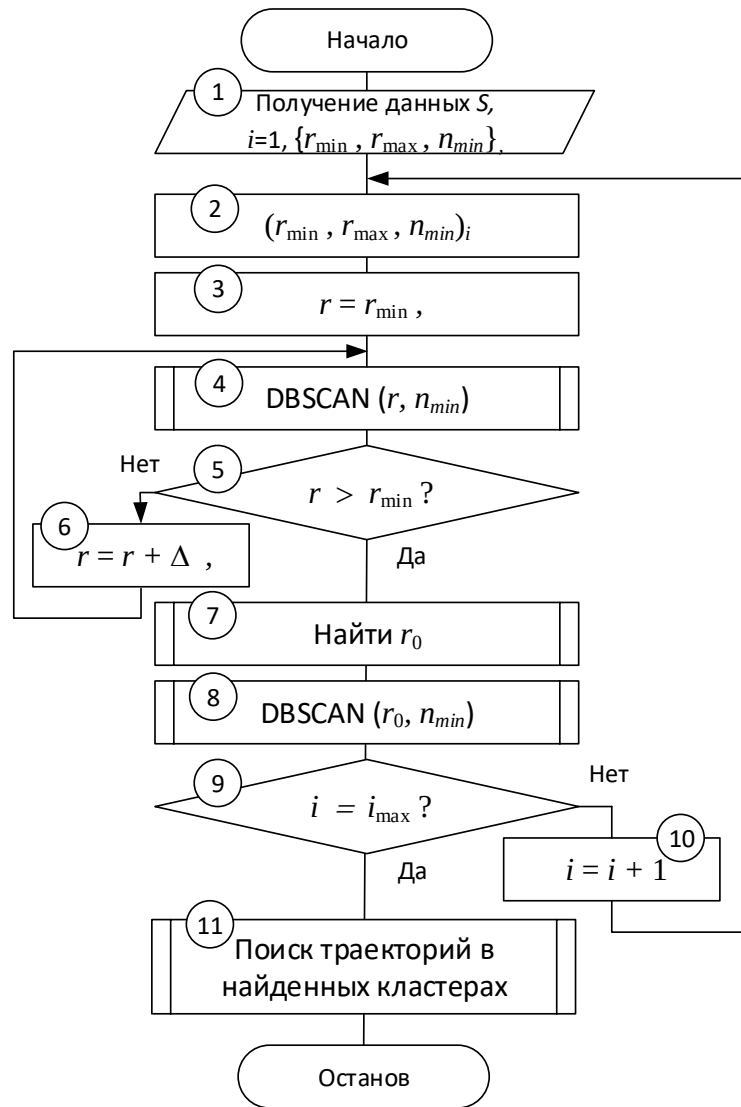


Рисунок 2.9 – Алгоритм метода (процесса) выбора параметров движения подвижных головных узлов.

Искать решение целесообразно, когда размеры получаемых кластеров и структурных элементов окружения существенно превышают зону связи ГУ, например, сельскохозяйственные угодья, акватории водоемов, леса и т.д. Эти задачи являются предметом дальнейшего исследования. Отметим только, что возможным методом их решения может стать метод, предложенный в [66], но тогда он должен применяться для каждого из полученных кластеров.

2.4.4 Эффективность метода

Оценим эффективность предлагаемого метода с помощью результатов, полученных в [55]. Будем исходить из того, что работа ПГУ характеризуется двумя основными параметрами: временем движения и числом опрошенных узлов сети.

Предположим, что ПГУ проходит на своем пути через две области (два кластера) с высокой ρ_1 и низкой ρ_2 плотностью узлов (рис. 2.10). Рассмотрим два случая: в первом скорость узла выбирается из расчета на среднюю величину плотности, т.е. для $(\rho_1 + \rho_2)/2$, а во втором – индивидуально для каждой из областей.

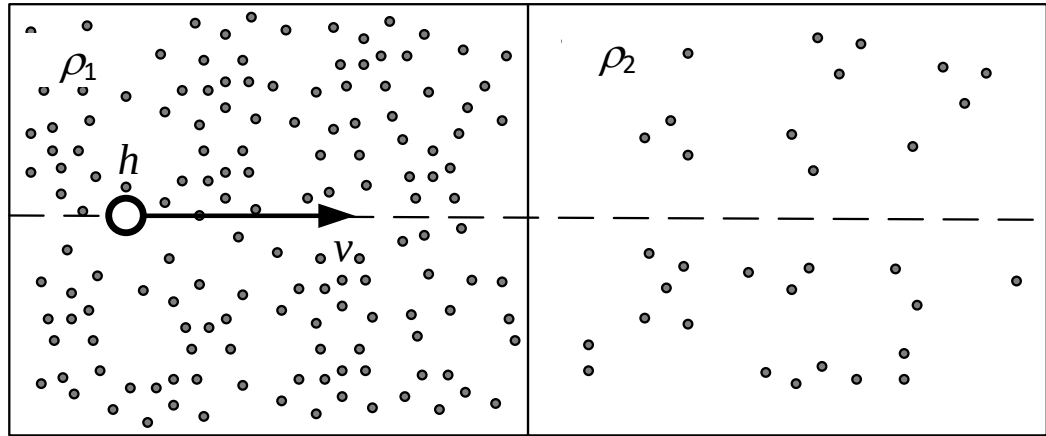


Рисунок 2.10 – Движение ПГУ через две области с разной плотностью узлов сети

Для выбора скорости используем метод, описанный в [55]. Эффективность будем оценивать коэффициентом изменения количества опрошенных узлов:

$$e = \frac{\eta_1(\rho_1, v_2) + \eta_2(\rho_2, v_2) - \eta_1(\rho_1, \tilde{v}) - \eta_2(\rho_2, \tilde{v})}{\eta_1(\rho_1, \tilde{v}) + \eta_2(\rho_2, \tilde{v})} \quad (2.12)$$

где $\eta(\rho, v)$ – количество обслуженных узлов [55]; ρ_1 и ρ_2 плотности узлов в первой и второй областях; v_1 и v_2 оптимальные скорости движения, выбранные

согласно [55] для первой и второй области, с учетом плотности узлов в них, $\tilde{v}$ – оптимальная скорость выбранная для усредненного значения плотности узлов.

Если $\rho_1 = \rho_2$, то эффективность должна быть равна нулю. Метод эффективен для неоднородной сети. На рисунке 2.11 приведена зависимость оценки эффективности согласно выражению (2.12) от неоднородности сети, характеризуемой отношением плотностей узлов в первой и второй областях $d\rho = \rho_1/\rho_2$. Как видно из рисунка, эффективность повышается с ростом разницы плотностей в первой и второй областях вдвое, прирост числа обслуженных узлов составит около 20%.

Предложенная модель оценки эффективности представляет частный случай. Формы получаемых кластеров, их размеры и соотношения числа узлов могут быть различны. Однако данная модель отражает основное свойство предложенного метода выбора скорости движения ГУ по плотности узлов сети.

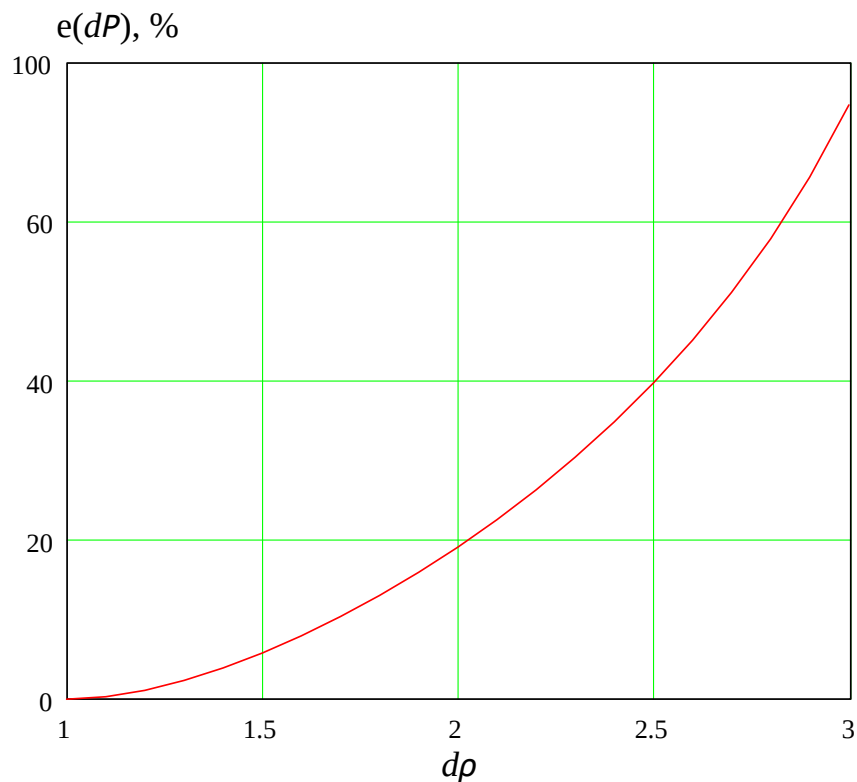


Рисунок 2.11 – Зависимость эффективности от неоднородности сети

Анализ зависимости эффективности метода от неоднородности распределения узлов показывает, что минимальное ее значение равно нулю, что соответствует однородной сети. В таком случае метод не дает выигрыша. Рост неоднородности приводит к увеличению прироста числа обслуженных узлов и эффективности метода, соответственно. При этом следует учитывать, что при неограниченном увеличении плотности узлов придется уменьшать скорость движения узла практически до нуля, что приведет к вырождению задачи. Поэтому данная модель применима при реальных значениях плотностей, которые в большинстве случаев отличаются не более чем на порядок.

2.5 Выводы к главе 2

Проведенный во второй главе анализ показал, что сети ИВ принципиально отличаются от традиционных телекоммуникационных сетей:

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.
5. 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.
6. Разработанный метод 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.

Таким образом, в данном разделе решена задача повышения эффективности функционирования сетей ИВ за счет применения методов кластеризации и оптимального выбора параметров ПГУ в кластере в неоднородных сетях ИВ с мультимодальным распределением узлов сети. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании энергоэффективных и масштабируемых IoT-инфраструктур в условиях городской среды, промышленных зон и других объектов со сложной топологией.

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

3.1 Анализ возможностей SDN в части выбора структуры обмена данными

К основным достоинствам SDN можно отнести следующее:

- централизованное управление: единый контроллер (или группа контроллеров) обеспечивает видимость и контроль всей сети из одной точки;
- программируемость: сетевое поведение определяется программным обеспечением, что позволяет быстро адаптировать сеть под нужды приложений;
- автоматизация и гибкость: быстрое масштабирование и автоматическая конфигурация сетевых устройств, что критично для облачных сред;
- виртуализация сети: создание виртуальных сетей (overlay) поверх физической инфраструктуры;
- динамическая маршрутизация: оперативная настройка правил передачи трафика и усиление защиты данных за счет централизованных политик безопасности.

Такое достоинство SDN как возможность достаточно быстро изменять правила маршрутизации трафика позволяет гибко управлять структурой логической сети. Логическая структура может достаточно быстро изменяться в зависимости от производимого пользователями трафика.

Важнейшим фактором также является возможность миграции сервисов, что в совокупности с динамической маршрутизацией позволяет рационально распределять ресурсы сети тем самым повышая эффективность их использования и качество предоставления услуг.

Например, использование туманных вычислений, т.е. вычислений на устройстве в непосредственной близости к пользователю (смартфон, бортовой компьютер, персональный компьютер, ноутбук) позволяет существенно сократить задержку и в некоторых случаях почти до нуля снизить трафик, передаваемый на сервер. Если непосредственно на устройстве реализована функция распознавания изображений или звуков, то нет необходимости отправлять на сервер достаточно большой объем данных.

Аналогичный эффект будет иметь место и при использовании облачных вычислений, с той разницей, что трафик в сети останется, но доставляться он будет не на главный сервер услуги, а на облачную платформу, ресурсы которой находятся ближе к пользователю.

Таким образом, ключевая возможность SDN в части выбора логической структуры обмена данными — это возможность оптимального решения по распределению вычислительных ресурсов и трафика.

3.2 Модели облачных и туманных вычислений в SDN

Опишем модель облачных и туманных вычислений в SDN соотношением между показателями качества предоставления услуг и набором телекоммуникационных и вычислительных ресурсов, рисунок 3.1.

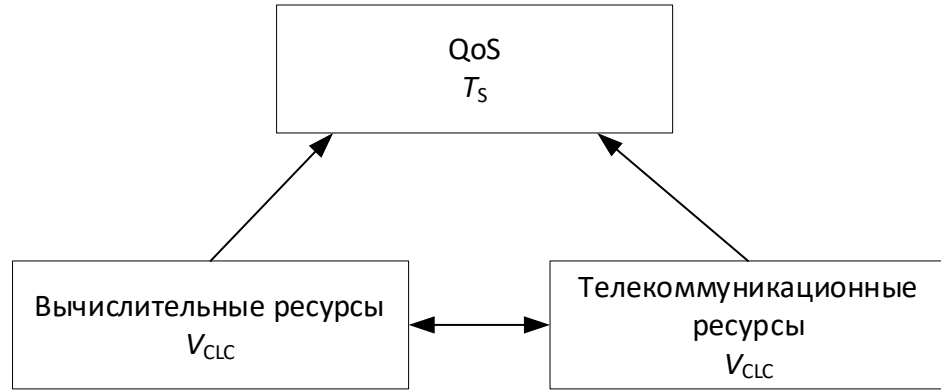


Рисунок 3.1 – Взаимосвязь ресурсов и качества

Будем полагать, что имеется некоторое количество телекоммуникационных ресурсов $V_{\text{ТКМ}}$, и некоторое количество вычислительных ресурсов V_{CLC} .

При реализации сервиса затрачивается время T_s , определяемое двумя составляющими: на доставку данных $T_{\text{ТКМ}}$ и время на обработку (вычисления) T_{CLC} .

$$T_s = T_{\text{TRM}} + T_{\text{CLC}}$$

Как время доставки данных $T_{\text{ТКМ}}$, так и время обработки (вычисления) T_{CLC} зависят от интенсивности нагрузки (запросов) a , так и от объема соответствующих ресурсов $V_{\text{ТКМ}}$, и V_{CLC} .

Задачу распределения ресурсов можно описать двумя способами.

1. Как задачу минимизации времени реализации сервиса. В этом случае решается задача перераспределения ресурсов $V_{\text{ТКМ}}$, и V_{CLC} с целью минимизации времени реализации сервиса T_s .

$$\{V_{\text{TRM}}, V_{\text{CLC}}\} = \arg \min_{V_{\text{TRM}}, V_{\text{CLC}}} \{T_{\text{TRM}}(a, V_{\text{TRM}}) + T_{\text{CLC}}(a, V_{\text{CLC}})\},$$

$$V_{\text{TRM}} = \text{const}$$

$$V_{\text{CLC}} = \text{const}$$

$$a > 0$$

В этом случае, важно то, что объем ресурсов не изменяется, производится только их перераспределение (в противном случае, задача не будет иметь решения).

1. Как задачу приближения времени реализации сервиса к заданному значению T_0 .

$$\{V_{TRM}, V_{CLC}\} = \arg \min_{V_{TRM}, V_{CLC}} \left[(T_{TRM}(a, V_{TRM}) + T_{CLC}(a, V_{CLC})) - T_0 \right]^2, \\ a > 0$$

Следует заметить, что в реальной сети это V_{TKM} , и V_{CLC} множества, включающие в себя наборы ресурсов серверов, облачных платформ, туманных вычислителей, маршрутов пропуска трафика.

Таким образом, как первая, так и вторая формулировки задачи приводят к задаче дискретной оптимизации.

Функциональные зависимости времени от объема ресурсов и интенсивности трафика могут быть получены различным образом, в частности, могут быть использованы методы теории массового обслуживания. В качестве обслуживающей системы может быть выбран соответствующий элемент, а система может быть описана системой массового обслуживания с ожиданием.

3.3 Кластеризация в сетях туманных вычислений

Под кластеризацией обычно понимается разбиение заданного множества объектов, имеющих некоторые общие признаки, на непересекающиеся подмножества, такие, что их объединение дает исходное множество. Абстрактная формулировка определения позволяет говорить о любых объектах, в том числе и о элементах сетей связи. В задачах построения и управления SDN задачи кластеризации имеют важное значение, поскольку для управления сетью, как было отмечено выше, необходимо реализовывать миграцию сервисов и управление потоками трафика (маршрутизацию). Для решения таких задач необходимо выделять группы элементов

сети (приложений, пользователей, потоков). Для решения такого рода задач могут быть использованы методы кластеризации.

Задачи, решаемые методами кластеризации, фактически являются задачами оптимизации, однако, ввиду того что получаемое большинством известных методов решение, как правило не является оптимальным, их не относят к методам оптимизации. Если задачу кластеризации рассматривать как задачу оптимизации, то она окажется NP-сложной. Известные методы кластеризации относят к группе методов искусственного интеллекта (ИИ) с обучением без учителя. Известно достаточно много различных методов кластеризации [70], которые отличаются друг от друга возможностями в части выделения кластеров.

В сетях с туманными вычислениями задачи кластеризации могут быть использованы для выделения (выбора) групп (кластеров) различных элементов сети: пользовательских терминалов, приложений, узлов туманных вычислений. Критерием выбора, который основывается на некоторых общих свойствах элементов, могут быть, например: схожесть географического положения, логических соединений, функциональности, производительности и т.п. Например, выделение группы абонентских терминалов, использующих услуги конференцсвязи и имеющих схожее географическое положение.

