

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский институт радио (НИИР)»

На правах рукописи

Тонких Евгений Викторович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЛАНИРОВАНИЯ
СЕТЕЙ СВЯЗИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Санкт Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ | 12 |
| 1.1. Введение | 12 |
| 1.2. Сети связи пятого поколения | 13 |
| 1.3. Рекомендации МСЭ-Т и МСЭ-Р по сетям связи пятого поколения | 16 |
| 1.4. Сети связи шестого поколения и сети связи 2030 | 57 |
| 1.5. Высокоплотные сети | 59 |
| 1.6. Цель и задачи диссертационной работы | 62 |
| 1.7. Выводы | 63 |
| ГЛАВА 2. СЕТИ D2D ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ В УСЛОВИЯХ ОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВА ОКРУЖЕНИЯ | 64 |
| 2.1. Распределение трафика на сетях связи | 64 |
| 2.2. Ad Hoc или целевые сети связи | 66 |
| 2.3. Особенности построения и функционирования сетей D2D. Перспективы использования технологии D2D при построении сетей связи высокой плотности | 70 |
| 2.4. Разработка метода планирования сети высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения | 72 |
| 2.5. Выводы | 83 |

| | |
|---|-----|
| ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВА ОКРУЖЕНИЯ..... | 85 |
| 3.1. Характеристики пространства окружения высокоплотных сетей связи | 85 |
| 3.2. Разработка метода планирования сети высокой плотности в условиях неоднородной структуры пространства окружения | 86 |
| 3.3. Сравнение разработанных методов по числу транзитных маршрутов | 95 |
| 3.4. Выводы | 98 |
| ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ФРАКТАЛЬНОЙ ФИГУРЫ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ПРОСТРАНСТВА ОКРУЖЕНИЯ..... | 100 |
| 4.1. Фрактальные свойства пространства окружения сети высокой плотности | 100 |
| 4.2. Метод представления пространства окружения высокоплотной сети | 102 |
| 4.3. Фрактальные размерности..... | 105 |
| 4.4. Фрактальные фигуры для представления неоднородного пространства окружения сети высокой плотности..... | 110 |
| 4.5. Методика выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования сети высокой плотности | 112 |
| 4.6. Выводы | 116 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 117 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 121 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 134 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время в области сетей и систем связи происходят принципиальные изменения, вызванные переходом к следующему этапу эволюции сетей и систем связи, а именно: сетям связи пятого и последующих поколений. Под сетями связи последующих поколений понимаются сети связи шестого поколения и сети связи 2030. Эти сети с сетями связи пятого поколения объединяют некоторые общие характеристики. К ним, в первую очередь, относятся высокая плотность и ультрамалые задержки.

Высокая плотность появилась вследствие реализации в сетях связи пятого поколения концепции Интернета Вещей. Уже сегодня стандартизующие организации рекомендуют планировать сети связи пятого поколения исходя из 1 млн устройств на 1 км². Естественно, что это требует пересмотра методов планирования сетей связи, поскольку в сетях связи высокой плотности устройства могут быть расположены настолько близко друг к другу, что на их функционировании может оказываться даже величина трафика, который обслуживает сеть в конкретный момент времени. В сетях связи шестого поколения плотность устройств еще более увеличивается и может достигать 100 устройств на 1 м³. В этом случае говорят уже о сверх плотных сетях.

Ультрамалые задержки в сетях связи пятого и последующих поколений возникают вследствие реализации концепции Тактильного Интернета. Предоставление услуг Тактильного Интернета требует круговой задержки в 1мс, что в 100 раз меньше, чем для существующих сетей.

Для реализации указанных требований в сетях связи пятого и последующих поколений предполагается широкое использование технологий граничных и туманных вычислений, главной особенностью которых является размещение вычислительных ресурсов сети как можно ближе к пользователю (устройству). Еще одной важнейшей технологией, которая может обеспечить выполнение столь жестких требований к сетям и системам связи, является обеспечение

непосредственного взаимодействия между пользователями и/или устройствами без участия базовой станции сети. Эти взаимодействия получили название устройство-устройство D2D (Device-to-Device) и во многих случаях позволяют выполнить требования по высокой плотности и ультрамалым задержкам. Мало того, и граничные и туманные вычисления, и взаимодействия D2D позволяют разгрузить ядро сети, замыкая трафик либо на уровне базовых станций, либо даже без их участия.

Несмотря на эти достижения в области сетей связи пятого и последующих поколений, остается еще целый ряд принципиальных вопросов по планированию и проектированию таких сетей. В области исследований по высокоплотным сетям практически не изучены вопросы влияния неоднородности пространства окружения на ее построение и функционирование. В то же время вследствие высокой плотности и близкого расположения устройств относительно друг друга эти исследования представляются необходимыми. Кроме того, неоднородность пространства окружения, скорее всего, носит самоподобный характер и ее влияние на сеть связи высокой плотности требует изучения фрактальных характеристик такого пространства совместно с размещением узлов сети в нем. Решению этих проблем и посвящена диссертационная работа.

Степень разработанности темы. В области Интернета Вещей и Тактильного Интернета, сетей связи пятого и последующих поколений существует достаточно много работ отечественных и зарубежных ученых В.В. Бутенко, В.М. Вишневского, Б.С. Гольдштейна, В.Г. Карташевского, А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, К.Е. Самуилова, В.К. Сарьяна, М.А. Сиверса, С.Н. Степанова, А.В. Рослякова, А.Е. Рыжкова, В.О. Тихвинского, Ю.В. Гайдамаки, Р.В. Киричка, Е.А. Кучерявого, Д.А. Молчанова, А.С.А. Мутханны, А.А. Атейя, J. Andrews, J. Araniti , M. Dohler, N. Himayat, F. Baccelli, S. Rangan, T. Rappoport, S. Singh и других.

Отмеченные выше работы внесли решающий вклад в исследования гетерогенных сетей связи пятого и последующих поколений. Однако в области планирования высокоплотных сетей до настоящего времени отсутствовали работы,

в которых учитывалась бы неоднородность пространства окружения планируемой сети. Пространство окружения высокоплотной сети может включать в себя типовую застройку, строения, спроектированные на основе типовых проектов, т.е. некие самоподобные структуры, фрактальные характеристики которых следует учитывать при планировании и проектировании высокоплотных сетей. Все это в целом и определяет цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы.

Объект и предмет диссертации. Объектом исследования являются сети связи пятого и последующих поколений, а предметом исследования – методы планирования высокоплотных сетей.

Цель и задачи диссертации. Цель диссертационной работы состоит в разработке и исследовании методов планирования сетей связи высокой плотности с учетом фрактальных характеристик пространства окружения сети.

Указанная цель достигается путем решения в диссертационной работе следующих задач:

- анализ развития сетей связи пятого и последующих поколений на горизонте планирования до 2030 года,
- анализ особенностей и характеристик высокоплотных и сверх плотных сетей связи,
- анализ особенностей и перспектив развития технологии взаимодействия устройство-устройство D2D для сетей высокой плотности,
- исследование фрактальных свойств пространства окружения высокоплотной сети,
- разработка метода планирования сети высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения,
- разработка метода планирования сети высокой плотности в условиях неоднородной структуры пространства окружения,
- разработка методики выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования сети высокой плотности в условиях неоднородной структуры пространства окружения.

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- Предложен метод планирования полносвязной сети Ad Hoc высокой плотности до 1 млн устройств на один 1 м^2 в условиях однородной структуры пространства окружения, отличающийся тем, что полная связность сети доказана на основе теоремы Эрдеша-Ренъи, а в качестве модели сети используется модель, включающая область сигналов и область помех, радиус связи устройства составляет 10 м.
- Предложен метод планирования сети связи, отличающийся тем, что при планировании сети связи высокой плотности учитывается самоподобная структура неоднородного пространства окружения сети путем использования геометрических фракталов, при этом для планирования высокоплотной сети была использована кривая Гильберта, что позволяет с достаточной для практики степенью точности учесть неоднородность пространства окружения планируемой сети.
- В отличие от известных методов планирования сетей связи для планирования сети высокой плотности при использовании кривой Гильберта предложено ввести параметр условной ширины кривой, что позволяет оценивать площадь, занимаемую строениями, стенами и иными элементами пространства окружения планируемой сети связи высокой плотности.
- Сравнение результатов имитационного моделирования высокоплотных сетей для метода планирования сети с использованием фрактальной кривой Гильберта, учитывающего неоднородную структуру пространства окружения сети, доказало, что для этого метода требуется более, чем в два раза меньшее число транзитов при маршрутизации сообщений по сравнению с методом планирования сети, предполагающим однородную структуру пространства окружения.
- Установлено в отличие от известных результатов, что длина маршрута при неоднородной структуре пространства окружения может быть представлена β -распределением.

- Предложено для планирования сетей связи в отличие от существующих методов использовать различные фрактальные фигуры для представления пространства окружения высокоплотной сети, в том числе салфетки Серпинского, ковер Серпинского и кривую Гильберта. Для каждой из приведенных фрактальных фигур получены оценки фрактальной размерности методом Миньковского.

- Разработана методика планирования сети связи, отличающаяся от известных тем, что введена процедура выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования высокоплотной сети в условиях неоднородного пространства окружения, основанная на близости параметров фрактальной размерности, модифицированной информационной размерности и доли площади, занимаемой в площади пространства окружения сети иными элементами этого пространства. Методика реализована в виде алгоритма выбора фрактальной фигуры.

