

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

Бушеленков Сергей Николаевич

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТЕЙ
ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ**

Специальность 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Доктор технических наук, доцент
Парамонов Александр Иванович

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ	11
1.1 Развитие телекоммуникационных сетей	11
1.1.1 Общие положения	11
1.1.2 Прогноз развития телекоммуникаций.....	13
1.1.3 Анализ развития сетей доступа.....	15
1.2. Анализ развития Интернета вещей	17
1.2.1 Понятие Интернета вещей	17
1.2.2. Основные принципы Интернета вещей.....	19
1.3 Анализ архитектуры сетей Интернета вещей	21
1.3.1. Архитектура Интернета Вещей.....	21
1.3.2. Стандарты, используемые в Интернете вещей.....	36
1.3.3. Приложения Интернета вещей	39
1.3.4. Практическое применение ИВ.....	49
1.4 Выводы.....	51
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ РЕШЕТОК	53
2.1 Анализ особенностей структуры сети высокой плотности	53
2.2 Модель сети связи на основе решеток.....	56
2.3 Теория перколяции и качество функционирования сети.....	64
2.4 Сравнительный анализ применения метода перколяции для оценки связности сети	69
2.5 Выводы.....	74
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫБОРА МАРШРУТОВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ	75
3.1 Анализ моделей точечных процессов в задачах моделировании сети высокой плотности	75
3.1.1 Предварительные замечания	75
3.1.2 Понятие точечного процесса и его интерпретация в прикладной области	76
3.1.3 Параметры и свойства точечных процессов	77
3.1.4 Модели точечных процессов	79

3.1.5 Возможные приложения точечных процессов в моделировании сетей связи.....	86
3.2 Предварительные замечания по задачам выбора маршрута	88
3.3 Постановка задачи построения маршрута.....	90
3.4 Модель и метод выбора узлов для построения маршрута.....	92
3.5 Выводы.....	103
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАФИКА В СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ	105
4.1 Много-путевая маршрутизация.....	105
4.1.1 Предварительные замечания	105
4.1.2 Беспроводные одноранговые и ячеистые сети	106
4.1.3 Достоинства многолучевой маршрутизации	108
4.1.4 Элементы протокола многопутевой маршрутизации	109
4.1.5 Протоколы многопутевой маршрутизации	111
4.1.6 Многопутевая маршрутизация в беспроводных ячеистых сетях	117
4.2 Предварительные замечания.....	120
4.3 Модель много-путевой маршрутизации	121
4.4 Метод выбора маршрутов при много-путевой маршрутизации	126
4.5 Результаты имитационного моделирования	135
4.6 Выводы.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	141
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. Современное общество – информационное общество. На всемирной встрече по вопросам информационного общества, в Женеве в 2003 г. и в Тунисе в 2005 г., была принята «Тунисская программа для развития информационного общества». Данная определила концепцию, которая, фактически констатировала те тенденции развития инфокоммуникационной системы, которые сложились к этому времени. Как концепция построения информационного общества, так и фактические тенденции его развития состоят в стремительном увеличении объема производимой и потребляемой информации, следовательно, и средств ее обработки и доставки. Последние образуют фундамент современной инфокоммуникационной системы. Развитие современных средств телекоммуникаций можно охарактеризовать как повышение доступности любой информации в любом месте и в любое время [1]. Для постижения этих целей развитие телекоммуникаций происходит по ряду направлений, которыми являются повышение пропускной способности сетей связи, уменьшения задержек доставки информации и повышение количества подключенных к сети связи устройств [2].

Рост количества подключенных к сети связи устройств происходит за счет проникновения услуг подвижной связи и развития интернета вещей, причем последний вносит наибольший вклад в этот процесс, поскольку количество устройств не ограничено количеством людей, как это имеет место в сетях подвижной связи. Эволюция сетей связи сопровождается изменением технологической базы, уровень развития которой, как правило, отражает последние достижения науки и техники. На протяжении всей истории развития основным технологий телекоммуникаций в качестве основного целевого показателя следует отметить эффективность использования ресурсов. Эффективность в данном контексте — это достижение поставленной цели минимальными средствами.

Такая особенность современных и перспективных сетей как высокая плотность пользователей приводит к необходимости решения ряда задач организации связи с учетом взаимных влияний узлов сети. Сети интернета вещей представляют собой особый сегмент сети связи, который характеризуется специфическими свойствами трафика и требованиями к качеству его обслуживания. Современные сети интернета вещей как сети 5G также являются гетерогенными. Структура и иные характеристики этих сетей зависят от прикладных задач и являются объектом выбора и оптимизации при планировании.

Развитие технологической базы согласно современным тенденциям и требованиям включает технические и модельно-методические решения, которые направлены на повышение эффективности использования сетевых ресурсов. К модельно-методическим решениям следует отнести знания, позволяющие описать основные характеристики сети, отражающие качество ее функционирования с позиции пользователя и связать их с параметрами сети, отражающими использование сетевых ресурсов. Область этих знаний составляет модельно-методический аппарат описания сетей высокой плотности.

С учетом писанных выше тенденций создание такого модельно-методического аппарата актуально в настоящее время и в обозримом будущем. В частности, важным элементом задач построения сетей высокой плотности является выбор их логической структуры и определение ее основных параметров с учетом эффективности использования ресурсов.

Степень разработанности темы. В область выбранной темы следует отнести работы, посвященные задачам построения сетей 5G и последующих поколений, а также сетей интернета вещей. В ряде таких работ делается акцент на особенности сетей с большим количеством пользователей. В частности, решению вопросам обслуживания трафика интернета вещей посвящены ряд рекомендаций 3GPP, а также ряд научных работ.

Большинство данных рекомендаций и работ направлены на оценку пропускной способности систем связи для пиковых всплесков трафика интернета вещей, а также на исследование особенностей обслуживания пользователей в сети

NR. В большинстве случаев авторы рассматривают сети со структурой «звезда», которая характерна для сетей интернета вещей на базе LTE, а также сетей 5G.

Среди работ, посвященных данной тематике, отечественных и зарубежных авторов следует выделить работы А. Е. Кучерявого, А. И. Парамонова, Р. В. Киричка, Е. А. Кучерявого, К. Е. Самуйлова, С. Н. Степанова, А. В. Рослякова, О. И. Шелухина, С. В. Поршнева, Р. Я. Пирмагомедова, Андреева С. Д., Молчанова Д. А., С. I. F. Akyildiz, A. J. Das, J. H. Lee, S. Adibi и многих других. Их работы направлены на решение многих задач моделирования и построения сетей 5G и последующих поколений, сетей Интернета вещей и тактильного Интернета, повышения эффективности использования сетевых ресурсов и обеспечения качества услуг связи. Эти исследования позволили существенно расширить представления о новых задачах и методах их решения.

Следует отметить, что значительное внимание в научных работах уделяется исследованию характеристик трафика различных услуг, разработке моделей и методов предоставления услуг и созданию различных сетевых архитектур. Однако современные технологии позволяют создавать самоорганизующиеся сети со сложной структурой, как одноранговой, так и иерархической организацией узлов сети. Работы, рассматривающие такие сети как правило учитывают особенности процессов самоорганизации без учета особенностей высокой плотности устройств, которые более подробно рассматриваются в данной работе.

Объект исследования — беспроводные сети связи Интернета вещей высокой плотности.

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

Цель работы и задачи исследования — повышение эффективности использования ресурсов беспроводной сети Интернета вещей высокой плотности путем разработки модельно-методического аппарата, обеспечивающего рациональный выбора логической структуры сети.

Для достижения поставленной цели в работе последовательно решаются следующие задачи:

1. Анализ состояния и перспектив развития методов построения сетей доступа и сетей Интернета вещей в сетях связи общего пользования;
2. Анализ возможности применения теории перколяции в задачах моделирования сетей Интернета вещей.
3. Анализ структур сетей интернета вещей и разработка модели сети на основе моделей решеток;
4. Анализ методов маршрутизации и разработка метода выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности;
5. Разработка метода многопутевой маршрутизации трафика в сети интернета вещей;

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Доказано, что использование положений теории перколяции позволяет оценить основную функциональность сети Интернета вещей высокой плотности, имеющей регулярную связанную (mesh) структуру. В частности, она дает возможность оценки связности сети, описанной моделью кубической решетки, при известной доле функционирующих узлов или их плотности в заданном трехмерном пространстве.
2. Разработана модель логической структуры сети Интернета вещей высокой плотности на основе модели решетки. Разработанная модель описывает логическую структуры сети, организуемой в трехмерном пространстве как простую кубическую решетку, для которой могут быть применены методы теории перколяции, позволяющие оценить вероятность состояние связности сети используя методы.
3. Доказано наличие максимума скорости передачи данных по маршруту в сети Интернета вещей в зависимости от выбора количества транзитных узлов и их позиций и разработан метод рационального выбора транзитных узлов, позволяющий повысить эквивалентную скорость передачи данных.
4. Доказана возможность повышения скорости передачи данных при использовании много-путевой маршрутизации в сети Интернета вещей высокой

плотности и разработан метод выбора маршрутов позволяющий повысить эффективность использования сетевых ресурсов при использовании много-путевой маршрутизации.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость работы состоит в расширении модельно-методического аппарата описания сетей Интернета вещей высокой плотности. В частности, полученные результаты позволили использовать положения теории перколяции в задачах анализа сетей Интернета вещей высокой плотности; разработана модель логической структуры сети Интернета вещей в трехмерном пространстве, описанная моделью простой кубической решетки, позволяющая использовать методы теории перколяции для численной оценки вероятности связности; разработан метод рационального выбора транзитных узлов маршрута, и метод выбора маршрутов при многопутевой маршрутизации позволяющие повысить эффективность использования сетевых ресурсов.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в работе результаты могут быть положены в основу алгоритмов и протоколов управления сетью высокой плотности, а именно протоколов маршрутизации и управления трафиком.

Разработанные модель и метод описания сети высокой плотности моделью простой кубической решетки может быть положен в основу методики планирования сетей высокой плотности в зданиях и сооружениях.

Полученные результаты также могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений, готовящих специалистов соответствующей специальности при чтении лекций и проведении практических и лабораторных занятий.

Результаты работы внедрены в ПАО «РОСТЕЛЕКОМ» при разработке «Методики планирования сети Интернета Вещей», а также при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по курсу «Математические модели в сетях связи», «Методы оптимизации сетей связи» в СПб ГУТ (приложение А).

Методология и методы исследования. Выполненные в работе исследования основаны на положениях теории массового обслуживания, теории вероятностей и математической статистики, методах аналитического имитационного моделирования дискретных событийных систем. Имитационное моделирование разработанных методов рационального выбора узлов маршрута и выбора маршрутов при использовании много-путевой маршрутизации выполнено с использованием программного обеспечения AnyLogic, а также с использованием программы Mathcad.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Модель сети высокой плотности на основе моделей решеток, повышает эффективность построения сети Интернета вещей за счет формирования решетчатых структур, отличающаяся от известных моделей тем, что в ней использованы методы теории перколяции для численной оценки вероятности связности сети.

2. Метод выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов за счет рационального выбора позиций размещения транзитных узлов маршрута, что, в частности, выражается в повышении скорости передачи данных по маршруту, например, при использовании стандарта IEEE 802.11n на величину 38%.

3. Метод многопутевой маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов, что проявляется в повышении эффективной скорости передачи данных на величину до 40% по сравнению со случайным выбором маршрутов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных автором в диссертационной работе научных и практических результатов подтверждается обоснованным выбором предмета и объекта исследований, исходных данных при постановке задач исследования, принятых допущений и ограничений, а также соответствием результатов аналитического и имитационного моделирования, проведенных лично автором, согласованностью с

данными, полученными другими авторами и апробацией результатов на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международной научной конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО). (Санкт-Петербург, 2021, 2022); региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна» (Санкт-Петербург, 2022); 77-я научно-техническая конференция СПб НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио (Санкт-Петербург, 2022).

Публикации по теме диссертации. По теме работы опубликовано 7 научных работ, из них: 3 в рецензируемых научных изданиях (перечень ВАК), 4 в других изданиях и материалах конференций.

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

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

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

1.1 Развитие телекоммуникационных сетей

1.1.1 Общие положения

Потребность передачи информации в обществе существует всегда. Это приводит к постоянному развитию технологий связи, от своих истоков - дым от костров, до сенсорных сетей и тактильного интернета. Основным двигателем развития сетей связи, является потребность в доставке информации. Современные сети включают в себя различные технические средства, которые удобно классифицировать по функциональному назначению. Тогда сеть можно представить, как многоуровневую структуру, на каждом из уровней которой находятся средства, выполняющие определенные функции по передаче информации. В частности, в качестве одного из этих уровней принято выделять уровень доступа.

Уровень доступа включает в себя технические средства, обеспечивающие взаимодействие непосредственно с пользователем (потребителем услуг) или с устройством, находящимся непосредственно у пользователя (оконечным устройством). Уровень доступа часто называют сетью доступа.

Следует заметить, что уровень доступа (сеть доступа) имеет место, практически, в любой сети связи. Рассматривая глобальную сеть связи, можно выделить уровни: доступа, агрегации (распределения), ядро сети. Иногда в этой структуре выделяют и магистральный уровень.

В общем случае, при предоставлении услуги связи могут быть задействованы все эти уровни. Исключения могут составить услуги, которые предоставляются локально.

Рассмотрим далее более подробно уровень сети доступа. Этот уровень является одним из наиболее сложных с точки зрения реализации, поскольку он наиболее массовый и включает в себя как оборудование оператора связи, так и оборудование пользователя. Особая значимость данного уровня проявляется с ростом количества пользователей. Поэтому в сетях Интернета вещей (ИВ) он приобретает первостепенное значение.

Следует отметить, что существуют различные подходы к построению сетей ИВ. Например, в частности, сеть ИВ может иметь всего один уровень - ячеистая (mesh) сеть. В такой сети роли всех элементов идентичны, но эта сеть непременно взаимодействует с оконечными устройствами, т.е. включает в себя уровень доступа. Таким образом, уровень доступа — это тот уровень реализации сети, на который следует обращать особое внимание при построении сетей ИВ. Именно уровень доступа должен обеспечивать взаимодействие с большим количеством оконечных устройств.

Этот уровень чаще всего является «узким местом» сети. Это вполне естественно, т.к. являясь наиболее массовым данный уровень определяет в значительной степени ресурсоемкость, а в конечном итоге и стоимость сети. Поэтому решения, принимаемые на данном уровне, должны быть максимально эффективными. Эффективность решения предполагает получение максимального качества при минимальном расходе ресурсов.

В перспективных сетях связи уделяется значительное внимание решению задач эффективного использования ресурсов сети. Именно эффективное использование ресурсов позволяет достичь желаемых результатов (показателей качества) при росте количества пользователей сетей связи и возрастании требований к качеству предоставления услуг.

Для анализа актуальности задач развития различных технологий связи следует рассмотреть статистику развития основных показателей отрасли связи в

мире. Такими показателями, как правило, являются число пользователей или их доля от численности населения (проникновение), а также показатели трафика услуг связи (количество переданных данных или количество сессий). Анализ таких статистических данных позволяет оценить динамику развития отрасли и ее отдельных направлений.

1.1.2 Прогноз развития телекоммуникаций

Базовым показателем развития сетей связи является количество пользователей. Говоря об Интернете вещей следует обратить внимание на развитие Интернета. Рост количества пользователей Интернет является показателем, отражающим динамику развития сетей передачи данных, на которых основаны, практически, все современные услуги связи.

На рисунке 1.1 приведены статистические данные о росте количества пользователей сети Интернет и прогноз до 2030 года.

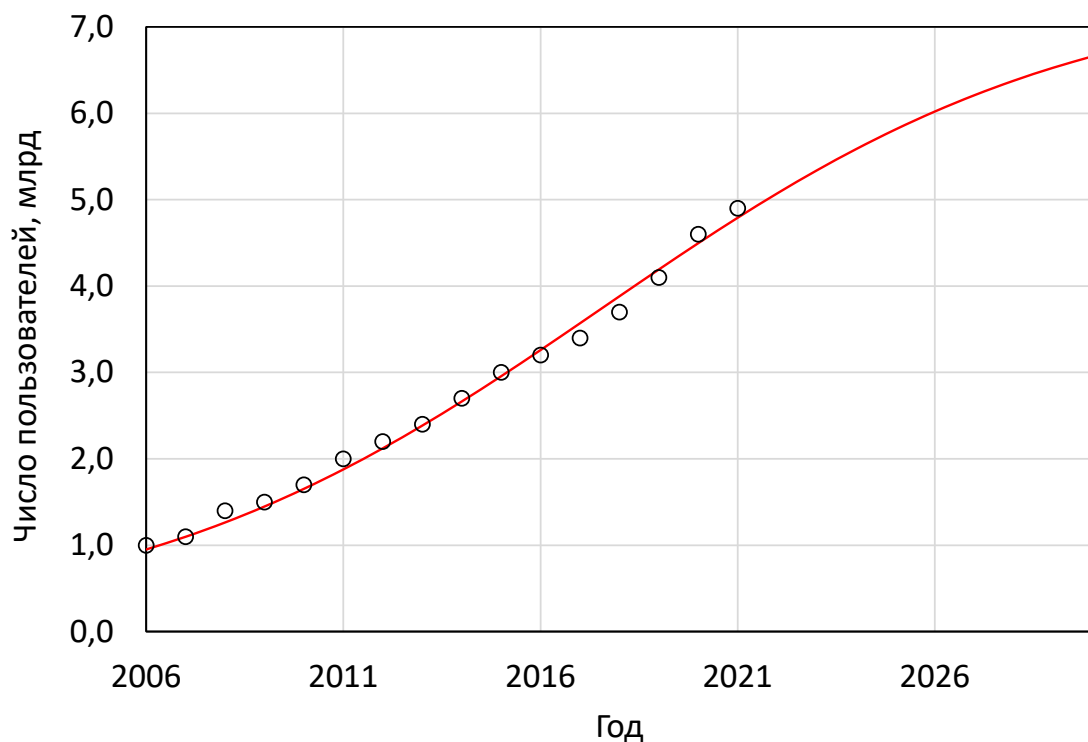


Рисунок 1.1 – Статистика и прогноз числа пользователей Интернет до 2030 г.

Статистика показывает неуклонный рост количества пользователей сети Интернет в мире. На рисунке также приведен прогноз изменения количества пользователей до 2030 г. Прогноз также демонстрирует рост числа пользователей в будущем. Пределом роста в данном прогнозе является число жителей на планете. Приведенная статистика получена на основе данных ИТУ-Т [3], прогноз получен с помощью ассоциативного метода.

Вторым важным показателем развития ИВ является количество пользователей коммуникаций типа «машина-машина» (M2M). В настоящее время этот тип коммуникаций составляет основную долю интернет-вещей, подключенных к сетям связи.

На рисунке 1.2 приведены статистические данные Cisco [4] и прогноз (красная кривая) изменения количества M2M устройств, подключенных к сетям связи.

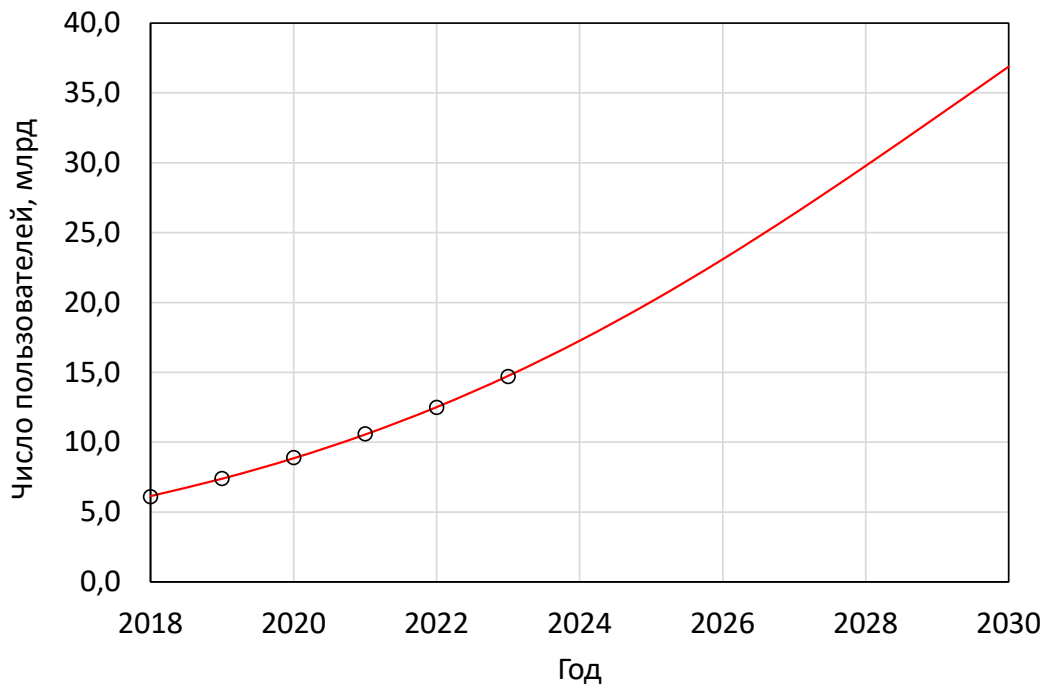


Рисунок 1.2 – Статистика и прогноз изменения количества пользователей M2M коммуникаций

Как видно из представленных данных, уже сегодня количество M2M устройств превышает количество жителей на планете. В дальнейшем ожидается рост этого количества, причем, вероятно, в настоящее время имеет место лишь начальный этап развития ИВ. Таким образом, следует ожидать, что количество подключенных к сети устройств многократно превысит количество жителей.

Ввиду большого количества устройств ИВ трафик, производимый этими устройствами, начинает влиять на сети связи. Даже при малом объеме передаваемых данных, из расчета на одно устройство, общий трафик достаточно велик, что оказывает влияние на качество функционирования сетей связи.

Вполне вероятно ожидать, что с развитием технологий, объем трафика, передаваемого одним устройством, также возрастет. Таким образом, принятие эффективных решений при построении сетей ИВ является необходимым условием развития перспективных сетей связи.

1.1.3 Анализ развития сетей доступа

Не случайно при создании интернета и желании подключиться к сети развилось на базе телефонных линий первую технологию Dial Up. Дальнейшее развитие интернета усложнения контента, развития структуры, потребовало увеличение скорости доступа к интернету, что стало причиной развития новой технологии xDSL, также на базе телефонных линий.

Технология xDSL со временем совершенствовалась, разрабатывая дополнительные стандарты как синхронной, так и асинхронной передачи данных по сетям доступа. Максимальных параметров достиг стандарт VDSL с возможностью передачи на короткие расстояния до 56 Мбит/с.

Возрастающие потребности пользователей не смогли удовлетворить даже скорости VDSL, которые, к слову, имеют серьезные ограничения как по количеству включенных абонентов в кабеле, так и по максимальной возможной длине линии.

На смену технологий по телефонной паре (медные провода), пришла новая технология передача по оптическому волокну. Первым было разработано и воплощено в жизнь многомодовое волокно, но, к сожалению, оно не решало вопрос по передаче на длинные расстояния и на смену ему пришло одномодовое волокно на базе которого на сегодняшний день реализованы самые передовые технологии на базе проводных решений.

Технологии семейства FTTx и технология xPON на сегодняшний день являются основными технологиями для оптического волокна.

Скорости передачи данных по волокну на сегодняшний момент ограничивает только возможности оборудования. Уже на сегодняшний день по одному волокну с помощью спектрального уплотнения возможно передать до 27 Тбит/с.

С внедрением таких технологий пользователю стали доступны скорости во многом превышающие его сегодняшние потребности.

Проводные решения обладают одним недостатком, они требуют конкретного присутствия здесь и сейчас, но увеличивающийся ритм жизни диктует свои условия.

Параллельно с проводными сетями доступа и на базе проводных сетей связи развивались беспроводные сети связи.

Беспроводные сети связи первых поколений строились для обеспеченных людей и были не доступны большинству. Обладали низкой пропускной способностью и большими задержками.

Развитие игровой индустрии, потребность получать информацию везде где только можно (дома, в транспорте, в метро, и т.д.) привели к развитию беспроводных сетей связи с возможностью получения приемлемых скоростей для удовлетворения желаний пользователя.

Внедрение сетей 5G позволят получать пользователю скорости сопоставимые с возможностями проводных технологий, а реализация сверхмалых задержек позволит серьезно развить направление виртуальной реальности и тактильного Интернета.

Последующие развитие беспроводных сетей, появление огромного числа смартфонов привело к возникновению Интернета вещей, технологии, где все устройства находятся в интернете с возможностью удаленного управления.

1.2. Анализ развития Интернета вещей

1.2.1 Понятие Интернета вещей

Чтобы говорить об истории развития Интернета вещей (ИВ) нужно определить, что понимается под данным термином.

Интернет вещей можно определить как концепцию вычислительной сети вещей, оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или внешней средой. Также это некая совокупность разнообразных датчиков, каналов, устройств, объединенных в сеть с помощью любых доступных каналов с помощью единого протокола доступа к глобальной сети Интернет.

Иногда, первой в мире интернет-вещью называют автомат Coca-Cola подключенный к университетскому компьютеру PDP-10 в 1982 году, который мог проверять наличие напитка и его температуры. Но на тот момент не существовало единого протокола доступа, использовался протокол IMP.

Нужно отметить, однако, что принципы и первые приложения ИВ появились гораздо раньше. Например, в 1874 г. во Франции была разработана система датчиков определения погоды и глубины снега на Монблане, которая передавала информацию в Париж [5]. Подобные применения телекоммуникаций получили название телеметрии и широко использовались в различных областях позднее, однако, масштабное развитие началось с развитием сети Интернет и сетей подвижной сотовой связи.

Через 8 лет (1990 год) Джон Ромки презентовал на конференции Interop 89 свой домашний тостер, с возможностью управления через удаленное подключение, хотя его основная цель была в демонстрации возможности работы RFID технологии

Сам термин впервые применен в 1999 году Кевином Эштоном на презентации в Массачусетском технологическом университете, в котором велась речь о всеобщем внедрение радиочастотных меток RFID (Radio Frequency Identification), которые изменят систему управления логическими цепями [7].

-«Если бы у нас были компьютеры, которые знали все, что только можно знать о вещах, используя данные, которые они собрали без нашей помощи, мы могли бы отслеживать и считать все...»

-«Технологии радиочастотной идентификации и сенсорные технологии позволяют компьютерам наблюдать, выявлять и понимать мир без ограничений данных, введенных человеком.»

Конечно, на тот момент Эштон вел разговор только о дешевых RFID метках, на которых можно было записывать только серийный номер, т.к. на тот период технология RFID была весьма дорогой.

Под интернетом вещей понимается не только умный чайник, который кипятит воду по приложению со смартфона, или тостер, а это еще целый ряд устройств таких как: умные датчики, различные контроллеры управления (освещение, голосового управления, управление жестами, системы безопасности, протечек). Технология интернет вещей до 2010 года развивалась медленно, была разработана архитектура интернета вещей, и новые устройства. С 1991 по 1999 год появились (сетевой принтер, умная кофеварка, интернет-камера, дистанционная диагностики, умный холодильник) [7].

В 2008 году было организовано первое интернет-сообщество целью которых было содействие к подключению вещей к интернету.

В 2010 году была создана светодиодная лампочка, которая привела к концепции умного освещения [7].

Все разработки появились не случайно, создание RFID метки началось с необходимости оптимизации систем управления и логистики предприятий.

Сокращение затрат в системах безопасности, наблюдения, транспорта привела к разработке датчиков, интернет-камер.

Потребность в геолокационных сервисах привела к разработке устройств с возможностью получения геолокационных сигналов внутри зданий.

Следующим шагом будет возможность создание сетей будущего с ячеистой топологией, которая включает в себя датчики, метки средства измерения и устройства управления.

Чем больше развивается интернет, тем больше устройств подключается к нему, создавая возможности в сфере аналитики, безопасности, управления.

В 2010 году в связи с повсеместным распространением смартфонов и планшетных компьютеров количество подключенных к Интернету устройств стало 12,5 Млрд, когда население составляло 6,8 млрд. На каждого жителя приходилось практически по 2 устройства.

Между 2008 и 2009 годами количество «вещей» впервые превысило количество живущих людей на земле

По мнению консалтингового подразделения компании Cisco Интернет вещей – всего лишь количественная точка, когда количество «вещей», подключенных к интернету, превысит количество людей, которые Интернетом пользуются.

Таким образом можно сказать, что с 2009 года произошел переход от «Интернета людей» к «Интернету Вещей»

1.2.2. Основные принципы Интернета вещей

Существует три основных принципа:

- Распространенная коммуникационная инфраструктура

- Глобальная идентификация
- Возможность отправки и получения данных через персональную сеть или Интернет.

Интернет вещей отличается от существующего Интернета следующими вещами:

- Главное вещь, а не человек
- Количество подключенных объектов интернет вещей больше, чем людей на земле.
- Низкие скорости передачи данных и минимальные размеры объектов
- Основа считывания информации, а не коммуникациях
- Альтернативные стандарты и новая инфраструктура.

Если сравнивать сети следующего поколения и интернет вещей, то в первом главное коммуникация людей в любое время и в любом месте., а во втором добавляется еще коммуникация устройств или вещей. Таким образом концепция интернета вещей выглядит так:

- Коммуникация в любое время (круглосуточно, в независимости от того, что делаешь)
- Коммуникация в любом месте (улица, дом, средства связи)
- Коммуникация между любыми устройствами (компьютеры, люди без компьютеров, люди и устройства, устройства)

В рекомендации МСЭ-Т Y.2060 ИВ [1] — это глобальная инфраструктура информационного общества, обеспечивающая передовые услуги за счет организации связи между вещами на основе существующих и развивающихся совместимых технологий.

В качестве «вещи» понимается физический или виртуальный объект.

Физическим объектом может выступать «устройство» при наличии основных и дополнительных возможностей как коммуникация, зондирование, сбор, обработка, хранение данных.

Виртуальный объект представляет собой программу, которая, объединяется и идентифицируется через коммуникационные сети.

Из вышеизложенного следует что виртуальные объекты не могут существовать без физических реализаций, хотя для физического объекта существует хотя бы один виртуальный.

Под интернет-вещью нужно понимать такое устройство, которое отвечает следующим пунктам:

- Доступ к сети Интернет для передачи или запроса данных.
- Адресацию в глобальной сети или идентификатор, для возможности осуществления обратной связи.
- Наличие интерфейса взаимодействия с пользователем.

Протокол взаимодействия Интернет вещи единый, для которого любой узел сети равноправен в предоставлении своих сервисов. Т.е. каждый узел предоставляя свой сервис оказывает некую услугу поставки данных. Следовательно, это позволяет взаимодействовать интернет-вещам друг с другом и дает возможность решать совместные задачи.

Такие объединения интернет вещей можно считать локальными сетями, которые могут быть объединены какой-либо общей функцией или зоной обслуживания.

1.3 Анализ архитектуры сетей Интернета вещей

1.3.1. Архитектура Интернета Вещей

Интернет вещей является частью сетей следующего поколения, и его архитектура в классическом виде схожа с архитектурой сети связи. Существует множество представлений архитектуры (эталонных моделей) Интернета Вещей, однако к системообразующим относится 4-е уровня [1,6]:

- Уровень Сенсоров и датчиков (Устройства)
- Уровень Шлюза и Сети
- Уровень Управления и Обработки
- Уровень Приложения.

Боле подробно архитектура ИВ приведена на рисунке 1.3. Следует более подробно описать каждый из упомянутых уровней.

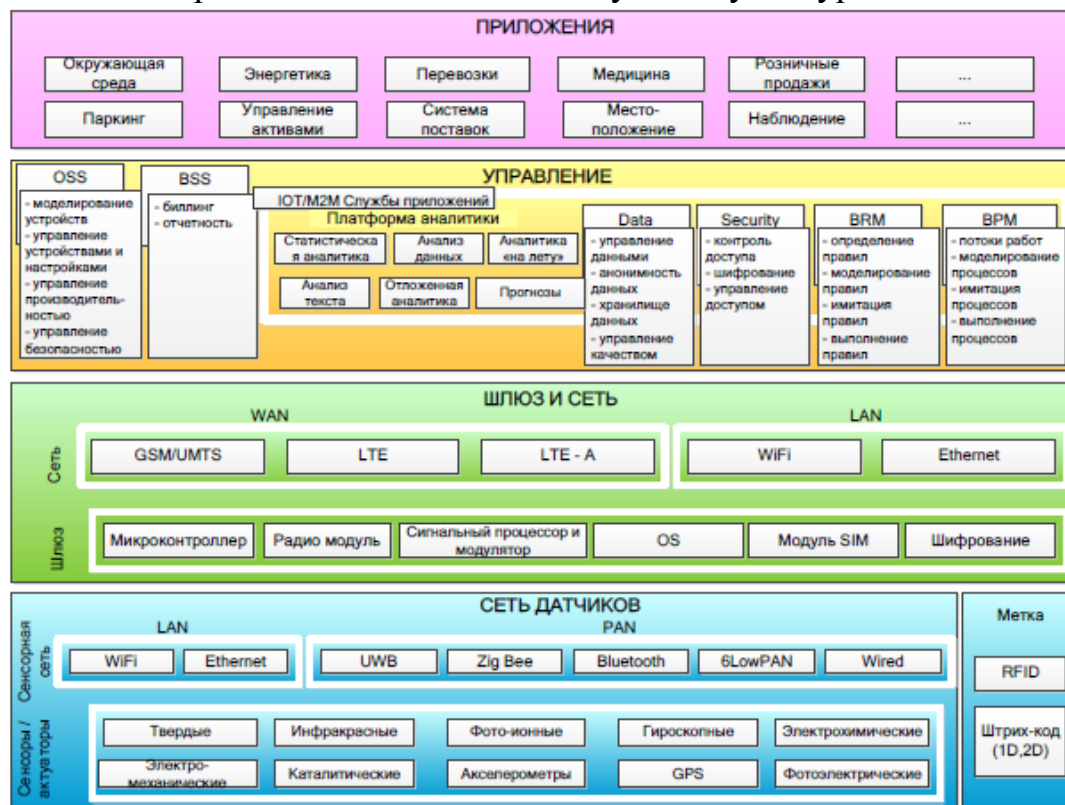


Рисунок 1.3 – Архитектура Интернета вещей

Уровень датчиков и периферийных устройств:

Нижний уровень архитектуры интернета вещей, состоит из smart объектов с интегрированными в него датчиками (сенсоры), а также периферийных устройств со своими протоколами. Датчики собирают информацию в реальном масштабе времени. Постепенное сокращение габаритов датчиков привело к возможности интегрировать в различные физические объекты.