Формально задачу можно описать следующим образом. Допустим, что имеется множество из n сетевых элементов $E = \{e_1, e_2 \dots e_n\}$.

Тогда задача кластеризации может быть поставлена как разбиение множества E на заданное количество k подмножеств $\varepsilon_1 \dots \varepsilon_k$, таких, что $E = \varepsilon_1 \cup \varepsilon_2 \dots \cup \varepsilon_k$, $\varepsilon_1 \cap \varepsilon_2 \dots \cap \varepsilon_k = \emptyset$.

Задача кластеризации может включать требования к некоторым параметрам кластеров. Например, может быть задан «ожидаемый» размер кластера [FOREL], число кластеров может быть не определено заранее.

В сетях с туманными вычислениями основное место задач кластеризации может быть определено в процедурах сопоставлении узлов туманных вычислений и приложений или пользователей.

Простейшим критерием кластеризации может быть физическая доступность пользователя узлу туманных вычислений с применением определенной технологии связи. Например, кластеризация пользователей одной сети WiFi.

3.4 Анализ методов кластеризации в сетях туманных вычислений

Эволюция сетей связи идет в направлении увеличения объемов данных, передаваемых сетью, ужесточения требований к времени доставки данных, увеличения числа устройств, расположенных на единице площади или в единице объема, а также расширения состава услуг, которые предоставляются пользователям. Рекомендации Международного Союза Электросвязи (МСЭ) требуют создания сетей, которые содержат в среднем 10 и более устройств на каждый квадратный метр и обеспечивают задержку доставки данных для самых срочных услуг не более 1 мс и даже долей миллисекунды [71, 72].

Удовлетворение этих требований может быть достигнуто за счет применения новых аппаратных и программных решений, в том числе за счет изменения архитектуры сетей [73].

Одним из эффективных способов представляется использование туманных вычислений. Такой подход позволит комплексно решить многие проблемы при оказании перспективных услуг связи, в том числе снизить нагрузку на сетевые ресурсы и дата-центры, а также облегчить работу сервисов обработки и хранения информации за счет приближения части функций сбора и обработки данных к пользователю. По сравнению с классическими облачными архитектурами появится

возможность обеспечить более быстрые отклики на запросы пользователей, повысить надежность систем и разгрузить каналы ядра сети [12].

«Туман» объединяет устройства, выполняющие некоторое подмножество функций, выполнение которых необходимо при предоставлении услуг связи. Организация промежуточного слоя в архитектуре сети, расположенного между пользователем и облаком, в частности, ставит перед архитекторами целый ряд проблем [74]:

1. Выбор рациональных алгоритмов, позволяющих разделить сетевые функции между облаком и туманом в процессе предоставления телекоммуникационных услуг.
2. Разработка методов оценки пропускной способности сетевых соединений, связывающих пользователя с туманом, а также тумана с облаком.
3. Оценка объема данных, которые необходимо иметь в тумане.
4. Определение мест расположения туманных устройств для обеспечения максимального качества обслуживания.
5. Проведение расчетов энергопотребления в структурах с туманом, состоящего из большого количества услуг и др.

В качестве туманных устройств могут выступать и специально созданные программно-аппаратные системы, а также пользовательские терминалы, устройства интернета вещей или узлы сотовых систем связи. Эти устройства могут располагаться на подвижных (автомобиль, элемент беспилотного летательного аппарата и т.п.) или стационарных (вышки, базовые станции и т.п.) платформах, иметь значительные или малые вычислительные ресурсы, а также изменять или не изменять свои функции в процессе предоставления услуг [75, 76].

Туманные устройства могут разделяться на кластеры так, чтобы каждый кластер соответствовал критериям динамичности входящих в него устройств и их

функциональной близости, а также содержал определенное количество устройств, расположенных в ограниченном пространстве.

Целью данного раздела является анализ методов кластеризации в сетях с туманными вычислениями. Научное значение имеет анализ принципов построения и исследования моделей, позволяющих оценить характеристики тумана в сверхплотных сетях с ультрамалыми задержками.

Для построения таких моделей необходимо решить следующие задачи:

- выбор алгоритмов кластеризации в туманных вычислениях.
- исследование свойств плотностных алгоритмов кластеризации в архитектуре с туманными вычислениями.
- повышение эффективности функционирования сети с туманными вычислениями.

При такой постановке задачи в качестве объекта исследования можно рассматривать сеть связи, использующую туманные вычисления, а предметом исследования являются модели и алгоритмы кластеризации устройств, образующих туман.

Кластеризация – это разбиение элементов на некоторые группы в зависимости от их схожести. А алгоритмы кластеризации обеспечивают построение групп в соответствии с исходными параметрами. Для сетей с ультрамалыми задержками и в туманных средах требуется высокий уровень качества обслуживания (QoS), гарантирующий качество передачи данных, своевременность и надежность передачи данных. Поэтому в туманных средах, где узлы сети могут быть расположены в пространстве неравномерно, целесообразно использовать кластеризацию с учетом их расположения, а также необходимо учитывать расстояние между туманными узлами [77].

3.4.1 Архитектура туманных вычислений

Туманные вычисления – это технология, при которой вычислительные устройства (серверы) размещаются гораздо ближе к устройствам конечного пользователя, чем серверы центров обработки данных (ЦОД). Примером элементов туманных вычислений могут служить устройства интернета вещей (IoT), сенсоры, мобильные устройства и т.д. Туманные вычисления позволяют легко интегрировать устройства IoT, анализировать данные в режиме реального времени и принимать решения в короткие сроки за счет использования периферийных устройств [78].

Архитектура туманных вычислений обычно имеет иерархическую структуру, в которой слой тумана располагается между слоями терминальных устройств и облаком. Каждый узел в туманной сети имеет возможности обработки и хранения. На рис. 3.2 представлена иерархическая архитектура с туманными вычислениями.

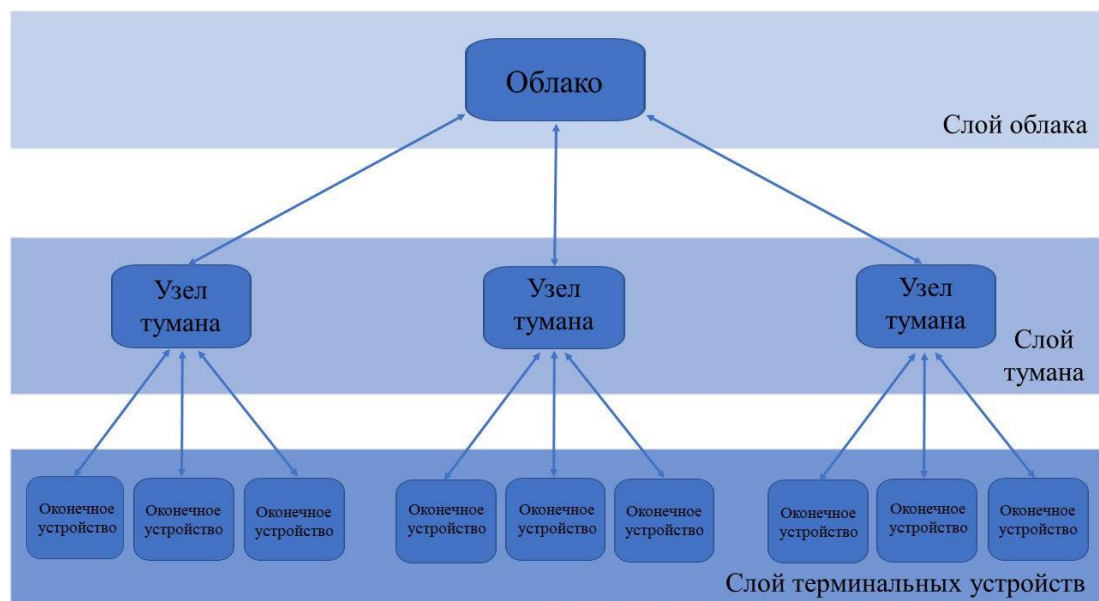


Рисунок 3.2 - Архитектура сети с туманными вычислениями

Слой терминальных устройств обеспечивает сбор, передачу и обработку данных сети. Такими устройствами могут быть датчики, смарт-карты, контроллеры, умные автомобили и др.

Слой тумана состоит из множества физических устройств, таких как маршрутизаторы, шлюзы, точки доступа, базовые станции и локальные облачные серверы, которые обеспечивают обработку и хранение данных ближе к границе сети. Обычно они расположены на опоре электросети, рядом с железнодорожными путями, в автомобиле, на стационарной или подвижной платформе. Узлы тумана предоставляют услуги конечным устройствам.

Слой облака состоит из высокопроизводительных вычислительных устройств и серверов данных с большой емкостью хранения, размещенных в ЦОД. На этом уровне выполняются вычисления, анализ и долгосрочное хранение данных для пользователей.

Взаимодействие устройств туманного и облачного слоев позволяет повысить эффективность использования ресурсов, а также упростить задачу управления и масштабирования данных в зависимости от предоставляемой услуги.

3.4.2 Кластеризации в сетях туманных вычислений

Алгоритмы кластеризации можно разделить на три основных типа:

- разделительные;
- иерархические;
- алгоритмы на основе плотности фрагментов сети.

Различные алгоритмы кластеризации имеют свои преимущества и недостатки. Для того чтобы получить более эффективное решение, необходимо выбирать алгоритмы кластеризации, которые в наибольшей степени подходят для конкретной задачи [79].

Например, разделительные алгоритмы делят все объекты на непересекающиеся группы. В каждом кластере должен быть хотя бы один объект, и ни один объект не может находиться в более чем одном кластере. Такой подход чаще всего используется при работе с большими наборами данных. Иерархические алгоритмы используются для группировки объектов в кластеры на основе их сходства. Этот метод применим в ситуациях, когда структура данных неизвестна заранее и требуется определить количество кластеров. Алгоритмы на основе плотности фрагментов сети определяют области концентрации точек, а точки, которые расположены отдаленно, и не попадают в кластеры помечаются как шум. Такие алгоритмы могут определять кластеры произвольной формы, что важно при работе с пространственными данными.

Одним из самых популярных является алгоритм *k*-means (или метод *k*-средних), который чаще всего используется при работе с большими наборами данных. Исходным параметром для него является заданное пользователем случайное количество кластеров. Работа алгоритма начинается со случайного выбора числа кластеров. Далее алгоритм реализуется на двух шагах: распределение объектов выборки по кластерам; и пересчет центров кластеров. Процесс продолжается до тех пор, пока центр кластера не перестанет менять свое положение.

При работе с пространственными данными необходимо учитывать особенности расположения узлов и их плотность распределения в сети, а не количество кластеров. При использовании алгоритма *k*-means эти особенности не учитываются. Это приводит к тому, что узлы, расположенные далеко от центров кластера, будут включаться в тот или иной кластер, что ухудшает результат кластеризации.

Основной принцип работы плотностных алгоритмов – это выделение областей высокой концентрации точек, которые разделяются областями с низкой плотностью. Точки, которые расположены в областях с низкой плотностью, в отличие от алгоритма k-means, определяются как выбросы. Также важной задачей при разбиении на кластеры является задача выбора транзитного узла в кластере. Самый популярный плотностной алгоритм – основанный на плотности алгоритм пространственной кластеризации для приложений с шумами (density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN), предложенный в 1996 г. Плотность в этом алгоритме определяется количеством точек и расстояниями между ними. Для алгоритма DBSCAN основными параметрами на входе являются максимальное расстояние между точками и минимальное количество точек, которое может быть в одном кластере.

К числу известных алгоритмов кластеризации, предназначенных для работы с пространственными данными, также относятся алгоритмы OPTICS и HDBSCAN.

OPTICS (ordering points to identify the clustering structure, упорядочение точек для обнаружения кластерной структуры) – это алгоритм нахождения кластеров в пространственных данных на основе плотности. По своей основной идее он похож на DBSCAN, но в отличие от него, алгоритм OPTICS рассматривает также точки, которые являются частью более плотного кластера. Алгоритм OPTICS тоже требует два параметра – максимальное расстояние между точками и число точек, необходимых для образования кластера. Алгоритм OPTICS может быть более сложным, чем DBSCAN, так как он содержит дополнительный шаг – упорядочивание точек по достижимости. Алгоритм OPTICS работает лучше DBSCAN при необходимости анализа кластерной структуры данных на различных масштабах плотности, тогда как DBSCAN хорошо подходит для кластеризации данных с четко определенными плотными областями и шумом.

HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) – это алгоритм кластеризации на основе плотности точек, который строит иерархическую структуру кластеров. Он является расширением алгоритма DBSCAN. Преимуществом HDBSCAN является то, что ему необходимо задать всего один входной параметр – минимальное количество точек, которое должно присутствовать в кластере. Недостаток HDBSCAN – вычислительная сложность алгоритма, особенно при работе с большими объемами данных. Кроме того, он требует большего количества вычислений по сравнению с DBSCAN и OPTICS.

Во всех случаях при кластеризации пространственных данных необходимо учитывать и взаимное расположение объектов, и расстояние между ними.

Также одним из главных составляющих качества связи является стабильность сети. Под стабильностью будем понимать время, в течение которого состав узлов кластера существенно не меняется. Это время является случайной величиной с некоторой функцией распределения вероятностей. Состав узлов кластера – тоже случайная величина, которая зависит от скорости движения узлов и направленности (вектора) их движения. Если известно время стабильности каждого из кластеров, то можно решить задачу запуска подвижных головных узлов, которые предназначены для сбора информации с устройств всех кластеров. Головных узлов может быть несколько, а время стабильности кластеров задает то время, за которое головные узлы должны обойти все кластеры [80, 81].

Предположим, что нам известно время стабильного существования кластера. Пусть оно равно t_i , где i – номер кластера. В этом случае возникает задача выбора траектории движения подвижного головного узла, который за время t_i должен успеть обойти все кластеры и снять информацию со всех узлов.

Существенное значение имеет количество узлов, которые объединяются в кластеры. Чем их больше, тем больше времени потребуется главному узлу для

опроса каждого узла первого слоя. Например, если информация с головного узла считывается последовательно, а время передачи данных от одного узла составляет τ , то время считывания будет равно $m_i \times \tau$, где m_i – число узлов в кластере i ($i=1 \dots m$; m – число кластеров). Если время стабильности кластера T больше, чем $m_i \times \tau$, то будет считываться вся информация. Если T меньше, чем $m_i \times \tau$, то для считывания информации можно либо разделить кластеры заново, либо использовать несколько головных узлов. Все эти ситуации необходимо учитывать в процессе кластеризации.

3.4.3 Метод оптимизации туманных кластеров

Целью кластеризации в сети туманных вычислений является повышение эффективности функционирования сети. Число устройств в сети, подлежащих кластеризации, обозначим – n . Предположим, что кластеризация осуществляется при помощи алгоритма DBSCAN. 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 не принадлежит ни одному из кластеров, эти узлы образуют так называемый «шум», т.е. $\sum_{j=1}^m m_j \leq n$.

Равенство имеет место в случае, когда «шума» нет. Обозначим M_N множество узлов, составляющих «шум». Следует отметить, что количество узлов, относимых к «шуму», зависит от выбора параметров алгоритма кластеризации, т.е. оно управляемо.

Под эффективностью будем понимать качество обслуживания запросов (трафика) от пользователей. Качество обслуживания характеризуется производительностью кластера μ_j , т.е. интенсивностью обслуживания заявок, которые направляются на кластер обслуживающих (туманных) устройств. Очевидно, что производительность туманного кластера должна соответствовать параметрам

поступающего в него трафика. Будем полагать, что j -й туманный кластер определяется множеством M_j входящих в него туманных узлов.

Будем полагать, что производительность j -го туманного кластера μ_j определяется как сумма производительностей входящих в него узлов μ_i :

$$\mu_j = \sum_{i=1}^{m_j} \mu_i, \quad (3.1)$$

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 ресурса нет, то заявка помещается в буфер ожидания. Размер буфера ожидания ограничен, и если он заполнен, то заявка теряется. Полагаем, что размер буфера ожидания выбирается из соображений ограничения среднего времени обслуживания:

$$B_j = T_0 \mu_j, \quad (3.2)$$

где T_0 — допустимое время обслуживания заявки.

Поток заявок, поступающих на обслуживание в кластер, формируется различными устройствами, которые, как правило, независимы друг от друга. При достаточно большом количестве таких потоков, согласно теореме, Пальма–Хинчина, свойства результирующего потока стремятся к свойствам простейшего потока. Поэтому сделаем допущение о том, что он может быть описан моделью простейшего потока (рис. 3.3).