Теоретическая и практическая значимость диссертации. Теоретическая значимость диссертационной работы состоит, прежде всего, в разработке и исследовании методов планирования сетей связи высокой плотности с учетом самоподобных характеристик пространства окружения сети и использовании геометрических фракталов для этой цели. Разработка метода планирования сети высокой плотности на основе применения кривой Гильберта для представления характеристик неоднородного пространства окружения планируемой сети доказала высокую эффективность такого подхода, позволив уменьшить число транзитных участков при маршрутизации сообщений более, чем в два раза по сравнению с планированием сети для однородного пространства. Это объясняется, в том числе и естественной кластеризацией сети при учете самоподобия пространства окружения высокоплотной сети.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании методики планирования и проектирования сети связи высокой плотности на основе выбора фрактальной фигуры в условиях неоднородного пространства окружения, базирующейся на близости параметров фрактальной размерности, модифицированной информационной размерности и доли площади, занимаемой в

площади пространства окружения сети строениями, стенами и иными элементами этого пространства. Методика реализована в виде алгоритма выбора фрактальной фигуры.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в ФГУП НИИР при выполнении государственных контрактов по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций Администрации связи Российской Федерации в Секторе стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи в работах по разработке стандартов для сетей ИМТ-2020, ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Методики планирования сети связи высокой плотности на основе использования фрактальных фигур» и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Интернет Вещей и самоорганизующиеся сети» и «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории телетрафика, теории фракталов, имитационного моделирования. Имитационное моделирование выполнялось с помощью пакета Mathcad.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод планирования сети связи высокой плотности на основе фрактальной кривой Гильберта, позволяющий с достаточной для практики степенью точности учесть неоднородность пространства окружения планируемой сети,
2. Метод планирования сети с использованием фрактальной кривой Гильберта, учитывающий неоднородную структуру пространства окружения сети, требует более, чем в два раза меньшее число транзитов при маршрутизации сообщений по сравнению с методом планирования сети, предполагающим однородную структуру пространства окружения,

3. Методика планирования сети связи высокой плотности на основе процедуры выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования в условиях неоднородного пространства окружения, базирующаяся на близости параметров фрактальной размерности, модифицированной информационной размерности и доли площади, занимаемой в площаи пространства окружения сети иными элементами этого пространства.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования с использованием пакетов Mathcad, обсуждением результатов диссертационной работы на конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях и семинарах: секции «Информационные технологии как средство повышения качества жизни населения», доклад на Форуме «Интернет + Город», организованного Институтом Развития Интернета, при поддержке Минкомсвязи России, ПАО «Ростелеком» и ФРИИ, РИА Новости, Москва, 6 октября 2016, Региональном семинаре МСЭ для стран Европы и СНГ «Внедрение 5G в Европе и СНГ: стратегии и политика, стимулирующие новые возможности роста», 3-5 июля 2018 года, г. Будапешт, Венгрия, Конференции IEEE Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, Москва, 19–20 марта 2020 года, конференции NEW2AN 2020 Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, август 2020, С.-Петербург, IX и X Международных научно-технических и научно-методических конференциях «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании» АПИНО 2020 и 2021, СПбГУТ, заседаниях 11, 13 и 20 Исследовательских комиссий МСЭ-Т в 2020 и 2021 годах, семинарах кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Публикации по теме диссертации. Всего по теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 3 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в международную базу данных SCOPUS, одна из которых относится к Q1, а другая – к Q2, 1 статья в журналах, включенных в РИНЦ.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пп. 3, 11 и 14 паспорта специальности 05.12.13– Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ

1.1. Введение

Второе десятилетие 21 века ознаменовалось принципиальными изменениями в представлениях о развитии сетей и систем связи. Причинами этого стали как появление концепции развития общества, известной как цифровая экономика [7], так и технологические прорывы в области разработки и создания новых технических средств электросвязи. При этом ключевую роль в области развития сетей и систем связи сыграли концепции Интернета Вещей [21, 30, 61, 91] и Тактильного Интернета [24, 25, 32, 35, 80, 81].

Основой создания концепции Интернета Вещей явился научно-технический прогресс в области беспроводных сенсорных сетей [28, 83, 93, 101], впервые стало понятно, что число устройств в клиентской базе современных сетей связи может превысить число людей. Реальными стали прогнозы о том, что число пользователей сети, включая устройства, может со временем достигнуть триллионов [125]. Естественно, что это потребовало осмысления и разработки новых принципов построения сетей связи, поскольку предыдущие были разработаны исходя из демографических характеристик по народонаселению в расчете на 10 миллиардов жителей планеты и нескольких устройств на жителя.

Поэтому, уже на этапе внедрения беспроводных сенсорных сетей широкое распространение получили так называемые самоорганизующиеся сети [19, 23] и кластеризация сетей связи [20, 31, 37], что позволило весьма эффективно преодолеть этап внедрения совершенно новых беспроводных сенсорных сетей как элементов сети доступа сетей связи общего пользования (ССОП). При этом появилось много новых достижений, в том числе в области алгоритмов выбора

головного узла для кластеров беспроводных сенсорных сетей [23], во что существенный вклад внесли российские ученые [1, 66, 69, 70, 84].

Все вышесказанное создало благоприятные условия для начала широкомасштабных работ во втором десятилетии 21 века по исследованиям и стандартизации в области Интернета Вещей.

Концепция Тактильного Интернета в отличии от концепции Интернета Вещей связана, в первую очередь, с новыми услугами, требующими принципиально иной задержки для их предоставления. В основе этой концепции лежат услуги по передаче тактильных ощущений [24, 88], которые и потребовали уменьшить значение круговой задержки со 100 мс, характерной для сетей связи следующего поколения NGN (Next Generation Networks) [104], до 1 мс [25]. В настоящее время концепция Тактильного Интернета получила новое обобщение в концепции создания сетей связи с ультрамалыми задержками и сверхвысокой надежностью uRLLC (ultra-Reliable Low Latency Communications) [34]. Существенную роль вследствие предстоящего широкого распространения играет дополненная реальность, для которой допустимая задержка определяется в 5мс [89, 90]. Такие сети наряду с сетями Интернета Вещей и определяют основные характеристики сетей связи пятого 5G/IMT-2020 и последующих поколений. Аббревиатура 5G (Fifth Generation) используется в соответствии со стандартами 3GPP (Third Generation Partnership Project) [55, 121], а аббревиатура IMT-2020 (International Mobile Telecommunication) [49] используется Сектором стандартизации телекоммуникаций международного союза электросвязи МСЭ-Т.

1.2. Сети связи пятого поколения

На рис.1.1 приведена эталонная модель архитектуры сети IMT-2020 в соответствии с рекомендацией Y.3104. Как видим, вся сеть разделена на два уровня: пользовательский (use plane) и уровень управления (control plane). И это

вполне естественно, учитывая гетерогенный характер сетей связи пятого поколения [67,68]. Действительно, в отличии от сетей предыдущих поколений в сети пятого поколения гетерогенность сети становится определяющей архитектуру сети характеристикой и предусматривает как деление сети на пользовательский уровень и уровень управления, так и создание новой структуры на основе так называемого слайсинга, обеспечивающего возможность обслуживания пользователей различных сетей (мобильных, стационарных, WiFi, беспроводных сенсорных и т.д.) единообразным способом.

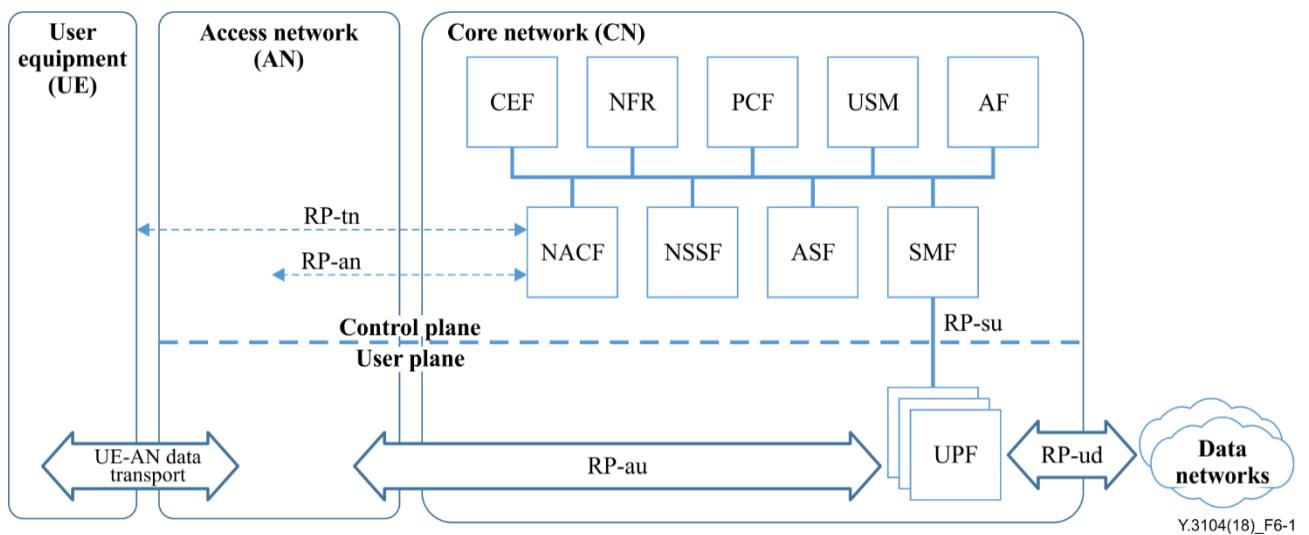


Рис.1.1 – Эталонная модель архитектуры сети IMT-2020

На этом рисунке приняты следующие основные обозначения:

UE (User Equipment) – пользовательское оборудование,

AN (Access Network) – сеть доступа,

CN (Core Network) – ядро сети,

CEF (Capability Exposure Function) – функция возможностей экспозиции,

NFR (Network Function Repository) – репозиторий сетевых функций,

PCF (Policy Control Function) – функция управления политикой обслуживания,

USM (Unified Subscription Management) – единое управление пользователями, AF (Application Function) – функция приложения, NACF (Network Access Control Function) – функция управления доступом в сеть, NSSF (Network Slice Selection Function) – функция выбора сетевого слайса, ASF (Autentification Server Function) – функция сервера аутентификации, SMF (Session Management Function) – функция управления сессией.

Естественно, что помимо рассмотренных архитектурных особенностей сетей связи пятого поколения существуют и иные, которые в эти сети привносят другие технологические достижения в области сетей и систем связи. Это относится, например, к программно-конфигурируемым сетям SDN (Software Defined Networks) [95], которые рассматриваются в настоящее время как основа для построения ядра сети связи пятого и последующих поколений [31]. Особенno это касается мульти контроллерных сетей SDN [72].