Датчики могут измерять параметры контролируемого объекта и преобразуя его в сигнал, который может принимается соответствующим устройством.

Датчики можно разделить на две основные категории:

- Простые Сенсоры

- Световые (фотодиоды, фототранзисторы, и.т.д)
- Звуковые (микрофон, ультразвуковые датчики)
- Электромагнитные (Датчики измерения физических характеристик, электрическая емкость, сопротивление, индуктивность)
- Выключатели (Измерители угла поворота, Измерители скорости вращения)
- Сложные Сенсоры
 - Специализированные датчики (Датчики газа, Датчики спектра и т.п.)
 - Видео камеры

Требования, предъявляемые к датчикам:

- Минимальная цена, т.к. используется большое количество в объекте.
- Низкие энергозатраты, т.к. питается от батарейки. На сегодня стало нормой работа без обслуживания до 10 лет.
- Минимальные затраты на обслуживание, т.к. в основном датчики находятся в труднодоступных и удаленных местах.
- Частичная обработка информации перед передачей (например, первичная обработка изображения с принятием решения на основе ИИ)

Периферийные устройства имеют небольшую функциональность, их задача состоит в том, чтобы обеспечить преобразование аналоговой информации, поступающей от датчиков(сенсоров) в цифровую и наоборот.

Периферийное устройство объединяет несколько подуровней, Физический, уровень периферийного вычисления, уровень периферийной коммуникации. Главная функциональность это локальная ETL.

Помимо данной задачи периферийные устройства обеспечивают:

- Сбор, анализ и фильтрацию данных (приведение информации к стандартному виду, выбирать возможность отправки только необходимых данных далее в сеть).

- Обработка конфиденциальных данных без отправки в сеть. (обеспечение контроля и хранения информации)
- Уменьшение времени отклика во взаимодействии датчик – сеть. (сеть в зависимости от построения обладает разной пропускной способностью, и отправка всех данных без предварительной обработки ведет к увеличению задержки в работе устройств)

Периферийные устройства имеют четыре режима работы:

- Сон
- Измерение и сбор информации с датчиков
- Связи (передача-получение информации)
- Установки и подключения

В основном производители выпускающие данные устройства разрабатывают их по своим внутренним стандартам что приводит к проблемам интеграции.

На данный момент используются решения на базе следующих модулей: SoC, Raspberry Pi, Arduino, PLC и др.

Также как и к датчикам к периферийным устройствам предъявляются требования по низкому энергопотреблению, которые могут реализовываться с помощью функций Сон/Работа.

Теперь поговорим непосредственно о передачи данных периферийных устройств.

Передача данных является самой затратной частью по энергопотреблению. Это связано с тем, что в периферийные устройства могут не иметь внешнего питания и быть не включенными в проводные средства связи.

Поэтому требуются протоколы, которые смогут передавать небольшое количество информации кратковременно.

Для конфигурации устройств может использоваться протокол NFC. Для увеличения расстояния и надежности можно применять методы и протоколы организации сетей Mesh и Ad Hoc [10].

С точки зрения подключения периферийные устройства делятся на три группы:

- прямой доступ,
- с подключением к шлюзу,
- с подключением к серверу.

Для организации прямого доступа на периферийном устройстве должен быть собственный IP адрес или псевдоним, который даст возможность обратиться из любого приложения. Также периферийные устройства должны выполнять функции WEB-сервера. Для работы с Web-приложения необходима интеграция с прикладным программным интерфейсом, типа RESTful API [11].

Недостатки:

- требуется постоянные обращения к периферийному устройству, т.к. необходимо обновлять сетевой адрес по псевдониму.
- ограниченное количество подключений к устройству, т.к. периферийное устройство ограничено по габаритам и по энергопотреблению. Изменение данных параметров приводит к тому, что периферийное устройство становится стационарным и очень дорогим.

Периферийные устройства без подключения к шлюзу подключаются к серверам/приложениям с помощью протоколов IP и HTTP

Подключение к шлюзу

Если периферийные устройства поддерживают внутренние протоколы такие как ZigBee, BLE, LoRa, UWB, WiFi то для данного решения используют подключение через шлюз. В данном случае сам шлюз выступает как Web – сервер и взаимодействуют с устройствами IP с одной стороны и периферийными устройствами по API с другой стороны. Сам шлюз может работать с различными периферийными устройствами по различным протоколам.

Шлюзы объединяют локальные сети периферийных устройств с глобальной сетью, также организуют связь между сервером управления и пользователем. Также используется для подключения к централизованному серверу.

Локальные сети периферийных устройств представляют собой беспроводные сенсорные сети, соответственно шлюзы в таких сетях являются территориально-распределенными.

Способы организации шлюзов:

- Компьютер используется как точка доступа к глобальной сети. Все объединяемые сети подключены к компьютеру. Для территориально распределенной сети данный способ не является актуальным, т.к. появляется зависимость от наличия электричества и точки доступа в Интернет.
- Устройство-шлюз как соединитель сенсорной сети и Ethernet сети с выходом в Интернет. Шлюз состоит из приемопередатчика для связи с объединенной сенсорной сетью, порт для подключения Ethernet и микроконтроллер для преобразования одного формата данных в другой.
- Автономное устройство шлюз с предоставлением точки доступа в Интернет. Состоит из двух приемопередатчиков, первый для связи с сенсорной сетью второй для глобальной беспроводной сетью (GSM, WiFi, WiMAX).

Недостатки в данном методе такие, как и в прямом доступе, но предъявляются только самому шлюзу.

Подключение к серверу

Предполагает наличие централизованного сервера или группы серверов, со следующими функциями:

- Прием сообщений от периферийных устройств и передача пользователю
- Хранение информации и обработка
- Обеспечение двухстороннего обмена между пользователем и устройством.

Сервер упрощает контроль, поиск, визуализацию и обмен данными. Значительно снижает требования к производительности, а соответственно и габаритам устройств (не требуется выполнения функций Web-сервера). Также

такое решение уменьшает загрузку периферийных устройств, освобождая радиоканал как самую узкую точку, перенося каналы связи из радио в проводные.

Уровень шлюза и внешних связей:

Огромный объем данных, который создается на первом уровне большим количеством датчиков(сенсоров) требует наличия высокопроизводительной проводной или беспроводной сетевой инфраструктуры как транспорта.

Чтобы реализовать широкий спектр услуг и приложений в Интернете вещей нужно обеспечить совместную работу множества сетей, различных технологий и протоколов доступа.

- Для чего используется шлюз:
 - Для уменьшения нагрузки на уровни управления и приложения (без уровня шлюза требуется увеличение мощности верхних уровней, следовательно увеличатся затраты).
 - Уменьшает задержки в реальном времени, для большинства периферийных устройств.
 - Не вся информация передается на уровни управления и приложения.
- Что обеспечивает шлюз:
 - Преобразование одного типа протокола в другой по необходимости.
 - Определять проблемную ситуацию и выдавать ответ без обращения к уровням Управления и Приложения.
 - Отправлять только обработанную информацию с периферийных устройств и получать конфигурационные файлы с верхних уровней.
 - Хранить статус и данные периферийных устройств

В определенных случаях на уровне шлюза присутствует функциональность Искусственного интеллекта/машинного обучения.

В большинстве случаев шлюз имеет внешнее питание или включен от батареи большой емкости. Выбор типа зависит от задач. При использовании протокола синхронизации передача сообщения готовности может осуществляться как шлюзом, так и периферийным устройством.

К примеру, в решениях для умного дома зачастую шлюз объединяют с блоками управления или телевизионными приставками. Для данной задачи используется открытая платформа RDK-V [12]. Можно ожидать следующего этапа преобразования с интеграцией STB + шлюз + безопасность в одно устройство.

В различных «умных» системах реализован на базе Мини РС с элементами машинного интеллекта.

Уровень внешней связи

Данный уровень разделяет уровень периферийных устройств и уровни Управления и Приложения.

Содержит:

- коммуникационные сервисы
- службы балансировки нагрузки и определения местоположения
- протокол CoAP
- шифрование DTLS

Шлюз так же, как периферийные устройства без подключения к шлюзу подключен к уровням Управления и Приложения по беспроводной связи 4G/5G и также по проводной связи по протоколу Ethernet.

Для взаимодействия с периферийными устройствами используется протокол LwM2M [13]. Это клиент-серверное приложение, где клиент находится на периферийном устройстве, а сервер развернут на шлюзе. Данный протокол создан для управления устройствами M2M и Интернета вещей.

Протокол LwM2M использует протокол шифрования DTLS (с ключами безопасности на основе дейтаграмм и сессией установления соединения) [14].

Управляет:

- начальной загрузкой устройства
- Конфигурацией устройства
- Обновлением ПО
- Отказами

Протокол CoAP необходим для периферийных устройств, которые управляются удаленно через сеть Интернет [15]. Сеть, в которой работают такие

устройства называют сеть с ограниченными ресурсами. Протокол совместим с протоколом HTTP.

Уровень Управления (Сервисный уровень)

Включает в себя уровни, призванных автоматизировать технологические и бизнес-операции в Интернете вещей, аналитики (обработка информации), обеспечения безопасности, хранения данных, управления бизнес-процессами, поддержки операционной деятельности.

Уровень безопасности:

Обеспечивает аутентификацию, учет, авторизацию и шифрование/дешифрование.

Для установки безопасного канала, клиент-сервер согласуют параметры соединения. Это версия протокола, способ шифрования, сертификаты. Процедура называется «рукопожатие». В процессе процедуры происходит обмен случайными числами, т.е. аутентификация, далее обмен зашифрованными данными с проверкой защиты от ее подмены.

Уровень внутри серверной связи:

Данный слой обеспечивает балансировку нагрузки, передачу потоковой информации, очередь сообщений. Компоненты этого слоя автоматически масштабируются и дублируются. Реализован на основе микросервисов или платформы как услуги (PaaS) [16].

Автоматическое масштабирование помогает снижать стоимость реализации уровней Управления и Приложения. Сервис реализован как асинхронная передача сообщений с перераспределением нагрузки и буферизацией.

Уровень сбора, обработки и хранения данных

На данном уровне система накапливает данные со всех шлюзов и периферийных устройств, отвечает за следующие операции:

- Сбор Информации
- Преобразование информации к стандартному виду (трансформация)
- Управляет архивированием уничтожением (а также всем циклом жизни информации)

- Уведомляет о поступлении новых данных другим сервисам.

Операция сбора данных включает чтение из однотипных очередей.

Операция трансформации выполняется:

- Виртуальными машинами
- Вычислительными средствами внутри контейнеров
- Специализированными сервисами (Пример: без серверный вычислительный сервис (AWS Lambda)) [17].

Наиболее часто применяемая операция из перечисленных — это контейнерные вычисления. Данная операция удобно масштабируется легко переносится на различные уровни Управления. Основная выполняемая задача операции — это преобразование данных для удобного хранения, сортировки и поиска.

Операция хранения(архивирования) предназначена для последующего поиска, сортировки и хранения информации.

В зависимости от типа информации существуют различные варианты использования инструментов:

- Информация без колонок табличного вида – хранение осуществляется в NoSQL (структура данных не регламентирована или слабо типизирована)
- Информация систематизируется фиксированной схемой – хранение осуществляется в SQL типах (структура регламентирована и типизирована). С помощью OLTP и OLAP. OLTP предназначен для записи новых значений, OLAP для поиска и анализа данных [18].
- Данные невозможно хранить в базах данных в виде записи – в базах данных хранятся только метаданные, сами данные хранятся в некой логической сущности Bucket.

Все устаревшие данные архивируются или удаляются.

Операция уведомления:

Внутреннее уведомления о наличии новых сохраненных данных, которые предоставляются клиентам и сервисам анализа.

Уровень больших данных и аналитики:

Извлекает ситуативную информацию из полного набора периферийных устройств.

Прослеживается зависимость от конкретного приложения Интернета вещей, т.к. каждое приложение отличается различными задачами и методами их решения.

Используются алгоритмы искусственного интеллекта и машинного обучения. Также используется предсказание будущих событий в части потребления ресурсов, погоды, наличие частей на складе и т.п.

На схеме (рисунок 1.4) представлено общее представление работы сети

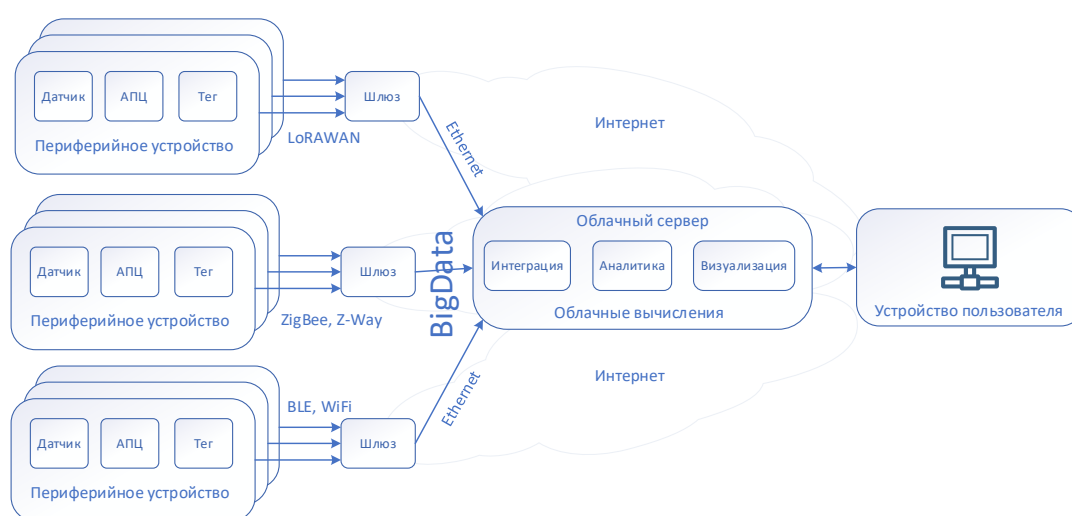


Рисунок 1.4 – Структурная схема информационных потоков в сети связи.

Большие данные представляют собой инструменты и методы обработки структурированных и не структурированных данных больших объемов. Выделяются три основные характеристики (рисунок 1.5):

Объем, скорость, разнообразие.

Рисунок 1.5 – Три основные характеристики больших данных.



Большие данные — это такие данные, которые невозможно обработать стандартными системами управления (базы данных) или компьютерными методами из-за огромного ускорения накопления данных, постоянного изменения, разнообразного состава и большого объема.

Поэтому для решения таких задач были разработан набор инструментов, который позволяет работать с данными независимо от объема и типа, называющийся «большие данные»

Для хранения «больших данных» используют:

- облачные вычисления (Cloud Computing).
- Туманные вычисления (Fog Computing)

Облачные вычисления

Основные характеристики:

- Самообслуживание по требованию
- Широкополосный сетевой доступ
- Пул ресурсов

- Расширения
- Быстрая перенастройка

Существуют несколько типов облачной инфраструктуры:

- Частное облако: (private cloud) используется одной организацией либо ее подразделениями, находится в управлении, эксплуатации в собственности физического лица/лиц, а также быть в не юрисдикции владельца
- Публичное облако (public cloud) используется свободно, управляется, эксплуатируется различными организациями, физически существует в юрисдикции владельца такого как поставщик услуг.
- Гибридное облако (hybrid cloud) – является комбинацией двух и более облачных инфраструктур. Облака связаны между собой технологиями и приложениями.
- Общественное облако (Community Cloud) – объединяет конкретные сообщества потребителей с общими задачами. Находится в совместной собственности.

В общественном облаке возможна организация различных сервисов. За обозначение принято ХааS (Все как сервис). На данный момент существует три основных класса таких услуг [16]:

Инфраструктура как услуга (IaaS)

ПО как услуга (PaaS)

Платформа как услуга (SaaS)

Общая структура облачных сервисов приведена на рисунке 1.6.

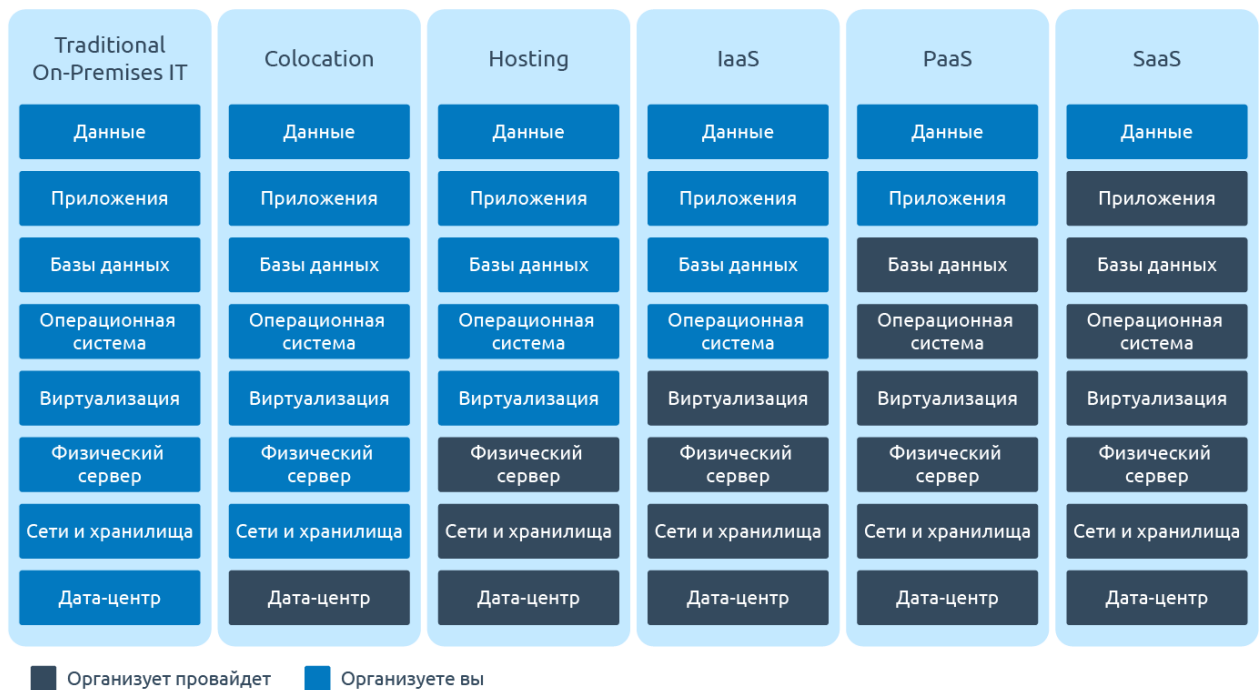


Рисунок 1.6 - Общая структура облачных сервисов.

Остальные услуги такие, как например DBaaS или VPaaS можно так или иначе отнести к трем основным [19].

Туманные вычисления (Fog Computing)

Под «туманом» понимают приближение «облака» к земле. Является дополнением к облачным вычислениям, возможна совместная работа, например, при выполнении аналитического приложения [19].

Туманные вычисления в представленной модели работают на уровне шлюза. Обеспечивает взаимодействие огромного количества периферийных устройства между собой и с облачными ЦОД.

Уровень представления:

Приложения Интернета вещей имеют два потока:

- От машины к машине (M2M)
- От машины к человеку (M2P)

Уровень представления связан с потоком M2M, занимается обработкой, обслуживанием, конфигурированием, изменяет состояние системы (включая периферийные устройства и шлюзы) и предоставлением информации клиенту.

Уровень конфигураций:

Данный уровень относится к обоим потокам M2M и M2P, также может работать как хранилище статусов периферийных устройств:

- Активное состояние
- Новое состояние
- Процесс обновления от старого к новому

Хранение статусов связано с тем, что периферийное устройство и шлюз подключаются только на короткое время. При наличии шлюза в схеме передачи, большая часть информации идет на сервер в виде пакетов данных, аккумулированных с нескольких периферийных устройств.

Уровень Приложения:

На данном уровне существуют различные виды приложений для разных сфер деятельности (транспорт, торговля, энергетика, медицина и др.). Является интерфейсом между пользователем и устройством в рамках того или иного протокола.

Приложения бывают:

- Вертикальные – специфические для конкретной отрасли
- Горизонтальные – универсальные, используются в различных сферах деятельности.

1.3.2. Стандарты, используемые в Интернете вещей

Для взаимодействия с огромным количеством различных устройств требуется стандартизировать форматы данных, протоколы, интерфейсы. Рассмотрим несколько стандартов используемых в Интернете вещей.

1.3.2.1. Стандарт IEEE Std 802.15.4

Предназначен для реализации сетей с большой емкостью и низким энергопотреблением. Реализован на двух нижних уровнях стека протоколов (Физический, MAC). Является основой для протоколов таких как ZigBee и 6LoWPAN [20].

На физическом уровне стандарта 802.15.4 определяются параметры, интерфейс, способ передачи данных. Обмен осуществляется в диапазонах 868 МГц, 910 МГц, 2,4 ГГц. В различных странах используются все три либо часть диапазонов.

Позволяет использовать фазовую манипуляцию (QPSK) и двоичную фазовую манипуляцию (BPSK)

На канальном уровне стандарт определяет какие механизмы будут взаимодействовать с элементами на физическом уровне. Обеспечивает FEC, формирование и отправки кадров на сетевой уровень, регулирует множественный доступ к физической среде по времени, обеспечение безопасности.

Поддерживает шифрование AES 128, использует сетевой протокол CSMA/CA. Имеет особенность переходит в режим «Сна» при получении сигнала, не предназначенного для него, что способствует уменьшению энергопотребления. Длительность перехода в активное состояние занимает не более 10-15 мс.

Стандарт описывает два типа узлов:

- Полнофункциональное устройство (координация работы и определение параметров сети, может работать как узел)
- С ограниченным набором функций (поддержка связи только с полнофункциональными устройствами)

Канальный уровень стандарта определяет топологии сети: Одноранговые, древовидные, ячеистые.

1.3.2.2. Стандарт ZigBee

Верхнеуровневый стек протоколов использующий на физическом и канальном уровне протокол IEEE Std 802.15.4. Описывает сетевые процессы совместимости, управления и информационной безопасности. Стек состоит из следующих уровней:

- Физический и канальный уровни протокола IEEE Std 802.15.4
- Уровень канала передачи данных (DLC) (формирование и контроль пакетов)
- Сетевой уровень (NWK) (Маршрутизация, логическая топология)
- Подуровень поддержки приложений (APS) (трансляция сообщений, организация сервисов)
- Профили устройств ZigBee (Набор сервисов, совместимость, информационные сообщения)
- Интерфейс связи с приложением.

Поддерживает технологии, такие как «точка-точка», «дерево», «звезда», «Mesh».

Дает возможность выбора алгоритмов маршрутизации, в зависимости от состояния сети, конечной точки, привязки, требований приложений.

Обеспечивает простоту модернизации и развертывания. Полностью совместим аппаратно и программно.

Основная особенность — это нахождение устройств большую часть времени в спящем режиме, что приводит к значительному увеличению продолжительности работы.

Стандарт поддерживает кластерную архитектуру, т.к. входящие в состав устройства не равнозначны по функционалу и построению. Устройства бывают трех видов: Координатор, Маршрутизатор, Оконечное устройство.

Протокол ZigBee выделяет под адрес устройства 16 бит информации, соответственно один координатор может управлять до 65536 устройств [21].

Координатор способен передавать информацию другому координатору. Фактически дает возможность использовать совместно несколько сетей в рамках одной системы.

Сеть, построенная на стандарте ZigBee, является самоорганизующимися, т.е. узлы самостоятельно определяют и корректируют маршруты.

1.3.2.3. Стандарт Bluetooth Low Energy

Технология беспроводной связи для ближних коммуникаций. В отличии от ZigBee и Z-Wave 6LoWPAN, рассчитана на топологию «Звезда» или «Точка-Точка».

Стандарт BLE передает данные в 50 раз быстрее чем классический Bluetooth, а также потребление электроэнергии снижено в 10-20 раз [22].

Работает в диапазоне 2,4 ГГц. Имеет 40 каналов. На физическом уровне применяется GFSK модуляция, что позволяет уменьшать потребление энергии. Чувствительность приемника должна составлять не менее -70Дбм.

Устройства BLE делятся на два типа: Контроллер и узел сети. На контроллере реализован физический и канальный уровень, а на узле сети реализованы протоколы верхних уровней, таких как L2CAP, ATT, GATT, SMP. Взаимодействие между устройствами реализована с помощью интерфейса HCI.

BLE и Bluetooth не совместимы между собой, для взаимодействия нужно универсальное устройство, поддерживающее протоколы обоих стеков.

BLE использует технологию адаптивной скачкообразной перестройки частоты, для снижения интерференции и уменьшения переполнения в рабочем частотном диапазоне.

Рассматривается как альтернатива технологии RFID и NFC.

1.3.3. Приложения Интернета вещей

Интернет вещей можно ассоциировать с решением многих прикладных задач. Наиболее общая классификация этих задач, на сегодняшний день может быть представлена как:

- межмашинные коммуникации M2M
- радиочастотная идентификация (RFID)
- беспроводные сенсорные сети (WSN)

1.3.3.1. Межмашинные коммуникации M2M

Технология, позволяющая обмениваться информацией между машинами или передавать в автоматическом режиме между устройствами без участия человека.

M2M являются важнейшей частью Интернета вещей. Для реализации M2M используют различные среды передачи данных такие как: радиолинии, оптические линии, электрические линии.

Функциональная структура M2M согласно стандарту ETSI TS 102690 разделена на два домена: Сетевой домен, Домен шлюзов и устройств.

Сетевой домен состоит из следующих частей:

- Сеть доступа (позволяет взаимодействие устройств и шлюзов M2M с транспортной сетью)
- Транспортная сеть (выполняет функции управления услугами, сетью, роумингом, IP соединением)
- Сервисные возможности (предоставление различных функций, оптимизация разработки приложений)
- Приложения (используют серверные возможности, реализуют логику услуг)
- Функции (управление сетями доступа и транспорта, администрирование и др)

Домен шлюзов и устройств

- Устройство (Поддерживает приложения и использует сервисные возможности)
- Сеть доступа (Обеспечение связи между устройством и шлюзом)
- Шлюз (прокси-сервер, предоставление сервиса скрытым устройствам)

Технологию M2M используют различные беспроводные технологии такие как WiFi, GSM, 3G, технологии оптимизированные для индивидуальные устройства ZigBee, BLE, RFID, WSN

1.3.3.2. Радиочастотная идентификация

RFID (Radio Frequency Identification)– термин, использующийся для обозначения систем, которые по средствам радиоволн беспроводным путем считывают уникального серийного номера (идентификация) человека или предмета. Технология относится к огромной области технологий автоматических идентификаций, такие как: Штрих-коды, оптические считыватели, биометрия (сетчатка глаза и др.) [9].

В отличие от большинства технологий RFID не требует участия человека при передаче данных в систему.

Состоит из двух основных частей:

- RFID метка (Контроллер и EEPROM)
- Считыватель (Генератор, Демодулятор, Декодер)

Метка принимает волну, излучаемую генератором Считывателя. За счет этого метка получает энергию и отражает модулированную волну в той же частоте (пассивная метка), или генерирует выходной сигнал в случае активной метки (наличие питания). Считыватель принимает и демодулирует и декодирует сигнал, чтобы определить содержимое памяти RFID метки. Полученная и декодированная информация передается в идентификационную систему верхнего уровня

Конструктивно RFID метка представляет собой микрочип с радиоантенной. Компактность RFID метки в целом зависит от дальности работы (длины антенны).

Помимо активных и пассивных RFID меток существуют полупассивные (полуактивные) которые также как активные имеют источник питания, но передает данные за счет энергии считывателя [9].

По исполнению RFID метка бывает: Пластиковые карты, этикетки (бумага, лавсан), брелоки, диски.

По типу памяти RFID метки делятся:

- Только чтение
- Единичная запись, многократное чтение (дополнительный блок памяти для последующего чтения)
- Многократная запись, многократное чтение (дополнительный блок памяти и идентификатор)
- ПАВ метки (SAW – тип, работает на принципе акустической волны)

В зависимости от протокола RFID метка делится на классы:

- Класс 1 – пассивная метка, обеспечивающая только чтение
- Класс 2 – пассивная метка, с возможностью считывать и перезаписывать
- Класс 3 – полупассивная метка с функциями Класса 2.

- Класс 4 – активная метка.
- Класс 5 – активная метка с возможностью связи с другими метками Класса 5

По дальности работы различают следующие типы:

- До 20 см
- От 20 до 5 метров
- От 5 м до 100 метров

По диапазону частот можно выделить следующие типы:

- **НЧ** (до 135 кГц) – рекомендовано применять вблизи жидкостей и металлов, используются на коротких расстояниях.
- **ВЧ** (13,56 МГц) – используются для контроля доступа, платежные карты, борьба с подделкой товаров
- **СВЧ** (433 МГц) – используются на дальние расстояния, до 1 км, в основном активные.
- **СВЧ** (860-920 МГц) – используется в логистике.
- **Микроволны** (2,45-5,8 ГГц) – используются в промышленной автоматизации, высокие скорости ПД.

Функционально RFID метка похожа на технологию штрих-кода, однако отличается по возможностям чтения скрытых меток и объемом памяти до 10 Кбайт, дальности работы, повышенной точности, и др.

Считыватель

Предназначен для получения данных от RFID метки. Имеет от одной до нескольких антенн. Полученная от RFID метки информация передается в цифровом виде для дальнейшей обработки. Считыватель может получать информацию от RFID метки только если частоты совпадают.

Основные функции:

- Снабжение энергией пассивных меток
- Чтение данных
- Запись данных (зависит от возможности RFID метки)

- Связь с компьютером

Типы считывателей:

- Ручные
- Стационарные
- Настольные

1.3.3.3 Беспроводные сенсорные сети WSN

Для понимания беспроводной сенсорной сети мы должны рассмотреть, что представляет собой обычная сенсорная сеть.

Сенсорная сеть — это распределенные сенсорные узлы, которые взаимодействуют между собой и другими сетями, для передачи, обработки и предоставления информации, полученных от объектов физического мира, для выработки ответной реакции на эту информацию. Обладает возможностью передачи сообщений по цепочке от одного узла до другого, тем самым компенсируя выход из строя отдельных узлов сети. Оптимальным маршрутом считается самый короткий.

Область применения – это контроль и мониторинг измеряемых объектов.

Область покрытия – от нескольких метров до десятка километров.

Сенсорный узел – представляет собой устройство с одним или несколькими сенсорами.

Сенсор – устройство, (датчик) с возможностью измерения количественных и качественных характеристик и преобразованием физической информации в электрическую. Иногда сенсором называют датчик совместно с контроллером (устройством обработки) к которому он подключен, рисунок 1.7.

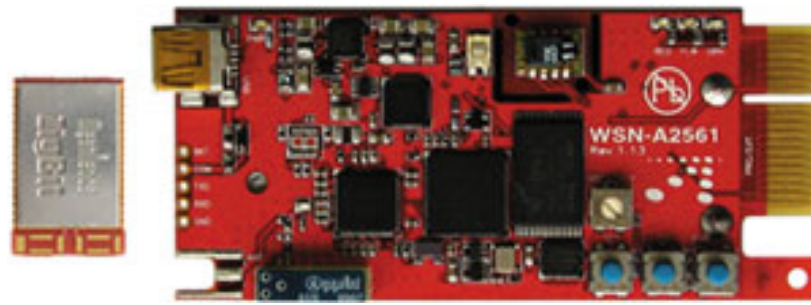


Рисунок 1.7 - Сенсор, возможный внешний вид

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) — это самоорганизующаяся сеть со множеством датчиков и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством радиоканалов.

Основные преимущества:

- Самоорганизация и самовосстановление
- Передача информации на большие расстояния, при малой мощности
- Малый размер узлов
- Питание от автономных источников
- Низкая стоимость узлов и технического обслуживания

Архитектура Сенсорной сети

Сенсорный узел:

- Базовое программное обеспечение
- Аппаратное обеспечение
- Прикладное обеспечение

Интерфейсы сенсорной сети (базовые):

- Между прикладным и базовым ПО
- Между сенсорной сетью и внешней средой (шлюз)
- Между аппаратным и базовым ПО
- Беспроводные и проводные между узлами в сенсорной сети

Аппаратная часть разделена на следующие подсистемы:

- Восприятия (соединяет сенсорный узел с внешним миром)
- Коммуникационная (соединения с другими узлами сети)

- Обработки данных (обрабатывают данные, обеспечивает функциональность узла)
- Электропитания (электроснабжение всех элементов узла)

Датчики могут быть различными. Наиболее распространены следующие датчики: Давление, Влажности, Температуры, освещенности, вибрации, местоположения и др.

Сигналы, получаемые от датчиков обычно, не соответствует требованиям для обработки сигналов. К примеру, полученный сигнал требует увеличения по уровню амплитуды, отчистки от зашумления (использование фильтров). Обработанный сигнал преобразуется в цифровой, далее обрабатывается в процессоре и храниться в памяти микроконтроллера [6].

Какие ограничения накладывается на узлы БСС:

- Низкое потребление
- Работа с большим количеством узлов на малых расстояниях
- Автономность (т.е. работа без обслуживания)
- Адаптация к окружающей среде.

Для того чтобы сенсор мог выполнять свои функции на каждый сенсор устанавливается операционная система, например TinyOS. Это операционная система реального времени, которая рассчитана на работу при жестко ограниченных вычислительных ресурсах [23].

Для соблюдения принципа автономности, работы без обслуживания, мы должны максимально упростить обработку информации на сенсорах и минимизировать циклы приема и передачи информации. Для решения данных задач используется специальные протоколы типа ZigBee, которые снижают время включения радиопередатчиков и сокращают энергопотребление.

Одной из главных функций сенсоров это автоматический выбор схем организации и маршрутов передачи данных, т.е. фактически сети таких сенсоров являются самонастраиваемые [21]. Так как сенсору необходимо определить свое местоположение, то первично происходит идентификация и в результате формируется схема маршрутизации.

Беспроводные сенсорные сети используют протоколы ZigBee, Bluetooth, WiFi в частотной диапазоне 2,4 ГГц. Выбор того или иного протокола определяется временем непрерывной работы и пропускной способностью.

В случае если необходимо построить сеть с длительным временем работы и огромным количеством узлов, то следует обратить внимание на ZigBee. Если важна большая пропускная способность, а сенсоры могут иметь внешнее питание, то в данном случае приоритетны будут Bluetooth или WiFi.