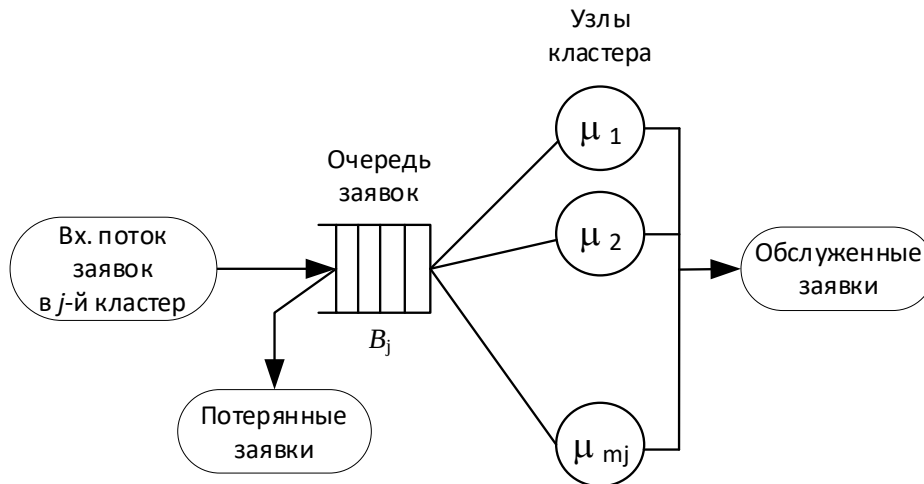


Рисунок 3.3 - Модель обслуживания заявок в j -м кластере

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

Тогда вероятность потери заявки составит:

$$p_j = \frac{1 - \rho_j}{1 - \rho_j^{B_j+1}} \rho_j^{B_j}, \quad (3.3)$$

где ρ_j – нагрузка на j -й кластер.

Качество обслуживания запросов туманными кластерами будем характеризовать интенсивностью потерянных заявок, которую для каждого из кластеров определим как

$$L_j = a_j p_j, \quad (3.4)$$

где a_j – интенсивность заявок в j -м кластере.

Общая интенсивность потерь заявок:

$$L = \sum_{j=1}^m L_j. \quad (3.5)$$

Тогда задачу наилучшего распределения ресурсов по кластерам можно сформулировать как задачу минимизации интенсивности потерь заявок при фиксированном количестве обслуживающих устройств:

$$O = \min_{M_i} L, \quad \mu_j \in M, \quad (3.6)$$

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

Задача (3.6) с учетом выражений (3.1)–(3.5) является задачей дискретной оптимизации, так как распределяемый ресурс имеет дискретную природу, т.е. производительности отдельных узлов не могут быть разделены, а могут быть распределены лишь в целом, т.е. ассоциацией узла с кластером.

Формально для решения задачи (3.6) может быть применен, например, метод динамического программирования. Однако в данном случае туманные кластеры уже сформированы и перераспределение узлов между ними приведет к полному изменению структуры сети. Такое изменение не будет учитывать взаимное расположение узлов.

Идея предлагаемого метода состоит в выборе в качестве базовой структуры сети, полученной с помощью кластеризации алгоритмом DBSCAN, и в последующей минимальной корректировке этой структуры. Эта корректировка основана на минимизации функции (3.6) за счет перераспределения узлов, составляющих «шум», т.е. не приписанных ни к одному из кластеров. Это реализуется процедурой последовательного перебора неприписанных узлов $v_i \in M_N$ ($i=1, K, k$), где k – число узлов «шума» (нераспределенных узлов), и вычисления целевой функции (3.6) для каждого из кластеров $j=1, \dots, m$ и закрепление выбранного узла за тем кластером, для которого значение (3.6) было минимально. Формально это можно описать как задачу поиска

$$\tilde{O} = \left\{ \begin{array}{l} M_{j^*} = M_j \cup v_i, \ M_N = M_N \setminus v_i, \ i = 1 \dots k \\ j^* = \arg \min_j \sum_{j=1}^m a_i \frac{1-\rho_j}{1-\rho_j^{B_j+1}} \rho_j^{B_j}, \\ \rho_j = \frac{a_j}{\mu_j}, \ v_i \in M_N, \tilde{d}_{ij} \leq d_0 \end{array} \right\}, \quad (3.7)$$

$$\tilde{d}_{ij} = d(v_i, v^* \in M_{j^*})$$

где $\tilde{d}_{ij}$ – расстояние между i -м узлом и ближайшим узлом j -го кластера; v^* – узел, принадлежащий кластеру j^* и ближайший к узлу v_i ; k – число узлов «шума»; d_0 – максимально допустимое расстояние между узлами. Множество $\tilde{O} = \{M_1 \dots M_m\}$ включает модифицированные множества узлов для всех кластеров.

Предлагаемый метод перераспределяет узлы из множества M_N («шум»), минимизируя целевую функцию, по кластерам с учетом максимально допустимого расстояния между узлами.

Для решения данной задачи результат кластеризации DBSCAN должен содержать «шум», т.е. $M_N \neq \emptyset$. Мы полагаем, что параметры алгоритма (расстояние достижимости между узлами кластера) DBSCAN могут быть выбраны так, что множество узлов «шума» не будет пустым.

Предложенный метод оптимизации туманных кластеров можно описать блок-схемой (алгоритмом), приведенной на рисунке 3.4.

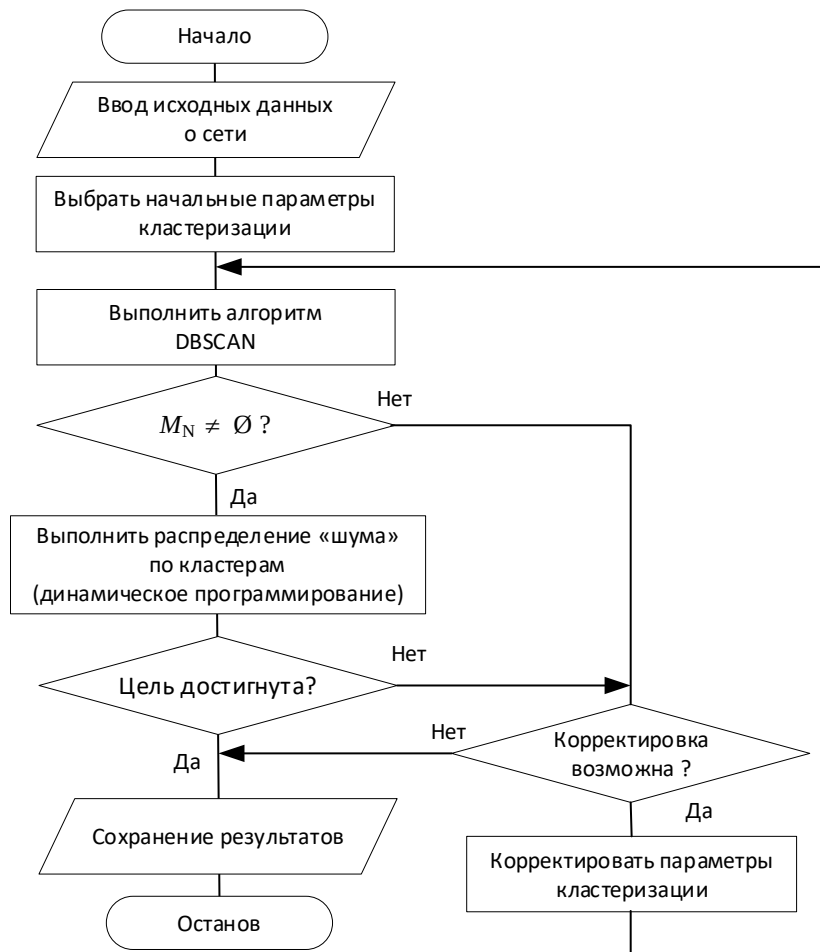


Рисунок 3.4 - Блок-схема метода

Этот метод заключается в выполнении кластеризации узлов сети с помощью алгоритма DBSCAN при некоторых начальных значениях параметров алгоритма. После этого производится перераспределение некластеризованных узлов (шума) по кластерам с помощью метода динамического программирования, целевой функцией в котором является (3.6), задача которого определена выражением (3.7).

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. Это позволяет изменять долю некластеризованных узлов.

3.4.4 Эффективность метода оптимизации туманных кластеров

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

Достижимый эффект опишем разницей между значением (3.6), полученным без и с применением предложенного метода, т.е. интенсивностью потерь заявок:

$$e = 100 \frac{|L - L^*|}{L} \%, \quad (3.8)$$

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

На рисунке 3.5 приведены оценки эффективности метода, полученные для различных реализаций распределения узлов сети, которые отличались количеством выделяемых кластеров.

Результаты проведенных экспериментов показали, что максимальное значение эффективности, определяемой по формуле (3.8), 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.

Также следует отметить, что данный метод может быть использован и с иными алгоритмами кластеризации. Основное требование к алгоритму кластеризации – это наличие возможности «регулировки» доли некластеризованных элементов.

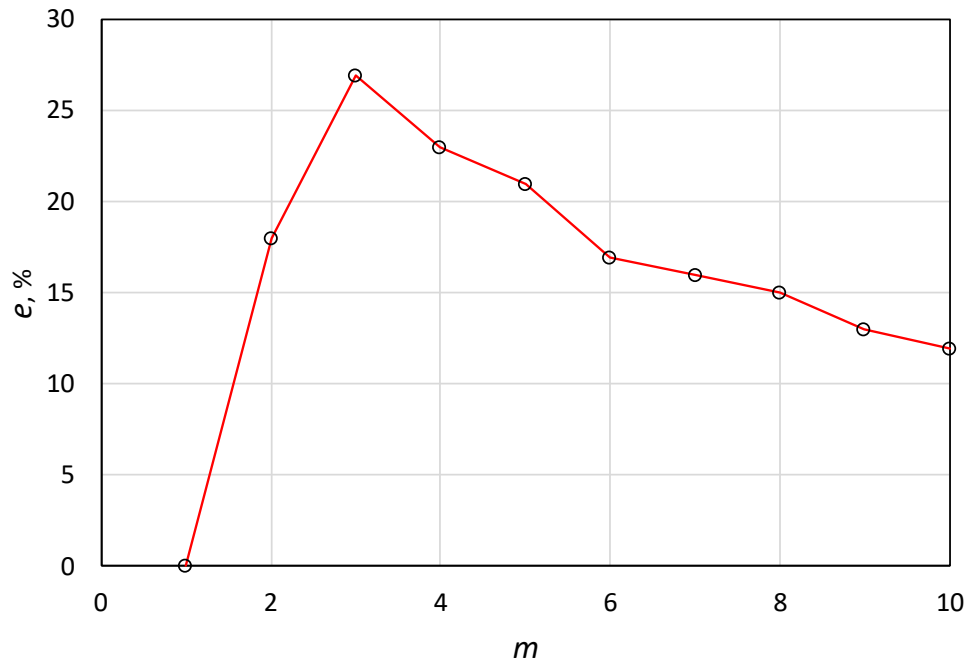


Рисунок 3.5 - Оценка эффективности метода при различном числе кластеров

1.6 Выводы к главе 3

В третьем разделе рассмотрена модель облачных и туманных вычислений в SDN, анализ показал:

1. В сетях с туманными вычислениями, под управлением SDN, обоснована целесообразность применения методов кластеризации для эффективного управления потоками трафика, маршрутизацией и миграцией сервисов.
2. 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.
3. 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.

4. Организация процесса сбора и обработки больших объемов информации в местах скопления оконечных устройств должна учитывать стабильность сети, которая прямым образом влияет на качество обслуживания, задержку и надежность передачи данных в облачной структуре.
5. 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).

В целом проведенное исследование показало, что построение сетей с архитектурой туманных вычислений тесно связано с методом кластеризации. Выбор метода кластеризации позволяет повысить эффективность функционирования сети и качество обслуживания трафика. Правильная кластеризация увеличивает эффективность и стабильность сети, повышает уровень качества обслуживания и уровень качества предоставления услуг.

Таким образом, в данном разделе решена задача повышения эффективности функционирования сетей связи за счет применения методов кластеризации в неоднородных сетях с туманными вычислениями. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании энергоэффективных и масштабируемых инфраструктур связи в условиях высокой плотности устройств, жестких требований к задержкам и необходимости обработки больших объемов данных в реальном времени.

ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦСВЯЗИ

Появившиеся в конце прошлого века услуги видеоконференцсвязи стали неотъемлемой частью современного общества, особенно сильно интерес к данным видам услуг возник в пандемию. Однако, видеоконференцсвязь может использоваться не только в коммерческих компаниях. Сейчас активно развиваются услуги телемедицины, в которых видеоконференции являются обязательной составляющей, в образовании довольно часто используется такой формат взаимодействия и даже на уровне государственных организаций часто устраивают совещания через видеоконференцсвязь.

Внедрение видеоконференцсвязи в различные процессы и отрасли позволяет повысить эффективность взаимодействия между сотрудниками, партнерами, студентами и др., работающими удаленно. В том числе одного из основных преимуществ видеоконференцсвязи (ВКС) – это существенная экономия на командировочных и транспортных расходах. И в дополнение к этому ВКС способствует более быстрому принятию сложных решений, требующих диалога между различными участниками или подразделениями.

Рост числа пользователей видеоконференцсвязи (ВКС) за последние несколько лет обусловлен в первую очередь цифровизацией. Наиболее значительный скачок числа пользователей пришелся на 2020–2021 годы, когда в условиях пандемии COVID-19 организации перевели значительную часть сотрудников на удаленный режим работы, и платформы ВКС стали основным коммуникационным инструментом. По данным аналитических агентств, в этот период использование сервисов видеоконференцсвязи увеличилось почти на 90%.

На основе данных Microsoft Teams представлен график роста числа пользователей ВКС (рис. 4.1). Это статистика отражает общую рыночную тенденцию перехода бизнеса на удаленный и гибридный форматы [82, 83].



Рисунок. 4.1 - Динамика роста числа пользователей ВКС

Тем не менее имея неоспоримые преимущества, ВКС не всегда может обеспечить должный уровень качества передачи видео, может быть прерывистый звук, рассинхронизация речевого и видеопотока, задержки в передаче и отображении данных, нестабильное соединение, ухудшение изображения, снижение четкости, появление артефактов и др., что, естественно, не может не повлиять на производительность работников, сорвать важные процессы и в общем снизить удовлетворенность пользователей данной услугой.

Проблемы обеспечения качества обслуживания и качества восприятия для услуг видеоконференцсвязи зависят от множества факторов, а именно, от сетевых характеристик, настроек оборудования самой ВКС, используемых программных продуктов и их совместимости с имеющимся оборудованием, а также пропускной способностью и параметрами сети провайдера, обеспечивающего доступ. Для того, чтобы предотвратить ухудшение качества ВКС, необходимо понимать какие показатели качества обслуживания и качества восприятия оказывают наибольшее влияние на удовлетворенность пользователей и своевременно их отслеживать, оперативно выявлять и устранять возникающие неполадки и по возможности уметь прогнозировать возникновение потенциальных рисков.

4.1 Услуги видеоконференцсвязи, показатели качества

Видеоконференцсвязь появилась в 60-х годах XX века и в основе ее лежали телевизионные технологии и передача данных. Компания AT&T представила свой первый видеофон в 1964 году. Позже для коммерческой эксплуатации были организованы переговорные комнаты, которые надо было заранее бронировать и согласовывать, что было весьма неудобно для занятых людей. Тем не менее идеи организации переговорных кабин или комнат или пространств успешно применяется и сегодня в различных компаниях, т.к. позволяет обеспечить необходимый уровень приватности и тишины и при этом не ограничивает работу других сотрудников.

Технология *Network Voice Protocol (NVP)* для пакетной передачи данных появилась в 1976 году и это предшествовало появлению технологии *VoIP (Voice over IP)*, ставшей весьма популярной позднее. Начиная с 1980-х годов, с появлением цифровых телефонных сетей, ускоряется и развитие ВКС, так в 1991 году было представлено первое решение для видеоконференций на базе персонального

компьютера от *IBM*. Примерно в это же время появляются и основные аппаратные игроки *Cisco (Tandberg)* (1984), *Polycom* (1990) и чуть позже *Lifesize* (2003). В 90-х ВКС уже базируется на интернет-протоколах, а в 1992 году компания *Polycom* выпустила свой первый конференц-телефон, позволяющей разговаривать нескольким сотрудникам одновременно, находясь в одной комнате [84].

Новый этап развития у ВКС начался в 2000-х годах, когда компания *Samsung* выпустила первый сотовый видеотелефон, а *Skype* и *iChat* представили свои программные продукты. Примерно в этот же период происходит разделение продуктов видеоконференцсвязи на 2 крупных направления: 1. Оборудование для ВКС; 2. Программное обеспечение. Программно-аппаратные решения обладают большим функционалом, но более сложные в использовании и получили большую популярность в коммерческом секторе. Программные решения чаще используются рядовыми пользователями в своих личных целях.

Рассмотрим продукты каждого из этих направлений более подробно.

4.1.1 Программные решения для видеоконференцсвязи

До недавнего времени технология видеоконференцсвязи находила применение преимущественно в крупных компаниях с географически распределенной офисной структурой, ее использовали сотрудники для реализации совместных проектов. В то же время, частные пользователи, использовали приложения типа *Skype* для общения с близкими, которые находятся далеко.

Значительный скачок в использовании видеоконференцсвязи произошел в 2020 году на фоне пандемии COVID-19, что привело к резкому спросу на эту технологию во всех сферах жизни. Образовательные организации (школы, колледжи и университеты) также перевели учебный процесс на дистанционный формат обучения

который активно реализовывался посредством ВКС. Эти события стали драйвером развития и распространения множества платформ для видеоконференцсвязи, краткий обзор которых приведен далее.

Одним из первых и наиболее известных продуктов в этой области стал Skype, запущенный в 2003 году. Он стал популярным благодаря понятному интерфейсу и простоте в использовании. К 2009 году число зарегистрированных аккаунтов в системе достигло 500 миллионов. В настоящее время Skype в основном используется для небольших совещаний и в личных целях

Сервис Google Hangouts представлен компанией Google на десять лет позже. Сегодня эта платформа встроена в корпоративный пакет G Suite и активно применяется бизнес-клиентами. Отличительная черта сервиса — тесная интеграция с Google Календарем и почтовым сервисом Gmail: при создании встречи в календаре автоматически генерируется ссылка на видеоконференцию. Для участия достаточно иметь учетную запись Google, дополнительная регистрация не нужна.