Для исследований в диссертационной работе наиболее важным является то, что уже на этапе создания рекомендаций по архитектуре высокого уровня для сетей связи пятого поколения отделены пользовательский уровень и уровень управления сетью, что позволяет использовать взаимодействия непосредственно между устройствами D2D (Device-to-Device) [62,63,94]. Эта технология как раз и является новой возможностью обеспечения услугами устройств Интернета Вещей. В условиях высокой плотности сети D2D взаимодействия позволяют не только обеспечить непосредственное взаимодействие устройств между собой, но и разгрузить ядро сети от трафика, который может замыкаться внутри сети доступа.

Далее подробно проанализируем рекомендации МСЭ-Т, относящиеся к сетям связи пятого поколения.

1.3. Рекомендации МСЭ-Т и МСЭ-Р по сетям связи пятого поколения

Начиная рассмотрение разработки стандартов (рекомендаций) в Международном союзе электросвязи (МСЭ) в области сетей связи пятого поколения – «5G», проанализируем сложившуюся классификацию и терминологию в этой области в МСЭ и других организациях, разрабатывающих стандарты (ОПС) [60].

Первым поколением подвижной связи (1G) принято считать первые радиотелефоны, работавшие в стандартах Advanced Mobile Phone Service – AMPS (США, Канада, Центральная и Южная Америка, Австралия), Total Access Communications System – TACS (Англия, Италия, Испания, Австрия, Ирландия, Япония) и Nordic Mobile Telephon – NMT (страны Скандинавии и ряд других стран), и обеспечивавшие услуги передачи речи по аналоговой сети. Следующим поколением (2G) и по настоящему глобальным (международным) стандартом стал стандарт GSM (Global System for Mobile communications), позволивший передачу голоса по цифровой сети, а также низкоскоростную передачу данных, услугу в последствии расширенную с помощью стандарта GPRS (General Packet Radio Service) и дальнейшего его развития – EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution). Кроме того, ко второму поколению относят цифровую модификацию стандарта AMPS – D-AMPS, а также стандарт CDMA (Code Division Multiple Access), использовании отличный от GSM и D-AMPS метод доступа.

Как мы сейчас знаем, следующим шагом в развитии услуг сетей подвижной связи стало обеспечение высокоскоростных услуг передачи данных (HSPA – High Speed Packet data Access), с возможностью передачи голоса по сети IP, мобильный широкополосный доступ к сети Интернет (MBB – Mobile Broadband). Предъявляемые требования ставили кардинальный вопрос о том, как должны развиваться сети: революционно или эволюционно. Также значительное влияние оказывала регионализация стандартов. Стало очевидным, что интересы различных

регионов невозможно объединить в рамках единого стандарта, поскольку потребует перестройки существующей инфраструктуры, в которую уже вложены значительные средства. Кроме того, несмотря на то, что существующие системы подвижной связи предоставляли относительно одинаковые виды услуг, применяемые же в них технологии доступа, такие как TDMA и CDMA, были технически принципиально различны, что фактически делало невозможным их гармонизацию или конвергенцию. Поэтому, когда проект по разработке долгосрочной программы, стандартизации и содействия внедрению национальных, региональных и международных систем, реализующих полный набор услуг в интересах наземной (сотовой и беспроводной) и спутниковой связи, именуемой Международная подвижная электросвязь (IMT), продвигаемый в течении нескольких лет МСЭ совместно с рядом региональных ОРС, забуксовал, было решено отойти от идеи разработки единого всемирного стандарта, а разрабатывать требования на семейство стандартов третьего поколения (3G) [6].

Работы по стандартизации семейства систем 3-го поколения, названного IMT-2000, проводились под эгидой МСЭ с привлечением партнерских объединений, региональных ОРС и профильных форумов и объединений (рис.1.2). Отдельно стоит отметить, что в ходе этой работы образовались два лагеря, оформившихся в виде двух партнерских объединений по системам 3-го поколения: 3GPP и 3GPP2.

Дальнейшее развитие сотовой связи ввиду большой популярности вышло за пределы среды инженеров, разработчиков и операторов связи, а также маркетинговое информирование о ходе разработки стандартов в партнерствах 3GPP, закрепило наименование «3G» за новыми стандартами подвижной связи. И положило начало исчисления поколений, как будущих, так и прошлых технологий в таком формате.



Рис.1.2 – Участники разработки семейства стандартов IMT-2000

На уровне международной стандартизации официально использовался термин IMT-2000. Под этой аббревиатурой МСЭ объединило изначально пять стандартов, к которым позже добавился WiMAX, и только некоторые из них обеспечивают полное покрытие в различных диапазонах, поэтому фактически только они могут рассматриваться в качестве полноценных 3G решений. В семействе стандартов IMT-2000 можно выделить три таких основных стандарта 3G: UMTS (Universal Mobile Telecommunications Service), CDMA2000 и WCDMA (Wide CDMA). Все они настроены на пакетную передачу данных и, соответственно, на работу с цифровыми компьютерными сетями, включая Интернет [16].

Рассматривая работу МСЭ, следует отметить, что работа велась в двух секторах: МСЭ-Т и МСЭ-R. Сектор стандартизации электросвязи МСЭ (МСЭ-Т) отвечал за разработку концептуальных аспектов создания IMT-2000, а Сектор радиосвязи МСЭ (МСЭ-R) - за спецификации радиоинтерфейсов для этих систем. Архитектура 3G-систем включает транспортную (базовую) сеть и средства радиодоступа, модернизация которых осуществляется различными путями. Эффективность сетей радиодоступа в значительной степени зависит от используемых в них технологий и смена поколений, как правило, означает и смену идеологии построения этих систем.

Подход же к выбору базовой сети совершенно иной и в основном определяется стратегией развертывания систем нового поколения. Изменения и перестройка базовых сетей более инерционны, в том числе и потому, что в них делались значительные инвестиции, которые операторы стараются сохранить при смене поколений. При этом, в отличие от радиосетей, существующие базовые сети не выступали как сдерживающий фактор для внедрения новых услуг.

Для реализации систем третьего поколения были разработаны рекомендации по глобальным унифицированным стандартам подвижной связи: обеспечение качества передачи речи, сравнимого с качеством передачи в проводных сетях связи; обеспечение безопасности, сравнимой с безопасностью в проводных сетях; обеспечение национального и международного роуминга; поддержка нескольких местных и международных операторов; эффективное использование спектра частот; пакетная и канальная коммутация; поддержка многоуровневых сотовых структур; взаимодействие с системами спутниковой связи; поэтапное наращивание скорости передачи данных вплоть до 2 Мбит/с.

К связи четвертого поколения (4G), как правило, относят технологии, которые позволяют передавать данные в сотовых сетях со скоростью выше 100 Мбит/сек. Технология LTE (Long-Term Evolution) – это основное направление эволюции сетей сотовой связи третьего поколения [51,53,54,87]. В январе 2008 года международное партнерство 3GPP, разрабатывающее перспективные стандарты мобильной связи, утвердило LTE в качестве следующего после UMTS стандарта широкополосной сети мобильной связи. На уровне МСЭ-R в марте 2008 года был установлен ряд требований для стандарта международной подвижной беспроводной широкополосной связи, пришедшего на смену IMT-2000 и получившего название «продвинутый IMT» (IMT-Advanced). В частности, определялись требования к скорости передачи данных для обслуживания абонентов: скорость 100 Мбит/с должна предоставляться высокоподвижным абонентам (например, на транспорте: автомобиль, поезд), а абонентам с небольшой подвижностью (например, пешеходам или фиксированным абонентам) должна предоставляться скорость 1 Гбит/с.

В начале 2012 года МСЭ-R приступил к реализации программы по развитию «IMT на период до 2020 года и далее», заложив основу для исследовательской деятельности в МСЭ в области 5G, в соревнование в которое включились все ключевые игроки, такие как 3GPP, ETSI¹, 5GPPP², NGMN³, IETF⁴ и некоторые другие. В 2013 году Рабочей группой 5D МСЭ-R, играющей ведущую роль в МСЭ-R в области разработок и исследования систем IMT, разработала график работ по стандартизации поколения следующего за IMT-Advanced, которое должно было завершиться утверждением спецификаций этих новых систем в 2020 году (рис.1.3).

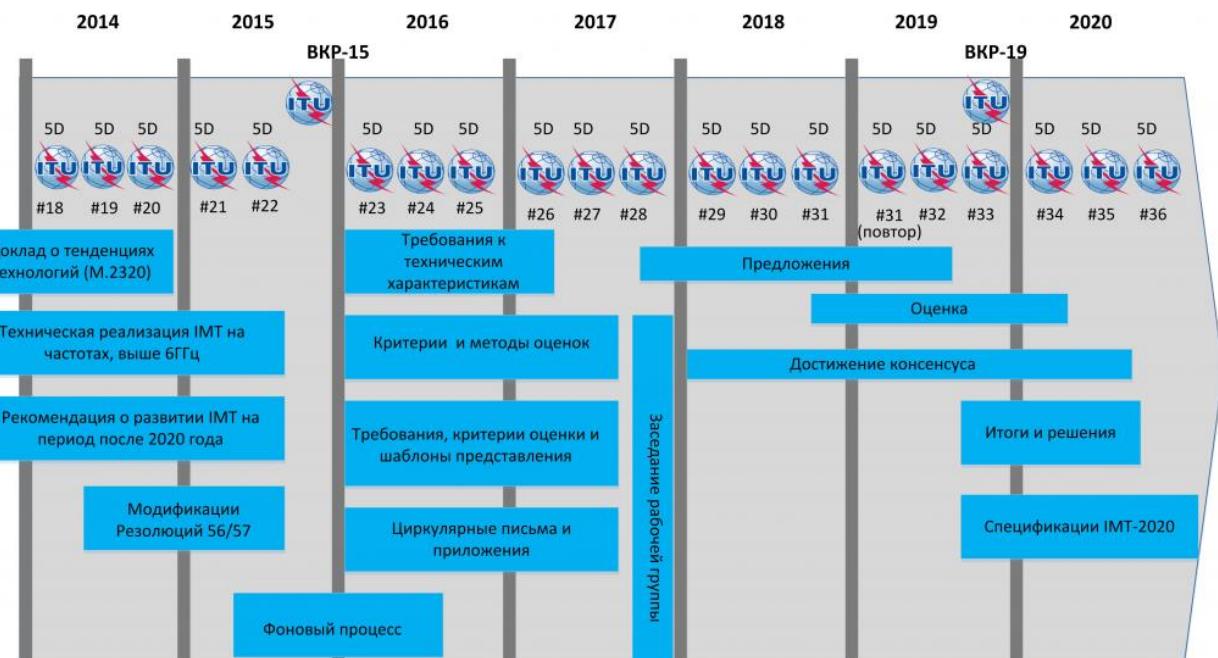


Рис1.3 – Временной график и сценарий разработки спецификаций IMT-2020 в МСЭ-R

¹ European Telecommunication Standard Institute – Европейский институт телекоммуникационных стандартов, который является членом 3GPP, и наиболее активно работает в области разработки стандартов 5G.