Архитектура беспроводной сенсорной сети строится на трех типах узлов:

- Оконечное устройство
 - Осуществляет сбор информации от датчиков
 - Запрашивает и получает данные от координатора, по средствам анализа пакетов синхронизации
 - Практически все время находится в режиме «Сна» (до 99 % времени)
 - Определяет параметры сети, для возможности входа в сеть
- Маршрутизатор (реализует функцию ретрансляции данных)
 - Прием и буферизация данных
 - Определяет направление передачи
 - Определяет активные каналы, позволяет окончному устройству входить в сеть.
 - Поддерживает различные функции маршрутизации (многоячейковая, древовидная)
- Координатор (реализует функцию шлюза)
 - Глобальная координация, выход во внешнюю сеть.
 - Управление маршрутизатором и окончными устройствами.
 - Большую часть времени находится в режиме приема.
 - Определяет из перечня существующих каналов незанятые.

Рассматривается два основных типа беспроводных сенсорных сетей:

- Одноранговые (все узлы сети выполняют одинаковые функции)
- Древовидные (узлы делятся на кластеры с маршрутизатором во главе)

- Ячеистая топология (Mesh) (маршрутизаторы соединяются с другими маршрутизаторами этой же сети, рисунок 1.8).

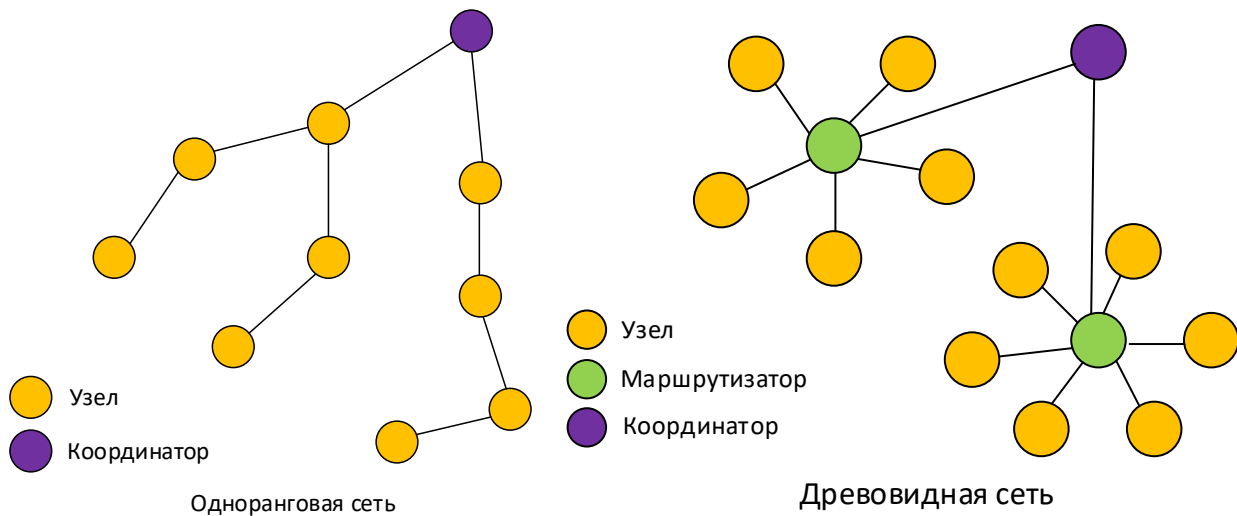


Рисунок 1.8 – Ячеистая (mesh) и древовидная структуры сети.

В одноранговой сети связи между узлами организуются спонтанно, т.к. агрегация данных происходит по пути следования от узла к координатору. Следовательно, возможно организация «паразитных» связей, которые увеличивают задержки, по причине необходимой активации промежуточного узла для транзитной передачи информации.

В древовидной сети основой является кластер (сенсорный узел), который собирает данные и передает координатору. В основе кластера находится узлы и маршрутизатор, соединенный с каждым узлом. Координатор имеет связь с IP сетью для передачи и дальнейшей обработки данных.

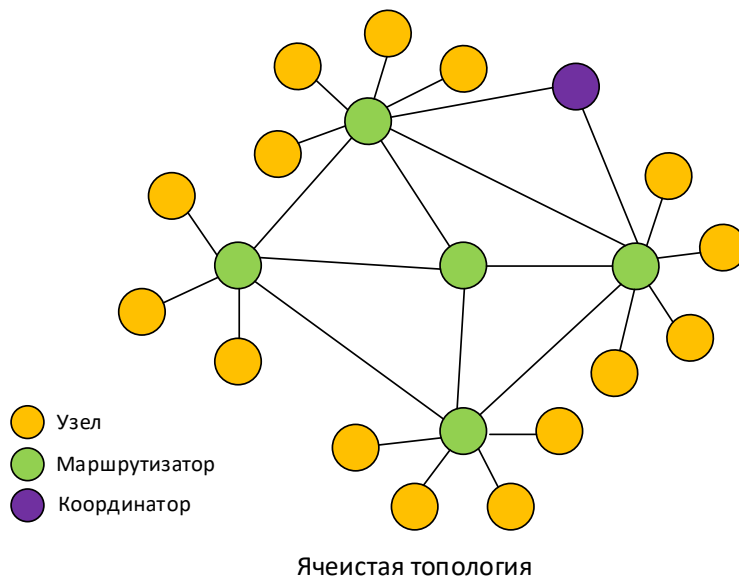


Рисунок 1.9 – Кластерная структура сети ИВ.

В ячеистой топологии маршрутизаторы соединяются по принципу каждый с каждым ближайшим, тем самым увеличивая возможность самоорганизации и самовосстановления [57].

В любой из описанных типов сенсорных сетей должно быть устройство с полной функциональностью, такое как координатор.

В зависимости от функционирования беспроводные сенсорные сети можно разделить на классы:

- Проактивные сети (периодически «просыпаются» и передают полную статистику данных)
- Реактивные сети (мониторят состояние сети и передают лишь изменения состояние сети, которые произошли)

Для определения маршрута передачи информации от сенсора до координатора и между сенсорами используются протоколы маршрутизации такие как:

- Одноуровневые SPIN
- Иерархические LEACH, PEGASIS, TEEN, APTEEN

Благодаря миниатюрности сенсоров, низкому энергопотреблению, наличие радиointерфейса, БСС целесообразно применять в Интернете вещей в областях,

связанных с мониторингом, контролем и анализом, автоматизации систем обеспечения.

Существуют различные проблемы реализации БСС такие как энергопотребление, самоуправление, беспроводное соединения, конструкции, безопасности

1.3.4. Практическое применение ИВ

Область применения ИВ чрезвычайно широка. Технологии ИВ проникают, практически во все сферы деятельности человека. Это бытовые устройства, которые постоянно используются людьми дома, промышленный Интернет – устройства выполняющие некоторые функции в технологических процессах промышленных предприятий, транспортная инфраструктура, медицина, системы безопасности и многое другие области.

Можно выделить следующие наиболее востребованные направления развития: Умный дом, Умная Медицина, Умное производство или промышленный интернет вещей, Умный транспорт и Умный город.

Каждая из перечисленных технологий повышает качество жизни человека. Например, умный дом позволяет управлять различными бытовыми устройствами, «умными» приборами что позволяет сократить расходы основных ресурсов (газ, вода, электроэнергия), обеспечивает высокий уровень комфорта, снижает вероятность аварий.

Принцип простой в бытовую технику помещают периферийное устройство с датчиком и превращают в «умное», которое имеет выход в интернет. На сегодняшний день достаточно много устройств, которые могут называется «умными».

Реализация «умного транспорта» осуществляется по средствам беспроводной связи (до сотни метров) между машинами по технологии V2V. Как пример

возможно управления автомобильным трафиком на основе пропускной способности магистрали.

«Умная медицина» реализуется в виде различных систем мониторинга здоровья людей с использованием сенсоров и датчиков. Возможность проводить удаленные видео консультации и операции.

«Умное производство» — это также оснащение производственных станков сенсорами и датчиками. Автоматическая самодиагностика, сообщения об перегреве, вибрации или износе узла, все эти данные могут передаваться в центр эксплуатации для анализа и дальнейшего принятия решения. Возможность чипирования деталей для борьбы с контрафактом.

Анализируя описание технологии ИВ, можно сказать, именно она привела к появлению сетей пятого поколения и созданию сверхплотных сетей связи.

Сверхплотность — это основной признак сетей 5-го поколения и последующих сетей. Для подтверждения можно рассматривать требования к сети 5-го поколения, где для соблюдения необходимого качества обслуживания нужно размещать до 1 млн устройств на кв. км т.е. по 1 устройству на 1 м², что само по себе не является пределом.

Размещение устройств на столь близком расстоянии к друг другу приводит к пониманию того, что ограниченные ресурсы сети используются не рационально.

Для примера в технологии D2D (Device-to-Device), одной из базовых технологий ИВ доля трафика может составлять не более десятка процентов [2.1/3].

В технологии WSN, где сенсоры могут располагаться на сверх близких расстояниях (менее метра), очень серьезно встает вопрос оптимальной скорости передачи данных, т.к. в процессе передачи информации от одного узла к другому возникают помехи с большим уровнем сигнала. Т.к. расстояние минимальное то уровень помех оказывает серьезное влияние на близлежащий узлы передачи как рассматриваемых маршрутах, так и в соседних.

В сверхплотных сетях в отличии от обычных сетей, приобретает важность правильного выбора маршрута, т. к. от этого выбора зависит максимальная

возможная скорость передачи данных. Появляется огромная возможность выбора одного или нескольких маршрутов доставки данных из точки А в точку В.

Существенное значение в сверхплотных сетях при построении сетевой архитектуры имеет кластеризация. Большинство узлов сети сконцентрированы в домах и офисах, наличие стен и перекрытий между помещениями, которые серьезно ослабляют сигнал, требуют новых подходов в расчетах моделей сети.

1.4 Выводы

1. Анализ тенденций развития телекоммуникаций показал, что сети связи являются базовым элементом современной инфокоммуникационной системы. Развитие телекоммуникаций является неременным условием развития современного общества. Основные направления развития состоят в повышении пропускной способности сетей связи, уменьшении времени доставки сообщений и обеспечении массовых коммуникаций. Эти тенденции находят отражение в развитии сетей 5G и последующих поколений, такие как: повышение скорости передачи данных, развитие тактильного Интернета и развитие Интернета вещей.

2. Анализ развития Интернета вещей показал, что наибольшую долю устройств ИВ, в настоящее время составляют устройства M2M. Уже в настоящее время число M2M устройств превышает численность населения. Тенденции роста численности M2M устройств показывают, что число подключенных устройств в обозримой перспективе будет многократно превышать численность населения земли. Большое количество устройств ИВ приводит к возникновению сетей высокой и сверхвысокой плотности, т.е. сетей, в которых плотность устройств превышает 1 устройство на 1 кв. метр.

Результаты анализа также показывают тенденции роста трафика ИВ. Эта тенденции проявляется как в росте доли трафика ИВ в общем трафике перспективных сетей связи, так и в интенсивности трафика, производимого устройствами ИВ.

3. Анализ архитектуры сетей Интернета вещей показал, что сети ИВ могут иметь разнообразную архитектуру в зависимости от прикладных задач и используемых технологий и стандартов организации беспроводного участка сети. Наиболее важным элементом сети является сеть устройств ИВ, которая выполняет функцию доступа устройств ИВ в глобальную сеть связи. Этот участок сети также может иметь различную топологию. Самыми распространенными топологиями являются: звезда, древовидная топология и ячеистая сеть (mesh). От методов построения и управления сетью ИВ на данном уровне зависят основные показатели функционирования.

4. Показатели качества функционирования сети ИВ зависят, как от используемых технологий организации радиоканала, так и от методов выбора логической структуры сети и методов управления трафиком. Поэтому, задачи выбора моделей и методов построения сети ИВ определяют эффективность использования ее ресурсов и возможность повышения таких основных показателей как пропускная способность (достижимая скорость передачи данных, так и время (задержка) доставки сообщения).

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ РЕШЕТОК

2.1 Анализ особенностей структуры сети высокой плотности

Прежде всего следует дать определение понятие структура в контексте данной работы. Под структурой сети понимается совокупность связей между элементами сети, т.е. узлами сети. Структура беспроводной сети — это описание взаимоотношений между узлами сети. Можно выделить физическую и логическую структуры.

Физическая структура включает в себя данные о размещении узлов сети в пространстве: их координаты или расстояния между узлами сети. Также она может включать данные об окружении, которые позволяют оценить условия распространения сигнала между узлами и описать отношения между узлами некоторыми моделями.

Логическая структура сети определяется связями между узлами сети, которые организуются для передачи информации. Множество этих связей может отличаться от множества связей, определенных физической структурой. Логическая структура формируется на основе физической и может рассматриваться как подмножество последней.

Наряду с понятием структура в литературе широко используется термин сетевая топология, который используют в том же смысле, что и описанные выше понятия. Однако, этот термин чаще применяется для описания логических отношений. Поэтому в работе будет использован термин структура, при необходимости с пояснениями, в виду его большей однозначности толкования.

Развитие Интернета вещей (ИВ) ведет к формированию сетей высокой плотности [1, 2]. В ряде работ показаны особенности таких сетей, основные из которых состоят в том, что узлам сети приходится работать в условиях относительно низких отношений сигнал/шум (ОСШ) [26,27]. Это обусловлено

внутриканальными помехами, создаваемых большим количеством соседних узлов. Низкое ОСШ приводит к росту количества транзитов в пути между узлом источником и узлом назначения, т.е. к увеличению средней длины пути (в количестве транзитов).

В работах [26-28] рассмотрены сети, узлы которых размещены в одной плоскости, т.е. сети, которые могут быть описаны двумерными моделями. Достаточно широкий круг приложений может быть описан такими сетями. В первую очередь, это сети, размещенные на открытом пространстве, т.е. вне помещений или сети, ограниченные одним уровнем, т.е. построенные в рамках одного этажа здания.

Однако, в структуре современных городов большинство узлов ИВ сконцентрировано в пределах жилых и офисных зданий (умный дом, системы контроля доступа, системы безопасности, жилищно-коммунальные системы и др.). Узлы таких сетей могут взаимодействовать не только в пределах одной плоскости (этажа), но и между узлами различных плоскостей. Эти сети распределены в пределах многоэтажных строений и в общем случае представляют собой трехмерные структуры.

Структуры таких сетей во многом определяются параметрами тех строений, в которых они размещены. Как было показано в [28] точечный процесс, описывающий распределение узлов сети в рамках одной плоскости, может иметь свойства самоподобия, обусловленные наличием таких свойств у структуры, описывающей помещения, расположенные на соответствующем этаже здания.

Распространение радиосигналов внутри строения существенно зависит от его архитектуры, материалов, использованных при возведении стен и межэтажных перекрытий. В связи с этим модель сети будет существенно отличаться от модели [27] из-за наличия препятствий в виде стен и межэтажных перекрытий и от моделей [28] из-за наличия третьего измерения.

Таким образом, в наиболее общем случае сеть ИВ сосредоточена в трехмерном пространстве и включает в себя множество сетевых элементов: абонентских устройств, точек доступа и возможно иных устройств

(ретрансляторов, повторителей и др.), которые в общем случае могут рассматриваться как узлы сети. Логическая структура связей между элементами сети может быть различна и определяться, например, такими основными структурами как «точка-точка», «звезда», «дерево» и смешанные структуры. Наиболее общей является смешанная структура, которая включает в себя все варианты построения сети. Особенности сети высокой плотности позволяют в значительной степени варьировать структуру в зависимости от конкретных задач и потребностей.

Далее будем рассматривать логическую структуру, которая может быть определена в сети высокой плотности в виде, например, некоторой регулярной структуры. Такая структура включает в себя узлы сети, которые имеют связи между собой и могут быть использованы для организации маршрутов между всеми узлами сети. Эту структуру можно образно сравнить с транспортной сетью, которая в идеальном случае обеспечивает передачу данных между любой парой узлов.

Особенности структуры сетей высокой плотности определяются, во-первых, их физической структурой и во-вторых, широкой возможностью выбора логической структуры.

Основными особенностями физической структуры являются большое количество узлов сети и влияние окружения на их функционирование. Следует отметить, что окружение оказывает существенное влияние на физическую структуру сети. Например, в качестве окружения могут рассматриваться стены зданий и междуэтажные перекрытия, сами здания и сооружения, тоннели и иные сооружения, лесопосадки, элементы естественного рельефа местности, потоки автотранспорта и иные подвижные или неподвижные элементы, которые могут создавать препятствия распространению радиосигнала. Эти элементы также влияют на характер размещения узлов сети, который в подавляющем большинстве случаев носит случайный характер.

В работах в качестве дополнительной характеристики размещения узлов предлагается использовать показатели, основанные на фрактальной размерности. Эти показатели позволяют ввести численную характеристику, позволяющую

сравнивать различные случайные точечные процессы, описывающие размещение узлов сети.

2.2 Модель сети связи на основе решеток

Структура сетей ИВ, размещаемой в многоэтажных зданиях и сооружениях может существенно отличаться от плоских (двумерных) моделей, например, рисунок 2.1. Это обусловлено, в первую очередь, не столько наличием третьего измерения, сколько теми неоднородностями, которые встречаются на пути распространения радиосигнала в многоэтажных строениях. Такими неоднородностями являются стены, межэтажные перекрытия и другие элементы конструкции здания.

Как правило, многоэтажные здания представляют собой регулярную структуру, состоящую из типовых элементов (типовые помещения) и в целом представляет собой фрактальную самоподобную структуру. В границах одного помещения узлы сети находятся в зоне прямой видимости на относительно малых расстояниях. Если для описания ОСШ использовать модель [4], то оно может быть достаточно высоким при рассмотрении сети в одном отдельном помещении.

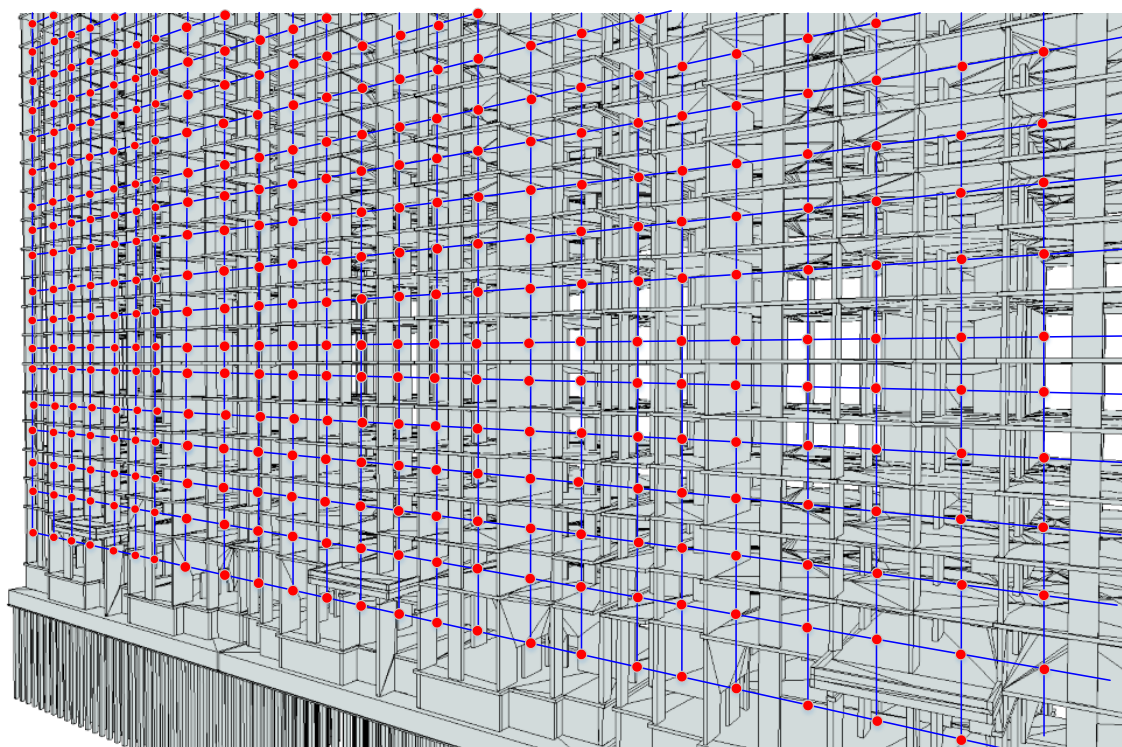


Рисунок 2.1 – Иллюстрация возможного плана размещения узлов сети в многоэтажном строении.

Бетонные стены и межэтажные перекрытия современных зданий вносят существенное ослабление сигнала, согласно [29] от 9 до 28 дБ, в зависимости от частоты сигнала и типа здания.

Для анализа функционирования сети в пределах всего здания наиболее важным является обеспечить возможность взаимодействия узлов, находящихся в различных помещениях, поэтому возможно сделать допущение заменив в модели все узлы одного помещения на единственный узел. Если сделать допущение о том, что структура строения состоит из одинаковых прямоугольных помещений, что в большинстве случаев близко к действительности, то структуру сети в границах здания можно описать прямоугольной решеткой, рисунок 2.2. Узлами решетки являются узлы сети, а ребрами связи между ними.

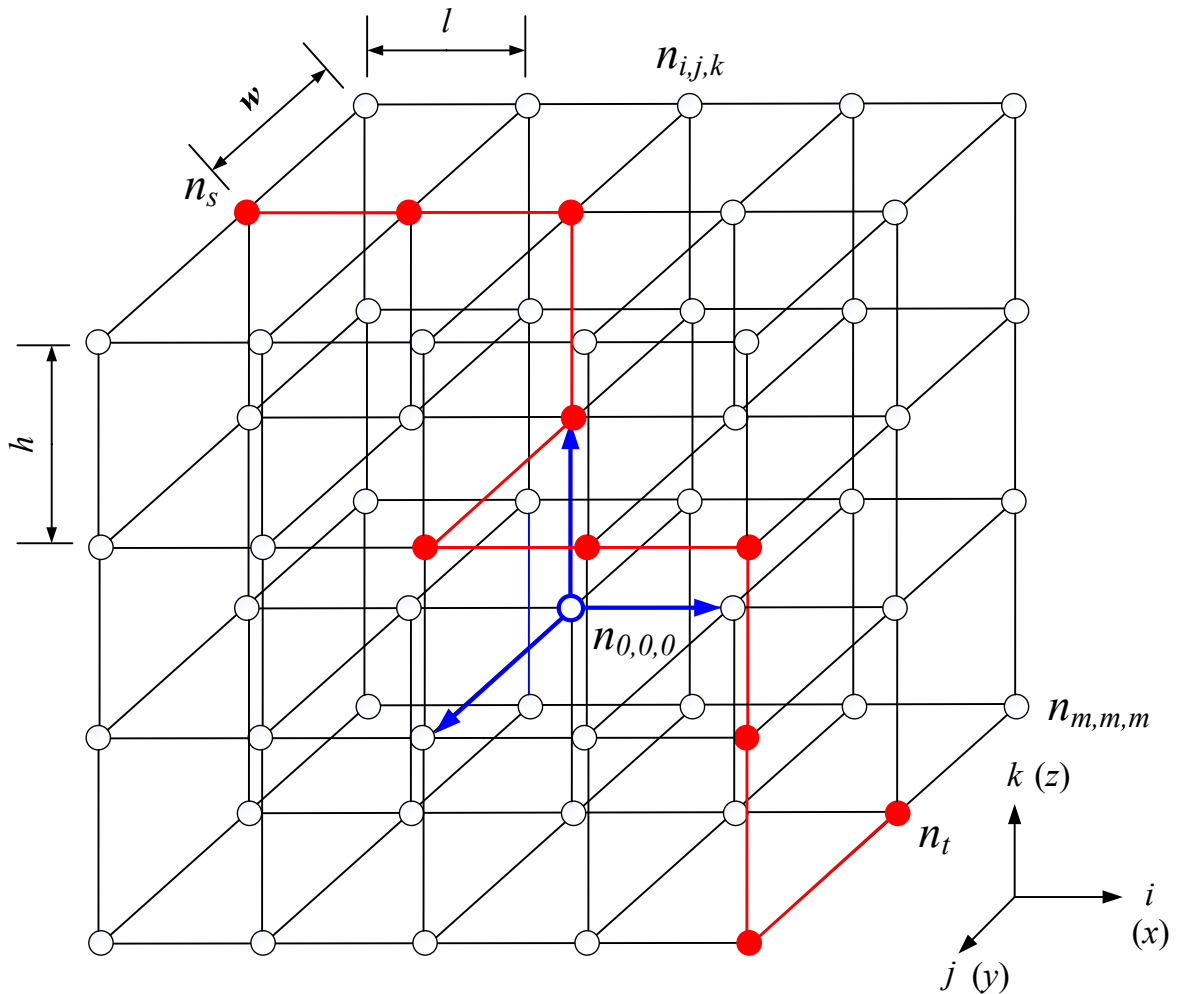


Рисунок 2.2 – Модель сети, описываемая прямоугольной 3D решеткой.

При некоторых допущениях такую структуру можно считать простой кубической решеткой [30].

Функционирование такой сети описывается доставкой сообщений от узла назначения n_s к узлу получателю n_t . Такая доставка возможна, когда существует хотя бы один маршрут между этими узлами. В приведенной на рисунке 2.2 решетке имеются связи только с соседними узлами, т.е. узлами, находящимися в соседних помещениях, это еще одно допущение, т.к., возможны связи и на большие расстояния. Такое допущение оправдано, когда требуется оценить нижние границы функциональности сети.

Для описания модели взаимодействия узлов в сети, оценим ОСП в точке расположения узла. Будем полагать, что уровень мощности помехи существенно

выше уровня естественного теплового шума, которым в данном анализе пренебрежем.

Воспользуемся эмпирической моделью затухания, рекомендованной в [6] для оценки затухания внутри помещений

$$L(d) = 20 \lg f + N \lg d + L_f(g) - 28 \text{ дБ} \quad (2.1)$$

где d – расстояние (м), f – частота (МГц), N – коэффициент потерь мощности, L_f – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через препятствие (дБ), где g – количество препятствий.

По аналогии с работой [27], аналитическую модель формирования сигнала помехи модель опишем выражением для трех измерений

$$p_{oi} = d_0 \iiint_V a(x, y, z) dx dy dz \text{ Вт} \quad (2.2)$$

где d_0 – мощность помехи, производимая в единице объема Вт/м³,
 $a(x, y, z)$ – коэффициент, определяющий зависимость мощности помехи в точке O от координат источника помехи,
 V – рассматриваемая область.

Исходя из модели (2), а также с учетом рассматриваемой модели сети, рисунок 2, зависимость $a(x, y, z)$ можно выразить через расстояние до источника помехи d и представить как

$$a(d) = \frac{q}{f^2 d^\alpha \Lambda(g)} \quad (2.3)$$

где d – расстояние от точки наблюдения до источника помехи,
 α – коэффициент, зависящий от условий распространения сигнала ($\alpha \geq 2$),
 f – частота сигнала (МГц),

q – константа (согласно модели (1) $q = 10^{2,8}$),

$\Lambda(g)$ -ослабление сигнала препятствиями,

g – количество препятствий.

Модель (2.3) приведена для непрерывного случая, в рассматриваемой модели, приведенной на рисунке 2.2 рассматривается дискретное множество узлов. С учетом дискретной структуры модель (2.2) может быть записана в виде суммы по трем измерениям

$$p_{oi}(i, j, k) = d_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} a(i, j, k) \text{ Вт} \quad (2.4)$$

где p_0 – мощность передатчика узла сети (Вт).

В рассматриваемой модели будем полагать, что решетка не ограничена в каждом из измерений, а точка наблюдения располагается в узле $n_{0,0,0}$, значения индексов позволяют указывать на любой узел решетки и могут принимать целые значения $i, j, k = -\infty, \dots, \infty$.

Если размеры элементарной ячейки (длина, ширина и высота) в модели на рисунке 2.2 равны l, w, h соответственно, то расстояние d между точкой наблюдения и произвольным узлом решетки можно определить как

$$d(i, j, k) = \sqrt{(il)^2 + (jw)^2 + (kh)^2} \text{ м} \quad (2.5)$$

Ослабление сигнала препятствиями, согласно модели (1), может быть определено как

$$\Lambda(g) = Ag \quad (2.6)$$

где A – коэффициент ослабления сигнала препятствием. Согласно модели (1), значение A для бетонной стены или межэтажного перекрытия может быть от 7,9 (9 дБ) до 631,0 (28 дБ). В качестве примера, в данной работе принято значение, рекомендуемое для жилых зданий для частоты 2,4 ГГц равное 10 (10 дБ).

В рассматриваемой модели сделаем допущение о распространении сигнала строго по прямой, соединяющей точку наблюдения с узлом $n_{i,j,k}$, тогда количество препятствий в данном направлении будет равно количеству пересекаемых вертикальных и горизонтальных плоскостей проведенных через центры ребер, соединяющих узлы решетки, т.е. будет равно сумме абсолютных значений индексов i, j и k . Тогда

$$\Lambda(i, j, k) = A(|i| + |j| + |k|) \quad (2.7)$$

Тогда выражение (2.3) для коэффициента снижения мощности может быть выражено через индексы как

$$a(i, j, k) = \frac{q}{f^2 \sqrt{(il)^2 + (jw)^2 + (kh)^2}^\alpha A(|i| + |j| + |k|)} \quad (2.8)$$

С учетом выражений (2.5) и (2.6), выражение (2.2) может быть записано через индексы узлов решетки. Решетка регулярна и симметрична относительно центра наблюдения, поэтому без снижения общности можно рассматривать только положительные значения индексов, т.е. 1/8 часть решетки, введя в выражение соответствующий множитель. Аналогично [27] введем пороговый уровень мощности p_m в точка приема, при превышении которого сигнал не воспринимается как помеха. Тогда выражение для мощности помехи в точке наблюдения может быть записано как

$$p_{oi} = \rho 8 \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m I(p_{i,j,k}) p_{i,j,k} \text{ Вт} \quad (2.9)$$

где $p_{i,j,k}$ мощность помехи, создаваемая узлом i,j,k в точке наблюдения;

где ρ - интенсивность нагрузки, m – количество узлов решетки (сети).

$$p_{i,j,k} = p_0 \frac{q}{f^2 \sqrt{(il)^2 + (jw)^2 + (kh)^2}^\alpha A(i+j+k)} \text{ Вт} \quad (2.10)$$

$I(p_{i,j,k})$ – индикаторная функция, которая обеспечивает суммирование только мощностей сигналов, воспринимаемых как помеха.

$$I(p_{i,j,k}) = \begin{cases} p_{i,j,k} & p_{i,j,k} < p_m \\ 0 & p_{i,j,k} \geq p_m \end{cases} \quad (2.11)$$

На рисунке 2.3 приведена зависимость уровня мощности помехи в узле от количества узлов решетки и интенсивности трафика, определяемая как

$$\tilde{p}_{OI} = 10 \lg(p_{OI}/0,001) \text{ дБм.} \quad (2.12)$$

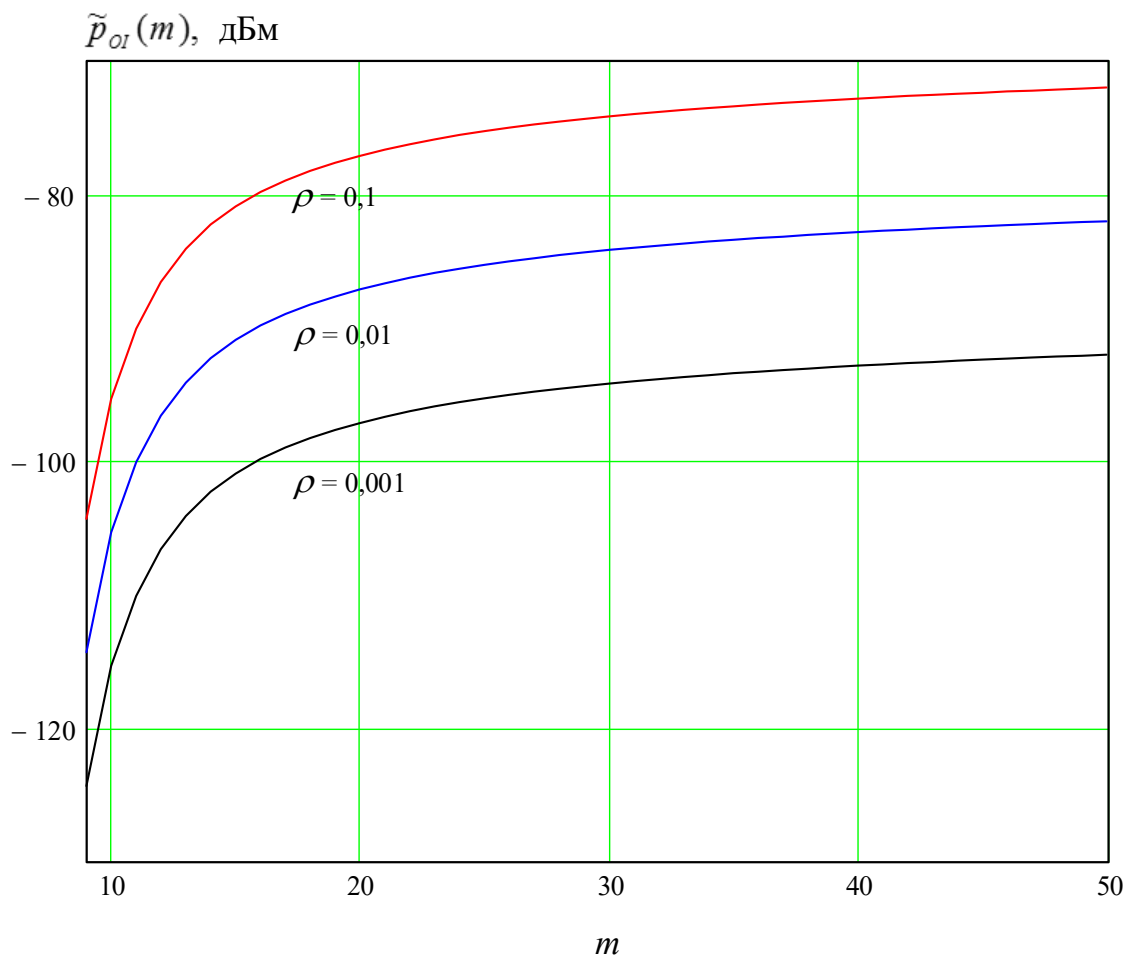


Рисунок 2.3 Зависимость уровня мощности помехи от количества узлов (узлов решетки).