Платформа Zoom обрела огромную популярность в период пандемии COVID-19. В 2020 году аналитическое агентство Gartner назвало Zoom одним из лидеров среди решений для видеоконференцсвязи. Стоит отметить, что сервис работает по модели платной подписки: в бесплатной версии длительность конференции ограничена 40 минутами, после чего сеанс автоматически завершается, что создает определенные неудобства, например, при организации дистанционного обучения. В то же время платформа поддерживает подключение до 1000 участников одновременно.

Корпоративное решение Cisco Webex Meetings это платформа для проведения конференций и вебинаров, ориентированная на корпоративный сегмент. Сервис предлагает бесплатное использование для проведения небольших встреч. Конкурентное преимущество этого решения является совместимость с аппаратными

комплексами видеоконференцсвязи и специализированными устройствами, которые могли быть уже внедрены в организации ранее.

Еще один продукт, используемый в сфере дистанционного обучения, — платформа GetCourse, предполагает организацию платного доступа к учебным курсам. Сервис позволяет создавать занятия и курсы, проводимые как в реальном времени, так и предоставляемые подписчикам в записи по заданному расписанию.

Платформа Discord в условиях пандемии также получила широкое распространение в образовательных организациях. Ее функционал не ограничивается проведением видеоконференций: сервис позволяет организовать полноценную образовательную среду по конкретной дисциплине, включая обмен учебными материалами между преподавателем и студентами в соответствии со структурой курса, выдачу и проверку заданий для практических и лабораторных работ.

Кроме того, компания Google в 2017 году выпустила сервис Google Meet, который также активно использовался в период пандемии, в том числе в образовательных целях. Максимальное количество участников конференции в этом сервисе составляет 250 человек.

Сравнение данных платформ представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнение платформ для видеоконференций

Платформа / Характеристика	Google Hangouts	Zoom	Get-Course	Scype	Cisco Webex Meetings	Google. meet	Discord
Операционные системы	Android, iOS	MacOS, Windows, Linux, Android, iOS	Android, iOS	MacOS, Windows, Linux, Android, iOS	MacOS, Windows, Linux, Android, iOS	MacOS, Windows, Linux, Android, iOS	MacOS, Windows, Linux, Android, iOS

Количество участников (максимально)	250	1000	500	50	25 на одном экране	250	50
Общий чат (количество участников)	+ до 150	+ до 500	+	+	+	+	+
Демонстрация экрана	+	+	+	+	+	+	+
Передача файлов	+	+	Н.д.	+	+	+	до 100Мб
Объем аудитории прямой трансляция	До 100 тыс.	Интеграция с Facebook и YouTube	600 тыс.	В Scurve для бизнеса до 10 тыс.	До 1 млн.	До 100 тыс.	Н.д.
Разрешение видео	До 720p	До 720p	До 720p	До 1080p	До 720p	До 720p	До 1080p
Запись	На некоторых платных тарифах	+	+	+(30 дней)	+	+	Н.д.
Дополнительные функции	Интеграция с календарем, почтой и др.	Подмена фона на видео, демонстрация любого приложения с iPhone / iPad	Заработок на вебинарах и курсах	Размытие фона, автоматические субтитры	Автоматическая транскрипция, интеграция с календарем, почтой, голосования	Звонки шифруются	-

Ограничения бесплатной версии	До 10 человек в видеовстречи	40 мин. записи, 40 мин. Групповых конференций, до 100 участников	Триал на 14 дней	Отсутствие ScypeOut и ScypeIn	Тарифы в РФ зависят от партнеров	600 мин. Видеоконференции, до 100 участников	Качество видео до 720р, ограничение размера файлов
Платная версия	В рамках платформы G Suite от 5,4 \$ в мес.	От 14, 99 \$ в мес.	От 2334 руб. в мес.	Поминутная тарификация звонков ScypeOut и ScypeIn	От 13,5 \$ в мес. / Тарифы в РФ зависят от партнеров	В рамках платформы G Suite от 5,4 \$ в мес.	4,99/9,99 \$ в мес.

Корпоративные решения в области ВКС развертываются на аппаратных ресурсах заказчика, размещенных в пределах его корпоративной сети. В качестве таких мощностей используются серверы на базе традиционных процессоров общего назначения (Intel, AMD), а клиентские устройства представлены стандартными персональными компьютерами или мобильными устройствами.

Процесс внедрения подобного решения включает следующие этапы:

1. Подготовка аппаратного или виртуального сервера.
2. Выбор конкретного программного решения ВКС, приобретение лицензии на необходимое количество участников с определением типа лицензии (бессрочная или годовая).
3. Установка выбранного решения на сервер.
4. Установка клиентского приложения ВКС на конечные устройства пользователей.

В качестве конечных устройств могут выступать:

- персональные компьютеры сотрудников, оснащенные веб-камерами, микрофонами и иным периферийным оборудованием;
- мобильные устройства (смартфоны, планшеты);

- переговорные комнаты, оборудованные персональным компьютером с профессиональной периферией: телевизионными панелями, PTZ-камерами, конгресс-системами, акустическим оборудованием и пр. В данной конфигурации компьютер фактически выполняет функции терминала или сервера ВКС;
- аппаратные терминалы ВКС.

На современном рынке представлено множество отечественных программных решений, среди которых: Контур.Толк, Яндекс.Телемост, eXpress, SberJazz, Mint, VideoMost, Webinar Meetings и другие.

Выбор программных корпоративных решений ВКС обусловлен рядом существенных преимуществ. Прежде всего, это доступная цена, которая складывается из стоимости оборудования и лицензий (например, Контур.Толк — от 750 рублей для 100 участников в месяц при годовой оплате). Следует отметить универсальность, т.к. решения подходят для компаний любого масштаба и включают полный набор функций — запись, демонстрацию презентаций, корпоративный чат, трансляции и планирование, нет необходимости использовать специализированное оборудование. А высокая скорость внедрения позволяет развернуть крупную сеть за несколько дней или часов и легко расширить, за счет лицензирования.

Наряду с преимуществами, программные решения ВКС имеют ряд ограничений. Использование процессоров общего назначения, будучи экономически оправданным, накладывает технические ограничения: снижение пропускной способности, ухудшение качества видео и звука, отсутствие приоритезации трафика, рост задержек. Стандартные офисные компьютеры не рассчитаны на высокие нагрузки, что не позволяет гарантировать качественную видеосвязь без ограничений. Кроме того, отсутствует возможность тонкой настройки под индивидуальные требования — ПО поставляется в фиксированной конфигурации.

4.1.2 Программно-аппаратные решения для видеоконференцсвязи

Программно-аппаратные решения для ВКС представляют собой системы, включающие как специализированное оборудование (серверы, терминалы, кодеки), так и программное обеспечение. В отличие от чисто программных решений, развертываемых на стандартном оборудовании, программно-аппаратные комплексы оптимизированы для выполнения задач ВКС и обеспечивают гарантированное качество связи, низкие задержки и высокую надежность.

В условиях реализации политики импортозамещения и необходимости обеспечения информационной безопасности объектов критической информационной инфраструктуры особую актуальность приобретает использование отечественных разработок в области телекоммуникаций.

Среди них можно выделить как универсальные платформы корпоративных коммуникаций (eXpress, TrueConf, МТС Линк), так и специализированные программно-аппаратные комплексы (ПРОТЕЙ-ВКС, VINTEO), ориентированные на корпоративный сегмент и государственные структуры.

Система видеоконференцсвязи «ПРОТЕЙ», разработанная российским холдингом «ПРОТЕЙ», представляет собой комплексное программно-аппаратное решение, включающее сервер ВКС, платформу унифицированных коммуникаций «ПРОТЕЙ-Юником», программно-аппаратный комплекс «Сапфир» и оконечные устройства («Гранат», «Топаз»). Программное решение, функционирующее под управлением операционной системы Astra Linux Special Edition и предназначено для организации видеоконференцсвязи на корпоративных предприятиях, а также органов государственной власти и силовых ведомств. Сервер поддерживает разрешение видео до Ultra HD (4K) с частотой кадров до 30 кадров/с, а также Full HD с частотой до 60

кадров/с, и обеспечивает работу с протоколами сигнализации SIP и H.323, видеокодеками VP8, VP9, H.264, H.265, H.263 и аудиокодеками G.711, G.722, OPUS, AAC.

[85]

Vinteo Video Core представляет собой программный сервер ВКС, выступающий в качестве ядра системы ВКС и коммуникаций. Поддерживает все открытые стандарты связи, включая H.323 и SIP, и обеспечивает полную (более 90% случаев) протокольную и функциональную совместимость с оборудованием ВКС различных вендоров. Позволяет построить сеть конференцсвязи с нуля и расширить возможности уже имеющейся системы ВКС любого производителя, в том числе за счет использования веб-конференций на базе технологии WebRTC, которая дает возможность подключаться к видеоконференции через браузер без установки специализированного ПО. Обеспечивает одновременное подключение до 1000 участников используется в медицине, энергетике, строительной отрасли и государственных органов [86].

В обоих случаях, особое внимание уделяется вопросам безопасности: современные отечественные ВКС-системы поддерживают размещение в защищенном контуре заказчика, используют шифрование каналов передачи данных, интегрируются с DLP-системами и средствами криптографической защиты.

Таким образом, современные программно-аппаратные решения ВКС представляют собой комплексные платформы, сочетающие специализированное оборудование и программное обеспечение для обеспечения качественной, безопасной и масштабируемой видеосвязи в корпоративном и государственном секторах.

4.2 Голографическая связь, видеоконференцсвязь, требования к ресурсам

Термин голографическая связь уже достаточно прочно вошел в документы международных организаций по стандартизации в области телекоммуникаций. Чаще всего встречается термин «коммуникации голографического типа» (НТС – Holographic Type Communications) [87]. Под этим термином чаще всего понимают передачу видео с эффектом присутствия (высокой иммерсивности).

Сам термин «голография» известен со времени изобретения оптического способа записи на фотопластинку изображения с возможностью последующего его воссоздания, воспринимаемого человеческим зрением как объемное изображение [88]. Голография была изобретена Деннисом Габором в 1948 году [88], за что он получил Нобелевскую премию по физике в 1971 году. С тех пор появились и развились различные технологии создания и отображения голографических изображений. В отличие от видео и обычных картинок, которые проецируются на двухмерные экраны, голограмма требует значительно большего объема данных, чтобы полноценно передать истинную трехмерную структуру с дополнительными эффектами глубины и параллакса.

Принципы построения современных терминалов голографической связи отличаются от упомянутых выше, однако они реализуют подобный эффект, воссоздавая иллюзию присутствия в виде объемного изображения.

В отличие от трехмерного изображения (3D) голографическое изображение позволяет наблюдателю рассмотреть объект с разных ракурсов изменяя свое положение в пространстве. На сегодняшний день существует несколько реализаций голографических терминалов. Для их реализации требуется несколько видеокамер, т.е. информации, передаваемое при голографической связи значительно выше, чем для 2D или 3D видеопотоков.

Поскольку в настоящее время пока не существует массово производимых терминалов голографической связи, не существует и общепринятых стандартов для

формирования таких видеопотоков. По оценкам различных экспертов, передача видеопотока голографической связи может потребовать пропускной способности от 1 до 10 Гбит/с [87].

Поскольку нет стандартов формирования потоков сложно предположить применяемые методы. Вероятно, с развитием данного направления будут разработаны эффективные методы кодирования видеоданных, позволяющие понизить требования к пропускной способности. Однако, безусловно, эти требования будут выше, чем требования со стороны традиционных форматов видеопотоков, поскольку требуется передача большего количества информации.

Известные современные терминалы голографической связи [89, 90] формируют наблюдаемое изображение в некотором объеме, например, заполненном паром или на элементах оптической системы полупрозрачных зеркальных поверхностей. До настоящего времени не получен эффект формирования голографического изображения в пространстве (в воздухе). Однако, имеющиеся достижения в этой области уже позволяют говорить о практическом применении таких терминалов для организации услуг голографической видеосвязи.

Следует заметить, что развитие технологий тесно связано с предложением соответствующих продуктов и услуг. Например, развитие 3D телевидения можно проследить на следующем примере. В 2009 г. выходит на экраны фильм Д. Кэмерона «Аватар» [92], в 2010 г. на рынке появляются 3D-телевизоры ведущих производителей, пик продаж приходится на 2012-2013 гг. Далее происходит угасание интереса к данной технологии. В настоящее время многие ведущие производители отказались от реализации 3D технологий в новых моделях, уделив основное внимание качеству изображения и разрешающей способности картинки. Данный пример не позволяет с абсолютной уверенностью утверждать, но возможно предположить, что интенсивное развитие технологии, как правило, сопровождается ростом спроса на

нее, а последний существенно зависит от популяризации услуги и ее привлекательности для массового использования.

На сегодняшний день голограммы могут применяться в различных сферах деятельности, каждая из которых предъявляет специфические требования к качеству обслуживания и восприятия [87]:

- Голографическое телеприсутствие и конференции предполагает организацию встреч между удаленными пользователями с отображением их в виде трехмерных голограмм в натуральную величину [87]. Пример голографической конференции показан на рисунок 4.2, где трехмерные спикеры проецируются в полный рост на экран для чтения лекций в аудитории Имперского колледжа Лондона [92].



Рисунок 4.2 – Голографическая лекция в Имперском колледже Лондона

- Пользователи могут видеть продукты в реальном размере и даже "брать" их в руки с помощью умных перчаток [87]. Практическая реализация данного направления продемонстрирована в Имперском колледже Лондона, где проводились голографические лекции [92].
- Образование и профессиональная подготовка обеспечивает наглядную демонстрацию сложных трехмерных концепций (например, распространение электромагнитных полей) [87]. Примером является использование голограмм

для обучения медицинского персонала (рисунок 4.3), когда дорогостоящее оборудование и устройства могут быть преобразованы в голограммы, что позволяет студентам использовать их виртуально, без затрат средств на покупку.

В рамках данного проекта были разработаны приложения HoloPatient и HoloHuman, которые позволяют студентам взаимодействовать с голографическими пациентами и изучать анатомию человека с помощью шлема смешанной реальности Microsoft HoloLens [93].

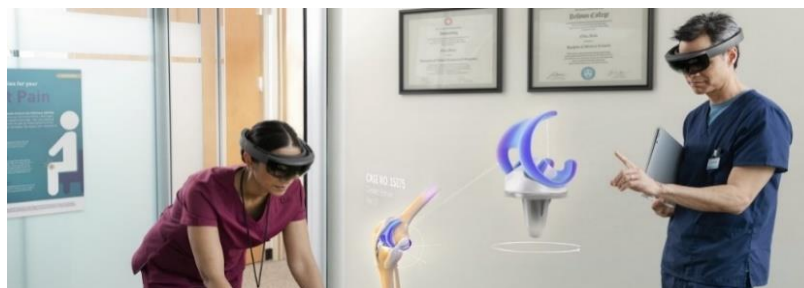


Рисунок 4.3 - Учебная голографическая программа, разработанная HoloPerson и Microsoft и используемая для обучения медицинских работников

— Здравоохранение (голографическая медицина) позволяет проводить удаленные консультации врачей с возможностью наблюдения за поведением пациента в 3D и удаленные операции с помощью роботов, где хирург видит голограмму пациента. [1, с. 427]. Например, в больнице Сант-Пау в Барселоне уже проводились операции с использованием 3D-моделей [94], что позволило хирургам детально наблюдать тело пациента в проекции во время операции (рис. 4.4).

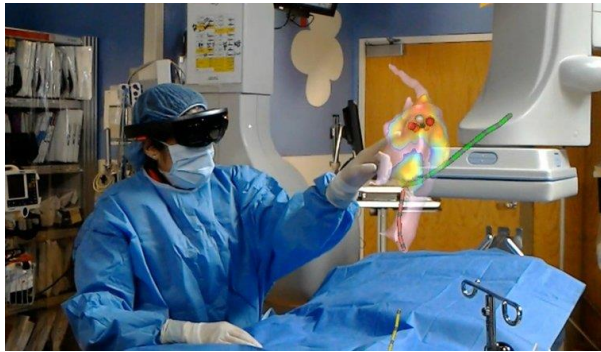


Рисунок 4.4 – Врач использует голографический дисплей во время процедуры абляции сердца

Согласно данным [95, 96], для медицинских приложений задержка не должна превышать 1 мс, а требования к надежности передачи являются наиболее жесткими среди всех категорий использования. Реальные примеры применения голограмм для assistance при хирургических вмешательствах (например, при процедуре абляции сердца) описаны в работе [95].

- Развлечение включает три основных направления: голографическое телевидение, спортивные трансляции (можно увидеть все поле с любого угла) и голографические игры (неиммерсивные на столе и иммерсивные в виртуальном мире).
- Удаленная техническая поддержка предполагает использование голографии для дистанционного решения проблем при ремонте оборудования, автомобилей и бытовой техники. Техподдержка может спроецировать 3D-инструкцию по ремонту на реальное место поломки. Реальный пример такого подхода демонстрирует компании ANDRITZ в промышленном оборудовании [97].