² 5G Infrastructure Public Private Partnership – Частно-государственное партнерство по инфраструктуре 5G считается одним из ведущих партнёрств по стандартизации 5G.

³ Next Generation Mobile Networks Alliance – Альянс мобильных сетей следующего поколения занимается стандартизацией полного спектра решений 5G. В альянс входит руководство ведущих американских операторов: AT&T, U.S. Cellular и Verizon.

⁴ Internet Engineering Task Force – Целевая группа инженерной поддержки интернета разрабатывает решения модернизации IP-протокола для поддержки виртуализации сетевых функций NFV (Network Function Virtualization).

Стоит отметить, что обозначение «5G», обычно отображающее технологический этап мобильных сетей, в данном моменте на международном уровне де-факто отражает новую эру сетей связи и сервисов в целом. Аббревиатура 5G, как и ранее 3G, используется обычно консорциумом 3GPP, однако в данном случае, учитывая множество факторов (тенденцию развития технологий, появляющуюся потребность в новых сервисах и другие), мировое сообщество дало новому поколению сетей связи аббревиатуру 5G/IMT-2020, где аббревиатуру IMT-2020 закрепил Международный Союз Электросвязи. На основании множества к данному времени международных рекомендаций и стандартов можно сделать вывод, что концепция сетей связи IMT-2020 или иначе сетей связи пятого поколения, включает в себя целый комплекс подходов и технологий, а не только описывает принципы и технологии организации мобильной сети доступа [33].

Сети пятого поколения призваны значительно расширить ограниченный функционал подвижных сетей предыдущих поколений. Основными функциональными особенностями сетей 5G являются следующие:

- Усовершенствованный подвижный широкополосный доступ eMBB (enhanced MBB);
- Сверхнадежная передача данных с малой задержкой ULLRC (Ultra Low Latency Reliable Communication)
- Крупномасштабные системы межмашинной связи, mMTC (Massive Machine Type Communication), Massive IoT/ПoT.

На основе этих трех ключевых элементов функционала строится все многообразие услуг и возможностей сетей 5G/IMT-2020, наиболее характерные из которых показаны на рисунке (Рис.1.4).



Рис.1.4 – Функциональнее возможности, предлагаемые сетями 5G/IMT-2020

Следует отметить, что особенность архитектуры сети 5G состоит в том, что традиционное понятие «архитектура сети», основанной на аппаратных решениях, в сети 5G/IMT-2020 теряет актуальность. Поэтому 5G чаще называют не сетью, а системой, или «платформой», при этом имеется в виду платформа программная, а не аппаратная. Если сети предыдущих поколений строились на базе оборудования – аппаратных решений, то платформа 5G/IMT-2020 строится на базе программных решений, в частности, программно-конфигурируемых сетей (SDN – Software Defined Network), а также виртуализации сетевых функций (NFV – Network Function Virtualization). Таким образом, оборудование традиционных сетей подвижной связи заменяется на программные «образы», работающие в центрах обработки данных (ЦОД) на стандартных серверах и виртуальных машинах (VM – virtual machine).

В архитектуре 5G/IMT-2020 функции базовой (опорной) сети реализуются в центральном облаке (Cloud RAN), на виртуальных машинах VM. Важную роль в развитии сетей 5G/IMT-2020 будут играть также периферийные (границные) облака (Edge Cloud), в частности, технология подвижных периферийных облачных

вычислений (МЕС – Mobile Edge Cloud), а также технологии «туманных облаков» (Fog Cloud).

Виртуализация сети на базе NFV/SDN необходима также для очень полезной функции 5G-систем: логической сетевой нарезки (Network Slicing).

Таким образом, сети 5G/IMT-2020 представляют собой с точки зрения стандартизации действительно инновационный рывок и как в области спецификаций радиоинтерфейсов, так и в области архитектурных решений для базовой сети. Далее предлагается рассмотреть ключевые документы МСЭ в области стандартизации сетей 5G/IMT-2020.

1.3.1. Ожидания и видение IMT-2020 в области радиосвязи

На исходе 2015 года, к концу четырёхлетнего исследовательского цикла МСЭ-Р пришел с наработками, описывающими и определяющими будущие тенденции, возможные архитектурные решения и общие задачи развития сетей IMT на период до 2020 года и после него. В *Отчете МСЭ-Р M.2320-0 (11/2014)* рассматривались *будущие технологические тенденции для наземных систем IMT*. В этом отчете рассмотрены тенденции развития технологий наземных систем IMT, которые применимы к радиоинтерфейсам, мобильным терминалам и сетям, на временном срезе 2015–2020 гг. и в последующий период. Эти технологические тенденции включают технологии, улучшающие взаимодействие с пользователем, конфиденциальность и безопасность, поддержку широкого спектра новых услуг и повышение энергоэффективности сети. Кроме того, они включают усовершенствования сетевой архитектуры, которые повышают гибкость и эффективность работы сети.

Технологии совершенствования радиоинтерфейса. Усовершенствованные формы сигналов, модуляция и кодирование, а также схемы многостанционного

доступа, в частности фильтрованное OFDM (FOFDM), модуляция с множеством несущих с использованием банка фильтров (FBMC), многостанционный доступ с разделением по шаблону (PDMA), многостанционный доступ на основе разреженных кодов (SCMA), многостанционный доступ с разделением на основе перемежения (IDMA) и распределение по несущим с низкой плотностью (LDS), способны повысить эффективность использования спектра в будущих системах IMT. Передовые технологии применения антенн, такие как формирование трехмерного луча (3D-BF), активная антенная система (AAS), крупномасштабные и сетевые системы с многоканальным входом/многоканальным выходом (MIMO) позволяют добиться более эффективного использования спектра. Кроме того, совместное применение TDD и FDD, двухканальное подключение и динамическая TDD увеличивают гибкость при использовании спектра. Одновременная передача и прием сигналов на одной частоте с подавлением собственных помех может повысить эффективность использования спектра. Гибкое использование спектра, объединенное управление несколькими технологиями радиодоступа (RAT) и гибкое распределение ресурсов линий вверх/линий вниз способны обеспечить техническое решение проблемы растущего потребления трафика в будущем и более эффективное использование радиоресурсов.

Внесение усовершенствований в радиоинтерфейс может осуществляться и другими методами.

Технологии совершенствования сценариев использования подвижной широкополосной связи. Преимуществами технологии расширенного мультимедийного широкополосного вещания и многоадресной передачи являются экономное использование ширины полосы и повышение эффективности передачи данных. Целесообразно также применять динамическое переключение между одноадресной и многоадресной передачей данных. Метод, основанный на близости объектов (proximity service), позволяет применением получать информацию о том, находятся ли устройства в непосредственной близости друг от друга, а также обеспечить прямое соединение устройств друг с другом (D2D). Технологии, которые включают преимущества связи D2D, могут быть рассмотрены для

будущих систем IMT. Особое значение будут иметь использование связи D2D для потенциального увеличения пропускной способности сети. С увеличением доступности мобильного широкополосного доступа возможность подключения также стала реальной проблемой для межмашинного взаимодействия (M2M). Применение M2M-коммуникаций растет и будет играть все более важную роль в повседневной жизни. Требуется разработка технологий, чтобы лучше обслуживать приложения M2M и поддерживать большой объем приложений M2M. Технология сильно различается для разных типов приложений M2M. Простая классификация приложений M2M: небольшие данные/большая задержка (интеллектуальные измерения, мобильное отслеживание, электронное здравоохранение и т. д.), небольшие данные/малая задержка (связь типа V2V) и большие данные M2M (наблюдение). Кроме того, для обеспечения общественной безопасности крайне целесообразным является развитие технологий групповой связи (push-to-talk).

Технологии для улучшения пользовательского опыта. Ориентированность на пользовательские предпочтения определила следующие направления: улучшение границ соты, повышение качества обслуживания, повышение качества обслуживания, улучшение мобильного видео, расширенное широковещание и многоадресная передача (eMBMS), улучшение позиционирования, развитие технологии с низкой задержкой и высокой надежностью, взаимодействие с RLAN (для разгрузки сотовых сетей и расширения емкости в не требующие лицензии диапазоны спектра), совершенствование использования контекстной информации (будущие системы IMT должны быть контекстно-зависимыми, позволяя получать контекстную информацию в режиме реального времени по сети, устройствам, приложениям, пользователю и его среде).

Технологии повышения энергоэффективности сетей. Для повышения энергоэффективности при проектировании протоколов необходимо учитывать энергопотребление. Энергоэффективность сети можно повысить как путем снижения мощности РЧ-передатчиков, так и путем экономии энергии в электрических цепях. Для повышения энергоэффективности необходимо адаптивное управление ресурсами на основе колебаний трафика, потребляемого

различными пользователями. Поэтому совершенствование технологии должно идти по направлениям управления питанием на уровне сети, энергоэффективного развертывание сети, управления и распределения ресурсов, ориентированные на пользователя, улучшения физического уровня и обработки помех.

Технологии пользовательских терминалов. Мобильный терминал и обработка помех.