Из приведенного рисунка видно, что уровень мощности помехи в точке наблюдения возрастает с ростом количества узлов, что очевидно и из выражения (2.8), однако его рост быстро замедляется, что обусловлено быстрым ростом затухания сигналов помех из-за увеличения расстояния и количества препятствий на пути распространения сигналов. Увеличение интенсивности трафика также прямо пропорционально отражается на уровне мощности помехи.

ОСП в точке наблюдения может быть получено как

$$SNI = \tilde{p}_{os} - \tilde{p}_{oi} \quad \text{дБ} \quad (2.13)$$

где \tilde{p}_{os} - уровень мощности сигнала в точке наблюдения (дБм),

\tilde{p}_{oi} - уровень мощности помехи в точке наблюдения (дБм), определяемый согласно (2.12).

$$\tilde{p}_{os} = 10\lg(a(i, j, k)p_0/0,001) \quad \text{дБм} \quad (2.14)$$

Зависимость ОСП от количества узлов и интенсивности трафика приведена на рисунке 2.4.

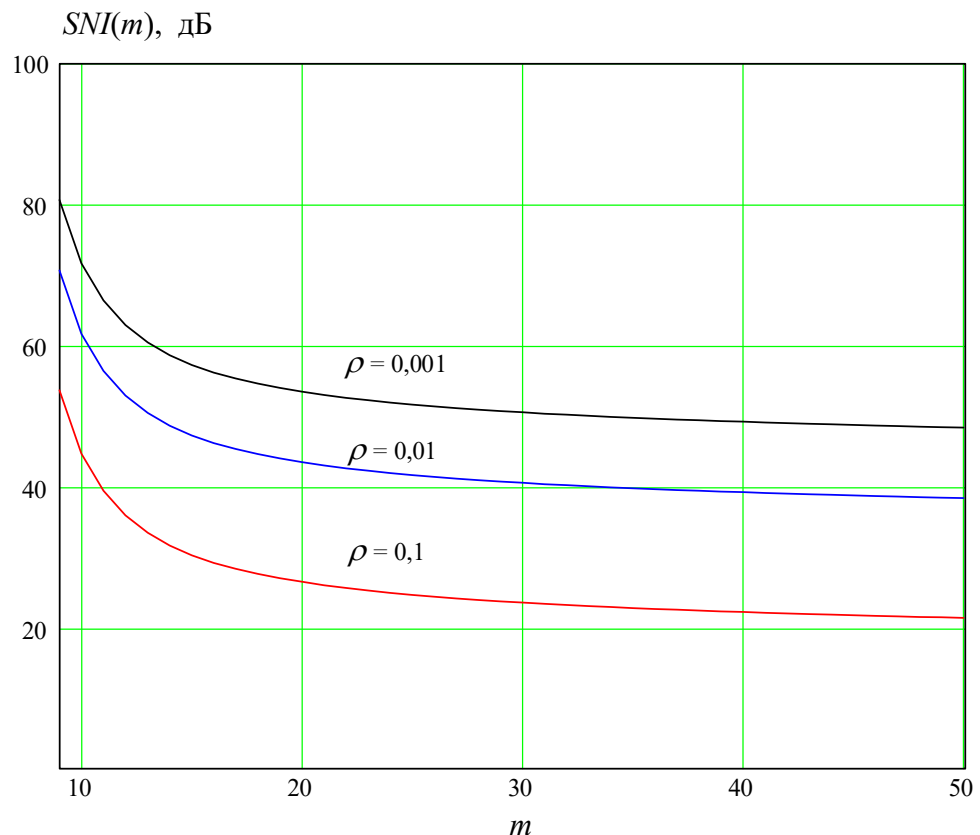


Рисунок 2.4 – Зависимость ОСП от количества узлов сети и интенсивности нагрузки.

Из приведенного графика видно, что при близких к реальным значениям количества узлов и интенсивности трафика ОСП для соседних узлов решетки принимает значение не менее 20 дБ, что в большинстве случаев, позволяет обеспечить достаточно высокое качество радиоканала. Например, при использовании стандарта IEEE 802.11ac при таком значении ОСШ (в данном случае ОСП) возможна работа на максимальной скорости.

Таким образом, полученная модель позволяет оценить качество канала связи, путем оценки ОСП и ОСШ для узлов сети. Использование модели позволяет утверждать, что в современном многоэтажном здании, при размещении узлов в каждом из помещений, может быть построена сеть беспроводной связи, причем качество радиоканала позволяет использовать максимально достижимые для современных стандартов скорости передачи данных.

2.3 Теория перколяции и качество функционирования сети

Теория перколяции ведет свое начало от постановки задач описания физических процессов проникновения (протекания) жидкости или газа через пористые среды, а также задач описания фазовых переходов в различных средах под влиянием некоторого фактора, обусловленных изменением молекулярного строения [30-36].

В теории перколяции рассматриваются различные структуры, в частности различные виды решеток, используемых в качестве моделей среды (кристаллические решетки и т.п.).

Основная задача теории перколяции состоит в описании условий «протекания», например, жидкости через среду, которые иногда называют условиями возникновения перколяционного кластера, т.е. множества смежных элементарных ячеек решетки, являющихся проводником жидкости или иной материи. Данная теория применима не только для упомянутых процессов, но и для

процессов возникновения электрического пробоя в диэлектрике, процессов образования геля при изменении концентрации вещества или температуры и многих других.

Основной качественной характеристикой решетки, которой моделируется среда, является способность «пропускать», т.е. обеспечить «протекание». При моделировании, как правило рассматривают бесконечные решетки, т.е. содержащие бесконечное количество узлов и связей. Возможность «протекания» описывают формированием в среде перколяционного кластера (иногда его называют бесконечный кластер). При моделировании решетки делается предположение, что ячейки решетки, т.е. узлы или связи между ними, могут быть двух типов: первый - способные выполнять функцию «протекания» (белые ячейки), т.е. пропускать и второй - не способные выполнять данную функцию (черные ячейки).

Для численной характеристики этой способности используется параметр, именуемый как порог перколяции $0 < p_c < 1$, который численно равен доле ячеек способных выполнять функцию «протекания».

Для решетки конечного размера величина p_c случайна [33] и ее значения находятся в интервале δ , однако при увеличении количества ячеек N в решетке этот интервал сужается как

$$\delta(N) \approx \frac{c}{\sqrt[\nu]{N}} \quad (2.15)$$

где c – константа ($c \approx 0,5$); ν - критический индекс (индекс радиуса корреляции), зависящий от размерности задачи (для трехмерной задачи $\nu \approx 0,8 \dots 0,9$).

$$p_c = \lim_{N \rightarrow \infty} (p_c(N)) \quad (2.16)$$

Величина p_c это пороговое значение доли «проводящих» узлов, которая соответствует состоянию фазового перехода рассматриваемой решетки (среды) из непроводящего в проводящее состояние. Величина p_c различна для различных видов решеток.

Для процесса перехода среды из непроводящего в проводящее состояние характерно очень небольшое изменение p_c , т.е. фазовый переход происходит, когда доля проводящих ячеек приближается к p_c и имеет место на достаточно малом интервале изменение величины p_c . При значениях же меньше p_c среда непроницаема, а при значениях, превышающих p_c проницаема.

Как видно из описания данной модели, она достаточно формальна для того, чтобы ее можно было использовать для широкого круга приложений.

В предложенной выше модели сети Интернета вещей, размещенной в многоэтажном здании сеть также представлена в виде решетки, узлами которой являются узлы сети связи (возможно группы узлов), размещенные в различных помещениях многоэтажного строения. Связи между узлами – это каналы, которые могут быть образованы между соседними узлами сети.

В реальной сети такие связи могут существовать не только с соседними узлами, однако, как видно из приведенного анализа качества канала, на основе отношения сигнал/помеха, связи с соседними узлами позволяют получить наибольшее качество канала и обеспечить наибольшую скорость передачи данных. Предложенную модель сети в виде решетки можно рассматривать как логическую структуру организации связей между узлами, которые размещаются в отдельных помещениях, т.е. структура решетки определяется структурой строения.

Если в помещении имеется функционирующий узел связи сети, то соответствующая ячейка модели считается «белой», т.е. проводящей, в противном случае это «черная», т.е. непроводящая ячейка. Мы полагаем, что соединения устанавливаются только между соседними узлами, т.е. находящимися в соседних помещениях. Тогда для существования связной сети в здании, должен существовать перколяционный кластер смежных «белых» ячеек.

Лишь для небольшого количества частных случаев двумерных (плоских) решеток на сегодняшний день известны точные аналитические решения [31, 33]. Для анализа поведения других типов решеток используются методы имитационного моделирования.

Известно большое количество численных результатов, полученных с помощью численного моделирования для различных типов решеток. В частности, порог перколяции для простой кубической решетки, которая использована для моделирования сети, составляет $p_c = 0,31$ [33, 34].

Для рассматриваемой модели эту величину можно интерпретировать как минимальную долю помещений в многоэтажном строении, в которых должны быть размещены функционирующие узлы сети (белые ячейки), при которой обеспечивается возможность передачи сообщений между всеми узлами сети, т.е. обеспечивается связность сети.

Пороги перколяции для некоторых типов трехмерных решеток, по данным [33] приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Пороги перколяции для некоторых типов трехмерных решеток

	Тип решетки	Порог перколяции
1	Простая кубическая	0,310
2	Объемно центрированная кубическая	0,243
3	Гранецентрированная кубическая	0,195
4	Гексагональная	0,200

Простая кубическая решетка предполагает наличие узлов в вершинах куба, объемно центрированная кубическая решетка предполагает наличие еще одного узла в центре ячейки (куба), а гранецентрированная кубическая решетка предполагает наличие узлов в центрах каждой из граней куба. В гексагональной решетки в основании ячейки лежит шестигранник.

Вероятнее всего для моделирования сети внутри многоэтажных зданий применимы модели кубических решеток.

Наряду с порогом перколяции для описания структуры сети могут быть использованы и другие характеристики.

Корреляционная длина, ξ — расстояние, на котором существует порядок или характерный размер кластера заблокированных ячеек при $p < p_c$ или пустот при $p > p_c$.

$$\xi(p) = |p - p_c|^{-\nu} \quad (2.17)$$

где p — доля белых ячеек, p_c — порог перколяции, ν — критический индекс (индекс радиуса корреляции).

Когда размер области меньше корреляционной длины ξ , то кластер самоподобен и его фрактальная размерность определяется как

$$d_f = d - \beta/\nu \quad (2.18)$$

где d — размерность задачи, β — параметр порядка (для трехмерной задачи $\beta \approx 0,4$), ν — индекс радиуса корреляции.

Перколяционный кластер обладает свойствами самоподобия, вблизи порога перколяции фрактальная размерность перколяционного кластера составляет $d_f = 2,54$ [33].

Приведенные параметры могут быть использованы при оценке качества функционирования сети Интернета вещей, размещенной в многоэтажном строении и описанной моделью кубической решетки.

Корреляционная длина может быть использована как показатель количества недоступных в сети узлов, а фрактальная размерность кластера позволяет характеризовать форму структур, образуемых ячейками модели (узлами сети).

Таким образом, положения теории перколяции применимы для описания трехмерной модели сети в многоэтажном строении или подобных структурах. Следует отметить, что положения этой теории также годятся и для построения двумерных моделей, которые в данной работе не рассматривались. Основные

параметры, определяемые для перколяционной структуры могут быть использованы также и для описания свойств сети связи.

2.4 Сравнительный анализ применения метода перколяции для оценки связности сети

Целью данного сравнения является обоснование полезности выводов теории перколяции для оценивания связности сети ИВ.

Связность сети характеризуется вероятностью наличия маршрута между любой парой узлов. Сеть связна, когда эта вероятность близка к единице. Оценить связность в конкретном случае можно, например, поиском кратчайших путей между всеми парами узлов (вершин графа, описывающего сеть). Сложность решения этой задачи состоит: во-первых, в том, что при большом количестве узлов эта задача требует значительного вычислительного ресурса n^3 циклов, где n – количество вершин графа; во-вторых, в том, что известные аналитические методы ориентированы на конкретные частные случаи.

Под известными методами здесь понимается метод теории перколяции, применение которого описано в данной работе и метод из теории случайных графов.

Рассмотренные в работе метод теории перколяции позволяют оценить долю исправных (работающих) узлов в сети связи, описываемой структурой простой кубической решетки, при которой достигается связность сети (существование гигантской компоненты). Для большинства трехмерных решеток известные из теории перколяции решения получены методами имитационного моделирования. В этом смысле, не смотря на отсутствие аналитических решений известны численные решения для типовых структур.

Применение теории случайных графов привлекательно известными моделями, с помощью которых легко получить нужные решения. Задача оценки

связности решается для сети, организованной случайным образом, с помощью теории случайных графов с использованием теоремы Эрдеша-Реньи. На основании этой теоремы может быть получена граничная (пороговая) величина вероятности связности между соседними узлами, при которой достигается «почти» связанное состояние сети. Эта величина определяется как

$$P_{th} = \frac{\ln n}{n} \quad (2.19)$$

где n – количество узлов в сети.

Величина (2.19) не зависит от особенностей сети, а зависит только от количества узлов в ней. Данная оценка справедлива для модели случайного графа, в которой взаимное положение вершин не имеет значения. Имеют значение только вероятности существования связей (ребер или дуг) между вершинами графа и эти вероятности, в общем случае, независимы.

Такая модель может быть принята для описания сети беспроводной связи только с некоторыми допущениями. Так как в реальном случае связь между узлами возможна только на некотором расстоянии (в зоне связи) и невозможна на значительном удалении (за пределами зоны связи). Приведенная выше модель не учитывает этого свойства. В работе [43] методом имитационного моделирования доказано, что эта модель хорошо описывает беспроводную сеть при количестве узлов, превышающем некоторую величину.

В этой работе рассматривается структура сети в виде простой кубической решетки. Строго говоря это регулярная, а не случайная структура, поэтому возможность применения упомянутой теоремы из теории случайных графов требует достаточно веского обоснования.

В качестве такого обоснования приведем следующие доводы:

-теория случайных графов часто применяется в тех задачах, где применяется теория перколяции, т.е. это теории, описывающие схожие явления различными методами и имеющие различные истоки, и историю развития;

-в условии задачи полагается, что в решетке, описывающей сеть есть нефункционирующие узлы их место случайно, поэтому все же рассматриваемая структура не полностью и однозначно определена (ее структура искажена случайным образом);

-отсутствуют иные альтернативные аналитические методы оценки связности сети.

Разумеется, два первых довода недостаточно убедительны, однако отсутствие иных аналитических методов оценки все же позволяет рассмотреть возможность использования теории случайных графов для решения этой задачи.

Вероятность связности узла сети с соседями (вершины в случайном графе) определяется как доля узлов, попадающих в зону его связи, т.е.

$$p_k = \frac{\bar{k}}{n} \quad (2.20)$$

где \bar{k} - среднее количество узлов, попадающих в зону связи.

Если рассматривать простую кубическую решетку, то связность определяется из тех соображений, что часть узлов может отсутствовать (быть неисправными или просто по каким-то причинам не функционировать). Будем полагать, что вероятность того, что узел не функционирует равна q_f , а того, что функционирует $p_f = 1 - q_f$.

Тогда учитывая вероятность функционирования узлов их среднее количество в зоне связи будет равно

$$\bar{k} = p_f k \quad (2.21)$$

где k – количество узлов, с которыми имеется связь, когда все узлы сети исправны (для простой кубической решетки это константа $k=6$), рисунок 2.5.

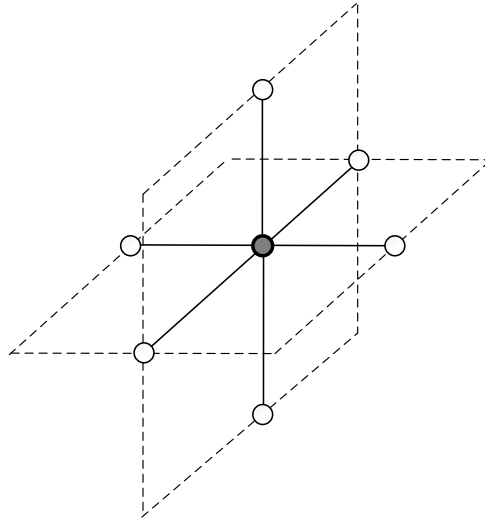


Рисунок 2.5 – Модель связности узла в простой кубической решетке.

Согласно результатам, приведенным выше, условием связности сети (протекания) с данной структурой является порог перколяции $p_c=0,31$, т.е. если количество доступных вершин не менее 31%. Величину p_c можно интерпретировать как вероятность существования узла решетки.

В данном сравнении примем это значение за величину p_f , т.е. за долю функционирующих узлов.

Тогда среднее количество узлов в зоне связи будет равно

$$\bar{k} = p_f k = 0,31 \cdot 6 = 1,86. \quad (2.22)$$

В задаче необходимо оценить вероятность связности узла сети с соседями.

Если сделать допущение о случайном распределении узлов и их количестве $n=1000$, то вероятность связности узла с соседями будет определяться согласно (1.2) как

$$\tilde{p}_{rc} = \frac{\bar{k}}{n} \approx 0,0019. \quad (2.23)$$

Эта величина существенно меньше порогового значения (2.19), которое для $n=1000$, $p_0 \approx 0,0069$.

Это демонстрирует то, что в таком случае может быть получено ошибочное суждение о несвязном состоянии графа. При этом оценки отличаются более чем в 3,6 раза.

Если не делать допущения о случайном размещении узлов, в заданной решетчатой структуре вероятность связности узла с соседями можно оценить иначе, как

$$\tilde{p}_{dc} = 1 - \pi_0 = 1 - (1 - p_c)^k = 0,89. \quad (2.24)$$

где π_0 – вероятность того, что у узла нет соседей, т.е. все 6 соседних узлов не функционируют.

Полученная согласно (2.24) величина вероятности связности узла с соседями не зависит от общего количества узлов и каких-либо иных параметров так как определяется только заданной структурой и долей исправных узлов. Эта величина существенно превышает пороговые значения, которые могут быть получены согласно выражению (2.19) для всех значений n .

Таким образом, выражение (2.19) в данном случае дает заниженное критическое (пороговое) значение (более чем в 100 раз), что завышает оценку связности сети.

На основании приведенных рассуждений можно сделать вывод, что применение критерия связности для случайного графа в данном случае не целесообразно. Ошибка пороговой вероятности, в этом случае превышает реальное значение более чем в 3,6 раз.

2.5 Выводы

1. Разработка трехмерной модели сети Интернета вещей показала, что в случае построения сети в многоэтажном строении ее структура может быть описана решеткой. В большинстве случаев это структуры близкие к простой кубической решетке.

2. Анализ распространения радиосигналов с учетом препятствий в многоэтажном строении показал, что отношение сигнал/шум в точках размещения узлов, существенно зависит от уровня мощности внутриканальных помех, создаваемых всеми узлами сети. Это определяет зависимость от количества узлов и от их активности, интенсивности производимого или трафика.

3. Качество канала, определяемого отношением сигнал/помеха в точках размещения узлов сети, в предложенной модели при типовых параметрах конструкции здания, позволяет для большинства стандартов обеспечить наибольшую скорость передачи.

4. Для предложенной модели сети применимы положения теории перколяции, которые позволяют описать сеть с точки зрения ее связности, т.е. способности доставлять сообщения между всеми узлами сети, а также получить дополнительные характеристики ее структуры.

5. На основании теории перколяции могут быть получены оценки некоторых критических значений, которые определяют условия и характеризуют качество ее функционирования.

6. Предложенные трехмерная модель и методы оценки качества функционирования сети Интернета вещей могут быть адаптированы и для других условий путем выбора соответствующих параметров модели и изменения структуры связей.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫБОРА МАРШРУТОВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

3.1 Анализ моделей точечных процессов в задачах моделировании сети высокой плотности

3.1.1 Предварительные замечания

В задачах моделирования сетей беспроводной связи существенное значение имеет взаимное расположение элементов сети. Часто положение таких элементов как точки доступа и базовые станции определяется при планировании сети и является решением части связанных с планированием задач. Это решение зависит от исходных данных для планирования, которые должны включать в себя данные о пользователях и окружении, в котором предполагается функционирование сети.

В этом смысле модель пространственного точечного процесса может быть удобна для описания размещения пользователей (оборудования пользователей) сети подвижной связи, положение которых в пространстве случайно, а количество слишком велико, чтобы рассматривать каждого в отдельности. В сетях Интернета вещей, в том числе высокой плотности, имеющих mesh структуру элементами могут быть и сами узлы сети.

Описание случайного размещения узлов сети в пространстве точечным процессом может быть удобно и с позиции моделирования возможной структуры сети, т.к. в ряде случаев свойства сети могут быть описаны аналитически на основе известных моделей точечного процесса. Например, описывая mesh сеть пуассоновским полем при ряде допущений можно достаточно просто получить оценку вероятности связности сети. Здесь можно допустить некоторую аналогию

между пуассоновским полем и простейшим потоком в теории массового обслуживания, для которого также имеются точные решения в части оценки среднего времени ожидания.

3.1.2 Понятие точечного процесса и его интерпретация в прикладной области

В данной работе точечный процесс будет рассматриваться как модель для определенной прикладной области, поэтому, дальнейшие определения не претендуют на исключительную полноту и полную общность. Они достаточны для однозначного толкования тех решений, которые рассматриваются в настоящей работе.

В статистике и теории вероятностей под точечным процессом или точечным полем понимают совокупность математических точек, которые расположены в математическом пространстве случайным образом, например, на вещественной прямой или в евклидовом пространстве.

Для целей данной работы будем понимать под точечным процессом некоторые метод случайного распределения точек по интервалам реальной линии или прямоугольникам или гиперпрямоугольникам в d -мерном евклидовом пространстве.

В теории точечных процессов наличие объекта в некоторой точке пространства называют событием.

Как в смысле определений, так и в смысле понятий можно провести аналогию между многими свойствами пространственных точечных процессов и временных случайных процессов, модели которых широко используются в теории связи. Для последних характерно (но не обязательно), что событие (точка) характеризуется только одной координатой (положением на оси времени).

Будем полагать, что в некоторой области пространства S определен точечный процесс X , тогда количество событий $k_X(B)$ в области $B \in S$ – есть случайная

величина. Такой процесс можно определить множеством многомерных функций распределения $\{k_X(B_1), \dots, k_X(B_g)\}$ для $g=1,2,\dots,m$.

Пространственный процесс называют стационарным если он инвариантен к сдвигу рассматриваемых областей в пространстве.

Если процесс инвариантен к повороту рассматриваемых областей относительно некоторой точки пространства, то его называют изотропным.

Процесс называют эргодичным, если среднее по всем его реализациям равно среднему по всей области определения.

3.1.3 Параметры и свойства точечных процессов

Для точечных процессов определены свойства, которые условно разделяют на свойства различного порядка.

Интенсивность может быть определена как свойство первого порядка. В таком случае интенсивность определяется как

$$\lambda = \lim_{B_\Delta \rightarrow 0} \frac{E(k_X(\Delta))}{B_\Delta} \quad (3.1)$$

где $k_X(\Delta)$ - число событий в окрестности точки, Δ - окрестность точки, B_Δ - площадь окрестности.

Если интенсивность не зависит от положения точки, в которой она определяется, то процесс называется однородным, иначе процесс считается неоднородным.

Можно определить интенсивности и более высоких порядков. Например, интенсивность второго порядка

$$\lambda_2 = \lim_{a_\Delta b_\Delta \rightarrow 0} \frac{E(k_X(\Delta_a)k_X(\Delta_b))}{a_\Delta b_\Delta} \quad (3.2)$$

где Δ_a и Δ_b - окрестности точек a и b .; a_Δ и b_Δ - площади этих окрестностей.

Интенсивность второго порядка как коэффициент вариации отражает связь двух величин. На основе интенсивности второго порядка могут быть определены условия стационарности второго порядка и изотропности.

К характеристикам второго порядка следует отнести парную корреляционную функцию

$$c(a,b) = \frac{\lambda_2(a,b)}{\lambda(a)\lambda(b)} \quad (3.3)$$

Если события в точках a и b независимы, то $c(a,b)=1$.

Для описания свойств второго порядка изотропного процесса также может быть использована функция Рипли []

$$K(r) = \frac{E(k_X(B_r))}{\lambda} \quad (3.4)$$

Значение этой функции пропорционально математическому ожиданию числа событий в области, ограниченной кругом радиуса r .

Также может быть использована модификация K функции – L функция Бесага.

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r \quad (3.5)$$

Для описания процессов также часто используется функция распределения расстояния до ближайшего события

$$G(r) = P(R < r). \quad (3.6)$$

Также может использоваться функция распределения расстояния от любой случайно выбранной точки до ближайшего события

$$F(r) = P(U < r). \quad (3.7)$$

Для сравнения $G(r)$ и $F(r)$ используется функция

$$J(r) = \frac{1 - G(r)}{1 - F(r)}. \quad (3.8)$$

Значение $J(r) < 1$ характерно для агрегации событий, т.е. имеет место «притяжение» событий друг к другу. При $J(r) > 1$, напротив события склонны «отталкиваться» друг от друга.

3.1.4 Модели точечных процессов

В теории точечных процессов можно выделить ряд процессов, которые наиболее часто упоминаются, по той причине, что имеют характерные особенности и могут быть полезны при построении моделей. Это такие процессы: как однородный и неоднородный пуассоновский точечные процессы, процессы Кокса, процессы Неймана-Скотта (процесс Матерна, процесс Томаса), процессы Гиббса.

Модель однородного пуассоновского процесса (пуассоновского поля) или модель полной пространственной случайности (CSR - Complete spatial randomness). Образно, ее можно сравнить с моделью простейшего потока в теории массового обслуживания. Однородный пуассоновский процесс является

стационарным и изотропным. Пример пуассоновского точечного процесса приведен на рисунке 3.1.

На рисунке 3.1а приведен пример точечного процесса на отрезке прямой, а на рисунке 3.1б в ограниченной области на плоскости.

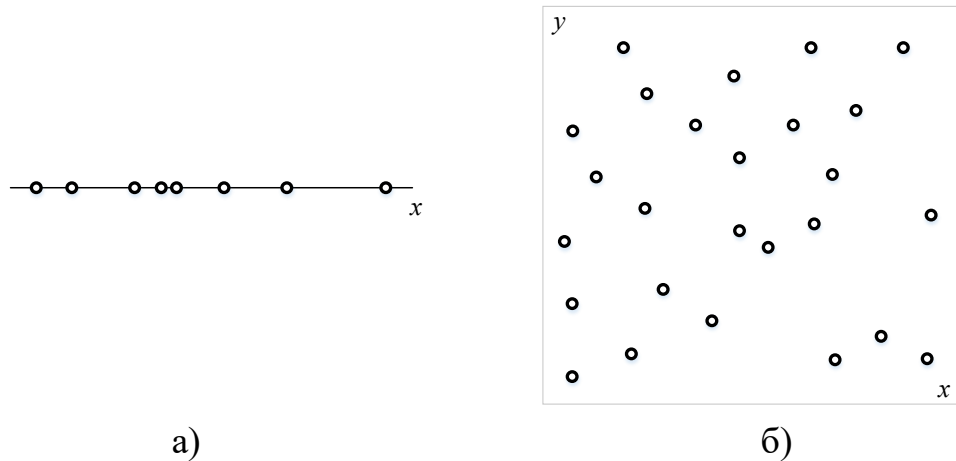


Рисунок 3.1 – примеры одномерного и двумерного точечных процессов.

Приведенные примеры получены для равномерного распределения точек. В таком случае координаты точки представляют собой случайные числа с равномерным законом распределения в пределах заданных значений координат.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & X_{\min} \leq x < X_{\max} \\ 0 & x < X_{\min} \vee X_{\max} < x \end{cases}$$

$$f(y) = \begin{cases} 1 & Y_{\min} \leq y < Y_{\max} \\ 0 & y < Y_{\min} \vee Y_{\max} < y \end{cases} \quad (3.9)$$

Такой точечный процесс (поле) обладает тем свойством, что вероятность попадания k точек этого процесса на заданный отрезок, плоскую область или в заданный объем, определяется распределением Пуассона и зависит только от размера выбранной области (длины отрезка, площади плоской области или объема фигуры) и не зависит от того, как и где именно в заданной области точечного процесса эта область определена.

$$p_k(B) = \frac{(\lambda B)^k}{k!} e^{-\lambda B} \quad (3.10)$$

Эту модель можно рассматривать как общий случай, который всегда удобно иметь для сравнения с другими частными случаями. Вероятно, такую модель также целесообразно применять, когда нет достаточно подробных данных о размещении элементов сети и когда нет достаточных оснований для предположений о их размещении.

Для однородного пуассоновского процесса значение функции Рипли равно площади круга радиуса r , а функции Бесага равно нулю

$$K(r) = \frac{E(k_x(B_r))}{\lambda} = \frac{\lambda \pi r^2}{\lambda} = \pi r^2. \quad (3.11)$$

$$L(r) = \sqrt{\frac{\pi r^2}{\pi}} - r = 0. \quad (3.12)$$

Интенсивность второго порядка

$$\lambda_2(r) = \lambda^2 \quad (3.13)$$

Парная корреляция равна единице

$$c(r) = 1. \quad (3.14)$$

На этих свойствах основаны тесты проверки процесса на однородность.

Для качественного описания свойств точечного процесса используют понятия агрегации и регулярности понимая под этими определениями «взаимное притяжение событий», приводящее к возникновению кластеров и напротив, «взаимное отталкивание» событий, приводящее к состоянию близкому к регулярному (равные расстояния между событиями). Эти две крайности позволяют описать процесс с точки зрения особенностей распределения событий в пространстве. В таблице 3.1 приведены характерные значения описанных выше функций, характерные для агрегации и регулярности.

Таблица 3.1 – Численные значения функций для агрегации и регулярности процесса

Агрегация	Регулярность
$K(r) > \pi r^2$	$K(r) < \pi r^2$
$L(r) > 0$	$L(r) < 0$
$c(r) > 1$	$c(r) < 1$
$J(r) < 1$	$J(r) < 1$

Как видно из (1.9) формирование пуассоновского поля в двумерном пространстве производится случайным «разбрасыванием точек» по плоскости. Вероятно, в большинстве прикладных задач, процессы, строго говоря, нельзя считать абсолютно случайными, т.к. большинство прикладных задач, связанных с описанием пространственного размещения некоторых элементов, опирается на некоторые физические структуры, в которых, образно говоря, координаты пространства не равноценны. Например, распределение пассажиров в поезде метро, распределение прохожих вдоль тротуара и др. Иначе говоря, моделируемый процесс, по крайней мере, не является однородным. Однако, часто при определенных условиях допущение об однородности может существенно упростить решение задачи не оказав существенного влияния на точность результата. Например, если для решения задачи имеет значение только количество событий в заданной области.

Неоднородный пуассоновский процесс отчасти характеризуется такими же свойствами как однородный пуассоновский процесс, но интенсивность его не является постоянной величиной, а зависит от положения в пространстве

$\lambda = \lambda(x)$, где x – координата в пространстве.

Число событий в области B распределено по закону Пуассона со средним значением

$$\bar{n}(B) = \int_B \lambda(x) dx \quad (3.15)$$

Такой процесс может найти применения во многих практических задачах, так как почти всегда плотность пользователей (количество на единицу площади) не равномерно, например, если строить модель размещения абонентов сети подвижной связи на участке тротуара, автомобилей на проезжей части дороги, узлов сети Интернета вещей в здании и т.п.

Пример неоднородного пуассоновского точечного процесса на плоскости приведен на рисунке 3.2.

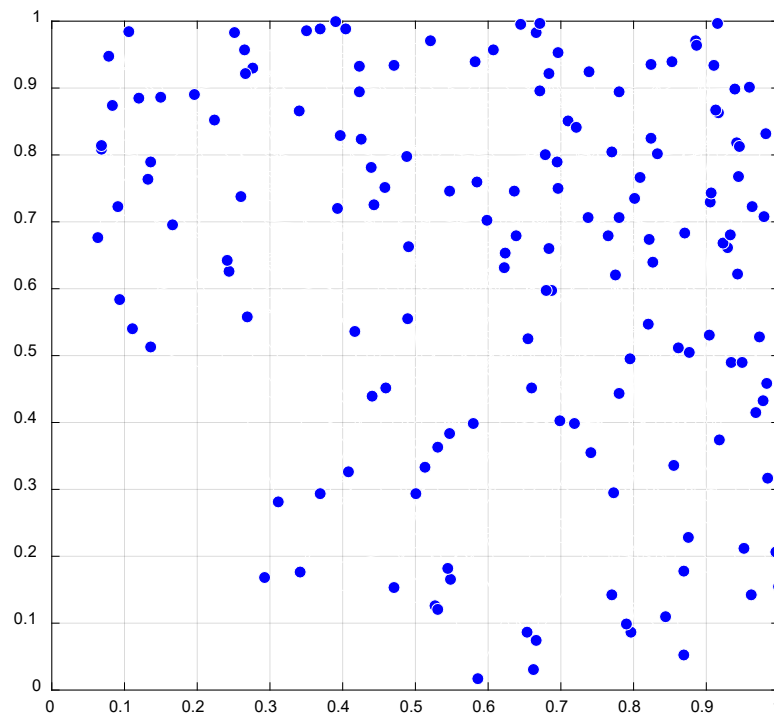


Рисунок 3.2 – Пример неоднородного пуассоновского процесса.

Точечные процессы Кокса. Эти процессы Кокса расширяют модельный аппарат и основаны на пуассоновском процессе, в котором интенсивность рассматривается как случайная функция координат $\Lambda(x)$. В зависимости от вида $\Lambda(x)$ различают различные модели процессов. Примером может быть смешанный пуассоновский процесс, когда интенсивность случайна и не зависит от координат в пространстве.