В данной работе рассмотрена область образования, как одна из возможных областей широкого применения голографических технологий в будущем. Возможность иммерсивного погружения в виртуальную среду, эффекты присутствия в значительной степени отражаются на качестве восприятия материала

обучающимися. Данная область может стать одним из факторов развития голографических коммуникаций.

Как было отмечено выше НТС предъявляют имеют большие требования к ресурсам пропускной способности сети, чем обычная передача видео. В связи с этим возникают проблемы обеспечения качества при реализации таких услуг в современных и перспективных сетях связи. В перспективных сетях связи решение данных проблем возможно при комплексном использовании технологии SDN, облачных и туманных вычислений, позволяющих динамически перестраивать ресурсы сети в зависимости от особенностей организации услуги.

Сегодня видеоконференцсвязь (ВКС) является неотъемлемым инструментом коммуникации не только в корпоративном и частном общении, но и в деятельности образовательных организаций, где она обеспечивает реализацию дистанционного обучения и проведения лекционных занятий.

Существующие программно-аппаратные платформы обеспечивают эффективное решение задач удаленного аудиовизуального взаимодействия (Skype, Zoom, отечественные разработки). Однако анализ современных тенденций развития телекоммуникационных технологий позволяет перейти к следующему этапу эволюции — голографической связи.

В отличие от традиционных систем ВКС, ограниченных двумерной передачей изображения, которые решают задачу «увидеть и услышать» удаленного участника, голографические технологии нацелены на достижение эффекта полного погружения и тактильного присутствия, что станет следующим логическим этапом развития телекоммуникационных технологий.

Современные тенденции в области телекоммуникаций свидетельствуют о постепенном переходе от традиционной двумерной видеосвязи к объемным форматам передачи изображения.

4.3 Метод выбора структуры сети голографических услуг

Современные сети связи являются высокотехнологичной платформой для предоставления множества различных информационных услуг. Благодаря гибкости технических решений [98, 99, 100], в частности, возможности организации облачных платформ различного уровня [101], а также миграции сервисов [102], возникает потенциальная возможность распределения вычислительных и коммуникационных ресурсов с целью обеспечения требуемого качества предоставления услуг связи и повышения эффективности их использования.

Задачи распределения ресурсов в сетях связи всегда привлекают к себе повышенное внимание [103, 104], поскольку потенциально они могут быть использованы для повышения эффективности работы сети. Целью этих задач обычно является получение оптимального решения, однако в общем виде они, как правило, не имеют точного решения.

Такого рода задачи и подходы к их решению были рассмотрены, например, в [105, 106]. Специфика постановки этих задач и их решения зависит от особенностей рассматриваемой сети и предоставляемых услуг связи.

В данной работе рассматриваются современные и перспективные сети связи, располагающие ресурсами для организации облачных платформ и миграции сервисов. В качестве объекта исследования рассматривается услуга голографической связи, которая используется для организации видеоконференцсвязи образовательными организациями. Предметом исследования является метод выбора структуры сети распределения трафика голографических услуг.

Стимулом к широкому распространению видеоконференцсвязи (ВКС) [107] стал рост интереса к этой технологии в период ограничительных мер, связанных с эпидемиологической обстановкой.

Появление терминалов голографической связи [108] является очередным шагом повышения иммерсивности услуг. Благодаря повышению степени реалистичности изображения, их применение может повысить эффективность применения ВКС в образовательном процессе. Однако при реализации голографической связи требуется учитывать особенности трафика и требований к качеству его обслуживания в сети.

Требования к качеству обслуживания трафика ВКС не определены отдельными документами, поэтому их следует рассматривать как требования к качеству интерактивных потоковых услуг, определенных в рекомендации Y.1541 [109].

Трафик ВКС порождается передачей видео- и звукового потоков, которые должны быть синхронизированы между собой. Сложности обеспечения качества состоят как в необходимости создания требуемой пропускной способности (скорости передачи), так и в обеспечении достаточно малой задержки, вносимой системой. Причем задержка зависит не только от времени доставки, но и от буферизации данных видео и звука, необходимость которой, в свою очередь, определяется вариацией (дисперсией) времени доставки.

Частота кадров при ВКС может варьироваться от 15 до 60 кадров/с, а размер буфера – от 6 до 30 кадров. Например, при частоте кадров 15 кадров/с и размере буфера 6 кадров задержка, вносимая буферизацией, составит $1/15 \times 6 = 0,4$ с, что в 4 раза превосходит задержку, определенную в рекомендации ITU-T Y.1541 (100 мс). Это приводит к снижению качества восприятия интерактивного режима данной услуги. Задержка в 100 мс при том же размере буфера имеет место только при частоте кадров 60 кадров/с. Если учесть время доставки, то задержка будет превышать требования к интерактивным потоковым услугам во всем диапазоне частот кадров.

Следует отметить, что увеличение задержки в основном снижает качество поддержания диалога между участниками ВКС (интерактивный режим) и почти не влияет на качество ВКС лекционного характера (вещательный режим).

Цель данной работы состоит в повышении эффективности использования ресурсов сети и обеспечении качества обслуживания трафика голографических услуг за счет рационального выбора конфигурации сети.

4.3.1 Выбор структуры сети

Обеспечение качества ВКС может быть достигнуто путем использования облачных технологий и рационального распределения облачных агентов и назначения им пользователей. Будем полагать, 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:

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

Полагаем, что задержка между пользователем j и облачным агентом i определяется такими составляющими как задержка, вносимая облачным агентом a_i (составляющая обслуживания), и задержка доставки данных по маршруту между пользователем и облачным агентом (сетевая составляющая):

$$\tau_{ij} = \tau_S + \tau_N = \tau_S + \tau_T + \tau_P, \quad (4.1)$$

где τ_S – время обслуживания; τ_N – сетевая составляющая (задержка, вносимая сетью связи). Сетевая составляющая, в свою очередь, состоит из двух частей: времени передачи τ_T и времени распространения сигнала τ_P . В общем случае все

составляющие, кроме времени распространения, являются возрастающими функциями от величины нагрузки, производимой пользователями. Для подтверждения данного положения приближенно опишем зависимость средней величины задержки, вносимой облачным агентом, и задержки, вносимой передачей данных выражением вида [Iversen] [110], описывающим задержку на ожидание в системе массового обслуживания (СМО):

$$\tau \sim \frac{\rho \bar{t}}{1-\rho} \varepsilon(*), \quad (4.2)$$

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 (1) может быть записано как

$$\tau \sim \frac{\rho_a \bar{t}_a}{1-\rho_a} \varepsilon(a) + \frac{\rho_L \bar{t}_L}{1-\rho_L} \varepsilon(L) + \tau_p, \quad (4.3)$$

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.

Это выражение отражает зависимость средней величины задержки, вносимой ожиданием, при описании облачного агента и сети моделями СМО. Такое упрощение не всегда допустимо, так как сеть состоит из множества участков и представляет собой, скорее, сеть массового обслуживания (СеМО), но в большинстве случаев задержка передачи определяется наиболее «узким» участком сети (участком с наименьшей пропускной способностью), в таком случае это допущение уместно.

Если описать структуру сети моделью случайного графа (рис. 4.5), то можно заметить, что средняя величина интенсивности заявок (трафика) на наиболее загруженные линии связи (ребра графа) будет тем больше, чем меньше облачных агентов используется для обслуживания трафика. На рисунке пример географически распределенной сети, где координаты x , y можно интерпретировать как условные единицы, выражающие расстояние.

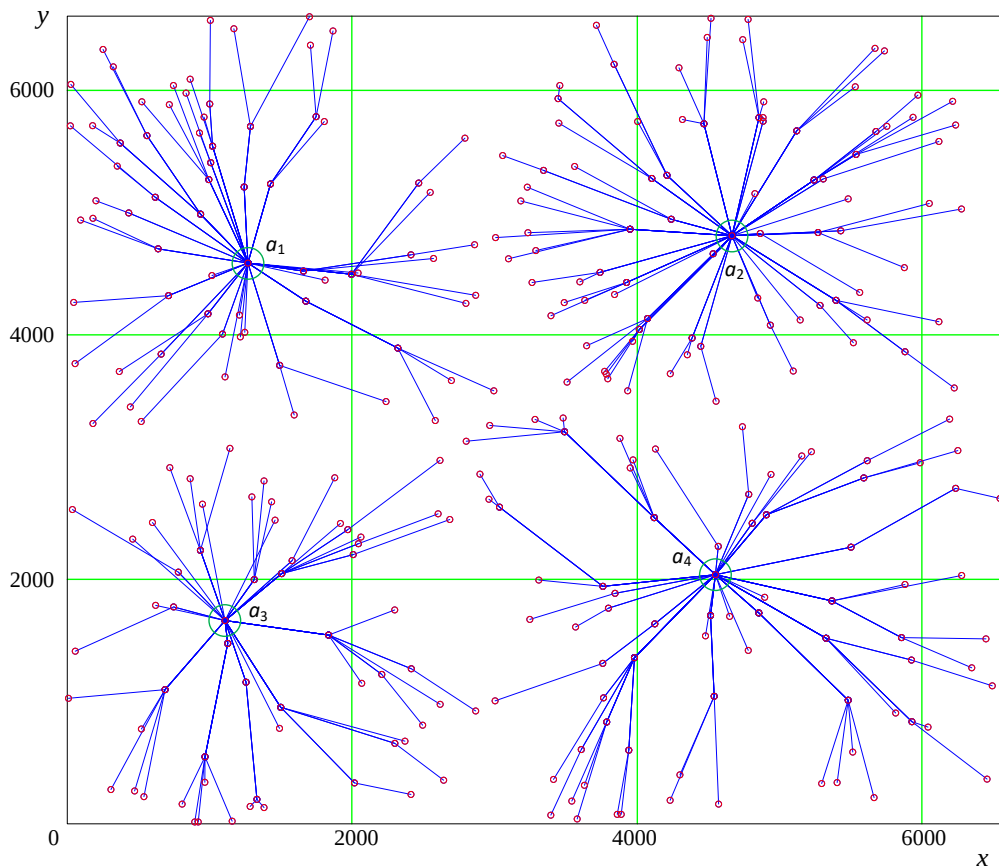


Рисунок 4.5 - Модель структуры сети

На приведенной модели изображены четыре облачных агента, которые обслуживают 300 узлов сети (красные кружки). Облачные агенты $a_1, \dots, a_4$ образуют

четыре кластера, узлы которых связаны с узлом размещения облачного агента кратчайшими маршрутами.

Наиболее загруженные линии связи – это линии между узлом, на котором размещен облачный агент, и другими узлами сети. Полагая, что средняя степень вершины (число таких линий) равна $\bar{r}$, а распределение облачных агентов в сети равномерно, приближенно величину интенсивности трафика и нагрузки можно описать как

$$\bar{A}_L = \frac{\bar{a}_0 m}{n \bar{r}}, \quad \rho_L = \bar{A}_L \bar{t}_L, \quad (4.4)$$

где $\bar{a}_0$ – нагрузка, производимая одним узлом; m – число узлов сети, n – число облачных агентов, $\bar{r}$ – среднее число линий связи, соединяющих узел облачного агента с остальными узлами.

Аналогично можно определить интенсивность трафика и нагрузки на облачных агентов

$$\bar{A}_a = \frac{\bar{a}_0 m}{n}, \quad \rho_a = \bar{A}_a \bar{t}_a. \quad (4.5)$$

Анализ выражения (4.3) с учетом (4.4) и (4.5) демонстрирует убывающий характер зависимости средней величины задержки от числа облачных агентов (рис. 4.6).

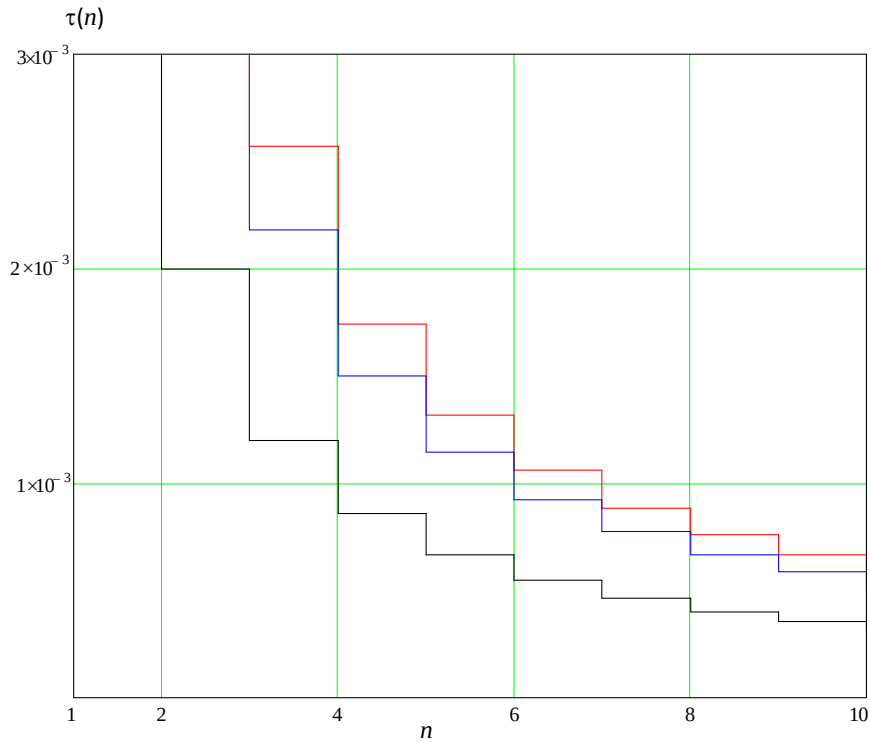


Рисунок 4.6 - Зависимость задержки от числа облачных агентов

Выражение (4.3) демонстрирует зависимость задержки от величины нагрузки. Очевидно, что, согласно (4.1), доминирует та составляющая, у которой эта величина наибольшая.

Уменьшение задержки может быть достигнуто за счет снижения нагрузки на облачных агентов, за счет снижения нагрузки на маршруты пропуска трафика между пользователем и облачным агентом, а также за счет уменьшения расстояния между пользователем и облачным агентом.

Для решения такой задачи могут быть использованы различные методы распределения облачных агентов и ассоциации пользователей с ними, в том числе и методы кластеризации. Критерием является величина задержки между пользователем и облачным агентом.

Рассмотрим две формулировки задачи: как задачу минимизации числа кластеров и средней величины задержки или как задачу приближения величины задержки к заданному значению.

Для первого случая она может быть описана как

$$\begin{aligned} \{a_{i=1\dots n}\}, \{u_{j=1\dots m_i}\}_{i=1\dots n} &= \arg \min_{a_i, u_j} \left\{ n, \bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{1}{m_i} \tau(a_i, u_j) \right\}, \\ \tau(a_i, u_j) &\leq \tau_0, \quad n \leq n_{\max}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где τ_0 — допустимая величина задержки; $n_{\max}$ — максимально допустимое число облачных агентов.

В этом случае задача является двухкритериальной. Требуется минимизация n и $\bar{\tau}$, зависимости которых, с некоторым приближением, взаимно обратные. Полагаем, что теоретически задержка минимальна в случае, когда каждый из узлов является кластером (центром кластера), т.е. содержит облачный агент a_i . Но такая сеть может быть избыточна с точки зрения количества ресурсов, следовательно, неэффективна. Задержка максимальна, когда имеется один единственный кластер (облачный агент a_1), обслуживающий трафик всех узлов. В приведенной формулировке решение зависит от соотношения условной цены образования кластера и величины задержки. Скаляризация данной задачи, например, методом взвешенной суммы, затруднительна из-за ее целочисленной природы в части числа облачных агентов — n .

Во втором случае задачу рассмотрим, как приближение средней величины задержки $\bar{\tau}$ к заданной величине τ_0 для каждого из облачных агентов a_i путем выбора их числа n и ассоциации пользователей u_j с ними:

$$\begin{aligned} \{a_{i=1\dots n}\}, \{u_{j=1\dots m_i}\}_{i=1\dots n} &= \arg \min_{n, a_i, u_j} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{1}{m_i} \left[\tau(a_i, u_j) - \tau_0 \right]^2 \right\}, \\ n &\leq nj_{\max \max}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Результатом решения являются множество из n облачных агентов a_i ($i=1, \dots, n$) и n множеств пользователей u_j ($j=1, \dots, m_i$), состоящих из m_i пользователей, ассоциируемых с соответствующими агентами. В данной формулировке число n определяется необходимым объемом ресурсов для обеспечения требований к задержке. Эта задача однокритериальная и может решаться различными численными методами, однако ее решение не гарантирует равенства или неперевышения заданной величины τ_0 . Следует заметить, что в этом случае также сохраняется целочисленная природа задачи, что требует значительных вычислительных ресурсов.

Применение приближенных методов может ускорить ее решение. Очевидно, что решением (4.7) может быть структура сети, позволяющая получить минимум целевой функции, т.е. минимум отклонений величины задержки от целевой величины τ_0 . Будем полагать, что значения задержки для пользователей в этой структуре будут случайными значениями, распределенными по некоторому закону. Качество же приближенного решения можно оценить разбросом этих значений.

При выборе метода следует учесть специфику задачи в части распределения объектов по территории. Узлами сети являются терминалы пользователей, которыми могут быть терминалы в образовательных организациях или домашние терминалы. Задача состоит в построении структуры сети, а именно в выборе числа и мест размещения узлов, способных выполнять функции облачных агентов, т.е. точек предоставления услуги. В таких условиях географическое распределение узлов определяется распределением пользователей, т.е. плотностью пользователей, которая пропорциональна плотности населения. Таким образом, исходное множество узлов имеет неравномерное распределение, для которого характерны скопления узлов в населенных пунктах (городах), которые могут существенно отличаться друг от друга.