Технологии пользовательских терминалов. Мобильный терминал становится все более удобным многоцелевым устройством информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), предназначенным для персонального офиса и развлечения. В последнее время помимо традиционных смартфонов появляется также множество «умных» устройств, которые пользователи могут носить на себе. В связи с этим должны продолжать совершенствоваться технологии изготовления микросхем, аккумуляторов и дисплеев.

Сетевые технологии. Технологии для упрощения управления и повышения надежности сети – усовершенствованная технология самоорганизующейся сети (SON) является одним из многообещающих решений, позволяющих операторам повысить оптимизировать расходы на эксплуатацию в многоуровневой и многоуровневой сети, удовлетворяя при этом растущие требования к пропускной способности подписчиков.

Уплотнение сети – с ожидаемым значительным увеличением количества сетевых узлов в результате уплотнения сети, сложности приобретения сайта и предоставления услуг обратного рейса будут становиться все более сложными. Гетерогенные развертывания могут также предъявлять другие требования к транспортному рейсу по сравнению с сетью, работающей только на макроуровне).

Малые соты – ожидается, что развертывание малых сот обеспечит большую масштабируемость и пропускную способность. Преимущества развертывания малых сот в более высоких полосах частот повлекут за собой повышенную сложность системы, особенно с точки зрения РЧ и конструкции антенны, однако с техническими достижениями в беспроводной системе реализация технические проблемы могут быть усилены.

Сверхплотные сети – уплотнение сети за счет развертывания сверхбольшого количества ячеек очень эффективно для повышения спектральной эффективности за счет разделения ячеек.

Технологии для улучшения сетевых архитектур – для будущих систем IMT о потребуются более гибкие сетевые узлы, настраиваемые на основе организации сетей SDN, а также архитектуры и виртуализации сетевых функций (NFV) в целях оптимальной обработки функции узлов и повышения эксплуатационной эффективности сетей.

Облачная RAN – благодаря централизованной и совместной работе системы облачная RAN (C-RAN) помогает операторам решать вышеупомянутые проблемы. Сеть C-RAN централизует ресурсы обработки основной полосы частот и более высокого уровня для формирования пула, так что ресурсы обработки могут управляться и выделяться динамически по запросу, в то время как радиоустройства и антенные устройства развертываются распределенным образом.

Технологии повышения уровня конфиденциальности и безопасности. Для будущих систем IMT будущего необходимы надежные и защищенные технические решения, способные противостоять угрозам безопасности и конфиденциальности, которые могут заключаться в новых технологиях радиосвязи, услугах и сценариях развертывания.

В рамках более ясного понимания, какие требования должны будут предъявляться к системам IMT-2020 было проведено аналитически исследование по тенденции роста трафика IMT в период с 2020 по 2030 годы. Сектор радиосвязи подготовил *Отчет МСЭ-Р М.2370-0 (07/2015) «Оценка трафика IMT на период с 2020 по 2030 год»*, в котором описываются многие факторы, влияющие на рост будущего трафика IMT, такие как внедрение устройств с расширенными возможностями, которые требуют увеличенной скорости передачи данных и расширения использования полос частот, рост использования видео, распространение различных приложений и рост числа портативных устройств, использующих радиоканал для обмена данными. Отмечается, что во многом подобные драйверы увеличили объем трафика при переходе от IMT-2000 к IMT-

Advanced. Поскольку эволюция будет различаться в зависимости от страны и ее социальных и экономических особенностей в отчете содержаться и оценки трафика для некоторых отдельных стран, таких как Китай и Корея [112].

Кроме того, рассмотрены аспекты асимметрии трафика в будущем, поскольку в настоящее время существует определенное смещение среднего коэффициента асимметрии трафика подвижной широкополосной связи в сторону линии вниз (загрузка данных на пользовательское устройство). И эта асимметрия может увеличиваться в связи с ростом потребления аудиовизуального контента.

Сделанные прогнозы значительного роста трафика в сетях IMT, особенно после 2020 года, показали, что транспортная сеть в мобильной инфраструктуре становится важным приложением, требующим особое внимание. Транспортная сеть поддерживает соединения как между разнесенными приемопередатчиками в рамках одной базовой станции, так и между различными базовыми станциями мобильной широкополосной сети, а также соединяет базовые станции с другими сетевыми элементами инфраструктуры.

Для дальнейшего исследования транспортной сети в инфраструктуре подвижной связи был разработан ***Отчет МСЭ-Р М.2375-0 (06/2015) «Архитектура и топология сетей IMT»***, в котором был дан обзор архитектуры и топология/конфигурация сетей IMT-Advanced (таких как E-UTRAN, cdma2000 и TDMA-SC) на общем уровне детализации, а также определение эксплуатационные требования и требования к пропускной способности транспортной сети в этих топологиях.

Для нас также интересно отметить, что в данном отчете [113] были в общем определены будущие трудности и задачи, с точки зрения архитектуры. Ожидается, что будущая сеть будет иметь четыре ключевых особенности: более плотно расположенные и разнообразные точки доступа, неравномерное распределение трафика при единообразном взаимодействии с пользователем, различные прикладные услуги (приложения) и лучшую поддержку экстренной связи. Рост числа портативных устройств, местоположение которых может меняться во времени и пространстве, но при этом сеть может получить пиковую нагрузку

совершенно произвольно. Однако с точки зрения конечных пользователей будет востребовано одинаковое высокое качество обслуживания (QoS) и опыта (QoE) независимо от того, где и когда инициируется связь. Кроме того, совершенствование приложений и услуг делает QoS более сложным и разнообразным. В связи с чем выделяются две перспективных тенденций в области архитектуры.

Облачные вычисления/облака – как форма вычислений, хранения и предоставления сетевых услуг. Разделение физического оборудования и сетевых функций делает возможным повсеместное обслуживание. В частности, сетевые устройства могут быть гибко связаны друг с другом и динамически совместно использовать собственные возможности для предоставления высококачественных услуг и расширенных возможностей, когда это необходимо. Такая архитектура позволяет реализовать множество различных видов топологий, включая базовую, кольцевую, ячеистую (mesh) и даже произвольные их комбинации. Что ставит задачи на будущее - как совместно оптимизировать общую производительность сети при такой сложной топологии?

Гибкая конфигурация сети. С одной стороны, чрезмерное улучшение трафика требует все большего и большего количества оборудования вместе с более передовыми технологиями, что способствует увеличению капитальных затрат. С другой стороны, если сетевые ресурсы не могут быть распределены динамически, может произойти огромная трата ресурсов или серьезный конфликт ресурсов. Более того, если топология сети настроена статически, надежность сети может быть проблемой, особенно когда происходит сбой какого-либо оборудования. Гибкая конфигурация сети позволит удовлетворить требования к производительности при сохранении доступной стоимости сети. Благодаря гибкой конфигурации топологии сеть сможет разгрузить тяжелый трафик данных с помощью соответственно выбранных транспортных путей. Благодаря гибкому назначению и совместному использованию радиоресурсов как в частотной области, так и во временной, развернутые ресурсы смогут быть использованы по

максимуму, что для связи базовой станции с устройством, что для связи между с устройствами, что для связи между базовыми станциями.

Следующим значимым шагом в сторону понимания, как будут развиваться сети IMT-2020, стала попытка сформировать концепцию развития IMT до 2020 года и после него, которая нашла свою реализацию в формате *Рекомендации МСЭ-Р M.2083-0 (09/2015) «Концепция IMT – Основы и общие задачи будущего развития IMT на период до 2020 года и далее»*. В ней рассматриваться перспективы с точки зрения пользователей и применений, увеличения трафика, тенденции развития технологий и вопросов использования спектра, а также предоставлены руководящие указания по структуре и функциональным возможностям IMT на период до 2020 года и далее. Из представленных в отчете тенденций хотелось бы отдельно выделить тенденции, касающиеся пользователей и применений, рост объема трафика IMT, технологические тенденции и тенденции в области использования спектра.

Тенденции, касающиеся пользователей и применений. Поскольку мобильные устройства играют разнообразную, непрерывно меняющуюся роль в жизни современного человека, то IMT-системы будущего должны поддерживать новые сценарии использования, в числе которых применения, требующие высокоскоростной передачи данных, подключения большого количества устройств, а также применения, обладающие сверхнизкой задержкой и высокой надежностью [49]. В общем виде выделены следующие направления:

- поддержка ориентированных на пользователя систем связи, обладающих сверхнизкой задержкой и высокой надежностью;
- поддержка машинно-ориентированных систем связи, обладающих сверхнизкой задержкой и высокой надежностью;
- поддержка работы в условия высокой плотности пользователей;
- одновременное обеспечение высокого качества и высокой мобильности;
- усовершенствованные мультимедийные услуги;
- интернет вещей;
- конвергенция применений;

– применения сверхточного позиционирования.

Рост объема трафика IMT. Стимулирующие факторы и другие тенденции, влияющие на рост объема трафика, подробно отражены в Отчете МСЭ-R M.2370, рассмотренный выше. Отчет содержит расчеты глобального трафика IMT после 2020 года, полученные из нескольких источников. На основании этих расчетов можно сделать вывод, что глобальный трафик IMT в период с 2020 по 2030 год вырастет в 10–100 раз.

Технологические тенденции. В Отчете МСЭ-R M.2320, рассмотренном выше, представлен широкий обзор перспектив технологического развития наземных систем IMT в период до 2020 год и последующий период. Отчет содержит информацию о технических и эксплуатационных характеристиках систем IMT, в том числе о развитии IMT в рамках технического прогресса и разработки эффективных методов использования спектра, а также о внедрении и эксплуатации таких систем.