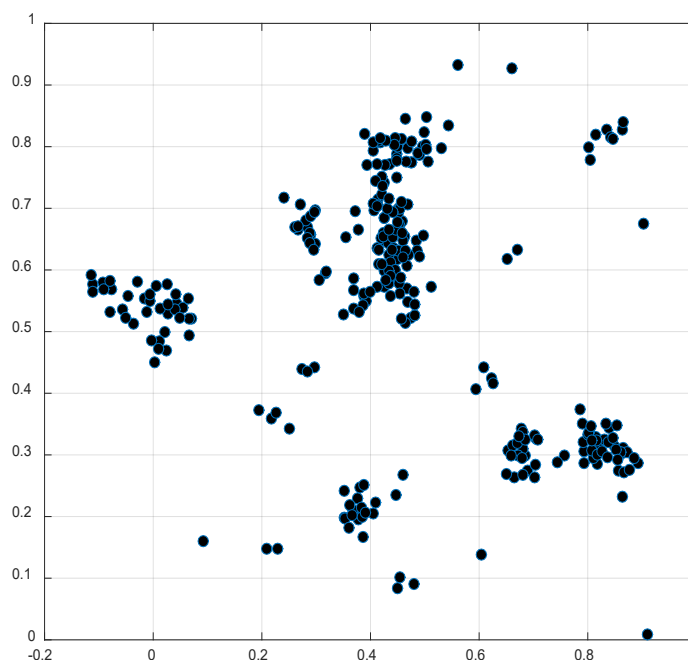


Рисунок 3.3 – Пример процесса Кокса

Кластерные процессы Неймана-Скотта. Кластерные процессы существенно расширяют модельный аппарат точечных процессов, поскольку позволяют моделировать специфику для случаев, характеризующихся выраженной агрегацией (скоплениями) событий (взаимным «притяжением» событий). Такой процесс часто рассматривают как суперпозицию нескольких процессов «родительских» событий и событий «потомков» (дочерних событий). Например, родительские события генерируются с помощью однородного пуассоновского процесса. Каждое родительское событие генерирует случайное число событий-потомков. Позиции событий-потомков имеют некоторый закон распределения в рассматриваемом пространстве.

Определение процесса не конкретизирует закон образования скоплений событий. В этом смысле возможны различные вариации процесса. Можно отметить некоторые конкретные модели: процесс Матерна и процесс Томаса.

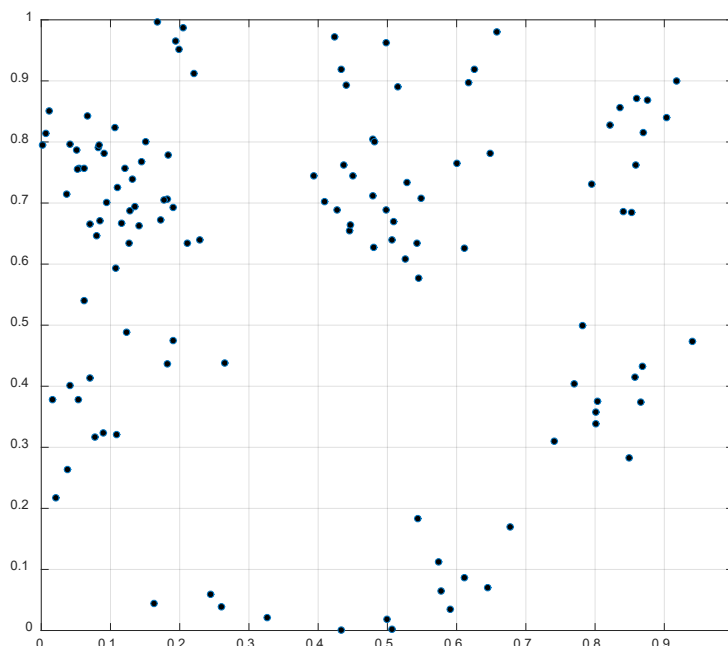


Рисунок 3.4 – Пример процесса Матерна

Процессы ингибирования. Эти процессы, как правило, используют для моделирования тех случаев, когда влияние некоторого фактора приводит к «угнетению» событий полной пространственной случайности. Например, наличие здания, сооружения или водоема, в некоторых случаях может быть препятствием для размещения узла сети. Примерами таких процессов могут быть: процесс Матерна I, и процесс Матерна II.

Процесс Матерна I может быть получен на основе однородного пуассоновского процесса путем удаления событий, находящихся друг от друга на расстоянии менее заданной величины. Такая модель позволяет учесть, например, невозможность размещения двух и более узлов сети в непосредственной близости.

Процесс Матерна II отличается от предыдущей модели тем, что удаляется только одно из пары событий, т.е. событий, находящихся на расстоянии друг от друга менее заданного.

Процессы Гиббса. Эти процессы используются для моделирования событий, для которых характерно взаимное «отталкивание». Частные случаи этого процесса могут быть, например, это процесс твердого ядра и процесс Штрауса.

Процесс твердого ядра основан на выборе заданной функции распределения если расстояние между заданной точкой и ближайшим событием превышает заданную минимальную величину, в противном случае вероятность появления события равна нулю.

Процесс Штрауса в отличие от процесса твердого ядра допускает появление события на расстоянии менее заданной величины от события, но вероятность этого зависит от расстояния так, что в самой точке эта вероятность равна нулю, а на расстоянии, определенном как минимальное – вероятность появления события не ограничивается.

3.1.5 Возможные приложения точечных процессов в моделировании сетей связи

Выше описаны наиболее известные модели пространственных точечных процессов, которые могут быть использованы для моделирования сетей беспроводной связи, в том числе и сетей Интернета вещей.

Таблица 3.2 – Модели точечных процессов для описания сетей беспроводной связи

Модель	Условия
Однородный пуассоновский процесс (CSR)	Отсутствуют данные о специфике размещения пользователей или она не имеет существенного значения.
Неоднородный пуассоновский процесс	Плотность сети неравномерна в рамках зоны обслуживания и изменяется по закону, который можно описать гладкой функцией.
Процессы Кокса	Имеют место скопления сетевых устройств, причем возможно описать функцию распределения устройств в местах их скопления.
Процессы Неймана-Скотта: -процесс Матерна,	Распределение сетевых устройств представляет собой кластеры, которые могут быть описаны кругами с равномерным распределением устройств внутри них.

-процесс Томаса.	Распределение сетевых устройств представляет собой кластеры, размещение в которых может быть описано двумерным нормальным распределением.
Процессы ингибирования: -процесс Матерна I, -процесс Матерна II,	Случай, когда сетевые элементы не могут размещаться слишком близко друг к другу, например, антенны двух базовых станций, работающие на одном частотном канале. В таком случае оба события (станции) удаляются. Случай, аналогичный предыдущему, но одно из событий остается (первое), а второе удаляется.
Процессы Гиббса: -процесс твердого ядра, -процесс Штрауса	Когда существует минимальное расстояние между элементами, ближе которого они не могут друг к другу располагаться. При превышении этого расстояния задается функция распределения для событий. Близкое расположение допускается, но нежелательно. Например, точки доступа частных локальных сетей, работающие на одно частотном канале.

Приведенные в таблице 3.2 возможные области применения моделей точечных процессов ориентировочными и приведены в качестве примеров.

Выбор той или иной модели диктуется потребностями моделирования и наличием исходных данных о сети, которую требуется описать. Наибольший интерес с точки зрения моделирования, по всей видимости, имеют сети высокой плотности, когда количество устройств слишком велико и недостаточно стабильно, чтобы говорить о детерминированных геометрических моделях.

Из анализа приведенных моделей можно заключить, что на их основе можно строить три основные группы моделей: модели с абсолютной пространственной случайностью (случайное равномерное распределение в зоне обслуживания),

модели с агрегированием (модели с образованием скоплений – кластеров) и модели с регулярностью (модели, тяготеющие к регулярным процессам).

Все эти задачи могут иметь место при моделировании сетей высокой плотности, в частности, сетей Интернета вещей или наносетей.

Описанные выше модели позволяют охватить широкий круг задач моделирования сетей ИВ. В дополнение к рассмотренным моделям следует отнести подход, писанный в работах, где авторы используют при построении моделей точечных процессов фрактальные фигуры. Такой подход позволяет расширить круг моделируемых процессов и ввести дополнительную характеристику фрактальной размерности, которая дает численно оценить схожесть модели с исследуемым процессом.

3.2 Предварительные замечания по задачам выбора маршрута

Современные беспроводные сети связи обслуживают значительное количество пользователей, которое уже превышает количество жителей планеты [37, 38]. Согласно прогнозам, это количество будет неуклонно расти, в основном за счет подключения к сети различных устройств и может многократно превысит количество жителей. По современным представлениям сеть высокой плотности содержит около 1 устройства на 1 м². Если формально интерпретировать это определение, то уже сегодня такие сети широко распространены, например, это: стадионы и многоквартирные здания.

Беспроводная сеть связи с высокой плотностью пользователей обладает рядом особенностей, как было отмечено в [39,40]. Если это сеть доступа, то для обслуживания пользователей требуется большое количество точек доступа, а для снижения их взаимных влияний требуется большое количество частотных каналов, а также применение направленных антенн. Если рассматривать ячеистую (mesh) сеть, то высокая плотность пользователей приводит, во-первых, к снижению

отношения сигнал/шум (ОСШ) из-за взаимных помех, производимых элементами сети на одном радиочастотном канале и во-вторых, в больших возможностях по формированию логической структуры сети [41].

В данной работе будем рассматривать сеть, образованную устройствами Интернета вещей (ИВ), которая имеет смешанную структуру, т.е. поддерживает связанную (mesh) структуру и имеет точки доступа (шлюзы). При формировании структуры сети необходимо определить логические связи и выбрать маршруты между ее узлами.

Структура сети определяется выбором связей между узлами, критерием для которого могут быть характеристики каналов между узлами сети и качество обслуживания трафика. В общем случае между каждой парой узлов может быть выбран маршрут. При асинхронной передаче сообщений такой подход требует постоянной работы всех узлов сети в режиме приема.

Это не всегда возможно в сети ИВ, где узлы могут работать в «спящем режиме» - режиме экономия энергии, а пробуждаться только для передачи сообщений. Тогда возникает необходимость выделения узлов различной функциональности: конечных и транзитных узлов. Транзитные узлы функционируют непрерывно и могут выполнять функции приема и передачи данных в произвольный момент времени. Увеличение количества таких узлов увеличивает расход электроэнергии, с одной стороны. С другой стороны, уменьшение их количества приводит к росту трафика из расчета на один транзитный узел, что косвенно влияет на качество обслуживания.

Построение маршрута в беспроводной сети приводит связано с его выбором среди возможных, а также с выбором его параметров, таких как количество транзитных узлов, их положение относительно друг друга. Эти параметры определяют качество обслуживания трафика, следовательно, и потенциальные возможности сети.

3.3 Постановка задачи построения маршрута

Если рассматривать сеть ИВ высокой плотности как множество преимущественно однотипных узлов связи, способных выполнять функции конечных и транзитных узлов сети, то она обладает избыточностью [41] с точки зрения обеспечения связности. Эта избыточность определяется значительным количеством узлов в зоне связи любого из них. Даже если количество узлов способных выполнять функцию транзита значительно меньше общего их числа, связность сети будет обеспечиваться с достаточно высокой вероятностью [42-44].

В таких условиях особое значение приобретает логическая структура связей между узлами. Увеличение количества транзитных узлов приводит к снижению интенсивности трафика, проходящегося на каждый из них, но увеличивает длину маршрута и задержку доставки пакета.

При увеличении количества транзитных узлов уменьшается расстояние между соседними узлами маршрута, что приводит к снижению затухания сигнала и росту отношения сигнал/шум, следовательно, к увеличению скорости передачи данных [45, 46] на участке между узлами. Однако увеличение количества транзитных участков влечет за собой и рост величины задержки из-за необходимости ожидания во время активного состояния узлов в зоне связи. Также увеличение количества транзитных узлов ведет к росту энергопотребления, что имеет важнейшее значение при больших количествах узлов. Таким образом, выбор количества транзитных узлов и маршрутов пропуска трафика является основной задачей организации сети ИВ высокой плотности.

Рассмотрим следующую модель, рисунок 3.5. Узлы источник и получатель s и t , соответственно соединены между собой маршрутом, состоящим из k узлов, включая узлы источника и получателя. Узлы r_1, \dots, r_{k-2} выполняют функцию транзита. Расстояния между узлами равны $d_{1,2}, \dots, d_{k-1,k}$.

Будем полагать, что все узлы маршрута расположены на прямой, соединяющей отправителя и получателя сообщения, на равных расстояниях. Это

не обязательное условие, сделано лишь для наглядности и упрощения рассуждений. Полученные результаты могут быть использованы и в других случаях.

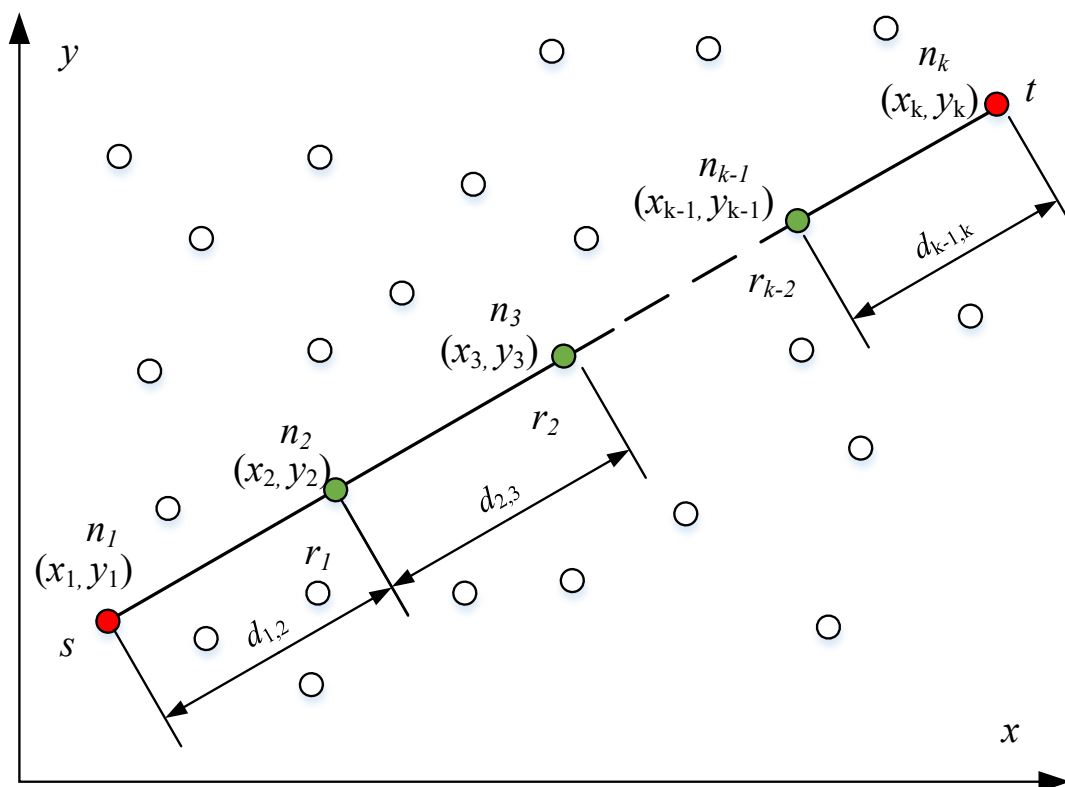


Рисунок 3.5 – Модель маршрута в сети ИВ

Приемопередатчики, используемые для организации радиоканала, могут выполнять функции транзита только в симплексном режиме. Если узел работает как транзитный, то после приема кадра от узла источника он переходит в режим передачи и передает кадр следующему узлу маршрута. В режиме передачи он не может принимать сигналы от других узлов.

Поэтому, узел источник должен будет ожидать окончания передачи, только после этого он сможет передать транзитному узлу очередной кадр. Более того, любой из узлов маршрута может передавать данные только в том случае, когда уровень сторонних сигналов на его входе не превышает некоторой заданной величины p_0 . Такими сторонними сигналами могут быть сигналы от узлов данного маршрута при передаче кадров, адресованных другим узлам.

Таким образом, возникает необходимость приостановки передачи, продолжительность которой определяется скоростями передачи, размером кадра, а

также уровнями мощности сигналов от узлов маршрута, которые зависят от условий распространения сигнала между узлами. Это приводит к тому, что эффективная скорость передачи данных на маршруте снижается, а ее величина зависит от длины маршрута и взаимного расположения узлов.

Опишем данную модель следующим образом. Будем полагать, что имеется маршрут, который состоит из k узлов, включая узлы источника и получателя сообщения. Полагаем, что источник передает по маршруту кадры размера L , размер кадра одинаков на всех участках маршрута. Будем полагать, что источник потенциально способен передавать кадры непрерывным потоком, т.е. можно пренебречь интервалом между моментами их передачи.

3.4 Модель и метод выбора узлов для построения маршрута

Скорость передачи данных через маршрут определяется отношением количества переданных данных ко времени, необходимому для их передачи.

Тогда передачи кадра между двумя узлами без транзита будет определяться скоростью передачи и размером кадра как

$$t_d = \frac{L}{b} \quad (3.16)$$

где L – размер кадра (бит), b – скорость передачи данных (бит/с).

При наличии одного транзитного узла между узлами источника и получателя время доставки будет определяться как

$$t_d = \frac{L}{b_{sr}} + \frac{L}{b_{rt}} \quad (3.17)$$

где L – размер кадра (бит), b_{sr} – скорость передачи данных (бит/с) между узлом источником и транзитным узлом, b_{rt} – скорость передачи данных (бит/с) между узлом транзитным узлом и получателем.

Тогда эквивалентная скорость передачи данных в маршруте будет равна

$$B = \frac{L}{t_d} = \frac{b_{sr} b_{rt}}{b_{sr} + b_{rt}} \quad (3.18)$$

В частном случае, при равенстве скоростей передачи на обоих участках маршрута $b_{sr} = b_{rt} = b$, эквивалентная скорость будет равна половине этой скорости

$$B = \frac{b}{2}.$$

При наличии k транзитных узлов эквивалентная скорость передачи данных в идеальном случае будет равна

$$B = \frac{\prod_{i=1}^k b_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^k \prod_{j=1, j \neq i}^k b_{j,j+1}} \quad (3.19)$$

Под идеальным случаем здесь понимаем такой случай, когда передающий узел переходит в состояние ожидания только на время, необходимое для передачи кадра соседним узлом, которому он это кадр отправил. Иными словами, когда уровни мощности сигналов от узлов, удаленных от передающего более чем на один шаг в маршруте пренебрежимо малы (меньше величины p_0).

В частном случае, при равенстве скоростей передачи на обоих участках маршрута $b_i = b; i = 1, \dots, k$, эквивалентная скорость будет обратно

пропорциональна количеству транзитных узлов $B = \frac{b}{k+1}$.

Скорость передачи данных на участке сети зависит от отношения сигнал/шум, которое зависит от уровня мощности полезного сигнала в точке приема

$$b_{i,j} = b_{i,j}(snr) = b_{i,j}(s) \quad (3.20)$$

Зависимость (5) различна для различных технологий и стандартов организации радиоканала. Например, для стандарта IEEE 802.11n [47] эта зависимость представляет собой функцию, вид которой приведен на рисунке 3.6.

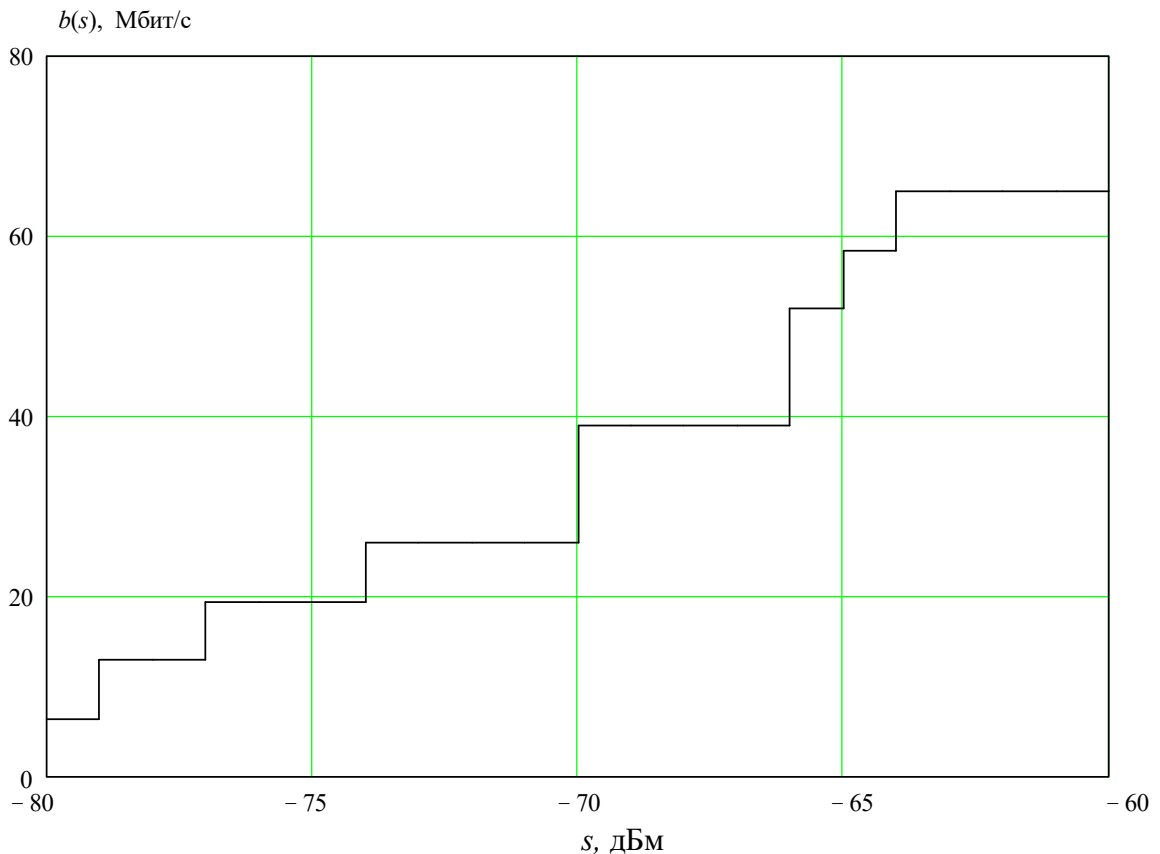


Рисунок 3.6 – Зависимость скорости передачи данных от уровня мощности сигнала

Уровень сигнала в точке приема зависит от затухания, которое определяется условиями распространения сигнала и расстоянием между приемной и передающей антеннами.

$$s(d) = p_{TX} - a(d) \quad (3.21)$$

где $a(d)$ – модель зависимости затухания от расстояния.

Выберем в качестве $a(d)$ модель, рекомендованную ITU-R для закрытых помещений [48].

$$a(d) = 20 \lg f + N \lg d + L_f(g) - 28 \text{ дБ} \quad (3.22)$$

где d – расстояние (м), f – частота (МГц), N – коэффициент потерь мощности, L_f – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через препятствие (дБ), где g – количество препятствий.

С учетом (3.20), (3.21) и (3.22) выражение (3.19) будет зависеть от расстояния между узлами маршрута

$$B = B(\Omega), \quad (3.23)$$

где Ω это способ выбора точек размещения транзитных узлов.

Под способом размещения транзитных узлов будем понимать их количество и расстояния между ними. Очевидно, что в общем случае, количество таких способов бесконечно велико. Однако, в практических задачах максимальное количество узлов в маршруте конечно, кроме того, учитывая сказанное выше, есть основание полагать, что пропускная существует некоторое оптимальное количество таких узлов, при котором она максимальна.

Рассмотрим вначале задачу поиска оптимального количества узлов в маршруте при равных расстояниях между ними, такое условие ограничивает количество возможных вариантов.

Выражение (3.19) описывает идеальный случай, когда узлы маршрута не создают внутриканальных помех друг другу. В таком случае с учетом (3.20), (3.21) и (3.22) для стандарта IEEE 802.11n можно получить зависимость, которая приведена на рисунке 3.7.

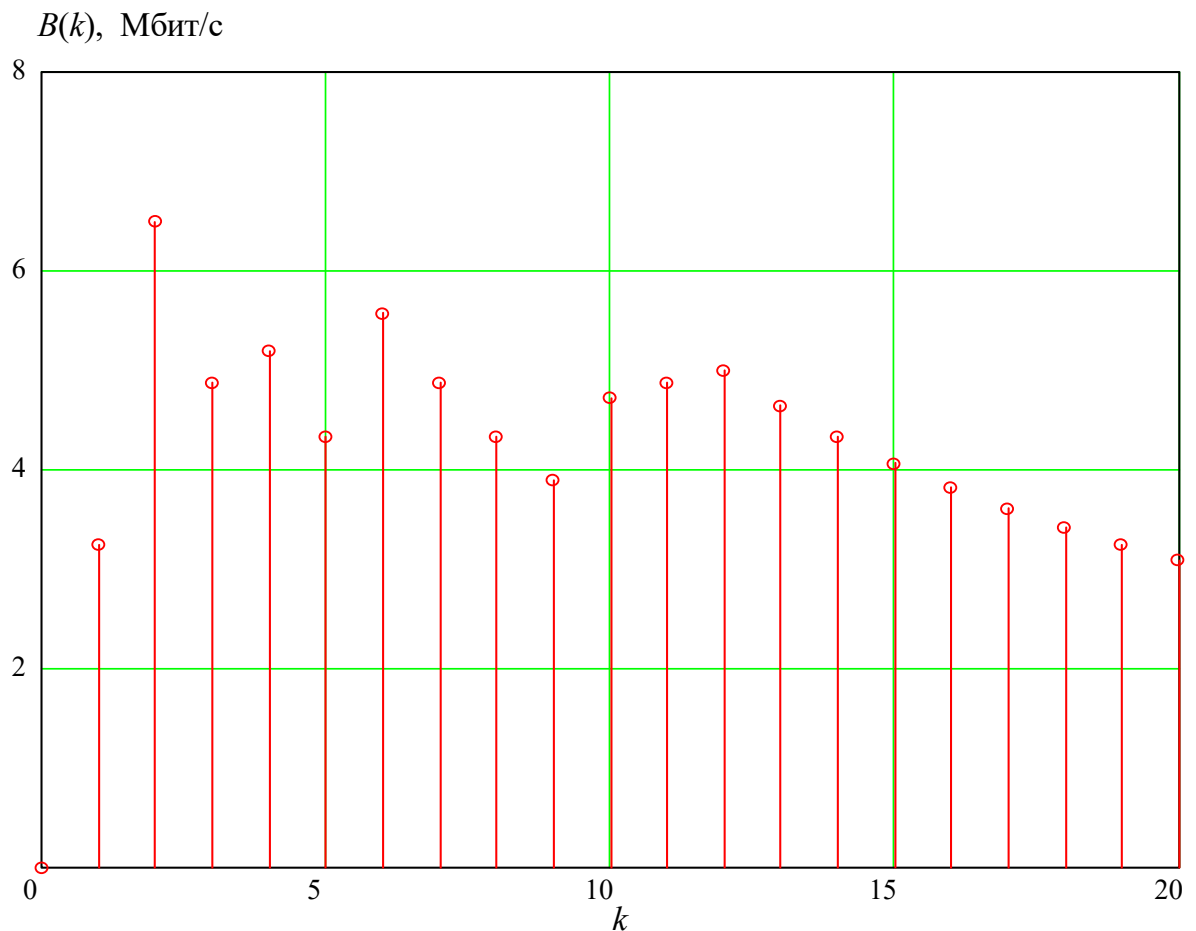


Рисунок 3.7 – Зависимость скорости передачи данных через маршрут от количества транзитных участков для стандарта IEEE 802.11n.

В реальном случае уровень мощности сигнала от других узлов маршрута в точке размещения предающего (принимающего) узла может быть достаточно большим, поэтому передающий узел вынужден ожидать пока не закончат работу на передачу узлы, уровень сигнала от которых превышает заданную пороговую величину p_0 .

На рисунке 3.4 приведена модель маршрута, проходящего через узлы, расположенные на прямой. В данном примере предполагается, что в зону связи узла маршрута попадают два следующих узла этого же маршрута. После передачи кадра первым узлом второму, первый узел ожидает передачи кадра вторым узлом третьему узлу и передачи третьим узлом четвертому, т.к. уровень мощности сигнала от их передатчиков превышает p_0 . Таким образом, доля времени в течение которого первый узел может передавать данные равна отношению $t_{1,2}/(t_{1,2} + t_{2,3} + t_{3,4})$. Аналогичные рассуждения следует отнести и к другим узлам

маршрута. Каждый из них должен ждать окончания передачи узлов, находящихся в зоне связи.

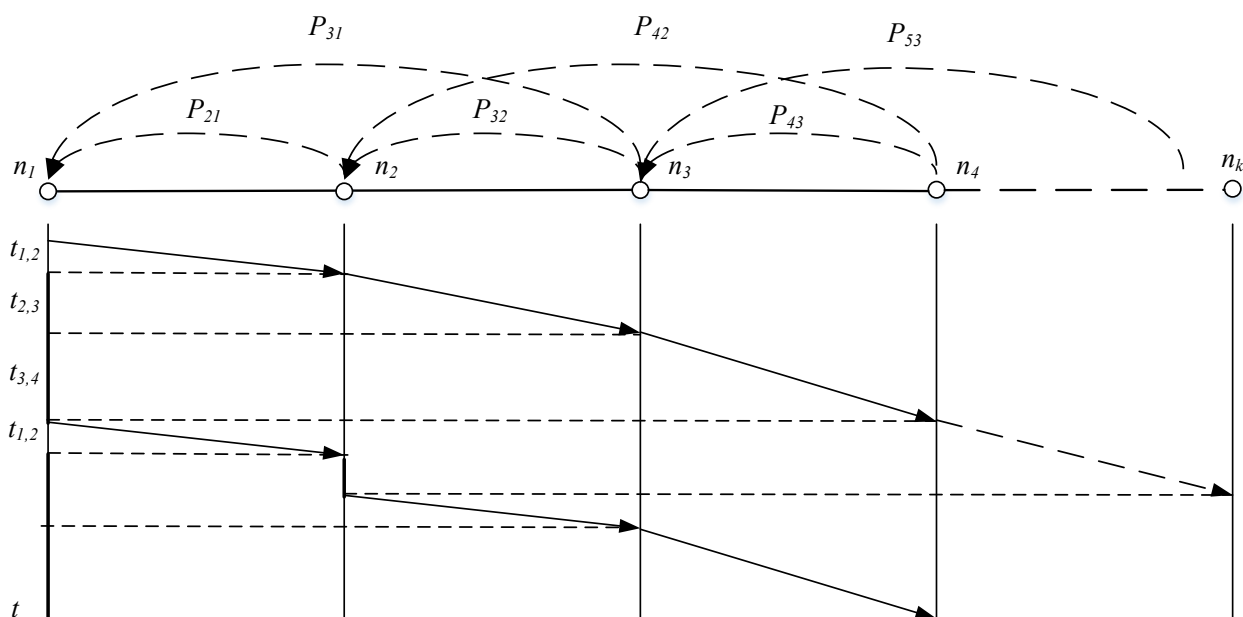


Рисунок 3.8 Диаграмма передач кадра узлами маршрута

Время доставки кадра по маршруту, полученное с учетом описанных процессов, можно вычислить как

$$t_d = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{L}{b_{i,j}} I(i, j) \quad (3.24)$$

Эквивалентная скорость передачи по маршруту, с учетом (3.8) будет определяться выражением

$$B(k) = \frac{L}{t_d} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{1}{b_{i,j}} I(i, j)} \quad (3.25)$$

где $I(i, j)$ - двоичная индикаторная функция

$$I(i, j) = \begin{cases} 1 & p_{j,i} < p_0 \\ 0 & p_{j,i} \geq p_0 \end{cases} \quad (3.26)$$

Значение $p_{j,i}$ в выражении (3.25) определяется на основе принятой модели затухания как

$$p_{j,i} = p_{TX} - a(d_{j,i}) \quad (3.27)$$

где $a(d_{j,i})$ - затухание сигнала, $d_{j,i}$ - расстояние между узлами j и i .

Зависимость скорости передачи от количества участков маршрута (3.25) приведена на рисунке 3.9.

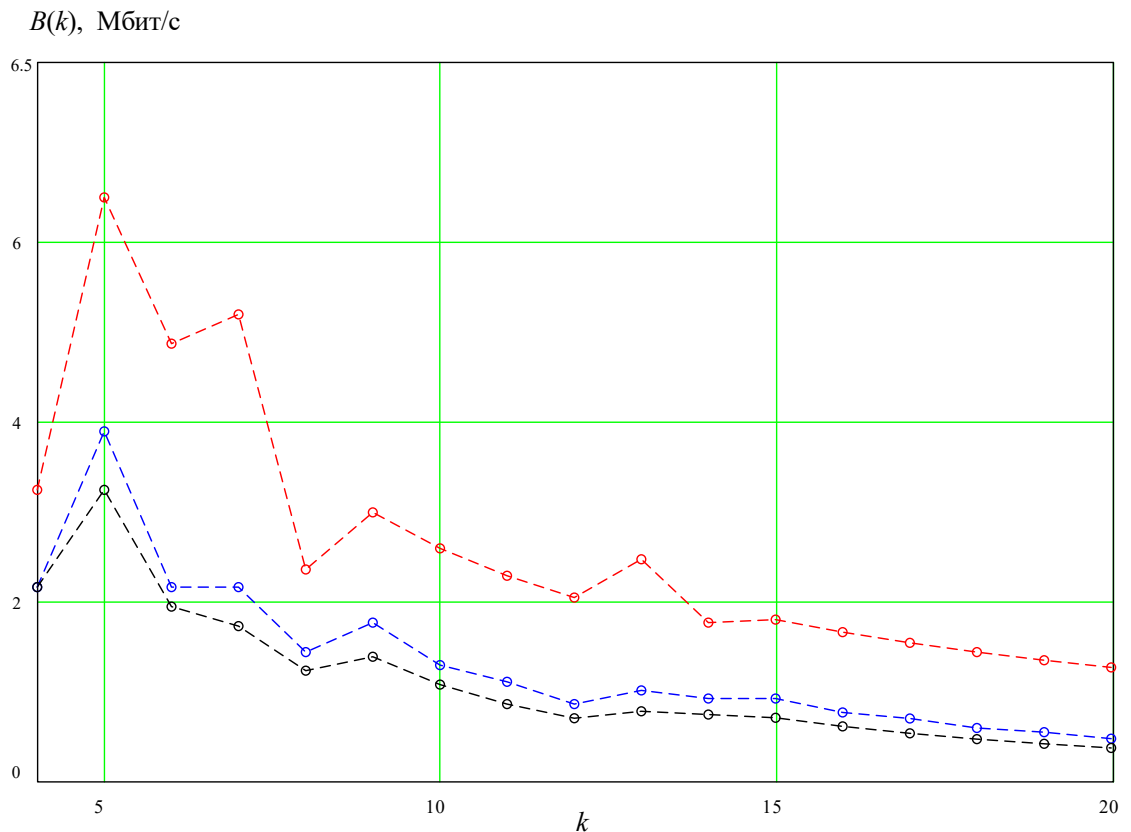


Рисунок 3.9 – Зависимость скорости передачи от количества транзитных участков

Как видно из рисунка 3.8, скорость передачи представляет собой невыпуклую функцию от количества узлов, имеющую несколько локальных максимумов.