Для упрощения решения данной задачи предлагается решение в два этапа: на первом этапе выполняется задача кластеризации, т.е. выделение s кластеров; на

втором – выбор позиции облачных агентов a_i и перераспределение пользователей по кластерам.

Для кластеризации предлагается использовать алгоритм DBSCAN, который позволяет произвести кластеризацию по плотности пользователей. Алгоритм позволяет выделить s кластеров, объединяя скопления пользователей, что характерно для населенных пунктов. При этом часть пользователей могут оказаться не ассоциированными ни с одним из кластеров (являются шумом, согласно принятому в описании алгоритма термину). К тому же алгоритм не выделяет центров кластеров.

Выбор позиции (узла) облачного агента a_i зависит от конфигурации сети связи. В общем случае позиция узла для размещения облачного агента может быть определена как центр графа G , описывающего структуру соответствующей сети связи (кластера). Центр выбирается как узел, в котором минимальны максимальные длины путей до него от остальных узлов кластера. 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 L размерности m_r графа G , содержащего m_r узлов. Тогда номер вершины графа, соответствующий искомому узлу, будет определяться как

$$i_r^* = \min_i \left\{ \max_j (L_{i,j}) \right\}, \quad i, j = 1 \dots m_r. \quad (4.8)$$

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

Задача поиска k -кратного центра графа относится к NP-сложным и для относительно больших размерностей для ее решения могут быть использованы приближенные методы [111]. Приближенные методы позволяют сократить время вычислений ценой ошибки нахождения центра графа [112]. Выбор конкретного

метода целесообразно производить на основе данных о числе узлов и требуемой точности.

Для решения задачи будем использовать алгоритм, приведенный на рис. 4.7. 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 решается задача кластеризации с использованием алгоритма DBSCAN. В результате выделяется s кластеров по признаку плотности пользователей. Практически выделяются 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).

На следующем шаге выполняется оценка трафика пользователей в кластерах

$$\{\alpha_{i=1...c}\} = \alpha_0 m_i, \quad i=1, \dots, n, \quad (4.9)$$

где α_0 – удельная нагрузка одного пользователя кластера; s - число кластеров; m_i – число пользователей в кластере.

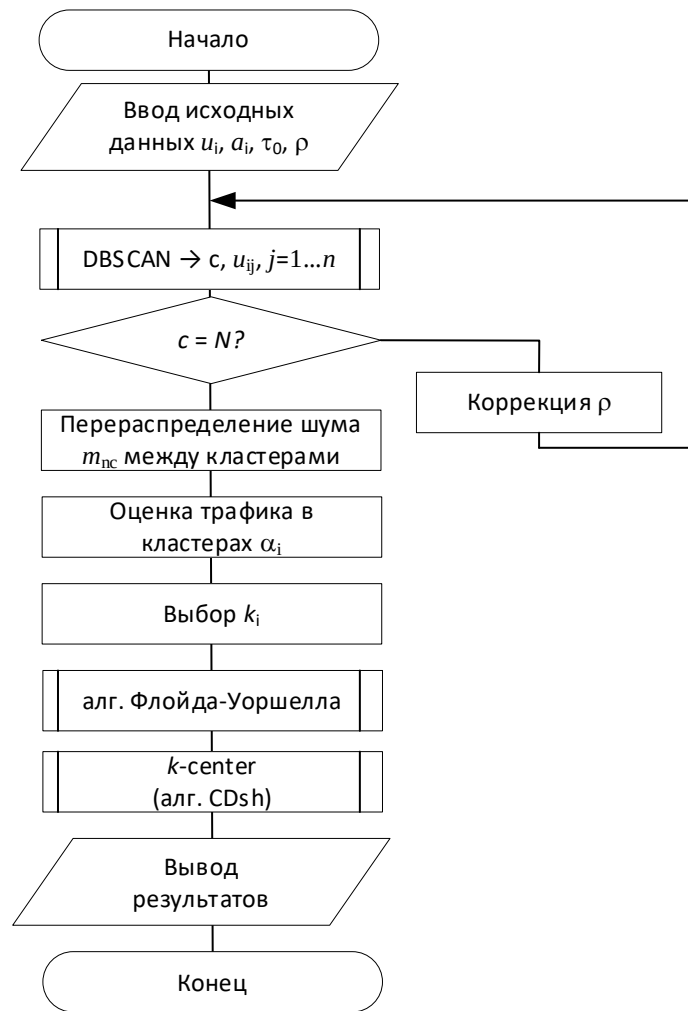


Рисунок 4.7 - Блок схема метода выбора позиций размещения облачных агентов

Требуемое количество облачных агентов в кластере определяется как округленное до большего целого отношение интенсивности трафика к производительности облачного агента

$$k = \frac{\alpha_i}{\eta_0}, \quad i = 1, \dots, c,$$

где η_0 – производительность облачного агента.

Далее выполняется поиск всех кратчайших путей в графах, представляющих каждый из кластеров (для этого используется алгоритм Флойда-Уоршелла).

После этого выполняется поиск центров графов. Если достаточно одного центра ($k=1$), то центр находится по матрице длин кратчайших путей, согласно (4.7).

Если $k>1$, то используется алгоритм CDSH [110] для приближенного решения задачи k -кратного центра графа. Этот алгоритм позволяет получить достаточно высокую точность решения задачи о k -кратном центре графа и имеет относительно низкую сложность $O(n^2 \log n)$.

Следующий шаг – перераспределение $n_{\text{пс}}$ пользователей между выделенными кластерами (центрами кластеров). Пользователи приписываются к ближайшим центрам кластеров.

4.3.2 Эффективность метода

Для сравнительной оценки эффективности предложенного метода выберем в качестве базового метода квазислучайный метод распределения облачных агентов. Последний заключается в том, что скопления пользователей (населенные пункты – кластеры) выбираются вручную (по административному признаку). Размещение облачных агентов производится согласно потребности в производительности на основе данных о производимой нагрузке, при этом позиции (узлы) для размещения облачных агентов выбираются случайным образом.

Отличия предложенного метода состоят в способе выделения кластеров и размещения агентов внутри кластеров. Будем оценивать эффективность как относительное изменение задержки из расчета на одного облачного клиента.

Для сравнения выбрана гипотетическая сеть, включающая 1000 узлов (пользователей), которые распределены неравномерно по территории и образуют пять

скоплений, имитирующих распределение пользователей в населенных территориях. Пример результата применения описанного метода приведен на рисунке 4.8. По осям отложены условные единицы расстояния.

В данном примере скопления узлов (кластеры) содержали близкие количества пользователей, поэтому величины производимого в кластерах трафика также близки, для их обслуживания было выбрано по два облачных агента, выбор позиций которых выполнялся с помощью алгоритма CDSH (на рисунке 4.8 не показаны связи между кластерами). В данном примере было размещено 10 облачных агентов.

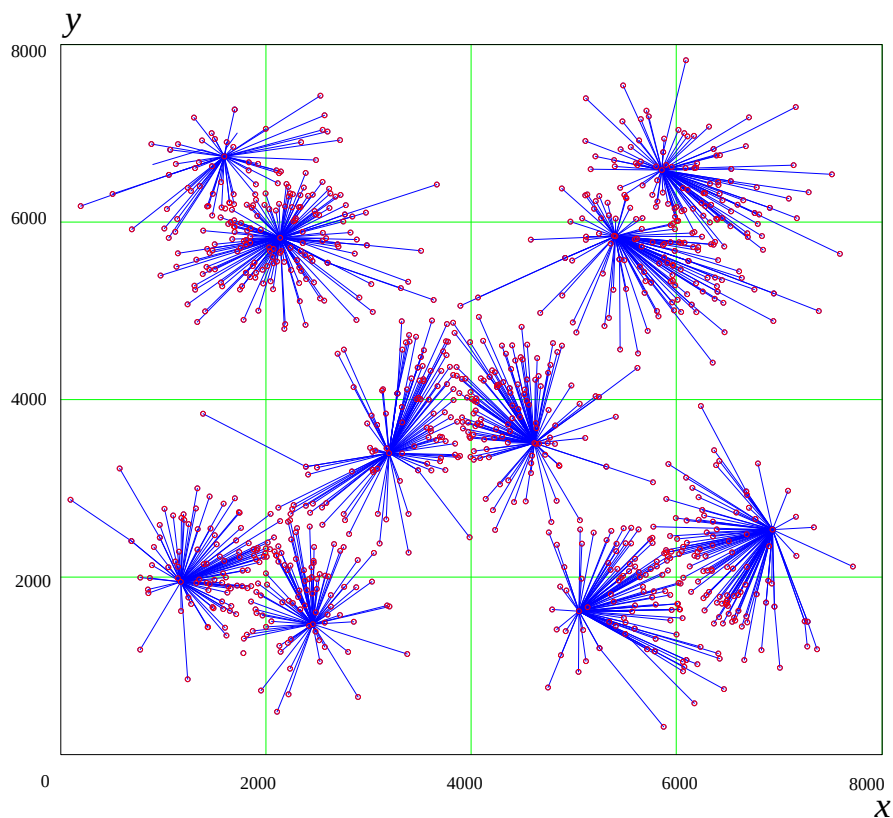


Рисунок 4.8 - Пример результата применения предлагаемого метода

Для оценки эффективности применения предложенного метода был проведен ряд экспериментов для сетей с различной структурой (размещением пользователей, их количеством, числом и размером скоплений).

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

$$e = 100 \frac{\bar{\tau}^{\otimes} - \bar{\tau}^*}{\bar{\tau}^{\otimes}} \%, \quad (4.10)$$

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. 4.9, были получены для сетей с различным числом пользователей (узлов) и различным числом скоплений (кластеров). Из рис. 4.9 видно, что с ростом числа пользователей эффективность предлагаемого метода увеличивается от 1,3% до величины около 37% при увеличении числа пользователей от 100 до 2000 и числа кластеров от 2 (крестики, черная кривая) до 5 (кружки, красная кривая).

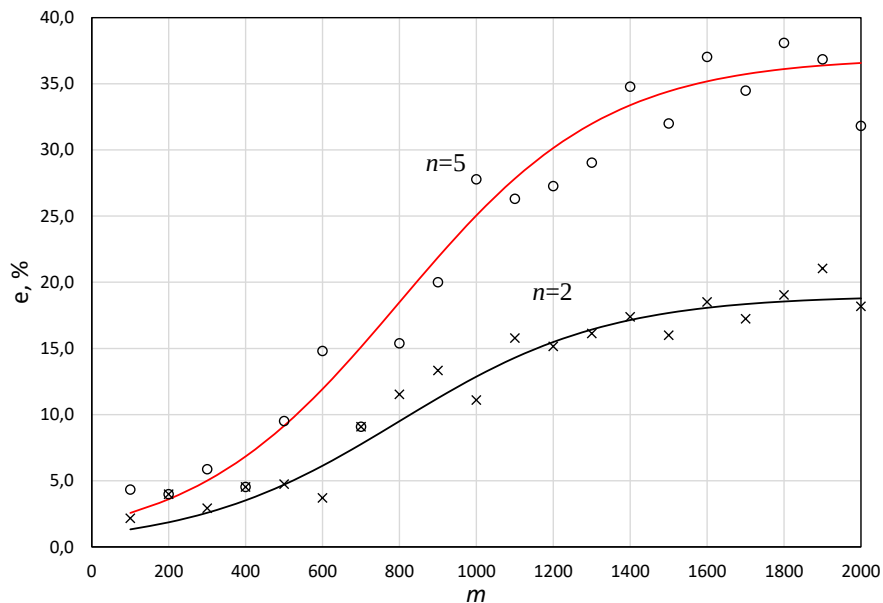


Рисунок 4.9 - Зависимость эффективности метода от числа пользователей и числа кластеров

Полученные результаты объясняются тем, что с ростом числа пользователей требуется большее число облачных клиентов. При их случайном распределении ошибка выбора позиции выше, чем при использовании алгоритма CDSH – это приводит к росту эффективности при увеличении числа пользователей.

При малом числе кластеров и большом числе пользователей в кластере требуется большее число облачных агентов в каждом кластере. Увеличение их количества приводит к снижению эффективности за счет уменьшения ошибки выбора позиций для облачных агентов.

На рис. 4.10 приведены эмпирические гистограммы распределения задержки для маршрутов при построении сети предлагаемым методом (гистограмма 1) и квазислучайным методом (гистограмма 2).

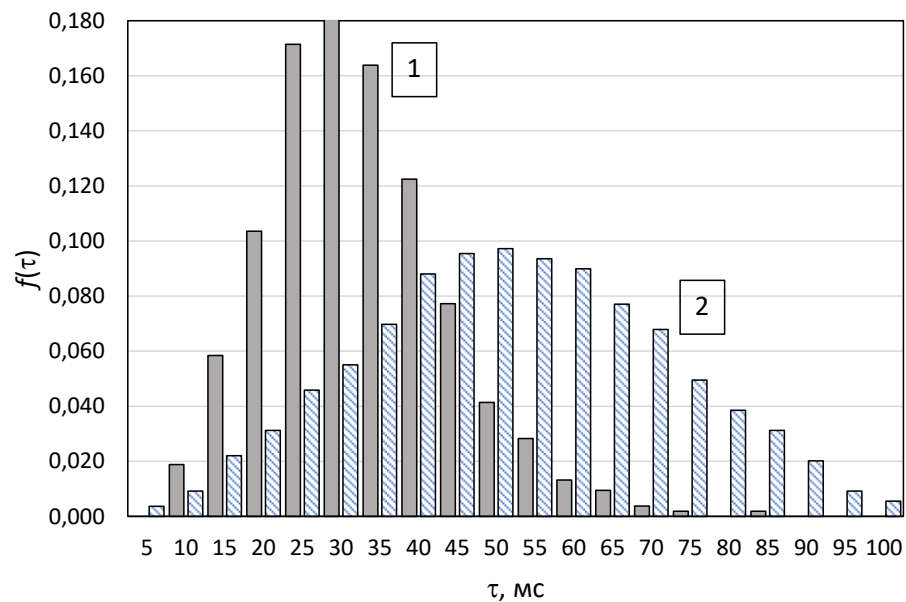


Рисунок 4.10 - Распределение задержки в структурах, построенных предлагаемым методом и квазислучайным методом

Из приведенных выше 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 (4.6) предложенным методом выше, чем квазислучайным методом.

4.4 Выводы к главе 4

В четвертом разделе проведен анализ видеоконференцсвязи и голографической видеоконференцсвязи. По итогам проведенного анализа получены следующие результаты:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Таким образом, в данном разделе решена задача повышения эффективности функционирования сетей связи при предоставлении голографических услуг за счет применения туманных вычислений, а также разработанного метода выбора структуры сети на основе кластеризации DBSCAN и поиска k -кратного центра графа. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании масштабируемых инфраструктур для перспективных иммерсивных услуг связи в условиях высоких требований к пропускной способности, задержкам и качеству обслуживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в первой главе анализ показал, что классическая архитектура сетей не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным сетям связи. Текущий этап развития сетей связи характеризуется активным внедрением технологий 5G, которые предполагают не только рост скорости, но и кардинальное изменение архитектуры с использованием виртуализации сетевых функций и программно-конфигурируемых сетей, в том числе с применением граничных и туманных вычислений. Миграция сервисов позволяет решать задачу повышения качества за счет масштабирования граничных и туманных облачных платформ без роста требований к пропускной способности сети. Это особо важно для новых услуг связи с повышенными требованиями к величине задержки доставки данных (услуги телеприсутствия, виртуальная и дополненная реальности, голографическая связь). Возможность использования динамического управления логической структурой сети позволяет операторам гибко управлять распределением ресурсов, оперативно перенаправлять трафик и своевременно внедрять новые услуги, обеспечивая высокое качество обслуживания (QoS). Следовательно, с целью обеспечения эффективного функционирования современных сетей связи необходимо рационально выбирать их логическую структуру и механизмы управления трафиком. Для решения этих задач необходимы новые методы и модели построения сетевой инфраструктуры.

Во втором разделе проведен анализ особенностей сетей ИВ. Показано, что ИВ имеют неоднородную структуру, в которой можно выделить области, определяемые структурными элементами окружения (дороги, тротуары, тоннели, здания), причем плотность узлов в рамках этих элементов может существенно различаться. Основной задачей организации движения подвижных головных узлов (ПГУ) является выделение групп узлов сети в границах структурных элементов. Для решения данной

задачи разработан метод выделения кластеров на основе алгоритма кластеризации DBSCAN, позволяющий выделять группы узлов с различной плотностью. Выделение таких кластеров дает возможность организовать сбор данных с помощью ПГУ, выбирая оптимальную скорость движения в каждом кластере. Разработанный метод повышает эффективность использования ПГУ, причем эффективность (прирост числа обслуженных узлов) тем выше, чем больше неравномерность распределения узлов в сети.