Перспективы использование спектра. Отмечается, что ни один отдельно взятый диапазон частот не удовлетворяет всем критериям, заданным для развертывания систем IMT, особенно в странах с разным рельефом местности и различной плотностью населения. Поэтому для удовлетворения потребностей систем IMT в пропускной способности и покрытии потребовалось бы несколько диапазонов частот, в связи с чем растет значимость *использования непрерывных и более широких полос спектра*. Широкое распространение «умных» устройств (смартфонов, планшетов, телевизоров и т. д.), а также большое разнообразие приложений, требующих для работы большого объема трафика, повышают потребность в трафике передачи данных в беспроводных сетях. Кроме того, для поддержки различных сценариев использования, например, для усовершенствованной подвижной широкополосная связь или сверхнадежной передача данных с малой задержкой или для работы крупномасштабных систем межмашинной связи, потребуются полосы различной ширины. Таким образом необходимо изучать доступность ресурсов спектра, поддерживающих использование непрерывных и более широких полос пропускания каналов в

перспективе после 2020 года. Более того, если для систем IMT будут доступны дополнительные участки спектра, необходимо учитывать сложности, которые могут возникнуть у действующих пользователей этих фрагментов спектра. Это приводит к необходимости *согласования спектра*. Согласование спектра дает следующие ключевые преимущества: экономию за счет масштаба, возможность глобального роуминга, а соответственно возможность использования одного и того же оконечного оборудования, снижение степени конструктивной сложности оборудования, увеличение срока службы батарей, повышение эффективности использования спектра и потенциальное уменьшение помех в приграничных областях.

В этой Рекомендации, также определены сценарии использования IMT на период до 2020 года и далее. Ожидается, что IMT-2020 обеспечит оптимизированную поддержку для множества различных вариантов использования, услуг, различных нагрузок трафика и различных сообществ конечных пользователей. Сценарии использования IMT-2020 объединены в три типовые категории, уже упомянутые нами ранее: усовершенствованная подвижная широкополосная связь (eMBB - enhanced Mobile Broadband), сверхнадежная передача данных с малой задержкой (uRLLC - Ultra Low Latency Reliable Communication) и крупномасштабные системы межмашинной связи (mMTC - Massive Machine Type Communication).

Усовершенствованная подвижная широкополосная связь. Сценарий для eMBB рассматривает варианты использования, ориентированные на человека, для доступа к мультимедийному контенту, услугам и данным, которые охватывают ряд примеров, которые имеют разные требования, такие как широкое покрытие, как в сотовой связи, и обеспечение подключения через точку доступа.

Сверхнадежная передача данных с ультрамалой задержкой. Сценарий для uRLLC предъявляет строгие требования к таким аспектам, как пропускная способность, время ожидания и доступность. Конкретными примерами для такого сценария могут быть беспроводное управление промышленным производством или производственными процессами, удаленная медицинская хирургическая

помощь, автоматизация распределения электроэнергии в умных сети электроснабжения (smart grid) и безопасность на транспорте.

Крупномасштабные системы межмашинной связи. Вариант использования mMTC характеризуется очень большим количеством подключенных устройств, обычно передающих относительно небольшой объем данных, не чувствительных к задержкам. Устройства должны быть недорогими и иметь очень долгое время автономной работы от батареи.

Следует отметить, что предложенные сценарии не являются всеохватывающими, и предполагается возникновение дополнительных сценариев использования, которые на данный момент невозможno предсказать.

Наверное, наиболее значимым в данной рекомендации является выделение восемь параметров, характеризующих функциональные возможности IMT-2020.

1. *Пиковая скорость передачи данных (Peak data rate):* Максимальная достижимая скорость передачи данных для одного пользователя или устройства в идеальных условиях (Гбит/с). Ожидается, что пиковая скорость передачи данных IMT-2020 для eMBB достигнет 10 Гбит/с. Однако при определенных условиях и сценариях IMT-2020 будет поддерживать пиковую скорость передачи данных до 20 Гбит/с.

2. *Скорость передачи данных через пользовательский интерфейс (User-experienced data rate):* Скорость передачи данных, достижимая во всей зоне покрытия для одного пользователя или устройства подвижной связи (Мбит/с или Гбит/с). Для случаев покрытия больших площадей, например, в городских и пригородных районах, ожидается, что пользовательская скорость передачи данных будет 100 Мбит/с. В случае работы через точки доступа ожидается, что скорость передачи данных по через пользовательский интерфейс достигнет более высоких значений (например, 1 Гбит/с в помещении).

3. *Задержка (Latency):* Обусловленный радиосетью промежуток времени между моментом отправки пакета источником и моментом его приема получателем (мс). IMT-2020 сможет обеспечить задержку по радиоканалу в 1 мс, способную поддерживать услуги с очень низкими требованиями к задержке.

4. *Мобильность (Mobility)*: Максимальная скорость, при которой может быть достигнуто заданное качество обслуживания и бесшовная передача данных между радиоузлами, которые могут относиться к разным уровням и технологиям радиодоступа (многоуровневые технологии/RAT) (км/ч). Ожидается, что IMT-2020 обеспечит высокую мобильность до 500 км/ч с приемлемым уровнем QoS. Это, в частности, предусмотрено для использования в высокоскоростных поездах.

5. *Плотность подключения (Connection density)*: Общее количество подключенных и доступных устройств на единицу площади (кв. км). Ожидается, что IMT-2020 будет поддерживать плотность соединений до 106/кв. км, например, в сценариях mMTC.

6. *Энергетическая эффективность (Energy efficiency)*: в зависимости от взгляда определяется со стороны сети как количество полученной от пользователей или переданной пользователям информации в битах на единицу энергопотребления в сети радиодоступа (RAN) (бит на джоуль), а со стороны устройства как количество информации в битах на единицу энергопотребления в модуле связи (бит на джоуль). Энергопотребление для RAN IMT-2020 не должно быть больше, чем у сетей IMT, развернутых сегодня, при обеспечении расширенных возможностей.

7. *Эффективность использования спектра (Spectrum efficiency)*: Средняя скорость передачи данных на единицу ресурсов спектра и на соту (бит/с/Гц). Ожидается, что эффективность использования спектра IMT-2020 будет в три раза выше по сравнению с IMT-Advanced для eMBB.

8. *Пропускная способность по географическому признаку (Area traffic capacity)*: Суммарная пропускная способность в географическом районе (Мбит/с/м²). Ожидается, что IMT-2020 будет поддерживать пропускную способность 10 Мбит/с/м², например, для беспроводных точек доступа.

Данная Концепция дает посыл об открытости МСЭ и сообщества к дальнейшему изучению IMT-2020. Планируемые характеристики систем IMT-2020, являются лишь предметом исследований и изучения и, возможно, будут

разрабатываться в последующих Рекомендациях МСЭ-R. Кроме того, в дальнейшем они могут быть пересмотрены в свете будущих исследований. Также для поддержки вновь появляющихся сценариев и применений в период до и после 2020 года предполагается, что развитие систем IMT-2020 приведет к появлению улучшенных характеристик.

Выделены главные направления для дальнейших исследований:

- радиоинтерфейс(ы) и их функциональная совместимость;
- проблемы, связанные с сетями доступа;
- вопросы, связанные с использованием спектра;
- характеристики трафика.

В завершении рассмотрения деятельности МСЭ-R в области разработки документов по стандартизации IMT-2020, хотелось бы отметить следующие интересные Отчеты и Рекомендации МСЭ-R.

Отчет МСЭ-R M.2410-0 (11/2017) «Минимальные требования, относящиеся к техническим характеристикам радиоинтерфейса (-ов) IMT-2020».

В Рекомендации МСЭ-R M.2083 определены восемь ключевых параметров, характеризующих функциональные возможности IMT-2020, которые составляют основу 13 технических требований к характеристикам, представленных в данном Отчете. Описанные ключевые требования, касаются минимальных технических характеристик технологий радиоинтерфейсов-кандидатов IMT-2020. Кроме того, определенные в этом документе, ключевые минимальные технические требования к рабочим характеристикам, предназначены для единообразного определения, спецификации и оценки возможных технологий радиоинтерфейсов (RIT) или набора технологий радиоинтерфейсов (SRIT) IMT-2020 в связи с разработкой Рекомендаций и Отчетов МСЭ-R с подробными спецификациями IMT-2020. Целью этих требований является обеспечение того, чтобы технологии IMT-2020 могли выполнять задачи IMT-2020, и установить конкретный уровень производительности, который должен достигнуть каждой предлагаемой RIT/SRIT, чтобы быть признанной МСЭ-R походящей для IMT-2020.

Отчет МСЭ-Р М.2411-0 (11/2017) «Требования, критерии оценки и шаблоны представления для разработки IMT-2020».

В этом отчете рассматриваются требования, критерии оценки и шаблоны представления для разработки Рекомендаций и Отчетов МСЭ-Р с подробными спецификациями IMT-2020, включающие:

- а) требования к услугам, спектру и техническим характеристикам предлагаемых RIT/SRIT в качестве кандидатов для IMT-2020;
- б) руководящие принципы оценки, включая критерии оценки и процедуры для оценки представленных технологий для IMT-2020;
- с) шаблоны представления, которые разработчики должны использовать для организации информации, которая требуется при представлении технологии-кандидата для оценки.

Выходом этой продолжительной работы в период с 2015 по 2020 года стала новая Рекомендация МСЭ-Р М.2150-0 (02/2021) «Детальные спецификации наземных радиоинтерфейсов Международной мобильной связи-2020 (IMT-2020)», которая рекомендовала 3 новых радиоинтерфейса («3GPP 5G-SRIT», поддерживающий технологии LTE и NR, и «3GPP 5G-RIT», только на базе технологии NR, разработанные на базе предложений 3GPP, а также «5Gi», на базе разработок Сообщества разработки стандартов электросвязи Индии - TSDSI) и как полный набор стандартов для подробных спецификаций наземных радиоинтерфейсов IMT 2020 и представила детальные описания этих радиоинтерфейсов в Приложении к ней.