Используя выражение (3.24) задачу поиска оптимального количества узлов маршрута, можно решить простым перебором их количества k в пределах от 0 (нет транзитов) до значения, при котором величина пропускной способности становится меньше допустимой.

$$k_0 = \arg \max_k B(k), \quad k = 0, \dots, k_{\max}, \quad k_{\max} = \arg \{B(k_{\max}) = B_{\min}\} \quad (3.28)$$

где B_{\min} – минимально допустимая величина пропускной способности маршрута.

При более общей постановке задачи (3.23), расстояния между узлами могут принимать произвольные значения. Тогда выражение (3.23), способы размещения, можно описать расстояниями между узлами или координатами узлов маршрута.

Для общего случая оптимизации маршрута выражение будет иметь вид

$$\begin{aligned} \{d_{i,j}, k_0 \mid i, j = 1, \dots, k_0\} &= \arg \max_{k, d_{i,j}} B(k, d_{i,j}), \\ k = 0, \dots, k_{\max}, \quad k_{\max} &= \arg \{B(k_{\max}) = B_{\min}\} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Для решения задачи (3.29) предлагается метод, который заключается в трехэтапном решении задачи.

1. На первом этапе находится оптимальная длина маршрута k , а на втором оптимальные расстояния между узлами маршрута.

2. В реальной сети ИВ, даже высокой плотности, невозможно найти транзитный, позиция которого в точности совпадает с найденной позицией.

3. Поэтому, на третьем этапе выбираются транзитные узлы, ближайшие к найденным позициям.

При этом произойдет изменение расстояний между узлами, что приведет к изменению средней скорости передачи по маршруту. Данный процесс случаен, поэтому, целесообразно оценить «чувствительность» выбираемого маршрута к возможным отклонениям расстояний между узлами [49].

Аналогичная задача имеет место и для оценки «чувствительности» маршрута к быстрым замираниям сигнала.

Для оценки введем в выражение (3.25) через выражения (3.20) и (3.21) зависимость от случайного фактора, которое проявляется в случайном изменении расстояния, тогда (3.21) будет представлено как

$$s(d) = p_{TX} - a(d + \Delta d) \quad (3.30)$$

где Δd – случайная величина отклонения расстояния от расчетного.

Будем полагать, что Δd имеет нормальное распределение со средним значением 0.

На рисунке 3.10 приведена иллюстрация зависимости средней скорости маршрута от длины маршрута с учетом случайных отклонений расстояний от расчетной величины.

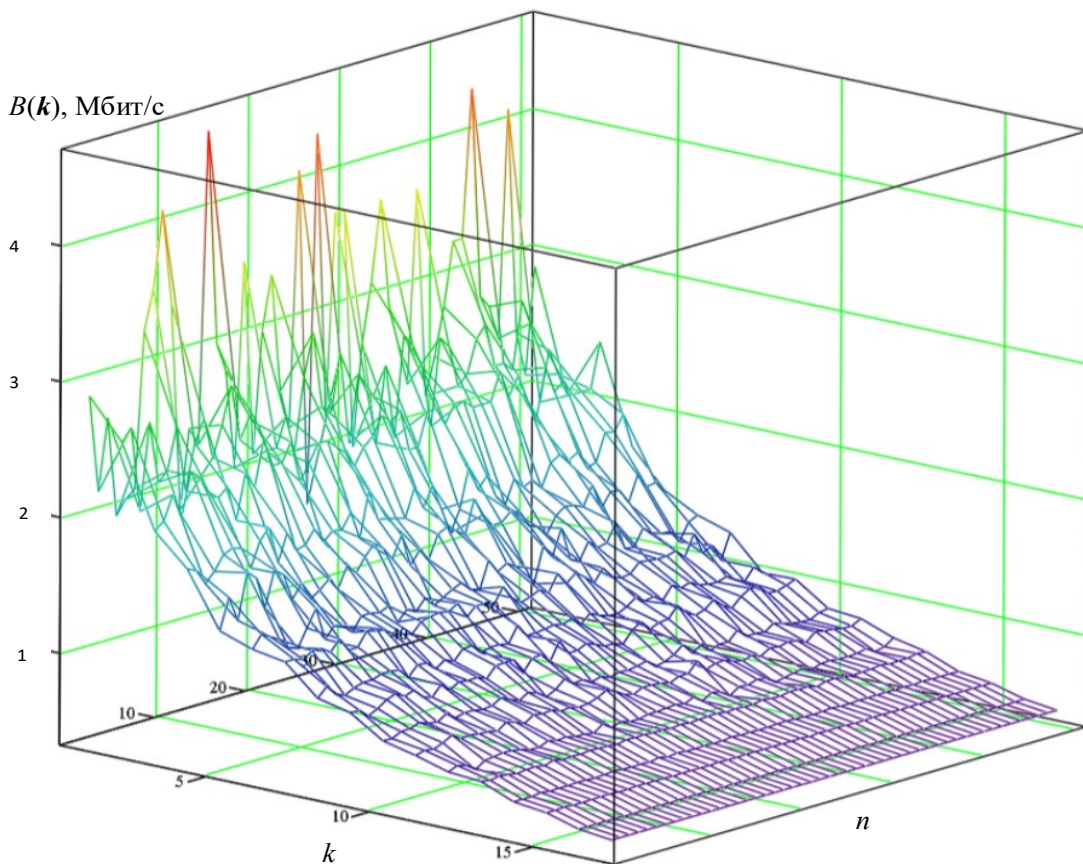


Рисунок 3.10 – Зависимость средней скорости передачи данных от количества транзитных участков с учетом случайных отклонений расстояний

На рисунке 3.10 приведена зависимость относительного разброса значений средней скорости передачи в маршруте от длины маршрута как оценка коэффициента вариации значений скорости $C_v(k) = \sigma(B(k))/M(B(k))$, где $\sigma(B(k))$ - среднеквадратическое отклонение, а $M(B(k))$ - среднее значение для приведенных на рисунке 3.9 данных (красная кривая).

Как видно из рисунка 3.10 коэффициент вариации уменьшается с увеличением количества узлов в маршруте, что является ожидаемым результатом. Зависимость аппроксимирована кривой $\sigma(B(k)) \approx a/k$ (синяя пунктирная линия). С ростом количества узлов и уменьшением расстояний между ними снижается чувствительность маршрута к случайным изменениям этих расстояний.

Аналогичная ситуация имеет место и при анализе чувствительности маршрута к быстрым замираниям сигнала.

Таким образом при выборе маршрута нужно решить компромисс между стабильностью скорости передачи и ее средней величиной.

Для решения данной задачи предлагается использовать «метод локтевой точки» [14] по отношению к кривой, приведенной на рисунке 3.11. «Локтевая точка» E находится как общая точка с касательной, проведенной под углом $3\pi/4$ к оси абсцисс.

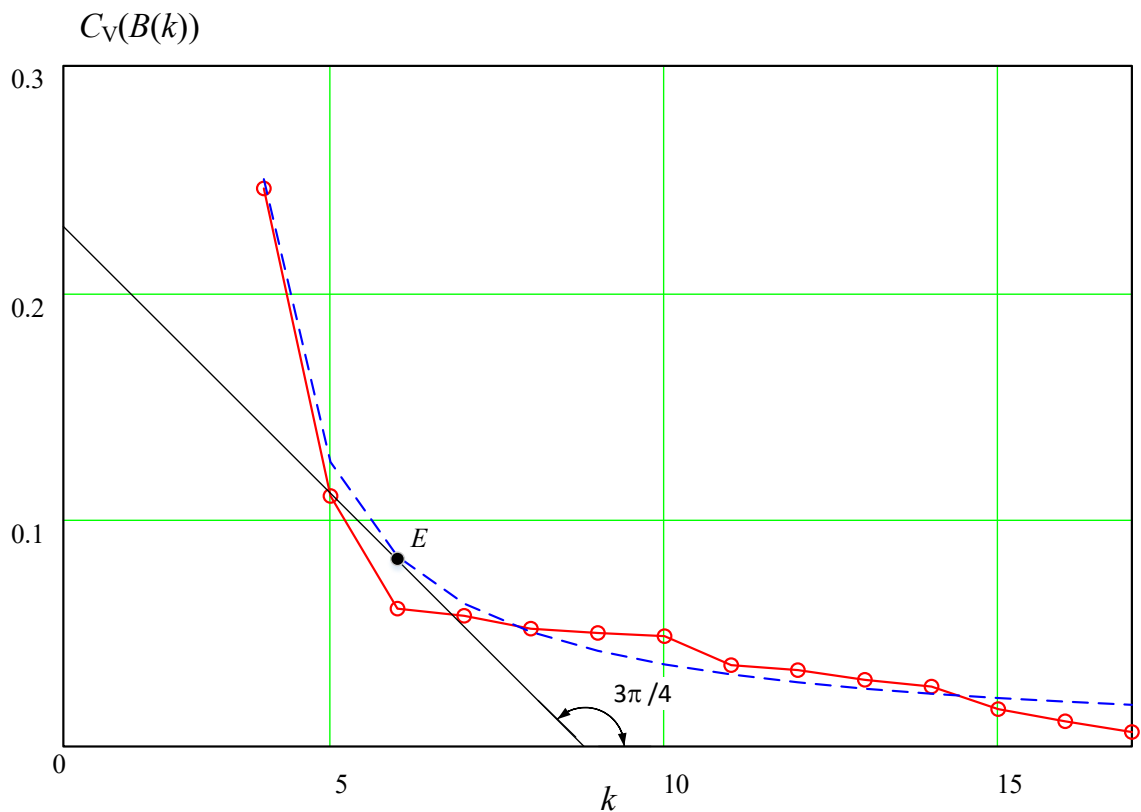


Рисунок 3.11 - Зависимость разброса значений средней скорости передачи в маршруте от длины маршрута

В данном случае, «локтевая» точка находится между точками $k=5$ и $k=6$, средняя скорость передачи в маршруте больше в первой из них, поэтому, целесообразно выбрать это количество узлов маршрута в качестве искомого.

Данное решение обеспечивает максимальную среднюю скорость передачи данных в маршруте, а также достаточно высокую устойчивость параметров маршрута.

Таким образом, метод выбора узлов для построения маршрута можно сформулировать следующим образом.

1. Задание исходных данных: координаты узлов сети $C = \{c_1, c_1, \dots, c_N\}$, где N – количество узлов сети; начальный и конечный узлы маршрута n_1 и n_k , расстояние между ними $d_{1,k}$, зависимость (3.5) для используемой технологии организации каналов.

2. Нахождение оптимального количества узлов в маршруте k решением задачи (13).

3. Нахождение расстояний между узлами маршрута решением задачи (14).

4. Оценка стабильности маршрутов. Вычисление коэффициентов вариации C_v .
5. Выбор значения k с использованием метода «локтевой» точки.

Особенность данного метода состоит в допущении, что найдутся транзитные узлы, расположенные достаточно близко к вычисленным координатам, расположенным на прямой, соединяющей начальный и конечный узлы маршрута. Такое допущение справедливо для сетей с высокой плотностью узлов. Для сетей с относительно малой плотностью узлов целесообразно ограничиться решением задачи (3.13), т.е. нахождением оптимального количества узлов маршрута при заданных расстояниях между узлами.

Использование предложенного метода дает возможность повысить эффективность использования ресурсов сети путем выбора близкого к оптимальному маршрута с учетом зависимости скорости передачи от уровня мощности полезного сигнала и сигналов помех от соседних узлов маршрута. Например, он позволяет повысить достижимую скорость передачи данных по сравнению с методом поиска кратчайшего пути по количеству транзитных участков.

3.5 Выводы

1. Потенциальная возможность сети связи в обеспечении качества обслуживания трафика характеризуется такими параметрами как задержка доставки данных, и достижимая скорость передачи данных. В сети, построенной с использованием беспроводных технологий эти параметры зависят способа организации маршрутов между отправителями и получателями.

2. Организация транзитных участков маршрута приводит к уменьшению достижимой скорости передачи данных, во-первых, из-за невозможности

одновременной работы узлов в режиме приема и передачи, а во-вторых, из-за необходимости ожидания завершения передачи всеми узлами маршрута, уровень мощности сигнала от которых в точке расположения рассматриваемого узла превышает заданный пороговый уровень.

3. Увеличение количества узлов в маршруте оказывает двоякое влияние на скорость передачи данных, с одной стороны, увеличивая ее за счет уменьшения участков переприема, а с другой стороны, уменьшая ее из-за необходимости ожидания передачи данных транзитными узлами. Такое влияние приводит к существованию оптимального количества узлов в маршруте, при котором достигается наибольшая скорость передачи данных.

4. Предлагаемый метод поиска узлов маршрута позволяет найти количество и положение транзитных узлов в сети ИВ высокой плотности с учетом «чувствительности» маршрута к отклонению расстояний между узлами в реальной сети от полученных оценок.

5. Данный метод позволяет получить выигрыш в скорости передачи данных по сравнению с методом поиска кратчайшего пути (по количеству транзитных участков). Например, при использовании стандарта IEEE 802.11n и расстоянии между источником и получателем 2000 м, выигрыш по скорости составляет более 38%.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДА МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ТРАФИКА В СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

4.1 Много-путевая маршрутизация

4.1.1 Предварительные замечания

Многопутевая маршрутизация — это метод выбора маршрутов, основанный на выборе доступных сетевых ресурсов для организации нескольких путей, позволяющих достичь узла назначения.

Он используется для ряда целей: объединение полосы пропускания (пропускной способности), минимизации задержки, повышения отказоустойчивости, повышение надежности, балансировки нагрузки и т.д.

В сети с коммутацией каналов альтернативные пути (маршруты) [51] использовалась, как правило, для уменьшения вероятности потерь вызовов. В таких случаях использовался кратчайший путь между двумя узлами до тех пор, пока не произойдет отказа оборудования или перегрузки трафиком (снижение качества обслуживания), тогда вызовы направляются по более длинному альтернативному пути.

В сети передачи данных идея использования нескольких путей для доставки пакетов впервые появился в [52]. Один из первых распространенных алгоритмов был разработан Галлагером [53].

На основе предположения о стационарном входном трафике и неизменной структуре сети, вычислительная процедура сводит к минимуму общую сетевую задержку. Главный недостаток алгоритма Галлагера заключается в том, что его очень сложно реализовать в реальной сети, учитывая, что каждый маршрутизатор

должен иметь численные оценки показателя качества, которые невозможно определить для всех условий [54].

Кроме того, поскольку настройка параметров в каждом маршрутизаторе иницируется по данным о пункте назначения и выполняется итерационно, алгоритм имеет тенденцию к медленной сходимости или не сходится вовсе, что ограничивает его использование для сетей со стационарными или квазистационарными узлами.

По этим причинам метод Галлагера используется только для получения теоретических нижних оценок.

В различных работах были предложены улучшения алгоритма. Например, в [55] расширение алгоритма Галлагера с использованием вторых производных были предложены для повышения скорости сходимости и выбор параметра.

Например, в стандарте ATM PNNI [56] могут быть найдены альтернативные пути в процессе резервирования. При сбое доставки на маршруте процесс запускается, чтобы попробовать несколько альтернативных путей, пока установлен новый маршрут.

В интернете какой-то маршрутизатор могут поддерживать несколько путей с маршрутизацией, например, протоколы такие как RIP и OSPF.

4.1.2 Беспроводные одноранговые и ячеистые сети

Мобильная одноранговая сеть формируется набором беспроводных мобильных узлов без поддержки стационарных базовых станций или инфраструктура. Каждый узел делится своими ресурсами и участвует в маршрутизации сообщений. Поскольку передача беспроводная и узлы мобильны, специальные сети поставили новые задачи перед разработкой алгоритмов маршрутизации. Маршруты проще сломаны из-за помех и мобильности узлов, а узлы имеют ограниченную пропускную способность, энергию и вычислительная

мощность. Эти проблемы делают многопутевую маршрутизацию возможным решением.

Существует множество протоколов многопутевой маршрутизации. для одноранговых сетей, обеспечивающих повышение ее пропускной способности. Технология беспроводных ячеистых сетей (WMN) имеет ряд существенных достоинств в ряде областей применения, таких как сети общего доступа и сети промышленных предприятий [57,58, 59]. WMN может состоять из мобильных клиентов и стационарных сетевых маршрутизаторов. Можно использовать сеть маршрутизаторов. для предоставления инфраструктурных/базовых услуг клиентам ячеистой сети. Такая сеть называется инфраструктурной WMN (IWMN) [57]. IWMN имеет несколько важных отличий, которые гарантируют различные стратегии маршрутизации. Во-первых, поскольку сетевые маршрутизаторы являются стационарными, для них нет проблем локализации и перестроения структуры. Это означает, что изменение структуры сети происходит значительно реже, чем в одноранговых сетях, где все узлы подвижны. Во-вторых, протоколы маршрутизации сети не испытывают ограничений по энергопотреблению, т.к. стационарные маршрутизаторы, как правило не требуют автономного питания, а подключены к стационарным источникам электроэнергии. В-третьих, распределение трафика в WMN обычно неравномерно, обычно большая часть пользовательского трафика направляется в/из Интернета через шлюзы или серверы приложений, которые находятся в сети [60].

Таким образом, IWMN требует лучшей масштабируемости, надежности и возможностей управления ресурсами, чтобы эффективно обеспечивать магистраль/инфраструктурные услуги.

4.1.3 Достоинства многолучевой маршрутизации

Отказоустойчивость — протоколы многопутевой маршрутизации могут обеспечить повышение отказоустойчивости за счет маршрутизации дубликатов сообщений в пункт назначения альтернативными путями. Это снижает вероятность того, что связь прерывается в случае сбоя соединения. Более сложные алгоритмы используют сетевое кодирование [61] для уменьшения накладных расходов трафика, вызванные избыточностью, в то время как сохраняя ту же степень надежности. Это увеличение отказоустойчивости во многом зависит от таких показателей, как независимость или непересекаемость используемых путей.

Балансировка нагрузки — когда один или более каналов маршрута перегружены трафиком, протоколы многопутевой маршрутизации могут перенаправить часть трафика по альтернативным путям, что облегчает его доставку.

Агрегация (объединение) пропускной способности — путем разделения потока передаваемых данных на несколько потоков, каждый из которых маршрутизируется через свой путь, эффективная пропускная способность может быть просуммирована (агрегирована). Эта стратегия особенно выгодна, когда узел имеет несколько низкоскоростных каналов, но требует пропускной способности больше, чем обеспечивает каждый из них.

Задержка доставки данных также может быть уменьшена за счет того, что различные маршруты имеют различные задержки и в группе маршрутов всегда найдется тот, у которого задержка буж.

Уменьшение задержки для беспроводных сетей, использующих один путь по требованию, сбоя маршрута означает, что должен быть инициирован новый процесс обнаружения пути, чтобы найти новый маршрут. Это приводит к задержке обнаружения маршрута. При многопутевой маршрутизации задержка сводится к минимуму, поскольку заранее известны резервные маршруты.

4.1.4 Элементы протокола многопутевой маршрутизации

Многопутевая маршрутизация включает в себя три базовых элемента: обнаружение пути, распределение трафика и обслуживание путей.

Обнаружение путей — это процесс определения доступных путей для пары источник-назначение. Существуют различные критерии, которые может использовать протокол при принятии решения о том, какое подмножество, если не все возможные пути, он будет выбирать в процессе обнаружения.

Непересекающиеся пути. Чаще всего используется понятие непересекаемость путей, который определяет независимость пути с точки зрения общих ресурсов. Существует три основных типа путей, а именно: пересекающиеся, непересекающихся по линиям и непересекающихся по узлам. Набор непересекающихся путей по узлам не имеет общих узлов, кроме источника и пункта назначения. Точно так же пути непересекающиеся по линиям не имеют общих линий, но могут иметь общие промежуточные узлы. И пересекающиеся пути могут иметь связи (и, следовательно, узлы) в общем.

Заметим, что непересекаемость узлов подразумевает и непересекаемость линий. При условии, что они доступны пути с непересекающимися узлами, как правило, предпочтительнее, потому что они используют самые доступные сетевые ресурсы, следовательно, они обеспечивают большую отказоустойчивость. Когда промежуточный узел в наборе непересекающихся по узлам путей выходит из строя, затрагивается только путь, содержащий этот узел. Отказ линии приведет к потере только одного из нескольких путей, независимо от того, являются ли они непересекающимися по линиям или узлами.

Однако отказ узла может привести к отключению нескольких линий и привести к отказу несколько непересекающихся путей.

Не всегда удастся найти непересекающиеся маршруты, особенно когда выбор маршрутов ограничен. В этом случае протоколы часто используют понятие

максимальной непересекаемости, чтобы минимизировать вероятность отказа канала или узла, влияющего на несколько путей.

В беспроводных сетях связи из-за значительного влияния длины маршрута на производительность, непересекающиеся по узлам пути могут быть не лучшим решением. Приходится искать компромисс между доступностью и производительностью при разработке многопутевых протоколов для многоскачковых беспроводных сетей.

Связывание маршрутов. В [62] показано, что в беспроводных сетях, взаимное влияние маршрутов, вызванное радиопомехами или коллизиями между путями могут сильно отражаться на производительности протоколов многопутевой маршрутизации, даже если пути топологически не пересекаются.

В проводной сети независимость маршрутов определяется непересекаемостью путей, но в беспроводной сети маршруты также считаются сильно зависимыми, если передача по одному маршруту препятствует передаче по другому маршруту или снижает его качество.

Зависимость между маршрутами может быть уменьшена за счет изменений на физическом или канальном уровнях, таких как использование нескольких радиочастотных каналов [62] или направленных антенн [63].

Распределение трафика. Существуют различные стратегии распределения трафика по доступным маршрутам. Многопутевой протокол может принять решение о пересылке трафика с использованием только пути с лучшей метрикой и оставить другие обнаруженные пути в качестве резервных. Или пути могут использоваться одновременно. Алгоритм выбора путей используется для выбора подмножества доступных путей в соответствии с определенным критерием качества. Традиционно, таким критерием является количество «скачков» (транзитов). Существуют и некоторые другие варианты: надежность пути, непересекаемость, доступная пропускная способность, степень влияния других маршрутов или комбинации этих метрик. В QoS-маршрутизации подмножество путей выбирается только в том случае, если объединенная метрика удовлетворяет требованиям QoS.

Количество путей — протокол может выбрать использование одного пути и сохранить остальные в качестве резервных, или он может использовать несколько путей циклически, когда за один раз используется только один путь. Если несколько путей используются одновременно для передачи трафика, то протокол должен решить, как трафик распределяется по этим путям и как обрабатывать неупорядоченные принимаемые пакеты в пункте назначения.

Возможно также повысить степень резервирования данных (вероятности доставки) при распределении трафика по нескольким путям. Для повышения эффективности использования ресурса могут использоваться специальные схемы кодирования данных, передаваемых по нескольким маршрутам [61, 64].

Детализация распределения трафика — возможны некоторые варианты степени детализации трафика, в порядке увеличения накладных расходов на управление, на пара источник-назначение: поток, пакет, сегмент. При мелкой детализации балансировка нагрузки может быть более эффективной, поскольку к колебаниям трафика можно быстро адаптироваться [65]. Тем не менее, для каждого пакета или более мелкой детализации требуется изменение порядка в пункте назначения, что может не подходить для некоторых приложений.

4.1.5 Протоколы многопутевой маршрутизации

Разработано множество протоколов многопутевой маршрутизации для беспроводных одноранговых сетей. Многие из них основаны на популярных протоколах маршрутизации по запросу, DSR [66] и AODV [67].

Протоколы на основе DSR

Расширение от Narsipuri и Das — многолучевое расширение для DSR представлен в [68]. Основной идеей является сократить частоту перестроения маршрута, поскольку перестроение связано с расходом значительного объема ресурсов сети, последнее приводит к снижению пропускной способности.

Протоколы определяют первичный исходный маршрут до узла назначения. Предполагается, что основной маршрут является кратчайшим маршрутом большую часть времени функционирования. Как только первичный маршрут

идентифицирован, пункт назначения отвечает на те последующие, содержащие маршрут, который является непересекающимся с основным маршрутом. Первоначально трафик направляется через основной маршрут. При сбое маршрута протокол переключается на кратчайший запасной путь. Обнаружение нового маршрута инициируется, когда отказали все маршруты.

В протоколе дополняется только возможность того, что узлу-источнику дается выбор альтернативных маршрутов, поэтому сбой любого промежуточного звена вызовет временную потерю маршрута до тех пор, пока источник не получит сообщение об ошибке и не переключается на новый маршрут.

Следовательно, все пакеты отправленные к месту назначения в по отказавшей линии будут потеряны на время потери маршрута.

Второй вариант протокола облегчает эту проблему, позволяя промежуточным узлам иметь один альтернативный маршрут и переключать маршрут, как только первичный выходит из строя (рис. 1). В процессе поиска маршрута пункт назначения пытается предоставить каждый промежуточный узел в основной маршрут с непересекающейся альтернативой к месту назначения.

При сбое связи первый вышестоящий узел с альтернативным маршрутом получает сообщение об ошибке и переключает маршрут для всего трафика. Этот процесс продолжается до тех пор, пока исходный узел получает сообщение об ошибке маршрута.

Авторы этого протокола пришли к выводу, что после проведения численного анализа что, любая форма многопутевой маршрутизации превосходит однопутевую маршрутизацию с точки зрения частоты повторного поиска маршрута, а альтернативные пути менее выгодны, прирост производительности менее значительный с использованием более двух альтернативных маршрутов. Разумеется, такой вывод следует рассматривать в контексте к конкретным технологиям и количеству (плотности) узлов сети.

В сетях с малой плотностью узлов зона связи, как правило достаточно велика, поэтому, велика вероятность взаимных влияний между маршрутами. В сети с высокой плотностью узлов размер зоны связи может быть выбран существенно

меньшим. Поэтому, взаимные влияния между маршрутами могут быть уменьшены. Иными словами, при высокой плотности узлов, данный вывод не следует рассматривать как достаточно убедительный.

Split Multipath Routing (SMR) [69] также является многопутевой маршрутизацией. В отличие от рассмотренных протоколов многопутевой маршрутизации, которые сохраняют несколько путей в качестве резервных, SMR разработан для использования их одновременно, т.е. разделяя трафик на потоки по двум максимально непересекающимся маршрутам. Два маршрута считаются максимально непересекающимися, если число общих звеньев в них минимально [70].

В SMR промежуточные узлы не отвечают на запросы маршрута, даже если у них есть маршруты к месту назначения. Это позволяет увеличить количество запросов, которые получает пункт назначения. Кроме того, промежуточные узлы пересылают пакеты запросов, полученные от линии, отличной от той, из которой исходит первичный запрос, при условии, что количество переходов меньше, чем первый первичного запроса. Это также увеличивает количество маршрутов до пункта назначения.

Как и в [68], используется маршрут, идентифицированный первым для достижения пункта назначения за минимальное время. Затем пункт назначения выбирает второй маршрут, как максимально непересекающийся с первым маршрутом.

Авторы выбрали для по пакетной детализации для распределения трафика, утверждая, что сложность получения сетевого состояния ad hoc сеть предотвращает использование более сложных схемы.

MP-DSR [71] был разработан с учетом качества обслуживания. Он направлен на обеспечение поддержки QoS с точки зрения вероятности доставки, определяемая как вероятность успешной передачи данных между двумя мобильными узлами за время от t_0 до $t_0 + t$, где t_0 — произвольный момент времени.

Математически это определяется как

$$p(t) = 1 - \prod_{k \in K} (1 - p(k, t))$$

где k — множество непересекающихся по узлам путей от источника к узлу назначения. $p(k,t)$ — вероятность исправного состояния пути k , вычисляемая как произведение доступности всех линий пути k . Другими словами, $p(t)$ — это вероятность того, что хотя бы один путь останется исправным за время t . Учитывая требования к надежности, протокол определяет количество путей, m_0 , которые необходимо найти, каждый из которых должен поддерживать минимальные требования надежности пути.

Процесс обнаружения маршрута запускается источником, отправляющим сообщения m_0 и запрос. Когда промежуточный узел получает запрос, он проверяет, удовлетворяет ли путь требованиям надежности. Если да, то запрос пересылается максимум m_0 соседям, в противном случае он отбрасывается. Пункт назначения получает все запросы и выбирает набор непересекающихся по узлам путей, которые в совокупности удовлетворяют заданному требованию надежности.

Множество выбранных путей не обязательно оптимально, выбирается первая комбинация, удовлетворяющая требованию.

MP-DSR периодически проверяет коэффициент потерь. Открытие нового маршрута инициируется, когда вероятность потерь становится неприемлемо высокой, или когда все происходит отказ всех путей. При моделировании было показано, что MP-DSR имеет лучшую скорость доставки и коэффициент ошибок чем DSR в сети с 20 мобильными узлами.

Протоколы на основе AODV. Протокол AOMDV [72] представляет собой многопутевое расширение протокола AODV. Протокол гарантирует, что альтернативные пути в каждом узле не пересекаются, благодаря этому достигается непересекаемость пути без использования источника маршрутизация.

Для поддержки многопутевой маршрутизации таблицы маршрутов в AOMDV содержат список путей для каждого узла назначения. Все пути имеют одинаковый порядковый номер узла назначения. Если маршрут получил более высокий порядковый номер, то все маршруты со старым порядковым номером удаляются. Для обеспечения непересечения с другими маршрутами и отсутствие

циклов в заголовок протокола вводятся два дополнительные поля, количество переходов и последний переход.

Поскольку протокол реализует поиск множества путей, он не гарантирует отсутствие петель. Он использует дополнительные меры для решения этой проблемы. Поле счетчика переходов содержит длину самого длинного пути для конкретного направления это число инициализируется только один раз, во время первого поиска. Следовательно, количество скачков остается неизменным до тех пор, пока не будет найден путь к более удаленному месту назначения (узлу). Это гарантирует отсутствие петель до тех пор, пока узел не объявляет маршрут короче, чем хотя бы один из уже найденных маршрутов.

Чтобы пути в таблице маршруты были непересекающимися, узел отбрасывает объявление пути, которые имеют либо общий следующий скачек или общий последний скачек, уже указан в таблице маршрутов.

Пути с непересекающимися узлами можно получить с помощью дополнительного ограничения, для конкретного пути к узлу назначения, каждый узел всегда выбирает один и тот же назначенный путь к другим узлам. Управление маршрутом в AOMDV аналогично, реализованному в AODV. Когда последний путь к месту назначения выходит из строя генерируется сообщение ошибки.

TORA - алгоритм маршрутизации с временным порядком (TORA) [75] основан на [76] и предназначен для разделения служебных сообщений управления от изменений топологии сети в максимально возможной степени. TORA является реактивным и распределенным. Он использует алгоритм обращения линии для достижения ориентированного на пункт назначения ориентированный ациклический граф (DAG), который гарантированно не содержит циклов.

При помощи сообщений QRY/UPD находятся несколько путей аналогично протоколам в DSR/AODV. При обмене сообщениями не передается информация о состоянии канала для минимизации управляющего трафика. Однако недостатком этого подход заключается в том, что, поскольку процесс реверсирования ссылки продолжается с течением времени, маршрутизация может стать менее оптимальной, чем она была изначально. TORA также требует, чтобы узлы в сети

были синхронизированы по времени, т.к. он использует временные метки (теги). Исследования производительности [77] показано, что алгоритм склонен к перегрузке, поскольку он требует своевременной и надежной доставки сообщений управления маршрутизацией.

ROAM - [73] представляет векторный алгоритм, выполняемый по требованию, называемый маршрутизацией по требованию. По сути, это многопутевая версия DUAL [74] который использует концепцию, называемую допустимым расстоянием, для нахождения маршрутов без петель. ROAM обнаруживает части сети по требованиям, чтобы узлы отправляли сообщения об обновлении соседним маршрутизаторам при изменении расстояния до определенного пункта назначения превышает заранее установленный порог. Так как алгоритм требует обмена информацией о состоянии между узлами, более подходит для использования в статических сетях или сетях с ограниченной подвижностью.

Кодирование разнообразия - основа для многолучевой схемы в ad hoc сетях предложен в [64]. Схема основана на Mfor-N разнесенном кодировании [61], описанном ранее. В этой схеме добавляется пакет размером N блоков с дополнительными накладными расходами рассчитывается как линейная функция исходного пакета объединенные данные и служебные данные фрагментируются на $M + N$ блоков и выделить несколько непересекающихся узлов путей к месту назначения.

Вместо размещения одного блока на $M + N$ путях схема позволяет назначать несколько блоков одному пути. Каждому пути присваивается вероятность потери, p_i , такая, что потеря информации в пункте назначения происходит с вероятностью p_i , или вся информация получена правильно с вероятностью $1-p_i$. Доступные непересекающиеся в узлах пути к месту назначения ранжируются по вероятности отказа, и только подмножество наименьшего p_i используется для маршрутизации. Схема предлагает алгоритм оптимизации для определения количества путей с наивысшим рангом к используемому и выделение блоков каждому пути, так что вероятность восстановления исходного пакета в пункте назначения будет

максимизирована В [64] было показано, что по мере увеличивается количества путей, вероятность успеха доставки приближается 1. Однако в реальных одноранговых сетях может быть сложно обнаружить более чем несколько непересекающихся узлов путей, если только сеть не имеет высокую плотность.

MPR-E — многопутевая маршрутизация с EAPAR [63] направлена на решение проблемы влияний на маршруты, вызванные помехами и коллизиями в беспроводных сетях. Он использует понятие зональной непересекаемости в качестве основного критерия выбора пути. Пара путей называется зонально-непересекающимися, если передача данных по одному пути не мешает, передачи по другому пути. Для дальнейшего увеличения производительности маршрутизации, протокол стремится ограничить длину путей (в пересчете на скачки) путем нахождения максимально непересекающихся зон кратчайших путей.