В третьем разделе исследованы методы кластеризации в архитектурах с туманными вычислениями. Проведенный анализ показал, что выбор алгоритма кластеризации является нетривиальной задачей, поскольку от входных параметров и свойств алгоритмов зависит эффективность функционирования сети. Обзор плотностных алгоритмов кластеризации показал, что выбор метода зависит от особенностей размещения узлов в пространстве, расстояний между узлами и наличия областей с высокой и низкой концентрацией узлов. Организация сбора и обработки больших объемов информации в местах скопления оконечных устройств должна учитывать стабильность сети, влияющую на качество обслуживания, задержку и надежность передачи данных. Разработанный метод формирования туманных кластеров на основе алгоритма DBSCAN обеспечивает уменьшение доли заявок, не получивших обслуживание, на величину до 27%. В целом установлено, что построение сетей с архитектурой туманных вычислений тесно связано с методом кластеризации, а правильная кластеризация повышает эффективность и стабильность сети, качество обслуживания и качество предоставления услуг.

В четвертом разделе рассмотрены услуги видеоконференцсвязи (ВКС) и голографической ВКС. Коммуникации голографического типа требуют больших ресурсов пропускной способности и обеспечения меньших значений задержки доставки данных. Интерактивный характер таких услуг обуславливает жесткие

требования к временным параметрам передачи пакетов. При предоставлении голографической ВКС требования к ресурсам сети возрастают из-за более высокой интенсивности трафика. Для реализации таких услуг в сетях пятого и последующих поколений предложено использовать гибкую структуру на основе облачных технологий и передаче функций предоставления услуги облачным агентам, размещаемым на элементах сети связи с учетом их производительности, трафика пользователей и задержки передачи данных. Разработан метод выбора структуры сети голографической ВКС, предполагающий приближенное решение задачи оптимального распределения ресурсов путем выбора числа и позиций размещения облачных агентов. Задача решается в два этапа с использованием метода кластеризации DBSCAN и метода поиска k -кратного центра графа CDSH. Результаты показали, что предложенный метод позволяет получить лучшие решения по сравнению с квазислучайным методом выбора облачных агентов, что позволяет уменьшить задержку на величину до 37% в зависимости от числа пользователей и числа кластеров.

Таким образом, в работе решены следующие основные задачи:

1. Проанализированы особенности и произведен выбор алгоритма кластеризации для сети Интернета вещей;
2. Разработана модель сети ИВ с различным распределением узлов сети;
3. Разработан метода сбора данных сети ИВ с применением подвижных головных узлов;
4. Проанализированы и исследованы свойства алгоритмов кластеризации в архитектуре с туманными вычислениями;
5. Разработан метод оптимизации туманных кластеров для повышения эффективности функционирования сети;
6. Разработана модель голографической видеоконференцсвязи;

7. Разработан метод выбора структуры сети голографических услуг с учетом применения облачных технологий.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании современных сетей связи в условиях высокой плотности устройств, жестких требований к задержкам и необходимости обработки больших объемов данных в реальном времени, а также в процессе обучения студентов и аспирантов профильных высших учебных заведений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

API - Application Programming Interface

AR - Augmented Reality

BIRCH - Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies

BSS - Business Support Systems

CDS_h - Connected Dominating Set with heuristic

DBSCAN - Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise

DWDM - Dense-Wavelength Division Multiplexing

FOREL - FORmal ELe ment

GMM - Gaussian Mixture Model

HDBSCAN - Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise

HEED - Hybrid Energy – Efficient Distribution

HTC - Holographic Type Communications

IoT - Internet of Things

ITU - International Telecommunication Union

LEACH - Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy

LSP - Label Switch Path

M2M - Machine-to-Machine

MEC - Mobile Edge Computing

NFV Network Function Virtualization

NVP - Network Voice Protocol

ONF - Open Network Foundation

OPTICS - Ordering points to identify the clustering

OSS - Operations Support Systems

OTN - Optical Transport Network

PBB - Provider Backbone Bridging

PCE - Path Computation Element

PDH - Plesiochronous Digital Hierarchy

QoS - Quality of Service

SDH - Synchronous Digital Hierarchy

SDN - Software-Defined Networking

URLLC - Ultra-Reliable Low-Latency Communications

БСС - Беспроводная сенсорная сеть

ИБ - Интернет Вещей

ИИ - Искусственный Интеллект

ИК - Исследовательская комиссия МСЭ

МСЭ - Международный Союз Электросвязи

МСЭ-Т - Международный Союз Электросвязи, сектор стандартизации телекоммуникаций

ПО - Программное Обеспечение

ЦОД - Центр Обработки Данных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITU-T Recommendation Y.3001. Future networks: Objectives and design goals [Electronic resource] / International Telecommunication Union. – 2011. – URL: itu.int (дата обращения: 15.05.2026).
2. Гольдштейн, Б. С. Сети связи пост-NGN / Б. С. Гольдштейн, А. Е. Кучерявый. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2014. – 160 с. – ISBN 978-5-9775-0900-8. – URL: <http://m.ibooks.ru/bookshelf/340666/reading> (дата обращения: 15.05.2026). – [Электронный ресурс].
3. Paramonov, A. Beyond 5G Network Architecture Study: Fractal Properties of Access Network / A. Paramonov, A. Muthanna, O. I. Aboulola [et al.] // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, No. 20. – P. 7191. – DOI: 10.3390/app10207191.
4. Кучерявый, А. Е. Сети связи ожидает блестящее наукоемкое будущее / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2022. – № 1. – С. 3–5.
5. Кучерявый, А. Е. Сети связи следующего поколения / А. Е. Кучерявый, А. Л. Цуприков. – Москва : ФГУП ЦНИИС, 2006. – 280 с.
6. Кучерявый, А. Е. Сети связи 2030: от сверхнизких задержек к тактильному интернету / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2023. – № 4. – С. 12–18.
7. Владыко, А. Г. Программируемые сети SDN : учебное пособие / А. Г. Владыко, А. С. Мутханна, Р. В. Киричек, А. Н. Волков, М. А. Маколкина, А. И. Парамонов. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2019. – 96 с.
8. Michel, O. Scalable Video Conferencing Using SDN Principles / O. Michel, S. Sengupta, H. Kim, R. Netravali, J. Rexford // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2025 Conference. – 2025. – P. 112–125.
9. Гольдштейн, Б. С. Программно-конфигурируемые сети SDN. Протокол OpenFlow : учебное пособие / Б. С. Гольдштейн, В. С. Елагин, А. А. Зарубин, А. Е.

Селиванов ; СПбГУТ им. М. А. Бонч-Бруевича. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2018. – 47 с.

10. ETSI White Paper No. 23. NFV Security in 5G [Electronic resource] / European Telecommunications Standards Institute. – 2020. – URL: [etsi.org](https://www.etsi.org) (дата обращения: 16.05.2026).

11. Network Functions Virtualisation (NFV) [Электронный ресурс] / ETSI (European Telecommunications Standards Institute). – URL: <https://www.etsi.org/technologies/nfv> (дата обращения: 16.05.2026).

12. Al-Ansi, A. Survey on intelligence edge computing in 6G: characteristics, challenges, potential use cases, and market drivers / A. Al-Ansi, A. M. Al-Ansi, A. Muthanna [et al.] // Future Internet. – 2021. – Vol. 13, Issue 5. – P. 118. – DOI: 10.3390/fi13050118.

13. Software-Defined Networking: The New Norm for Networks : ONF White Paper [Electronic resource] / Open Networking Foundation. – 2012. – URL: <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2011/09/wp-sdn-newnorm.pdf> (дата обращения: 15.05.2026).

14. Haleplidis, E. Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture Terminology : RFC 7426 [Electronic resource] / E. Haleplidis, K. Pentikousis, S. Denazis [et al.] ; Internet Research Task Force (IRTF). – 2015. – URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7426> (дата обращения: 15.05.2026).

15. Recommendation ITU-T Y.3300. Framework of software-defined networking : approved in 06/2014 [Electronic resource] / International Telecommunication Union. – Geneva, 2014. – URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/13016> (дата обращения: 15.05.2026).

16. Recommendation ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond (09/2015) [Electronic resource] / International Telecommunication Union. – URL: [itu.int](https://www.itu.int) (дата обращения: 16.05.2026).

17. State of IoT 2025: Number of connected IoT devices growing 14% to 21.1 billion globally [Electronic resource] / IoT Analytics. – 2025. – URL: [iot-analytics.com](https://www.iot-analytics.com) (дата обращения: 16.05.2026).
18. Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2030 [Электронный ресурс] // Statista. – URL: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (дата обращения: 06.05.2026).
19. Ericsson Mobility Report [Электронный ресурс] // Ericsson. – URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report> (дата обращения: 06.05.2026).
20. Купи ИИ: продажи умной техники выросли почти вдвое по сравнению с 2024 годом [Электронный ресурс] // Hi-Tech Mail.ru : сетевое издание. – 2026. – URL: mail.ru (дата обращения: 16.05.2026).
21. [CES 2026] Компаньон в быту: делаем повседневную жизнь проще [Электронный ресурс] // Samsung Newsroom Россия : официальный сайт. – 2026. – 13 янв. – URL: <https://news.samsung.com/ru/ces-2026-kompanon-v-bytu-delaem-povsednevn> (дата обращения: 16.05.2026).
22. Сценарии умного дома : Творческий подход [Электронный ресурс] // SberDevices : корпоративный блог. – 2025. – 19 сент. – URL: <https://sberdevices.ru/press/blog/detail/sczenarii-umnogo-doma/> (дата обращения: 16.05.2026).
23. Умный дом поможет сократить расходы на электричество [Электронный ресурс] // Умный дом и Интернет вещей : информационный портал. – [2024–2026]. – URL: <https://умный-дом-интернет-вещей.рф/novosti/umnyj-dom-pomozhet-sokratit-rashody-na-elektrichestvo/> (дата обращения: 16.05.2026).
24. Российский рынок ИИТ растет за счет промышленности и автоматизации [Электронный ресурс] // РУБЕЖ : информационно-аналитический журнал. – 2026. –

- 22 апр. – URL: <https://ru-bezh.ru/kompanii-i-ryinki/news/26/04/22/rossiyskiy-rynok-iiot-rastet-za-schet-promyshlennosti-i-avtomati> (дата обращения: 16.05.2026).
25. Промышленный Интернет вещей (IIoT): новые технологии в производстве [Электронный ресурс] // Seldon!News : информационный агрегатор / ИА «Монитор». – 2026. – 12 мая. – URL: <https://myseldon.com/ru/news/index/334669365> (дата обращения: 16.05.2026).
26. «Умный город» Росатома в 2025 году расширил применение ИИ [Электронный ресурс] // ComNews : сетевое издание. – 2026. – 15 янв. – URL: <https://www.comnews.ru/content/243300/2026-01-15/2026-w03/1009/umnyy-gorod-rosatoma-2025-godu-rasshiril-primenenie-ii> (дата обращения: 16.05.2026).
27. Маколкина, М. А. Приложения дополненной реальности в «умных городах» / М. А. Маколкина, А. С. Бородин, А. С. Мутханна, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2019. – № 12. – С. 44–50.
28. IIoT решения для розничной торговли [Электронный ресурс] // AppTask : официальный блог компании. – 2024. – 3 окт. – URL: <https://apptask.ru/blog/iiot-reseniia-dlia-roznicnoi-torgovli> (дата обращения: 16.05.2026).
29. Шарлаева, М. В. Исследование внедрения телемедицинских услуг в организации здравоохранения / М. В. Шарлаева // Электросвязь. – 2024. – № 8. – С. 53–60.
30. Heinzelman, W. R. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [Electronic resource] / W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan // Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00). – Maui, HI, USA : IEEE, 2000. – Vol. 8. – P. 1–10. – URL: scilit.net (дата обращения: 16.05.2026).
31. Кучерявый, А. Е. Интернет вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2015. – № 1. – С. 21.

32. Москаленко, Т. А. Архитектуры промышленного Интернета Вещей / Т. А. Москаленко, Р. В. Киричек, А. С. Бородин // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 49–56.
33. Киричек, Р. В. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей / Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. В. Прокопьев, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2014. – Т. 2, № 4. – С. 29–41.
34. Кучерявый, А. Е. Выбор головного узла кластера в однородной беспроводной сенсорной сети / А. Е. Кучерявый, А. Салим // Электросвязь. – 2009. – № 8. – С. 32–36.
35. Гимадинов, Р. Ф. Модели кластеризации в сетях связи пятого поколения 5G / Р. Ф. Гимадинов, А. С. Мутханна, А. Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 3. – С. 11–19.
36. Мутханна, А. С. Алгоритмы энергоэффективной кластеризации для беспроводных нательных сенсорных сетей общего назначения / А. С. Мутханна, М. В. Шарлаева // Электросвязь. – 2023. – № 8. – С. 27–33.
37. Ward, J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function / J. H. Ward // Journal of the American Statistical Association. – 1963. – Vol. 58, No. 301. – P. 236–244.
38. Ким, Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка [и др.]. – Москва : Финансы и статистика, 1989. – 215 с. : ил. – ISBN 5-279-00247-X.
39. Clustering Cloud Workloads: K-Means vs Gaussian Mixture Model / M. S. Kumar, V. K. Soundararajan, P. Kiruthika [et al.] // Procedia Computer Science. – 2020. – Vol. 171. – P. 158–167. – DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.017.
40. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks / W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan // Proceedings of the 33rd Annual Hawaii

International Conference on System Sciences (HICSS '00). – Maui, HI, USA : IEEE, 2000. – Vol. 8. – P. 8020–8029.

41. Younis, O. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks / O. Younis, S. Fahmy // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2004. – Vol. 3, No. 4. – P. 366–379. – DOI: 10.1109/TMC.2004.41.

42. Елфимова, Л. Д. Модифицированный алгоритм кластеризации FOREL / Л. Д. Елфимова // Кибернетика и системный анализ. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 138–144.

43. Zhang, T. BIRCH: an efficient data clustering method for very large databases / T. Zhang, R. Ramakrishnan, M. Livny // ACM SIGMOD Record. – 1996. – Vol. 25, No. 2. – P. 141–152. – DOI: 10.1145/235255.235333.

44. 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. – Portland, Oregon : AAAI Press, 1996. – P. 226–231.

45. Ankerst, M. OPTICS: ordering points to identify the clustering structure / M. Ankerst, M. M. Breunig, H.-P. Kriegel, J. Sander // ACM SIGMOD Record. – 1999. – Vol. 28, No. 2. – P. 49–60. – DOI: 10.1145/304182.304187.

46. Campello, R. J. G. B. Density-based clustering based on hierarchical density estimates / R. J. G. B. Campello, D. Moulavi, J. Sander // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining: Pacific-Asia Conference (PAKDD 2013). – Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. – P. 160–172. – DOI: 10.1007/978-3-642-37456-2_14.

47. Парамонов, А. И. Выделение аномалий в сетевом трафике на основе плотностного анализа данных / А. И. Парамонов, А. С. Мутханна, М. В. Шарлаева // Труды учебных заведений связи. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 18–26.

48. Frey, B. J. Clustering by passing messages between data points / B. J. Frey, D. Dueck // Science. – 2007. – Vol. 315, No. 5814. – P. 972–976. – DOI: 10.1126/science.1136800.

49. Luxburg, U. von. A tutorial on spectral clustering / U. von Luxburg // *Statistics and Computing*. – 2007. – Vol. 17, No. 4. – P. 395–416. – DOI: 10.1007/s11222-007-9033-z.
50. Кучерявый, А. Е. Летающие сенсорные сети / А. Е. Кучерявый, А. Г. Владыко, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. В. Прокопьев, И. А. Богданов, А. А. Дорт-Гольц // *Электросвязь*. – 2014. – № 9. – С. 2–5.
51. Futahi, A. Ubiquitous Sensor Networks in the Heterogeneous LTE Network / A. Futahi, A. Koucheryavy, A. Paramonov, A. Prokopiev // *17th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)*. – PyeongChang, Korea : IEEE, 2015. – С. 28–32.
52. Шкляева, А. В. Сбор данных с наземного сегмента летающей сенсорной сети как система массового обслуживания / А. В. Шкляева, Р. В. Киричек, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый // В сборнике: *Интернет вещей и 5G*. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2016. – С. 12–16.
53. Футахи, А. Беспроводные сенсорные сети с мобильными временными головными узлами / А. Футахи, А. И. Парамонов // *Электросвязь*. – 2016. – № 9. – С. 48–54.
54. Киричек, Р. В. Беспилотный летательный аппарат как система массового обслуживания / Р. В. Киричек, А. И. Парамонов // *Электросвязь*. – 2015. – № 7. – С. 16–19.
55. 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.
56. Бузюков, Л. Б. Исследование характеристик самоорганизующейся беспроводной сети при различных способах размещения узлов / Л. Б. Бузюков, Д. В. Окунева, А. И. Парамонов // *Труды учебных заведений связи*. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 28–32.

57. Окунева, Д. В. Анализ связности беспроводной самоорганизующейся сети при различном распределении узлов по территории / Д. В. Окунева, Л. Б. Бузюков, А. И. Парамонов // Электросвязь. – 2016. – № 9. – С. 58–62.
58. Mixture distribution [Electronic resource] // Wikipedia : the free encyclopedia. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mixture_distribution (дата обращения: 24.08.2021)
59. Röver, C. Discrete Approximation of a Mixture Distribution via Restricted Divergence / C. Röver, T. Friede // Journal of Computational and Graphical Statistics. – 2017. – Vol. 26, No. 1. – P. 217–222. – DOI: 10.1080/10618600.2016.1276840.
60. Ghojogh, B. Fitting A Mixture Distribution to Data: Tutorial [Electronic resource] / B. Ghojogh, A. Ghojogh, M. Crowley, F. Karray. – 2020. – URL: arxiv.org (дата обращения: 24.08.2021).
61. Multivariate Normal Distribution [Electronic resource] // MathWorks : official website. – URL: <https://www.mathworks.com/help/stats/multivariate-normal-distribution.html> (дата обращения: 24.08.2021).
62. Marshall, A. W. A bivariate uniform distribution / A. W. Marshall // Stanford University Technical Report № 244. – Stanford, CA, USA, 1988. – P. 10.
63. Мандель, И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
64. Paramonov, A. Clustering Optimization for Out-of-Band D2D Communications / A. Paramonov, O. Hussain, K. Samouylov, A. Koucheryavy, R. Kirichek, Y. Koucheryavy // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2017. – Vol. 2017. – Art. ID 6747052. – DOI: 10.1155/2017/6747052.
65. Хуссейн, О. А. Анализ кластеризации D2D-устройств в сетях пятого поколения / О. А. Хуссейн, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2018. – № 9. – С. 32–38.