1.3.2. Стандартизация сетевых аспектов IMT-2020

Для начала работ по стандартизации систем 5G/IMT-2020, для анализа принципов взаимодействия появляющихся технологий 5G/IMT-2020 в будущих сетях в качестве предварительного анализа инноваций в организации сетей,

необходимых для обеспечения развития систем и определения дальнейших направлений исследования в Секторе стандартизации электросвязи МСЭ в рамках 13-й Исследовательской комиссии (ИК13 МСЭ-Т) в мае 2015 года была создана Оперативная группа по сетевым аспектам IMT-2020 (ОГ IMT-2020). Оперативной группе была поставлена задача - подготовить материалы анализа неохваченных вопросов по IMT-2020 с целью определения соответствующей области применения Рекомендаций МСЭ-Т по фиксированной сети IMT-2020, охватывая технические аспекты высокого уровня, такими как варианты использования, требования и другие аспекты. Группа отработала 2 срока, завершив работу в декабре 2016 года. В частности, изучались вопросы:

- улучшения аспектов, связанных с программным обеспечением сетей и информационно ориентированных сетей (ICN);
- доработки и развития сетевой архитектуры IMT-2020;
- изучения сетевой нарезки⁵ для транспортных каналов к радио модулям (fronthaul) и сетевому ядру (backhaul) сети IMT-2020;
- определения новых моделей трафика и соответствующих применимых аспектов QoS и OAM в сети IMT-2020.

А также последующий анализ лакун и определение необходимых областей для стандартов в сетях, не использующих радиодоступ и поддерживающих IMT-2020, путем сбора, классификации и предложения высокоуровневых вариантов использования для IMT-2020 и их требований, а также предложения и описания требований высокого уровня и других аспектов таких сетей с поддержкой IMT-2020.

Результатами работы ОГ IMT-2020 стала подготовка следующих выходных документов:

- Термины и определения для IMT-2020 в МСЭ-Т;
- Применение перехода сети в IMT-2020 в программируемую плоскость (софтверизация);

⁵ разделение сетевых элементов на сетевые слои (network slicing)

- Требования IMT-2020 с точки зрения сети;
- Структура сетевой архитектуры IMT-2020;
- Требования к конвергенции фиксированной и подвижной связи IMT-2020;
- Объединенное сетевое интегрированное облако для конвергенции фиксированной мобильной связи;
- Требования к управлению сетью IMT-2020;
- Структура управления сетью для IMT-2020;
- Применение информационно-ориентированных сетей (ICN) в IMT-2020.

Поскольку ИК13 МСЭ-Т разрабатывает проекты стандартов (рекомендаций) для 5G/IMT-2020 по сетевой архитектуре, сетевым возможностям, сетевой нарезке, сетевой оркестровке, управлению сетью и инфраструктурой для обеспечения качества обслуживания, то многие из этих наработок нашли отражение в разработанных в дальнейшем Рекомендациях МСЭ-Т, таких как Y.3100 «Термины и определения для сетей IMT-2020» (09/2017), Y.3101 «Требования сети IMT-2020» с дополнением (04/2018), Y.3102 «Структура сети IMT-2020» с дополнением (05/2018), Y.3104 «Архитектура сети IMT-2020» (12/2018), Y.3130 «Требования конвергенции фиксированной мобильной связи в IMT-2020» (09/2018), Y.3111 «Требования к управлению и оркестровке сети IMT-2020» (09/2018), Y.3112 «Структура для поддержки сетевой нарезки в сети IMT-2020» (12/2018), Y.3106 «Функциональные требования к качеству обслуживания (QoS) для сети IMT-2020» (04/2019), Дополнение 64 МСЭ-Т серии Y.3100 «Информация о вариантах использования и аспектах миграции IMT-2020» (07/2020), Y.3157 «Конфигурация сетевого фрагмента нарезки IMT-2020» (02/2021).

Рассмотрим некоторые из ключевых Рекомендаций МСЭ-Т.

1.3.3. Стандартизация IMT-2020: требования к сетям

Новые сети 5G/IMT-2020 должны отличаться от сетей четвертого поколения не только с точки зрения дальнейшего улучшения характеристик радиосвязи, но и значительным повышением гибкости сквозного соединения, чтобы реализовать основные сценарии и множество новых возможностей в сети IMT-2020, включая функционал сетевой нарезки. Эта гибкость должна быть в значительной степени обеспечена за счет внедрения подхода реализации на программном уровне (софтверизация) функций в сетевых компонентах IMT-2020. Такие технологии, как программно-определенные сети (SDN), виртуализация сетевых функций (NFV) и облачные вычисления вместе и должны реализовать эту беспрецедентную гибкость в сети IMT-2020.

В Рекомендации МСЭ-Т Y.3101 определены следующие общие принципы и требования к сетям IMT-2020.

Разнообразие услуг. Сеть IMT-2020 должна поддерживать диверсифицированные услуги, учитывающие широкий спектр характеристик и поведения трафика. Это предполагает поддержку огромного количества и широкого разнообразия объектов связи, таких как пользовательские устройства, периферийные устройства и устройства МТС.

Общая опорная сеть с минимальной зависимостью от технологии сети доступа. В предыдущих сетях IMT внедрение новой технологии для сети доступа сопровождалось созданием новым типом опорной сети, и вытекающими последствиями в виде необходимости обеспечивать взаимодействие между новой и существующей опорными сетями для обеспечения совместного функционирования и плавного перехода, что всегда представляла значительную техническую проблему.

Гибкость и программируемость. Сеть IMT-2020 должна быть гибкой и расширяемой, чтобы адаптивно справляться с различными, а иногда даже противоречащими друг другу требованиями к услугам (eMBB, URLLC, mMTC), чтобы не развертывать отдельные выделенные сети для каждой конкретной услуги. При этом должно поддерживаться четкое разделение между функциями уровня управления и пользователя, что позволит сделать сеть IMT-2020 гибкой и

расширяемой. Сеть IMT-2020 должна поддерживать программируемое распределение и конфигурацию функций, услуг и приложений, а также динамическое масштабирование и горизонтальное масштабирование. Кроме того, сеть должна поддерживать виртуализацию ресурсов, связанных с сетевыми функциями, а также поддерживать формирование по запросу нескольких сегментов сети (элементы сетевой нарезки) с различными характеристиками.

Распределенная сетевая архитектура. Сеть IMT-2020 должна быть достаточно гибкой, чтобы справляться со стремительным ростом трафика от новых требовательных к пропускной способности услуг, таких как телевидение UHD (TV), VR/AR, видеоконференцсвязь или телемедицина. Существующая жестко централизованная архитектура будет не в состоянии удовлетворять требованиям, связанным с резким увеличением трафика мобильных данных. Таким образом, возникает необходимость располагать шлюзы опорной сети ближе к краям сети, что приведет к распределенной сетевой архитектуре.

Обработка данных в сети. Сеть IMT-2020 должна быть спроектирована и реализована для эффективной обработки огромных объемов данных, таким образом, чтобы иметь механизмы, позволяющие пользователям быстро извлекать данные независимо от их местонахождения. Обработка данных в сети может предоставить средства для обработки данных в масштабе сети и сервисов приложений в сетевых узлах.

Управление сетью. В соответствии с внедрением подхода к программному обеспечению сети в сетевых компонентах IMT-2020, функции управления сетью должны иметь возможность управлять как физическими, так и виртуальными ресурсами. Сеть IMT-2020 должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать простоту эксплуатации и управления сетью, несмотря на ее повышенную сложность из-за программного обеспечения сети. Кроме того, сеть должна поддерживать стандартизованные общие протоколы работы и управления. Управление и оркестровка сети IMT-2020 должны интегрировано поддерживать как существующие сети, так и будущие сети.

Динамическое и интеллектуальное управление передачей пользовательских данных. Сеть IMT-2020 должна обеспечивать динамическое управление транспортировкой пользовательских данных, адаптируясь к изменению требований к услугам, связанных с производительностью транспортировки пользовательских данных. Сеть должна обеспечивать динамические и интеллектуальные механизмы маршрутизации и пересылки данных для адаптации к изменяющимся условиям сети.

Надежность и отказоустойчивость. Сеть IMT-2020 должна быть спроектирована и эксплуатироваться с надежностью и отказоустойчивостью. Надежность и отказоустойчивость сети IMT-2020 не должны подвергаться риску из-за обновлений программного или аппаратного обеспечения сети.

Безопасность и защита личных данных. Сеть IMT-2020 должна поддерживать безопасность и защиту персональных данных, включая учет конфиденциальности, целостности и доступности.

Энергоэффективность. Сеть IMT-2020 должна быть спроектирована с целью достижения энергоэффективности в работе всей сети, включая минимизацию энергопотребления пользовательского оборудования.

Кроме того, данная рекомендация МСЭ-Т устанавливала требования для общих аспектов сети IMT-2020, не связанных с радиотехнологиями, как с точки зрения услуг, рассмотренных в Рекомендации МСЭ-R M.2083, так и с точки зрения работы сети.

Для услуг из сценария eMBB были определены следующие требования сети IMT-2020:

- поддержка возможности, позволяющей справиться с резким ростом трафика данных подвижной связи;
- обеспечение гибкости и отказоустойчивости для поддержки услуг со сверхвысокой пропускной способностью;
- обеспечивать эффективную поддержку локальной разгрузки;
- поддержка различных технологий мобильной транзитной сети, чтобы справляться с экстремальным трафиком или плотностью соединений.

Для услуг из сценария ULLRC были определены следующие требования сети IMT-2020:

- поддержка повышенной надежности обслуживания в соответствии с требованиями обслуживания;
- обеспечение улучшенных характеристик обслуживания за счет уменьшения сквозной (E2E) задержки в соответствии с требованиями обслуживания.

Для услуг из сценария mMTC были определены следующие требования сети IMT-2020:

- эффективная поддержка огромного количества устройств МТС;
- обеспечивать минимизацию перегрузки трафика, которая может быть вызвана огромным количеством устройств МТС;
- поддержка согласованного сквозного QoS даже при наличии большого количества одновременных соединений.

Эксплуатационные требования к сетям IMT-2020 определены [105] для следующих аспектов:

- гибкость и программируемость сети;
- конвергенция фиксированной мобильной связи;
- расширенное управление мобильностью;
- представление возможностей сети;
- идентификация и аутентификация;
- безопасность и защита личных данных;
- эффективная сигнализация;
- контроль качества обслуживания;
- управление сетью;
- зарядка;
- взаимодействие с сетями, не поддерживающими IMT-2020;
- развертывание и миграция сети IMT-2020.