Поскольку всенаправленная антенна создает нежелательные излучения во всех направлениях, протокол MPR-E применяет направленные антенны для уменьшения эффективной зоны передачи каждого узла, и максимизации доступности непересекающихся зон путей в сети. Используемая антенна называется ESPAR. (Электронно-управляемый пассивный излучатель). Когда антенна не излучает он остается в режиме всенаправленного зондирования, пока каждый узел в сети получает информацию о топологии сети и коммуникационной деятельности. Когда у источника есть информация для отправки получателю, он стремится пересылать пакеты поочередно на два максимально непересекающихся в зонах пути. Каждый промежуточный узел будет пытаться избежать переадресации на занятые скачки. Было показано что MPR-E обеспечивает лучшую пропускную способность, чем AODV, а также более высокую подвижность узлов.

4.1.6 Многопутевая маршрутизация в беспроводных ячеистых сетях

Многопутевая маршрутизация в ячеистых сетях инфраструктуры требует подход, отличный от того, который используется в одноранговых сетях для адресации наличия стационарных магистральных маршрутизаторов.

Маршрутизация имеет большой потенциал для повышения производительности в инфраструктурная ячеистая маршрутизация.

Мультирадио, многоканальный

По мере снижения стоимости аппаратного обеспечения набирают интерес многоканальные технологии, которые позволяют решить некоторые проблемы пропускной способности и надежности канала [78]. Это позволяет использовать инфраструктурные маршрутизаторы, которые имеют меньшую стоимость, потребляемую энергию и ресурсы, чем специальные узлы, применение технология для IWMN [57].

Многочисленные исследования [60, 79, 80, 81] показывают, что пропускная способность и характеристики сети с использованием мультирадио и многоканальных узлов существенно выше. В [82] введена новая метрика для маршрутизации в мультирадио, представлены многоскачковые сети. Метрика называется взвешенный кумулятивный ETT (WCETT) была разработана для выбора каналов различных путей. Метрика основана на ожидаемом времени передачи (ETT –Expected Transmission Time), функция скорости потерь и пропускной способности канала и вычисляет средневзвешенное значение EET каналов в пути. [83] улучшает выбор в [82] и представил метрику для выбора нескольких путей. Channel Aware Multipath (CAM) рассматривает как одиночные пути WCETT, так и индекс помех между путями, что позволяет уменьшить влияния между маршрутами.

Вышеупомянутые исследования многолучевой маршрутизации сосредоточены на сетевых измерениях в качестве показателей выбора пути. Несмотря на то что разнесение каналов увеличивается, пространственное разнесение игнорируется и в результате может пострадать надежность пути.

Географическая маршрутизация

Протоколы географической маршрутизации [84, 85, 86] используют информацию о местоположении, расположение источника, пункта назначения и соседних узлов используется для принятия решения о переадресации. Протоколы географической маршрутизации обычно обладают хорошей масштабируемостью,

поскольку обмен информацией о маршрутизации происходит в сети. Однако, перед маршрутизацией пакета исходный узел должен собрать данные о месте назначения. Таким образом, имеет решающее значение эффективная и масштабируемая служба определения местоположения. Известно множество решений [86, 87, 88]. В инфраструктурных WMN, поскольку узлы являются стационарными, очень мало необходимости в частых обновлениях местоположения. Следовательно, производительность службы определения местоположения не определяет эффективность маршрутизации. Протоколы многопутевой маршрутизации могут извлечь выгоду из географической маршрутизации в информации об местоположении можно использовать для построения более точной топологии сети.

Стандарт 802.11s

802.11s [89] — это стандарт IEEE 802.11 для беспроводной локальной ячеистой сети. Текущее предложение определяет расширяемый фреймворк для поддержки протоколов выбора пути второго уровня.

Помимо обязательного протокола и метрики, которые все реализация должна поддерживать по причинам интероперабельности, Framework позволяет использовать дополнительные протоколы и метрики.

Протокол выбора пути по умолчанию в предложении 802.11s: Гибридный беспроводной ячеистый протокол (HWMP). Он поддерживает поиск пути по запросу. Базовый уровень по запросу протокол называется Radio Metric AODV (RM-AODV).

Он расширяет AODV [67] для поддержки использования произвольных метрик пути в определении путей с наилучшей метрикой.

Хотя предложение 802.11s не поддерживает многолучевое распространение в своей базовой версии, структура выбора пути может легко расширяться для включения протоколов с поддержкой многопутевого распространения и метрики.

Узлы сетки могут переключаться между протоколами в соответствии с потребностями их применения. Учитывая это, многопутевая маршрутизация может быть адаптирована к текущей предлагаемой ячеистой сети.

Приведенный выше анализ наиболее известных протоколов многопутевой маршрутизации показал, что большинство авторов рассмотренных исследований склоняются к полезности этих протоколов в задачах организации беспроводных сетей связи для повышения пропускной способности (скорости передачи данных) между узлами сети. В большинстве работ авторы полагают, что увеличение количества «параллельных» маршрутов приводит к существенному росту служебного трафика в сети и снижению ее эффективности. Однако, некоторое «не слишком большое» количество таких маршрутов способно эффективно решать задачу повышения пропускной способности. Данные выводы в подавляющем большинстве работ относятся к традиционным сетям, т.е. не к сетям высокой плотности, в частности, это уточняется в этих работах. Как было отмечено выше, сеть высокой плотности имеет ряд особенностей, таких как: более широкие возможности выбора узлов для реализации транзитов в маршрутах, а также выбора самих маршрутов с учетом взаимных влияний. Таким образом, решение задачи многопутевой маршрутизации для сетей с высокой плотностью узлов с учетом их особенностей может повлиять на их показатели функционирования.

4.2 Предварительные замечания

Интернет вещей (ИВ) уже стал неотъемлемой частью современной инфокоммуникационной системы. Согласно прогнозам ведущих производителей, количество устройств ИВ, подключенных к сетям связи будет расти в обозримом будущем [90-92,44]. Большое количество подключенных устройств приводит к формированию сетей высокой плотности [38,39], которые обладают рядом особенностей, связанных со значительными взаимными влияниями между узлами [41,42].

Наряду со сложностями организации сетей высокой плотности, имеет место ряд особенностей, которые дают дополнительные возможности организации сети.

Например, при выборе логической структуры сети, в условиях большого количества узлов имеется возможность более гибко подходить к решению задачи. Если в условиях малой плотности возможности выбора логической структуры определяются исключительно взаимным размещением узлов, то в условиях большой плотности, узел может быть найден в непосредственной близости, практически, к любой точке пространства. Это дает возможность выбора той логической структуры, которую по некоторым соображениям требуется построить.

Однако, такая свобода выбора требует наличия методов формирования логической структуры, которая в наибольшей степени удовлетворяет конкретным потребностям.

В работе [93] приводится метод выбора параметров маршрута в сети ИВ целью которого является получение максимума скорости передачи. Как было показано в этой работе, скорость передачи по маршруту снижается с ростом количества транзитов. Если длина маршрута (в количестве транзитов) слишком высока, что может иметь место в сетях большого масштаба, то скорость передачи в нем может оказаться меньше требуемой и не может быть повышена выбором его параметров. В таком случае, единственной возможностью повышения скорости передачи является применение много-путевой маршрутизации.

В данной работе предложена модель много-путевой маршрутизации в ИВ и метод выбора маршрутов, обеспечивающий повышение эффективности использования ресурсов.

4.3 Модель много-путевой маршрутизации

Известные протоколы маршрутизации в сетях ИВ включают в себя также подгруппу много-путевых протоколов [94, 95], которые позволяют реализовать выбор нескольких маршрутов между источником и получателем. В сети высокой плотности потенциально возможное количество таких маршрутов может быть

чрезвычайно велико. Выбираемые маршруты могут содержать общие участки, т.е. быть зависимыми, или не содержать их и быть независимыми. В общем случае, при использовании независимых маршрутов скорость передачи данных равна сумме скоростей передачи в каждом из них. В случае зависимых маршрутов она будет ограничена скоростью передачи по наиболее «медленному» общему участку. В беспроводных сетях маршруты зависимы, если передача по какому-либо участку одного из них зависит от активности узлов другого маршрута, т.е. участки не обязательно должны быть общими, достаточно того, чтобы узлы находились в зоне взаимной связи (или влияния). Поэтому, в них невозможно построить абсолютно независимые маршруты. По крайней мере, первый и последний участки всегда нужно рассматривать как общие, поскольку одновременная передача на них возможно только по одному из маршрутов. На рисунке 4.1 приведена графическая интерпретация модели много-путевой маршрутизации между узлом источником s и узлом получателем данных t .

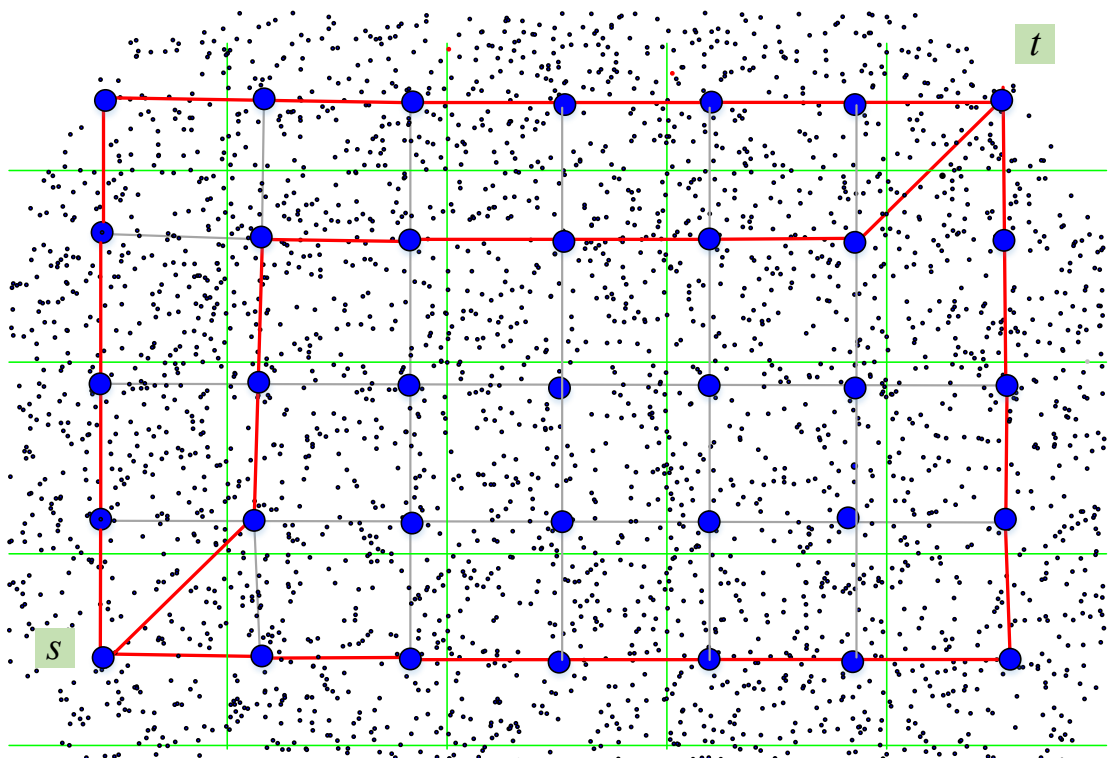


Рисунок 4.1 – Возможная структура много-путевой маршрутизации

Наличие зависимых участков неизбежно приводит к снижению скорости передачи данных поскольку во время активности влияющего узла в зависимом маршруте необходимо приостанавливать передачу.

Очевидно, что с точки зрения скорости передачи данных по группе маршрутов более ценные маршруты, не имеющие взаимных влияний, за исключением первого и последнего участков. С учетом того, что рассматриваемая сеть имеет высокую плотность узлов, сделаем допущение того, что такие маршруты можно найти и их количество также будет достаточно велико.

Геометрические размеры такой сети должны быть достаточно велики по сравнению с размерами зоны связи узла. Очевидно, что при малых размерах сети задача естественным образом вырождается, так как отсутствует потребность в построении маршрута.

Примем следующие условия. В сети имеются M различных маршрутов между узлом источником s и узлом назначения t . Маршруты могут содержать различное количество транзитов и обслуживать различные потоки трафика. В общем скорость передачи данных по каждому из маршрутов случайна, она зависит от количества узлов в маршруте (транзитных участков), скорости передачи данных на каждом из них, свойств обслуживаемых потоков трафика.

Будем полагать, что среди существующих маршрутов имеется множество из n известных (доступных) маршрутов $R = \{r_1, r_1, \dots, r_n\}$ которые могут быть использованы для передачи трафика от узла s к узлу t .

Допустим, что эквивалентная скорость передачи данных доставки по каждому из доступных маршрутов i случайна, равна b_i . Под эквивалентной скоростью будем понимать отношение количества переданных данных к продолжительности интервала времени передачи (интервал времени и количество данных достаточно велики по сравнению с временем передачи одного пакета и количеством данных в нем)

$$b_i = \frac{L}{x_i} \quad (4.1)$$

где L - количество данных (бит), x_i – время передачи (с).

Будем полагать, что передача данных по группе маршрутов производится «параллельно». Строго говоря, как было отмечено выше, одновременная передача по нескольким маршрутам в рассматриваемом случае невозможна, однако, это относится только к первому и последнему звеньям маршрута. Если маршрут имеет достаточно большую длину, то передача на участке за исключением первого и последнего звеньев может рассматриваться как «одновременная».

При передаче по нескольким маршрутам необходимо производить распределение передаваемых данных, что выражается в том, что по каждому из используемых маршрутов будет передаваться некоторая доля данных некоторая

$$\text{доля данных } \beta_i, \quad 0 \leq \beta_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^k \beta_i = 1.$$

Время передачи по выделенной доли данных по каждому из используемых маршрутов представляет собой случайную величину с функцией распределения $F_i(X)$. Тогда имеет место множество функций распределения времени доставки по каждому из этих доступных маршрутов $F = \{F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)\}$.

Поскольку мы сделали допущение о независимости маршрутов, то мы можем полагать, что значения времени передачи в маршрутах также случайны и независимы. Для реализации соединения выбирается k из n доступных маршрутов, т.е. выбирается множество W , которое является подмножеством множества всех доступных маршрутов $W \in R$. Время передачи данных по группе маршрутов T также случайная величина, которая определяется самым «медленным» маршрутом из W . Процесс передачи завершается, когда завершается передача всех данных, рисунок 4.2.

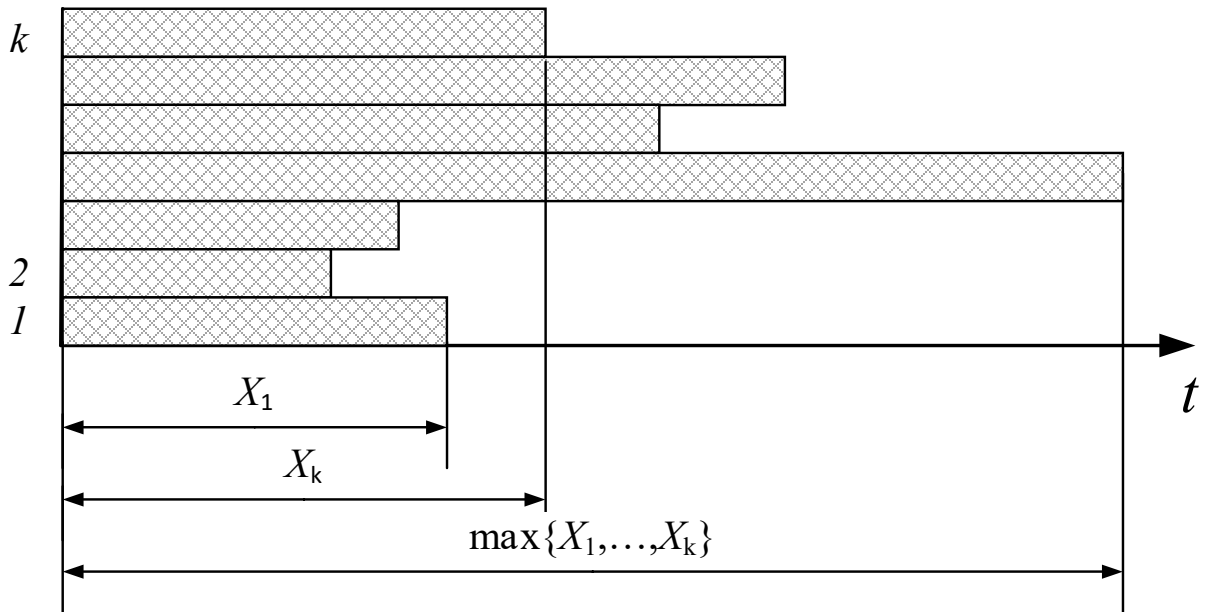


Рисунок 4.2 – Иллюстрация процесса передачи по группе маршрутов

Если x_{wi} - это время передачи по i -му маршруту из выбранной группы маршрутов, то время передачи по группе маршрутов будет равно

$$T = \max_W \{x_{w1}, x_{w2}, \dots, x_{wk}\} \quad (4.2)$$

где

$$x_{wi} = L \frac{\beta_i}{b_i}, \quad (4.3)$$

W это множество выбираемых маршрутов (номера выбираемых маршрутов).

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}, \quad w_i, k \in \mathbb{N}, \quad w_i, k \leq n, \quad i = 1, \dots, k \quad (4.4)$$

Функция распределения T , как показано в [96, 97], может быть определена как

$$G_w(x) = \prod_{i=1}^k F_{w_i}(x) \quad (4.5)$$

Математическое ожидание времени передачи T равно \bar{t} и определяется как

$$\bar{t} = E(T) = E(\max\{X_{w1}, X_{w2}, \dots, X_{wk}\}) = \int_{-\infty}^{\infty} x dG_W(x) \quad (4.6)$$

Задача выбора каналов в группу не является тривиальной, поскольку выражения (4.5) и (4.6) зависят от распределений времени передачи каждого из выбираемых маршрутов. Также стоит отметить, что число вариантов выбора группы маршрутов может быть очень велико, т.к. оно определяется как C_n^k . При n порядка 20, количество вариантов может достигать до десятков тысяч.

Решение задачи, дуальной к решаемой в данной работе, целью которой является минимизация среднего значения минимума из множества из группы случайных величин приведено в работе [98]. Схожесть задач состоит в необходимости оптимального или близкого к нему выбора группы величин (соединений или маршрутов), а различие в цели и методе ее достижения.

4.4 Метод выбора маршрутов при много-путевой маршрутизации

Целью разработки метода выбора маршрутов в группу является уменьшение времени доставки данных, т.е. повышение эквивалентной скорости передачи данных.

Из выражений (4.2), (4.5) и (4.6) видно, что уменьшение среднего значения времени доставки данных (увеличение скорости передачи) возможно достичь увеличением количества маршрутов в группе k , выбором определенных значений коэффициентов распределения трафика β_i и выбором маршрутов с определенными функциями распределения $F_i(t)$. Очевидно, что критерий выбора маршрута в

группу это уменьшение среднего времени доставки данных, т.е. минимизации выражения (4.6).

В качестве примера рассмотрим выбор маршрутов по средней величине времени доставки. Будем полагать, что имеется три маршрута $n=3$ из которых выбираются два $k=2$, так чтобы среднее время передачи было минимально, т.е. требуется получить минимум выражения (4.6).

Будем полагать, что время доставки в заданных маршрутах случайно и представляет собой величины X_1 , X_2 и X_3 , будем полагать, что они имеют гамма-распределение с плотностью вероятности [99]

$$f(x) = \frac{x^{k-1}}{\theta^k \Gamma(k)} e^{-\frac{x}{\theta}} \quad (4.7)$$

где k и θ - параметры распределения.

Математические ожидания этих случайных величин в данном примере составляют $E(X_1)=15,0$; $E(X_2)=60,5$; $E(X_3)=60,0$ с дисперсиями $D(X_1)=75,0$; $D(X_2)=30,3$; $D(X_3)=1800,0$.

Графики плотностей вероятности приведены на рисунке 4.3.

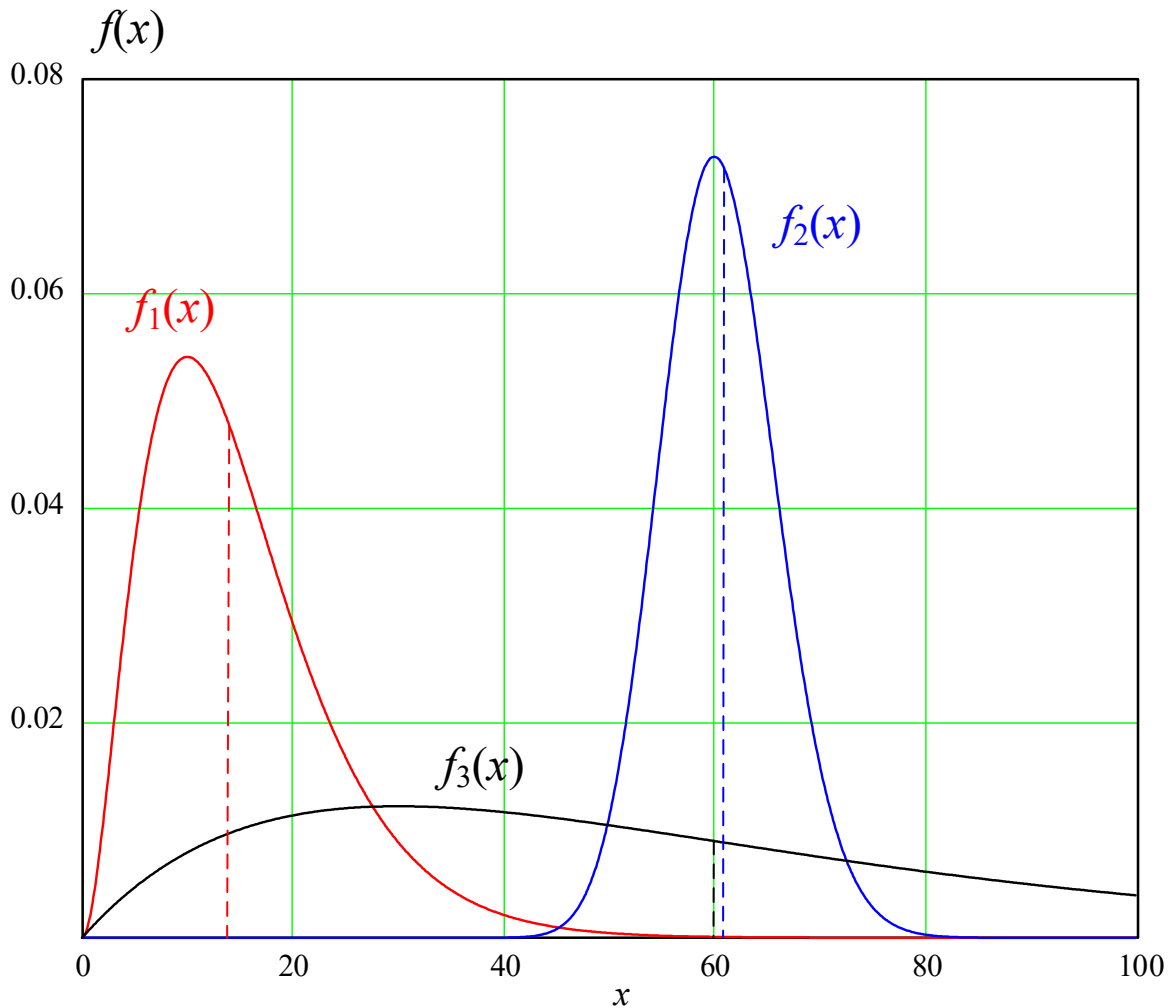


Рис. 4.3 – Плотности вероятностей случайных величин X_1, X_2, X_3 .

Эти случайные величины имеют различные математические ожидания (показаны пунктирными линиями) и дисперсии. Если при выборе руководствоваться величиной математического ожидания, то следует выбирать величины с минимальными значениями математического ожидания, т.е. X_1 и X_3 .

В данном случае возможны всего три варианта, на рисунке 4 приведены функции плотности вероятности возможных результатов выбора: $g_{1,2}(x)$, $g_{1,3}(x)$ и $g_{2,3}(x)$ для полученных решений, согласно (5), с учетом того, что плотность вероятности определяется как $g_{i,j}(x) = \frac{dG_{i,j}(x)}{dx}$, а математическое ожидание

$$m_{i,j}(x) = \int_0^1 x g_{i,j}(x) dx.$$

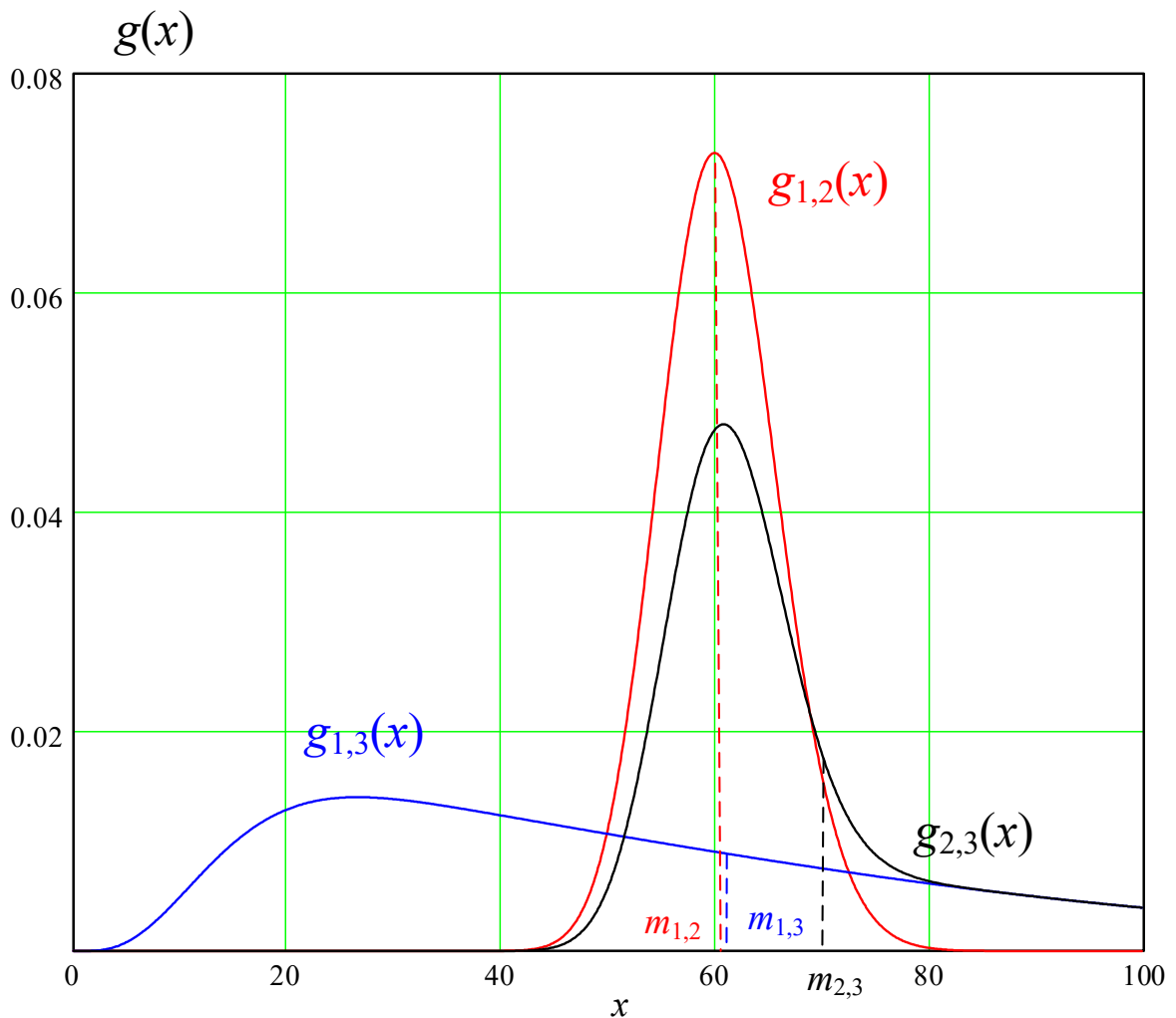


Рисунок 4.4 – Результаты выбора $k=2$ случайных величин

Из полученных результатов видно, что наименьшее значение выражения (4.6) достигается при выборе X_1 и X_2 , $m_{1,2}=60,5$. Для других вариантов выбора, значения математического ожидания, согласно (4.6), составляют $m_{1,3}=60,9$ и $m_{1,3}=76,7$, соответственно.

Таким образом, при выборе маршрута недостаточно знания математического ожидания времени доставки.

Задачу выбора маршрута следует рассматривать как минимизацию математического ожидания времени доставки \bar{t} в группе маршрутов с помощью выбора множества из k маршрутов W из общего числа n доступных маршрутов R . Решением задачи будет такое множество выбранных маршрутов, при котором

достигается минимальная величина математического ожидания времени передачи данных, согласно (4.6), т.е.

$$\begin{aligned} W_{\min} &= \arg \min_W E(\max(X_{w_1}, X_{w_2}, \dots, X_{w_k})), \\ W &= \{w_1, w_2, \dots, w_k\}; \quad w_i, k \in \mathbb{N}; \quad w_i, k \leq n; \quad i = 1, \dots, k \end{aligned} \quad (4.7)$$

Для решения задачи оптимизации можно определить целевую функцию как

$$\begin{aligned} \bar{t}_W &= E(\max(X_{w_1}, X_{w_2}, \dots, X_{w_k})), \\ W &= \{w_i\}; \quad w_i, k \in \mathbb{N}; \quad w_i, k \leq n; \quad i = 1, \dots, k \end{aligned} \quad (4.8)$$

Выражения (4.7) и (4.8) вычисляются с учетом (4.5). В общем случае решение этой задачи требует большого объема вычислений [96].

Заметим, что задача (4.8) сформулирована относительно времени доставки данных X_i , значения которого, согласно (4.3) зависят от доли передаваемых данных β_i , $i = 1, \dots, k$. Таким образом, необходимо решить и задачу выбора β_i . Это существенно усложняет решение.

В данной работе предлагается решать задачу последовательно, в два этапа. На первом этапе решается задача выбора k маршрутов при предположении, что все коэффициенты распределения трафика равны, т.е. $\beta_i = \beta = 1/k$, $i = 1, \dots, k$. На втором этапе решается задача выбора значений коэффициентов распределения β_i .

Задачу первого этапа можно отнести к задачам о ранце, которые имеют множество вариантов и описаны, например, в [100]. Решение задачи первого этапа осложняется ее нелинейностью.

В этой работе предлагается приближенное решения задачи методом динамического программирования.

В ходе решения задачи первого этапа предполагается равенство всех коэффициентов распределения трафика, решением задачи является выбор k

маршрутов обслуживания трафика из n доступных маршрутов по критерию минимума времени передачи данных.

Задача решается итерационно, а решение организовано в виде двух циклов: I и II. Цикл I является внутренним по отношению к циклу II. В цикле I производится выбор из всех доступных маршрутов того маршрута, который приводит к наибольшему уменьшению времени доставки при включении его в группу маршрутов (множество W). В цикле II производится сравнение значения целевой функции со значением, полученным на предыдущем цикле, а также количества выбранных маршрутов. Повторение цикла II завершается, когда в группу маршрутов будет выбрано заданное количество k маршрутов либо, когда выбор нового маршрута не приведет к уменьшению времени доставки данных.

Алгоритм 1 (алгоритм первого этапа)

Исходные данные:

R – множество известных маршрутов;

n – количество известных маршрутов;

W – множество -группа выбранных маршрутов;

k – количество выбираемых маршрутов.

T – множество значений целевой функции.

Шаг 1. Ввод исходных данных R , n , W , k и инициализация переменных $i=j=s=1$. $W=\emptyset$, $T=\emptyset$.

Шаг 2. Выбор маршрута r_i

На данном шаге производится выбор маршрута из множества R для дальнейшей оценки его влияния на целевую функцию $r_i \in R, r_i \notin W$

Шаг 3. Вычисление значения целевой функции

$$\bar{t}_{w,g} = E(\max(X_{w_1}, X_{w_2}, \dots, X_{w_g}))$$

$$W = \{w_i\}; w_i, g \in \mathbb{N}; w_i, g \leq k; i = 1, \dots, g$$

$$T = T \cup \bar{t}_{w,g}$$

На данном шаге вычисляется очередное значение целевой функции и включается в множество значений целевой функции T .

(На каждой итерации i (итерации цикла I) значение целевой функции вычисляется для g выбранных маршрутов, а g изменяется в цикле II от 1 до k .)

Шаг 4. Проверка конца цикла I.

Если $i < n - g$, то $i=i+1$ идти к Шагу 2.

Если нет то, выполнить следующий шаг.

(Цикл I выполняется пока не будут проверены все доступные маршруты из множества R не включенные в множество выбранных маршрутов W)

Шаг 5. Включение маршрута в группу выбранных маршрутов

На данном шаге просматривается множество значений целевой функции T и выбирается минимальное значение, в группу маршрутов включается маршрут, для которого было получено соответствующее значение целевой функции.

$$r_* = \operatorname{arg\,min}_s \{T, s = 1, \dots, n - g\}$$

$$W = W \cup r_*$$

Шаг 6. Завершение цикла II

Если $g < k$, то $g=g+1$, $i=1$ идти к Шагу 2

В противном случае выполнить следующий шаг.

Шаг 7. Вывод множества выбранных маршрутов W .

Останов.

В результате выполнения, приведенного выше алгоритма будет получена группа маршрутов, которые могут быть использованы для передачи данных при много-путевой маршрутизации. Однако, эта группа получена для случая, когда трафика равномерно распределяется среди выбранных маршрутов, что не является лучшим решением в случае, когда параметры маршрутов различны. Полученное решение может быть улучшено путем рационального выбора значений

коэффициентов распределения трафика β_i . Для решения этой задачи также предлагается использование динамического программирования.

Предлагаемый метод по структуре организации вычислений аналогичен описанному выше и также организован в виде итерационной процедуры с двумя циклами: I и II (внутренним и внешним).

В цикле I производятся попытки изменения значений β_i на величину $\pm\Delta\beta$, с учетом ограничений, и выбирается то i , для которого изменение дало наибольший эффект, т.е. было получено наименьшее значение целевой функции (времени доставки). Таким образом, в результате выполнения цикла I производится изменение одной из величин $\beta_i, i = 1, \dots, k$ на величину $\Delta\beta$ и корректировка значений остальных.