66. Варельджян, К. С. Оптимизация траектории движения БПЛА в летающих сенсорных сетях / К. С. Варельджян, А. И. Парамонов, Р. В. Киричек // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 20–25.
67. Scikit-learn: Machine Learning in Python [Electronic resource]. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/index.html> (дата обращения: 24.08.2021).
68. 2014 SIGKDD Test of Time Award Winners [Electronic resource] // Association for Computing Machinery : official website. – URL: <https://www.kdd.org/awards/view/2014-sikdd-test-of-time-award-winners> (дата обращения: 24.08.2021).
69. Syakur, M. A. Integration K-Means Clustering Method and Elbow Method For Identification of The Best Customer Profile Cluster / M. A. Syakur, B. K. Khotimah, E. M. S. Rochman, B. D. Satoto // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 336 : The 2nd International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE). – Art. ID 012017. – DOI: 10.1088/1757-899X/336/1/012017.
70. Кучерявый, А. Е. Сети связи пост-NGN / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Р. Г. Кучерявый. – Санкт-Петербург : Медиа Папирус, 2014. – 216 с. – ISBN 978-5-906213-05-1.
71. Recommendation ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond [Electronic resource] / International Telecommunication Union. – 2015. – URL: itu.int (дата обращения: 16.05.2026).
72. ITU-T Technical Report FG-NET2030-Arch. Network 2030 Architecture Framework [Electronic resource] / International Telecommunication Union. – Geneva : ITU, 2020. – 145 p. – URL: itu.int (дата обращения: 16.05.2026).
73. Волков, А. Н. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G Meganetlab СПбГУТ / А. Н. Волков, А. С. А. Мутханна, А. Е. Кучерявый [и др.] // Электросвязь. – 2023. – № 6. – С. 5–14.

74. Goudarzi, M. An application placement technique for concurrent IoT applications in edge and fog computing environments / M. Goudarzi, H. Wu, M. Palaniswami, R. Buyya // IEEE Transactions on Mobile Computing. – 2021. – Vol. 20, Issue 4. – P. 1298–1311. – DOI: 10.1109/TMC.2020.2967040.
75. NIST Special Publication 500-325. Fog Computing Conceptual Model: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology [Electronic resource] / National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, MD : NIST, 2018. – URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.500-325> (дата обращения: 16.05.2026).
76. Ungurean, I. Software Architecture of a Fog Computing Node for Industrial Internet of Things / I. Ungurean, N. C. Gaitan // Sensors. – 2021. – Vol. 21, Issue 11. – Art. ID 3715. – DOI: 10.3390/s21113715.
77. 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.
78. Muthanna, A. Secure and reliable IoT networks using fog computing with software-defined networking and blockchain / A. Muthanna, A. A. Ateya, A. Khakimov [et al.] // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2019. – Vol. 8, Issue 1. – Art. ID 15. – DOI: 10.3390/jsan8010015.
79. Волков, А. Н. Туманность в перспективных сетях связи для услуг телеприсутствия / А. Н. Волков // Электросвязь. – 2024. – № 4. – С. 7–13.
80. Марочкина, А. В. Моделирование и кластеризация трехмерной сети интернета вещей с применением метода оценки фрактальной размерности / А. В. Марочкина // Электросвязь. – 2023. – № 6. – С. 60–66.
81. Oueis, J. Small cell clustering for efficient distributed fog computing: A multiuser case / J. Oueis, E. C. Strinati, S. Sardellitti [et al.] // 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology

Conference (VTC2015-Fall). – Boston, MA, USA : IEEE, 2015. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/VTCFall.2015.7390974.

82. Кучерявый, А. Е. Перспективы развития видеоконференцсвязи и телекоммуникационных услуг в условиях цифровизации и гибридного формата работы / А. Е. Кучерявый, А. С. Мутханна // Электросвязь. – 2021. – № 6. – С. 14–22.

83. Chart: Microsoft Teams Powers Past Slack [Electronic resource] // Statista : official website. – 2019. – URL: <https://www.statista.com/chart/20028/daily-active-users-of-slack-and-microsoft-teams/> (дата обращения: 16.05.2026).

84. Гольдштейн, Б. С. Системы многоточечной видеоконференцсвязи: архитектура, протоколы, сигнализация / Б. С. Гольдштейн, А. А. Зарубин. – Санкт-Петербург : БХВ-Санкт-Петербург, 2012. – 256 с. – ISBN 978-5-9775-0761-4.

85. Программное решение «Сервер ВКС» для организации видеоконференцсвязи: техническое описание продукта [Электронный ресурс] // ПРОТЕЙ Технологии : официальный сайт ГК ПРОТЕЙ. – Санкт-Петербург, 2026. – URL: <https://tl.protei.ru/products/videokonferencsvyaz/server-vks-programmnoe-reshenie> (дата обращения: 16.05.2026).

86. Программный сервер видеоконференцсвязи Vinteo Video Core: техническое описание и функциональные возможности платформы [Электронный ресурс] // Системный софт (Syssoft) : официальный сайт. – URL: syssoft.ru (дата обращения: 16.05.2026).

87. Akyildiz, I. F. Holographic type communication: a new challenge for the next decade / I. F. Akyildiz, H. Guo // ITU Journal on Future and Evolving Technologies. – 2022. – Vol. 3, no. 2. – P. 422–447. – DOI: 10.5281/zenodo.6912389.

88. Clemm, A. Toward truly immersive holographic-type communication: Challenges and solutions / A. Clemm, M. T. Vega, H. K. Ravuri [et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2020. – Vol. 58, no. 1. – P. 93–99. – DOI: 10.1109/MCOM.001.1900509.

89. Koucheryavy, A. Holographic telepresence services for public communication networks / A. Koucheryavy // Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications : Proceedings of the 26th International Conference (DCCN 2023), Moscow, September 25–29, 2023. – Moscow : IPU RAN, 2023. – P. 12–21.
90. Разработки СПбГУТ [Электронный ресурс] // Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) : официальный сайт. – Управление проректора по научной работе ; Центр трансфера цифровых технологий. – URL: <https://www.sut.ru/university/structure/podrazdeleniya-prorektora-po-nauchnoy-rabote/ctt/vitrina/razrabotki> (дата обращения: 16.05.2026).
91. Березин, О. С. Большие циклы и конъюнктура рынка кинотеатрального показа : монография / О. С. Березин. – Санкт-Петербург : Реноме, 2014. – 240 с. – URL: https://nevafilm.ru/fileadmin/user_upload/Berezin_OS_Bolshie_cikly_i_konjunktura_rynka_kinoteatralnogo_pokaza_A4_032015.pdf (дата обращения: 16.05.2026). – Текст : электронный.
92. Imperial College Business School to offer live lectures via hologram [Electronic resource] // Imperial News : official website. – 2018. – 1 November. – URL: [imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/2018/11/imperial-college-business-school-offer-live-lectures-via-hologram/) (дата обращения: 16.05.2026).
93. Silva, J. N. A. First-In-Human Use of a Mixed Reality Display for Guidance during Transcatheter Cardiac Mapping and Ablation / J. N. A. Silva, M. Southworth, W. Blume [et al.] // Journal of the American College of Cardiology: Clinical Electrophysiology. – 2020. – Vol. 6, no. 9. – P. 1191–1199. – DOI: 10.1016/j.jacep.2020.04.036.
94. Hospital Sant Pau in Barcelona launches new 3D-printing platform [Electronic resource] // CataloniaBio & HealthTech : official website. – 2019. – 5 November. – URL: <https://catalonia.health/news/hospital-sant-pau-in-barcelona-launches-new-3d-printing-platform/> (дата обращения: 16.05.2026).

95. Шарлаева, М. В. Исследование средней задержки в сетях связи, предоставляющих телемедицинские услуги / М. В. Шарлаева, М. А. Маколкина // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2022. – Т. 10, № 4. – С. 45–54.
96. Шарлаева, М. В. Разработка лабораторного стенда для мониторинга ЭКГ на базе технологии LoRa / М. В. Шарлаева, М. А. Маколкина // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2021) : сб. науч. ст. X Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. / С.-Петербург. гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2021. – Т. 1. – С. 312–317.
97. Metris eXtended Reality [Electronic resource] // ANDRITZ GROUP : official website. – URL: <https://www.andritz.com/metals-en/news-media/references-and-success-stories/metris-xr> (дата обращения: 16.05.2026).
98. Волков, А. Н. Автоматизация развертывания программно-конфигурируемых сетей / А. Н. Волков, А. К. Зенченко // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2024) : сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. / С.-Петербург. гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2024. – Т. 1. – С. 221–225.
99. Волков, А. Н. Сетевая вселенная / А. Н. Волков, А. Е. Кучерявый, А. С. А. Мутханна // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО-2024) : сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. / С.-Петербург. гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2024. – Т. 1. – С. 9–11.
100. Аль-Кереа, З. А. Х. Интеллектуальная бессерверная вычислительная система для услуг телеприсутствия / З. А. Х. Аль-Кереа, А. С. А. Мутханна, А. Е. Кучерявый // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11, № 4. – С. 18–27.

101. Волков, А. Н. Исследование и разработка методов миграции микросервисов в многоуровневой облачной структуре / А. Н. Волков, В. М. Елагин // Студенческая весна - 2023 : материалы 77-й регион. научно-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2023. – С. 121–126.
102. Парамонов, А. И. Миграция сервисов в сетях IoT с использованием Docker и CI/CD / А. И. Парамонов, И. И. Комаров // 65-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников и аспирантов (НТК ППС 2025). – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2025. – С. 287–291.
103. Парамонов, А. И. Оценка эффективности метода маршрутизации, использующего серый реляционный анализ / А. И. Парамонов, А. В. Марочкина, И. Е. Никульский // Электросвязь. – 2024. – № 4. – С. 25–28.
104. Кучерявый, А. Е. Методы распределения трафика в гетерогенной сети интернета вещей высокой плотности / А. Е. Кучерявый, Д. В. Окунева, А. И. Парамонов, Н. Ф. Хоанг // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 67–74.
105. Volkov, A. Optimized data transmission and signal processing for telepresence suits in multiverse interactions / A. Volkov, A. Muthanna, A. Paramonov [et al.] // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2024. – Vol. 13, № 6. – Art. ID 82. – DOI: 10.3390/jsan13060082.
106. 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. – Т. 9, № 4. – С. 75–85.
107. Michel, O. Scalable Video Conferencing Using SDN Principles / O. Michel, S. Sengupta, H. Kim [et al.] // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2025 Conference. – 2025. – P. 112–125.

108. Разработки СПбГУТ [Электронный ресурс] // Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) : официальный сайт. – Управление проректора по научной работе ; Центр трансфера цифровых технологий. – URL: <https://www.sut.ru/university/structure/podrazdeleniya-prorektora-po-nauchnoy-rabote/ctt/vitrina/razrabotki> (дата обращения: 16.05.2026).
109. Recommendation ITU-T Y.1541. Network performance objectives for IP-based services [Electronic resource] / International Telecommunication Union. – 2011. – URL: [itu.int](https://www.itu.int) (дата обращения: 16.05.2026).
110. Iversen, V. B. Teletraffic Engineering Handbook [Electronic resource] / Villy B. Iversen // Technical University of Denmark. – 2001. – 310 p. – URL: https://www.itu.int/ITU-D/study_groups/SGP_1998-2002/SG2/StudyQuestions/Question_16/RapporteursGroupDocs/teletraffic.pdf (дата обращения: 16.05.2026).
111. García Díaz, J. Approximation Algorithms for the Vertex K-Center Problem: Survey and Experimental Evaluation / J. García Díaz, R. Menchaca-Mendez, R. Menchaca-Mendez [et al.] // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 109228–109245. – DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2933923.
112. Марочкина, А. В. Выбор головных узлов кластеров в трехмерных сетях Интернета вещей высокой плотности / А. В. Марочкина // Электросвязь. – 2023. – № 7. – С. 26–32.

ПРИЛОЖЕНИЕ



ООО «ЮбиТел»

197046, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Чапаева, д. 9, лит А, пом. 1-Н, пом. 25
тел. (812) 600-7920, www.ubitel.ru

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «ЮбиТел»

Д.В. Осипов

«08» сентября 2026 г.



АКТ

о внедрении научных результатов диссертационной работы

Воробьевой Дарьи Михайловны

на тему "Разработка и исследование кластеризации сетей Интернета Вещей,
туманных вычислений и голографических коммуникаций",

в ООО «ЮбиТел»

Комиссия в составе:

Председатель комиссии – технический директор, Супян Арсений Юрьевич,
кандидат технических наук

Члены комиссии: -

- заместитель генерального директора, Сапега Ольга Дмитриевна;
- инженер - программист 1 категории, Кудрин Иван Михайлович

Настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Воробьевой Дарьи Михайловны "Разработка и исследование кластеризации сетей Интернета Вещей, туманных вычислений и голографических коммуникаций", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, внедрены в ООО «ЮбиТел» при разработке инструментов моделирования специализированной версии многоцелевой платформы прототипирования телекоммуникационных систем с интегрированными библиотеками искусственного интеллекта «ЮБИСИМ». (Запись в Реестре Российского Программного Обеспечения №23516)

При этом были использованы следующие новые научные результаты из диссертации Воробьевой Д.М.:

- 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, обслуживаемых подвижным головным узлом на 20% для реальных значений неоднородности сети,

- 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%.

Данные модели и методы были использованы при создании библиотек объектов и инструментов моделирования, включенных в составе специализированной версии платформы прототипирования «ЮБИСИМ» разработки компании ООО «ЮбиТел».

Председатель комиссии:

Технический директор



А.Ю.Супян

Члены комиссии -

Заместитель генерального директора,



О.Д.Сапега

Инженер - программист 1 категории



И.М.Кудрин

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

29.05.2026 № 98/54-39
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
доктор техн.наук, доцент



Рабин
Алексей Владимирович

Акт

о внедрении научных результатов, полученных Воробьевой Дарьей Михайловной
в диссертационной работе «Разработка и исследование кластеризации сетей
Интернета Вещей, туманных вычислений и голографических коммуникаций»

Комиссия в составе и.о. декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем В.С. Елагина, доцента кафедры сетей связи и передачи данных Р.А. Дунайцев и заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных О.И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Воробьевой Дарьей Михайловной, использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по дисциплине «Интернет вещей» (Рабочая Программа регистрационный номер № 22.05/358-Д), разделы Программы:
- Ad Hoc или самоорганизующиеся сети. Приложения самоорганизующихся сетей. Всепроницающие сенсорные сети как технологическая основа внедрения концепции Интернета Вещей. Кластеризация сенсорных сетей и основные методы кластеризации, включая биоподобные алгоритмы. Особенности сетевой безопасности в сенсорных сетях;
- Облачные сервисы для подключения Интернет вещей. Качество обслуживания в сетях связи общего пользования и нормативно-правовая база для проведения измерений;
2. При чтении лекций и проведении практических занятий для магистров по дисциплине «Современные проблемы науки в условиях перехода к сетям шестого поколения (6G)» (Рабочая Программа регистрационный номер № 24.05/537-Д), раздел Программы:

- Граничные вычисления. Туманные вычисления. Новая микросервисная архитектура сети. Робототехника и сети связи.

- Метавселенная. Сетевая вселенная. Костюмы телеприсутствия.

3. При чтении лекций и проведении практических занятий для аспирантов по дисциплине «Интернет вещей и самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа регистрационный номер №_25.05/616-Д), раздел Программы:

- Ad Hoc или самоорганизующиеся сети. Приложения самоорганизующихся сетей. Всепроницающие сенсорные сети как технологическая основа внедрения концепции Интернета Вещей. Кластеризация сенсорных сетей и основные методы кластеризации, включая биоподобные алгоритмы. Особенности сетевой безопасности в сенсорных сетях.

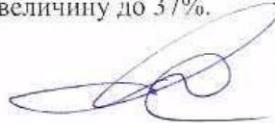
В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Воробьевой Дарьей Михайловной в диссертационной работе:

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 за раунд, 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%.

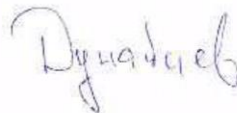
3. Модель и метод размещения облачных агентов для обеспечения требований по качеству обслуживания услуги голографической видеоконференцсвязи с использованием для кластеризации алгоритма DBSCAN с последующим перераспределением некластеризованных пользователей по кластерам при необходимости с помощью метода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

И.о. декана факультета ИКСС
к.т.н., доцент



В.С. Елагин

Доцент кафедры ССиПД
к.т.н., PhD



Р.А. Дунайцев

Зав. лабораторией кафедры ССиПД



О.И. Ворожейкина