В цикле II проверяется изменение значения целевой функции, по сравнению с предыдущим циклом. Если значение уменьшается, то происходит переход к следующему циклу, в противном случае процесс останавливается и текущие значения $\beta_i, i = 1, \dots, k$ рассматриваются как решение задачи.

Очевидно, что величина $\Delta\beta$ определяет точность получаемых результатов, а также объем вычислений при поиске решения данным методом. Поэтому она выбирается из соображений достаточной точности получаемого решения и может корректироваться в каждом конкретном случае, в виду того, что практически. Для практических целей начальное значение этой величины может быть принято, как 0,1. Такое значение было использовано и при получении результатов в данной работе. Ниже приведен алгоритм выбора коэффициентов распределения трафика.

Алгоритм 2 (алгоритм второго этапа)

Исходные данные:

W – множество (группа) выбранных маршрутов;

β - множество коэффициентов распределения трафика $\beta_i, i = 1, \dots, k$.

B - множество значений скорости передачи данных для выбранных каналов $b_i, i = 1, \dots, k$.

k – количество выбранных маршрутов;

T – множество значений целевой функции;

Шаг 1. Ввод исходных данных W , k и инициализация переменных $i=j=s=1$.

$T=\emptyset$, β , $\beta_i = 1/k$, $i = 1, \dots, k$.

Шаг 2. Выбор коэффициента β_i

На данном шаге производится выбор коэффициента β_i из множества β для дальнейшей оценки его влияния на целевую функцию $\beta_i \in \beta$.

Шаг 3. Вычисление значения целевой функции для измененных коэффициентов распределения трафика β_i . На данном шаге изменяется значение на β_i величину $\Delta\beta$, а все остальные значения β_j , $j = 1, \dots, k$, $j \neq i$ корректируются умножением на коэффициенты η_j так, чтобы выполнялось

условие $\sum_{j=1, j \neq i}^k \beta_j \eta_j + \beta_i = 1$.

$$\bar{t}_i = \min \left\{ E \left(\max \left(\frac{\beta_1^*}{b_1}, \dots, \frac{\beta_i^*}{b_i}, \dots, \frac{\beta_k^*}{b_k} \right) \right), E \left(\max \left(\frac{\beta_1^{**}}{b_1}, \dots, \frac{\beta_i^{**}}{b_i}, \dots, \frac{\beta_k^{**}}{b_k} \right) \right) \right\}$$

$$\beta_i^* = \begin{cases} \beta_i + \Delta\beta & \beta_i + \Delta\beta < 1 \\ 1 & \beta_i + \Delta\beta \geq 1 \end{cases}, \quad \beta_i^{**} = \begin{cases} \beta_i - \Delta\beta & \beta_i - \Delta\beta > 0 \\ 0 & \beta_i - \Delta\beta \leq 0 \end{cases}$$

$$\beta_j^* = \beta_j \frac{1 - \beta_i - \Delta\beta}{1 - \beta_i}, \quad \beta_j^{**} = \beta_j \frac{1 - \beta_i + \Delta\beta}{1 - \beta_i}, \quad j = 1, \dots, k \quad j \neq i$$

$$\beta_i, \beta_j \in \beta; \quad i, j = 1, \dots, k$$

$$T = T \cup \bar{t}_i$$

На данном шаге вычисляется значение целевой функции и включается в множество значений целевой функции T .

(На каждой итерации i (итерации цикла I) значение целевой функции вычисляется для k маршрутов.)

Шаг 4. Проверка конца цикла I .

Если $i < k$, то $i=i+1$ идти к Шагу 2.

Если нет то, выполнить следующий шаг.

(Цикл I выполняется пока не будут проверены все коэффициенты распределения трафика β).

Шаг 5. Изменение коэффициентов распределения трафика

На данном шаге просматривается множество значений целевой функции T и выбирается минимальное значение, выбираются соответствующие этому решению коэффициенты распределения трафика.

$$\beta = \beta^* = \arg \min_s \{T, s = 1, \dots, k\}.$$

Шаг 6. Завершение цикла II

Если полученное в результате решение дало значение целевой функции t_0 , меньшее, чем значение полученное на предшествующей итерации

$t_0 < T_0$, то $i=1$, **идти к Шагу 2**

В противном случае выполнить следующий шаг.

Шаг 7. Вывод множества коэффициентов распределения трафика β .

Останов.

После выполнения алгоритмов 1 и 2 сформированы все данные, необходимые для передачи трафика, т.е. определено множество маршрутов и k маршрутов W и определены значения коэффициентов распределения трафика $\beta_j, j = 1, \dots, k$.

4.5 Результаты имитационного моделирования

На рисунке 4.5 приведены результаты имитационного моделирования, полученные с использованием модели в которой были реализованы приведенные выше алгоритмы выбора группы маршрутов. В имитационной модели имеется $n=12$ доступных маршрутов, из которых выбирается группа из $k=5$ маршрутов и вычисляются коэффициенты распределения трафика.

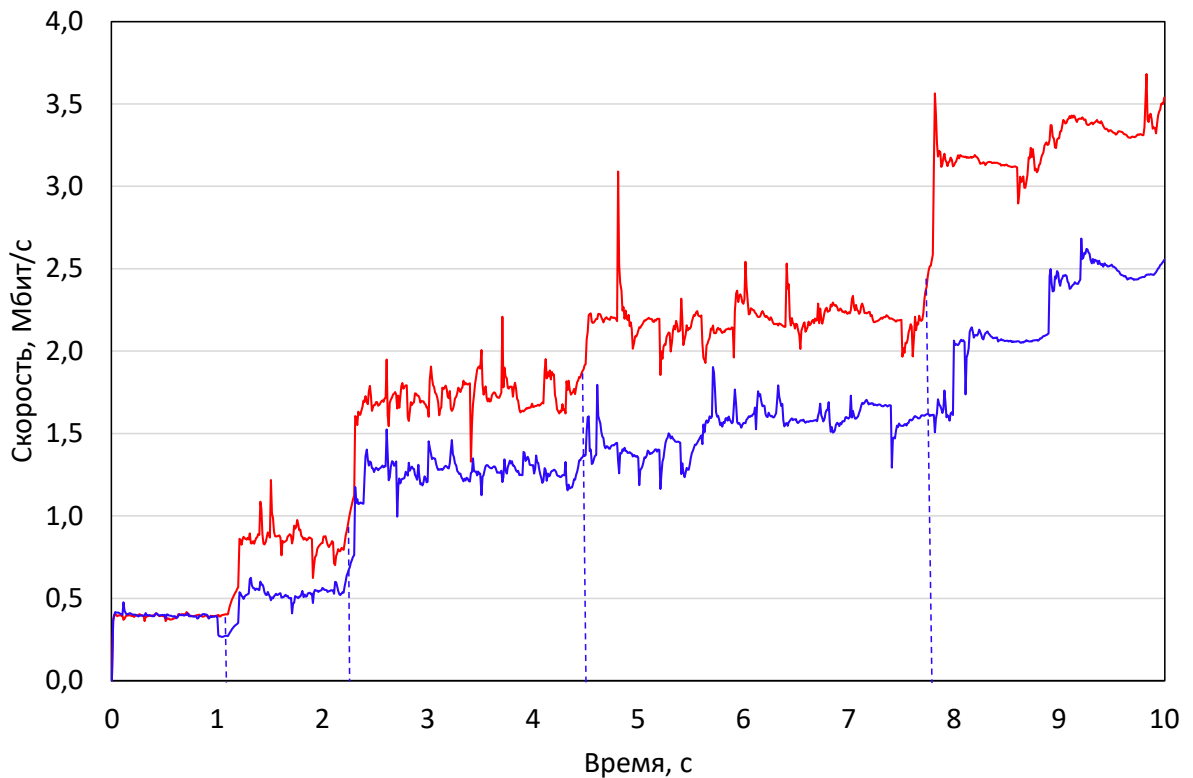


Рисунок 4.5 – Результаты имитационного моделирования с использованием предложенного метода (красная кривая) и без него (синяя кривая)

Модель построена в системе дискретно-событийного моделирования, в ней реализована генерация трафика в узле источнике и форового трафика, обслуживаемого сетевыми элементами, через которые проходят выбираемые маршруты.

На приведенном на рисунке 5 графике хорошо заметны 5 участков, которые соответствуют последовательному решению данной задачи для различных значений $k=1,2, 3,4$ и 5 маршрутов (красная кривая). Увеличение количества каналов в группе приводит к увеличению скорости передачи данных между узлами источника и получателя данных.

Для оценки эффективности предложенного метода выбора группы маршрутов произведено моделирование при увеличении группы маршрутов, без применения предложенного алгоритма, случайным образом и равновероятном распределении трафика по маршрутам (синяя кривая). Средняя величина выигрыша по скорости передачи при использовании предложенного алгоритма, по сравнению со случайным выбором и равновероятном распределении трафика

составила около 40%. Полагая, что выигрыш в скорости передачи данных эквивалентен повышению эффективности решения задачи маршрутизации, можно сделать вывод о повышении эффективности использования ресурсов сети на соответствующую величину.

4.6 Выводы

1. Анализ методов много-путевой маршрутизации показал, что ее использование в сетях ИВ позволяет реализовать передачу данных между узлами сети со скоростями, существенно превышающими скорости передачи при одно-путевой маршрутизации.

2. Количество маршрутов в сетях ИВ высокой плотности может быть достаточно велико для того, чтобы решать задачу много-путевой маршрутизации и при этом использовать независимые маршруты.

3. Выбор группы маршрутов, имеющих различные параметры, требует решения задачи распределения трафика и может привести к различным результатам, в том числе и к уменьшению эквивалентной скорости передачи. Для обеспечения ее повышения необходим метод, обеспечивающий рациональный выбор как самих маршрутов, так и коэффициентов распределения трафика по ним.

4. Предложенный метод реализует выбор заданного количества маршрутов и значений коэффициентов распределения трафика по ним, методом динамического программирования.

5. Предложенный метод обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов сети, которое по результатам имитационного моделирования составило 40% по отношению к случайному выбору маршрутов и равновероятному распределению трафика по ним.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны модели и методы повышения эффективности сети Интернета вещей высокой плотности. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Получены результаты анализа состояния и перспектив развития методов построения сетей Интернета вещей, в том числе, сетей с высокой плотностью. Результаты показали, что в обозримом будущем количество узлов сети Интернета вещей будет возрастать, что требует эффективных методов построения таких сетей и управления ими.

2. Получены результаты анализа возможности применения теории перколяции в задачах моделирования сетей Интернета вещей, которые показали, что теория перколяции может быть успешно использована в задачах построения сетей высокой плотности, в случаях выбора регулярных структур для маршрутизации трафика. Методы теории перколяции в таком случае позволяют получить оценку состояния сети с точностью как минимум втрое превосходящей точность оценки с использованием методов случайных графов.

3. Анализ структур сетей интернета вещей и разработка модели сети на основе моделей решеток показали, что особенности сетей Интернета вещей высокой плотности позволяют создавать регулярные структуры для маршрутизации трафика, которые являются эффективным решением построения логической структуры сети.

4. Анализ методов маршрутизации и разработка метода выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности позволили разработать метод рационального выбора узлов маршрута в сети Интернета вещей высокой плотности, который обеспечивает максимальную скорость передачи и повышение эффективности использования сетевых ресурсов.

5. Разработан метод многопутевой маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности, который позволяет повысить скорость передачи данных

за счет использования ресурсов нескольких маршрутов причем группа маршрутов выбирается из соображений получения максимальной эффективности.

Полученные в работе результаты использованы при разработке методики планирования сети Интернета Вещей, а также при учебном процессе СПб ГУТ.

В перспективе результаты работы могут быть использованы при разработке методов построения и управления трафиком перспективных сетей связи.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

FTTx	Широкополосная телекоммуникационная сеть передачи данных
xPON	Семейство технологий GPON
xDSL	Семейство технологий цифровой абонентской линии
VDSL	Сверхскоростная цифровая абонентской линии.
ETL	извлечение, преобразование, загрузка
HTTP	Протокол прикладного уровня передачи данных
IP	Интернет-протокол
API	Программный интерфейс приложения
RFID	Радиочастотная идентификацию
BLE	Bluetooth с низким потреблением
UWB	Сверхширокая полоса
WSN	Беспроводная сенсорная сеть
DTLS	Протокол датаграмм безопасности транспортного уровня
D2D	Связь между устройствами
IWMN	Беспроводная ячеистая сеть
AODV	Протокол динамической маршрутизации для мобильных ad hoc сетей
MP-DSR	Протокол маршрутизации для беспроводных ячеистых сетей

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендация МСЭ-Т У.2060. Обзор интернета вещей. 06. 2012
2. Recommendation ITU-R M.2083-0. MT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. 09.2015.
3. МСЭ-Т. Статистика. [Интернет ресурс] URL <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>.
4. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. [Интернет ресурс] URL <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>.
5. Википедия. Телеметрия. [Интернет ресурс] URL <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%8F>.
6. Росляков А.В., Интернет Вещей / Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю./ ФГОБУ ВПО ПГУТИ, 2015, С. 10-55
7. Ли П., Архитектура интернета вещей / Ли П., //- М.: ДМК Пресс, 2019 с. 25
8. Вишневский, В Mesh-сети стандарта IEEE 802.11s - Технологии и реализация / Вишневский В., Лаконец Д, Сафонов А, Шпилев С // Первая миля -2008 № 2-3 С. 26-31
9. Григорьева А.С., Массовое внедрение RFID-технологии-миф или реальность? / Григорьева А.С., // Компоненты и технологии -2013, № 12
10. Васильев Д.Р., протоколы маршрутизации в беспроводных ad-hoc сетях / Васильев Д.Р., Калмыков Б.М. // Информатика и вычислительная техника. сборник научных трудов. главный редактор Б.М. Калмыков; ответственный редактор Н.В. Первова. Чебоксары, 2014. С. 26-29.
11. Воронин В.В., проектирование и разработка restful api веб-сервера / Воронин В.В., Громов П.А., // Информационные технологии XXI века. сборник

научных трудов. Ответственный за выпуск Е.А. Шеленок. Хабаровск, 2015. С. 474-480.

12. Википедия. RDK-V [Интернет ресурс] URL <https://wiki.rdkcentral.com/display/RDK/RDK-V+Features>
13. Википедия. LWM2M [Интернет ресурс] URL https://en.wikipedia.org/wiki/OMA_LWM2M
14. Khan W.U., cyber secure framework for smart containers based on novel hybrid dtls protocol / Khan W.U., Marwat S.N.K., Ahmed S. // Computer Systems Science and Engineering. 2022. Т. 43. № 3. С. 1297-1313.
15. Селезнев С.П., Архитектура промышленных приложений ИОТ и протоколы AMQP, MQTT, JMS, REST, SOAP, XMPP, DDS / Селезнев С.П., Яковлев В.В. // Информационные и телекоммуникационные технологии. 2019 № 41, С 18-31
16. Грузин Н.А., Обзор и сравнение моделей облачных вычислений: saas, paas и iaas / ГРУЗИН Н.А. // Modern Science. 2021. № 1-2. С. 444-450
17. Мирошин Д.Ю./БЕССЕРВЕРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ/Мирошин Д. Ю.//NovaInfo.Ru. 2022. № 132. С. 17-19.
18. Поросенкова В.В., OLAP-ТЕХНОЛОГИЯ / Поросенкова В.В., Чернова С.В. // Теория и практика современной науки. 2019. № 11 (53). С. 271-273.
19. Винничек Е.В., Облачные, граничные и туманные вычисления. анализ и прогноз развития технологий обработки данных / Винничек Е.В., // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2018. № 1 (5). С. 239-244.
20. Knan R.A., Advanced prediction-based mobility support for 6lowpan wireless sensor networks / Khan R.A., Mir A.H. // International Journal of Information Technology and Computer Science. 2017. Т. 9. № 2. С. 47-57.
21. Скабелкин А.О., Применение беспроводных сетей zigbee для управления и мониторинга приборов и устройств / Скабелкин А.О., Меркулов А.В. //

Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2016. Т. 1. С. 110-113.

22. Википедия. BLE [Интернет ресурс] URL <https://ru-wiki.ru/wiki/BLE>
23. Википедия. TinyOS [Интернет ресурс] URL <https://ru.wikipedia.org/wiki/TinyOS>
24. Кучерявый, А.Е., Интернет Вещей / А. Е. Кучерявый // Электросвязь. - 2013. - № 1. - С. 21-24.
25. Кучерявый, А.Е., Сети связи 2030 [Текст] / А. Е. Кучерявый, А. С. Бородин, Р. В. Киричек // Электросвязь. - 2018. - № 11. - С. 52-56.
26. Бородин, А.С., Особенности использования D2D-технологий в зависимости от плотности пользователей и устройств [Текст] / А. С. Бородин, А. Е. Кучерявый, А.И. Парамонов // Электросвязь. - 2018. - № 10. - С. 40-45.
27. Тонких Е.В., Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности. / Е.В. Тонких, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // М. Электросвязь – №1, 2020 – с.51-55.
28. Тонких, Е.В., Свойства самоподобия сетевой структуры и ее моделирование для сети Интернета вещей высокой плотности. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2020. № 8. С. 18-24.
29. Рекомендация МСЭ-R P.1238-10. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в диапазоне частот 300 МГц – 450 ГГц. Международный союз электросвязи, 2019.
30. Мандельброт Б., Фрактальная геометрия природы. / Мандельброт Б. // М. Издательство компьютерных исследований. 2002. 665 с.
31. Федер Е., Фракталы. / Федер Е., // М. Мир. 1991. 261 с.
32. М. В. Меньшиков, Теория перколяции и некоторые приложения, / М.В. Меньшиков, С.А. Молчанов, А.Ф. Сидоренко, // Итоги науки и техн. Сер. Теор. вероятн. Мат. стат. Теор. кибернет., 1986, том 24, 53–110.

33. Бекман И.Н., Математика диффузии: учебное пособие / И. Н. Бекман // М. Издательство «ОнтоПринт», 2016. — 400 с.
34. Тарасевич, Ю.Ю., Перколяция: Теория, приложения, алгоритмы. / Тарасевич, Ю.Ю., // М.: Едиторал УРСС, 2002 – 112 с.
35. Mathworld [Электронный ресурс]. URL: <https://mathworld.wolfram.com/PercolationThreshold.html> (Дата обращения: 10.01.2021).
36. Соколов И.М., "Размерности и другие геометрические критические показатели в теории протекания" / Соколов И.М., // УФН 150 221–255 (1986)
37. Кучерявый А.Е., Новые перспективы научных исследований в области сетей связи на 2021-2024 годы. / Кучерявый А.Е., Киричек Р.В., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Дунайцев Р.А., Пирмагомедов Р.Я., Бородин А.С., Владыко А.Г., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Владимиров С.С., Гришин И.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 3. С. 1-19
38. Paramonov A., High Density Internet of Things Network Analysis / Paramonov A., Koucheryavy A., Tonkikh E., Tatarnikova T.M. // Lecture Notes in Computer Science. 2020. Т. 12525 LNCS. С. 307-316.
39. Тонких Е.В., Свойства самоподобия сетевой структуры и ее моделирование для сети интернета вещей высокой плотности. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2020. № 8. С. 18-24.
40. Тонких Е.В., Планирование структуры сети интернета вещей с использованием фракталов. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2021. № 4. С. 55-62.
41. Парамонов А.И., Модель сети доступа интернета вещей на основе решетчатой структуры. /Парамонов А.И., Бушеленков С.Н. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 37-46.
42. Бушеленков С.Н., Анализ и формирование структуры сети интернета вещей на основе моделей решеток. / Бушеленков С.Н., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2021. № 7. С. 23-28.

43. Нуриллоев И.Н., Метод оценки и обеспечения связности беспроводной сенсорной сети / Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2017. № 7. С. 39-44.
44. Кучерявый А.Е., Обеспечение связности беспроводных сенсорных узлов гетерогенной сети / Кучерявый А.Е., Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И., Прокопьев А.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. Т. 3. № 1. С. 115-122.
45. Викулов А.С., Постановка задачи замощения плоскости в применении к частотно-территориальному планированию сетей IEEE 802.11. / Викулов А.С., Парамонов А.И. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 1 (41). С. 24-32.
46. Викулов А.С., Модель канала OFDM в задаче оценки эффективности сети IEEE 802.11. / Викулов А.С., Парамонов А.И. // Инфокоммуникационные технологии. 2018. Т. 16. № 3. С. 290-297.
47. IEEE Std 802.11 – 2016. IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks — Specific requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Нью Йорк: Институт IEEE., 2016 – 3534 с.
48. Рекомендация МСЭ-R P.1238-8 (ITU-R P.1238-8), Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 300 МГц – 100 ГГц. Серия Р. 2015 г.
49. Дао Ч.Н., Метод выбора стабильного маршрута в сети с подвижными узлами. / Дао Ч.Н., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2018. № 8. С. 37-44.
50. Integration K-Means Clustering Method and Elbow Method for Identification of The Best Customer Profile Cluster / M A Syakur¹, B K Khotimah¹, E M S Rochman¹ and B D Satoto¹ // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 336, The 2nd International Conference on Vocational

Education and Electrical Engineering (ICVEE) 9 November 2017, Surabaya, Indonesia.

51. B. Hurley, C. Seidl, and W. Sewell, "A survey of dynamic routing methods for circuit-switched traffic," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 25, pp. 13-21, 1987.
52. N. F. Maxemchuk, "Diversity Routing," in *Proc. IEEE ICC*, San Francisco, CA, 1975.
53. R. Gallager, "A Minimum Delay Routing Algorithm Using Distributed Computation," *Communications, IEEE Transactions on [legacy, pre - 1988]*, vol. 25, pp. 73-85, 1977.
54. S. Vutukury and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "A simple approximation to minimum-delay routing," in *Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*. Cambridge, Massachusetts, United States: ACM Press, 1999
55. D. Bertsekas, E. Gafni, and R. Gallager, "Second Derivative Algorithms for Minimum Delay Distributed Routing in Networks," *Communications, IEEE Transactions on [legacy, pre - 1988]*, vol. 32, pp. 911-919, 1984.
56. "Private Network-Network Interface Specification v.1.1," ATM Forum, 2002.
57. I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, "Wireless mesh networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 47, pp. 445-487, 2005.
58. StrixSystems, <http://www.strixsystems.com/>
59. Firetide, <http://www.firetide.com/>
60. A. Raniwala and T.-c. Chiueh, "Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network," *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, 2005.
61. E. Ayanoglu, I. Chih-Lin, R. D. Gitlin, and J. E. Mazo, "Diversity coding for transparent self-healing and fault-tolerant communication networks," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 1677-1686, 1993.

62. M. R. Pearlman, Z. J. Haas, P. Sholander, and S. S. Tabrizi, "On the impact of alternate path routing for load balancing in mobile ad hoc networks," in Proceedings of the 1st ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing. Boston, Massachusetts: IEEE Press, 2000.
63. D. Saha, S. Toy, S. Bandyopadhyay, T. Ueda, and S. Tanaka, "An adaptive framework for multipath routing via maximally zone-disjoint shortest paths in ad hoc wireless networks with directional antenna," Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE 2003.
64. A. Tsirigos and Z. J. Haas, "Multipath routing in the presence of frequent topological changes," Communications Magazine, IEEE, vol. 39, pp. 132-138, 2001.
65. R. Krishnan and J. A. Silvester, "Choice of allocation granularity in multipath source routing schemes," INFOCOM '93. Proceedings. Twelfth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Networking: Foundation for the Future. IEEE San Francisco, CA 1993.
66. D. B. Johnson and D. A. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks," in Mobile Computing, Imielinski and Korth, Eds.: Kluwer Academic Publishers, 1996.
67. C. Perkins, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," IETF RFC 3561, 2003.
68. A. Nasipuri and S. R. Das, "On-demand multipath routing for mobile ad hoc networks," Computer Communications and Networks, 1999. Proceedings. Eight International Conference on, Boston, MA, 1999.
69. S. J. Lee and M. Gerla, "Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks," ICC 2001. IEEE International Conference on Communications, Helsinki, 2001.
70. N. Taft-Plotkin, B. Bellur, and R. Ogier, "Quality-of-service routing using maximally disjoint paths," Quality of Service, 1999. IWQoS '99. 1999 Seventh International Workshop on, London, 1999.

71. R. Leung, J. Liu, E. Poon, A. L. C. Chan, and B. Li, "MP-DSR: a QoS-aware multipath dynamic source routing protocol for wireless ad-hoc networks," *Local Computer Networks*, 2001. Proceedings. LCN 2001. 26th Annual IEEE Conference on, Tampa, FL 2001.
72. M. K. Marina and S. R. Das, "Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector Routing," Computer Science Department, Stony Brook University, 2003.
73. J. Raju and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "A new approach to on-demand loop-free multipath routing," // *Computer Communications and Networks*, 1999. Proceedings. Eight International Conference on, Boston, MA 1999.
74. J. J. Garcia-Luna-Aceves, "Loop-free routing using diffusing computations," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 1, pp. 130- 141, 1993.
75. V. D. Park and M. S. Corson, "A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks," // *INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, Kobe, 1997.
76. E. Gafni and D. Bertsekas, "Distributed Algorithms for Generating Loopfree Routes in Networks with Frequently Changing Topology," // *IEEE Transactions on Communications*, vol. 29, pp. 11-15, 1981.
77. J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," // in *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. Dallas, Texas, United States: ACM Press, 1998.
78. P. Bahl, A. Adya, J. Padhye, and A. Walman, "Reconsidering wireless systems with multiple radios," // *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 34, pp. 39-46, 2004.
79. P. Kyasanur, S. Jungmin, C. Chereddi, and N. H. Vaidya, "Multichannel mesh networks: challenges and protocols," // *Wireless Communications, IEEE [see also IEEE Personal Communications]*, vol. 13, pp. 30-36, 2006.

80. M. Kodialam and T. Nandagopal, "Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks," in Proceedings of the 11th annual international conference on Mobile computing and networking. // Cologne, Germany: ACM Press, 2005.
81. A. Raniwala, K. Gopalan, and T.-c. Chiueh, "Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks," // SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev., vol. 8, pp. 50-65, 2004.
82. R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks," // International Conference on Mobile Computing and Networking, Philadelphia, PA, USA, 2004.
83. I. Sheriff and E. Belding-Royer, "Multipath Selection in Multi-radio Mesh Networks," Broadnet's, // San Jose, 2006.
84. B. Karp and H. T. Kung, "GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks," in Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. Boston, Massachusetts, United States: ACM Press, 2000.
85. H. Li and M. Singhal, "A scalable routing protocol for ad hoc networks," Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st, 2005.
86. Y.-B. Ko and N. H. Vaidya, "Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks," // Wirel. Netw., vol. 6, pp. 307-321, 2000.
87. D. S. J. De Couto and R. Morris, "Location Proxies and Intermediate Node Forwarding for Practical Geographic Forwarding," // MIT Laboratory for Computer Science technical report, 2001.
88. C. T. Cheng, H. L. Lemberg, S. J. Philip, E. van den Berg, and T. Zhang, "SLALoM: a scalable location management scheme for large mobile adhoc networks," // Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE, 2002.
89. "Joint SEE-Mesh / Wi-Mesh Proposal to 802.11 TGs," 2006.

90. Кучерявый А.Е., Новые перспективы научных исследований в области сетей связи на 2021-2024 годы. / Кучерявый А.Е., Киричек Р.В., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Дунайцев Р.А., Пирмагомедов Р.Я., Бородин А.С., Владыко А.Г., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Владимиров С.С., Гришин И.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 3. С. 1-19.
91. Ефимов М.М., Интернет вещей: перспективы адаптивных систем / Ефимов М.М., Киричек Р.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 1. С. 55-66.
92. Сазонов Д.Д., Архитектура цифровых объектов как подход к идентификации устройств интернета вещей / Сазонов Д.Д., Киричек Р.В. // В сборнике: XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. С. 3002-3006.
93. Бушеленков С.Н., Метод выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности. / Бушеленков С.Н., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2021. № 12. С. 14-20.
94. Keum, DooHo, Trust Based Multipath QoS Routing Protocol for Mission-Critical Data Transmission in Tactical Ad-Hoc Networks. / Keum, DooHo & Lim, Jihun & Ko, Young-Bae // Sensors. 20. (2020) 3330. 10.3390/s20113330.
95. Wu, “Multimedia Independent Multipath Routing Algorithms for Internet of Things Based on a Node Hidden Communication Model.” / Wu, Cong and Jianhui Yang. // Future Internet 11 (2019): 240.
96. Eppstein, D., The Minimum Expectation Selection Problem. / David Eppstein, George Lueker // Random Structures and Algorithms. 21. 10.1002/rsa.10061, 2002 – 13P.
97. Вентцель Е.С., Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель Л.А. Овчаров // М. «Высшая школа», 2000, 480 С.

98. Кашкаров, Д.В., Метод повышения эффективности uRLLC в перспективных сетях связи / Д.В. Кашкаров, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2022. № 2. С. 52-57.
99. Вадзинский Р.Н., Справочник по вероятностным распределениям / Вадзинский Р.Н., // М. Наука, 2001. - 295 с.
100. Vazirani V.V., Approximation Algorithms. / Vi jay V. Vazirani // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, P.380 ISBN 978-3-642-08469-0 ISBN 978-3-662-04565-7 (eBook) DOI 10.1007/978-3-662-04565-7.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

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. БОЖИЧЕВЫЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, город А. Санкт-Петербург, 190146

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

Тел: (812) 3263156, факс: (812) 3263159

<http://spbu.ru>

E-mail: spbu@spbu.ru

ОКПО: 01175934 ОГРН: 1027628197033

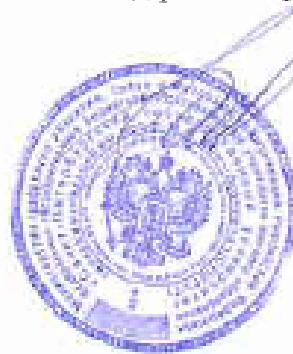
ИНН: 7808004760 КПП: 784001001

ОКНТО: 40909000

№ _____
вв № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
д-р.техн.наук, с.н.с.



Шестаков
Александр Викторович

Акт

о внедрении научных результатов,
полученных в диссертационной работе Сергея Николаевича Бушеленкова
"Разработка моделей и методов организации сетей интернета вещей высокой
плотности"

Комиссия в составе декана факультета Инфокоммуникационных сетей и систем к.т.н., доцента Д. В. Окуневой, профессора кафедры сетей связи и передачи данных д.т.н., доцента М. А. Маколкиной и заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных О. И. Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Сергеем Николаевичем Бушеленковым в диссертации "Разработка моделей и методов организации сетей интернета вещей высокой плотности", использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по курсу «Методы оптимизации сетей связи» (Рабочая Программа № 22.05/52-Д), раздел Программы:

- Методы имитационного моделирования.

2. При чтении лекций и проведении практических занятий для магистров по дисциплине «Математическое моделирование устройств и систем» (Рабочая Программа регистрационный номер № 22.05/215-Д), раздел Программы:

-Использование моделирования при проектировании сетей связи и протоколов,

–Принципы оптимизация сетей связи.

3. При чтении лекций и проведении практических занятий для аспирантов по дисциплине «Разработка физических и математических моделей и исследуемых процессов, явлений и объектов ЭРиСС» (Рабочая Программа регистрационный номер № 21.05/753-Д), раздел Программы:

- Принципы разработки натуральных и комплексных моделей.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Сергеем Николаевичем Бушеленковым в диссертационной работе:

1. Модель сети высокой плотности на основе моделей решеток, повышает эффективность построения сети Интернета вещей за счет формирования решетчатых структур, отличающаяся от известных моделей тем, что в ней использованы методы теории перколяции для численной оценки вероятности связности сети.

2. Метод выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов за счет рационального выбора позиций размещения транзитных узлов маршрута, что в частности выражается в повышении скорости передачи данных по маршруту, например, при использовании стандарта IEEE 802.11n на величину 38%.

3. Метод много-путевой маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности позволяет повысить эффективность использования сетевых ресурсов, что проявляется в повышении эффективной скорости передачи данных на величину до 40% по сравнению со случайным выбором маршрутов.

Декан факультета ИКСС,

к.т.н., доцент

Профессор кафедры ССяПД,

д.т.н., доцент

Заведующая лабораторией

кафедры ССиПД



Д.В.Окунева



М.А.Маволкина



О.И.Ворожейкина



Публичное акционерное общество «Ростелеком»

МАКРОРЕГИОНАЛЬНЫЙ ФИЛИАЛ «СЕВЕРО-ЗАПАД»

Синопская наб., д. 14, лит. А
г. Санкт-Петербург, Россия, 191167,
тел.: +7 (812) 601-69-99, факс: +7 (812) 601-69-98
e-mail: office@nw.rt.ru, web: www.rt.ru

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
Макрорегионального филиала
«Северо-Запад» ПАО «Ростелеком»
Технический директор



Маевский К.А.

АКТ

О внедрении научных результатов,
полученных Бушеленковым Сергеем Николаевичем

Комиссия в составе:

- Щербакова Ольга Сергеевна, Директор департамента планирования технической инфраструктуры ПАО «Ростелеком» МРФ «Северо-Запад»;
- Пяттаев Владислав Олегович, Кандидат технических наук, Директор Северо-Западного филиала ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» (ГК Ростелеком);
- Молотков Юрий Алексеевич, Кандидат технических наук, Руководитель проектов Северо-Западного филиала ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» (ГК Ростелеком)

составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Бушеленковым Сергеем Николаевичем в диссертационной работе на тему «Разработка моделей и методов организации сетей Интернета вещей высокой плотности», а именно:

1. модель сети высокой плотности на основе модели решеток, с использованием методов теории перколяции для численной оценки вероятности связности сети;
2. метод выбора маршрутов в беспроводной сети интернета вещей высокой плотности за счет рационального выбора позиций размещения транзитных узлов маршрута;
3. метод много-путевой маршрутизации трафика в сети интернета вещей высокой плотности позволяющий повысить скорость передачи данных за счет рационального выбора маршрутов.

Приведенные результаты исследования использованы при разработке, «Методики планирования сети Интернета Вещей» ПАО «Ростелеком».

Директор департамента планирования
технической инфраструктуры
ПАО «Ростелеком» МРФ «Северо-Запад»

О.С. Щербакова

Директор Северо-Западного филиала
ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» (ГК Ростелеком),
кандидат технических наук

В.О. Пяттаев

Руководитель проектов Северо-Западного филиала
ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» (ГК Ростелеком)
Кандидат технических наук

Ю.А. Молотков