Таким образом, новая сетевая архитектура IMT-2020 должна быть независимой от сети доступа и иметь опорную сеть, общую для технологий радиодоступа (RAT) для IMT-2020, а также существующих фиксированных и беспроводных сетей. Опорная сеть IMT-2020 должна реализовывать общий механизм управления, не связанным с технологиями сети доступа. Распределенная сетевая архитектура должна привести к значительному сокращению транзитного трафика и трафика базовой сети, позволяя размещать контент-серверы ближе к устройствам конечных пользователей, а также будет выгодна с точки зрения задержки обслуживания.

Ожидается, что применение технологий искусственного интеллекта в сети IMT-2020 предоставит многообещающие вспомогательные инструменты для - но не ограничиваясь - расширенного управления сетью и операций, включая механизмы самовосстановления, самоорганизации, самоадаптации и самооптимизации.

Архитектура сети была рассмотрена выше, поэтому далее перейдем к проблемам качества обслуживания.

1.3.4. Стандартизация IMT-2020: качество обслуживания

Функциональные требования к качеству обслуживания (QoS) для сети Международной мобильной электросвязи 2020 (IMT-2020) закреплены в Рекомендации МСЭ-Т Y.3106, принятой в ИК13 МСЭ-Т в апреле 2019 года.

Рассматривая обзор требований к QoS в Рекомендации МСЭ-Т [107] так же основываться на 3 базовых сценариях использования IMT-202, определенных в Рекомендации МСЭ-Р M.2083: eMBB, mMTC и URLLC. Типичными приложениями для них являются виртуальная/дополненная реальность (VR/AR), потоковое видео 4K и многопользовательская 3D-трансляцию в прямом эфире, коммуникация транспортного средства с любыми объектами (V2X) и межмашинное взаимодействие (M2M) по сети IMT-2020.

Выделенные в Рекомендации МСЭ-R M.2083 функциональные возможности IMT-2020 определены как ключевые показатели эффективности (КП): пиковая скорость передачи данных, скорость передачи данных через пользовательский интерфейс, задержка, мобильность, плотность подключения, энергетическая эффективность, эффективность использования спектра, пропускная способность по географическому признаку.

Кроме того, Рекомендация МСЭ-T Y.3106 описывает возможности QoS высокого уровня сети IMT-2020, которые включают: планирование QoS, обеспечение QoS, мониторинг QoS и оптимизацию QoS. Основываясь на этих возможностях, Рекомендация МСЭ-T Y.3106 определяет функциональные требования QoS для сети IMT-2020.

Согласно требований, представленных в Рекомендации МСЭ-T Y.3101, сеть IMT-2020 должна поддерживать унифицированные механизмы управления QoS и сквозного QoS независимо от технологий доступа к сети. Рекомендуется, чтобы сеть IMT-2020 поддерживала инициируемые пользователем механизмы управления QoS, чтобы поддерживать производительность различных услуг в соответствии со спецификацией уровня обслуживания (SLS). Все сервисы и сценарии использования (eMBB, URLLC и др.) поддерживаются разными экземплярами сетевого сегмента (сетевого слоя) в течение жизненного цикла услуги. В жизненном цикле услуг и сетевой нарезки (сегментации) также участвует управление жизненным циклом QoS, которое делится на четыре взаимозависимые категории: планирование QoS сети IMT-2020, обеспечение QoS, мониторинг QoS и оптимизация QoS (рис.1.5).

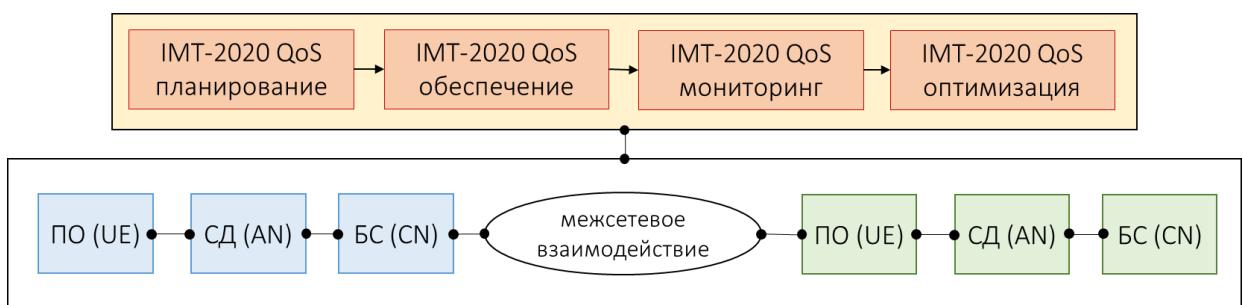


Рис.1.5 – Возможности QoS высокого уровня в сети IMT-2020

Планирование QoS сети IMT-2020 – проведение оценки покрытия сети, требований к емкости и ресурсам. Это требует знания реальных оценок трафика и топологии сети для каждой анализируемой области, использования точных моделей для передачи сигналов и пользовательских данных и реализации фактических характеристик, функций и параметров сетевых элементов.

Обеспечение QoS сети IMT-2020 – функция преобразования соглашения об уровне обслуживания (SLA) ориентированного на услуги в описания сегментов сети, ориентированных на ресурсы, унифицированные и управляемые сквозным QoS. Также оно предполагает взаимодействие и соотнесение для QoS, а кроме того эффективное обеспечение сквозного качества обслуживания.

Оптимизация QoS сети IMT-2020 – процесс улучшения общего качества сети, пользовательского QoE и обеспечения эффективного использования сетевых ресурсов.

Оптимизация предполагает наличие мониторинга QoS IMT-2020: измерения, анализ результатов измерений, обнаружение и прогнозирование аномалий, а также обновление параметров конфигурации сети.

В Рекомендации определен функциональные требования QoS для ориентированного на услуги сетей IMT-2020 по всем этим 4 блокам для выполнения требуемых KPI услуг.

Для общего понимания содержания таких требований приведем лишь некоторые из них:

- Планирование QoS:
 - требуется поддержка динамического моделирования разнообразных сценариев использования IMT-2020 (eMBB, MTC и URLLC);
 - требуется точное преобразование сервисных моделей в модели трафика;
 - рекомендуется поддерживать маршрутизацию с учетом QoS для удовлетворения различных требований к услугам по задержке, полосе пропускания, пропускной способности, балансировке нагрузки, стоимости и др.
- Обеспечение QoS:

- требуется поддержка эффективного обеспечения сквозного QoS с возможностями глобального просмотра сети, программными сетевыми функциями по запросу, автономным управлением сетевыми сегментами (нарезкой) и оркестровкой;
- требуется поддержка унифицированного и независимого от доступа (фиксированный или мобильный доступ) управления QoS с точки зрения базовой сети (БС/CN);
- требуется поддержка надлежащего взаимодействия QoS и отображение между пользовательским оборудованием (UE), сетью доступа (AN), БС и другими сетями передачи данных;
- требуется поддерживать обеспечение QoS, которое включает в себя классификацию потока, маркировку, предотвращение перегрузки, формирование очереди и планирование очереди на основе правила (правил) QoS;
- рекомендуется поддерживать осведомленность о QoE, которая может динамически адаптировать требования пользовательского QoE к параметрам QoS.
 - Мониторинг QoS:
 - требуется предоставить механизм для поддержки мониторинга сквозного QoS в реальном времени;
 - требуется предоставить интерфейс к приложению для мониторинга QoS (например, для инициирования мониторинга QoS, запроса параметров QoS, событий или информации протоколирования);
 - требуется ответить на запрос авторизованного пользователя для предоставления информации мониторинга QoS в реальном времени в течение определенного времени после получения запроса;
 - требуется предоставлять в реальном времени параметры QoS и информацию о событиях авторизованному приложению или сетевому объекту;
 - рекомендуется предоставлять уведомление о событиях QoS авторизованным пользователям в соответствии с заранее определенными шаблонами (например, каждый раз, когда полоса пропускания падает ниже заранее определенного предела)

для параметров QoS, авторизованный пользователь уведомляется, и событие регистрируется).

- Оптимизация QoS:
 - требуется поддержка интеллектуального обнаружения аномалий QoS на основе анализа данных QoS;
 - требуется поддержка прогнозирования трафика на основе анализа данных QoS;
 - требуется поддержка оптимизации QoS для обеспечения и гарантии желаемого уровня производительности услуги в течение жизненного цикла услуги.

1.3.5. Искусственный интеллект в IMT-2020

Сегодня, на фоне развития цифровых технологий и сетей связи мир переживает бум искусственного интеллекта (ИИ), включая практическое использование «машинного обучения» (ML) помогает нам автоматически определять и изучать закономерности и правила из больших объемов данных («большие данные») на основе определенных критериев. Эта технология позволяет устанавливать более подходящие правила на основе изучения данных и делать более точные суждения по необходимым действиям после того, как будут определены критерии оценки. Кроме того, в рамках этой концепции развивается «глубокое обучение (deep learning)», при котором ИИ учится сам по себе и накапливает знания о шаблонах и правилах без указания конкретных критериев.

Количество настраиваемых параметров в сотовых сетях существенно растет при переходе от одного поколения к другому. Например, в типичных узлах сети связи поколений 3G и 4G число этих параметров составляет около 1000 и 1500 соответственно. Для сетей 5G/IMT-2020, вероятно, будет иметь 2000 или более параметров [96]. Кроме того, в отличие от сетей предыдущего поколений, которые

предоставляют статические услуги, в сетях следующего поколения, необходимо поддерживать постоянно развивающиеся новые услуги и сценарии, а также обеспечивать достаточный сетевой ресурс и механизмы его сопровождения, гарантируя при этом гибкость и надежность. Это требует от сетей 5G/IMT-2020 понимания вариаций параметров, изучения неопределенностей, настройки параметров сети, прогнозирования ближайших и будущих проблем и предоставления своевременных решений путем взаимодействия с окружающей средой.

Используя алгоритмы машинного обучения, можно находить корреляции и зависимости в многочисленных параметрах оборудования, ошибках, событиях, счетчиках, изменениях, обратной связи с абонентами и даже внешних факторах. В части эксплуатации сетей ИИ/ML применим для:

- идентификации корневых причин аварий (Root Cause Analysis);
- заблаговременного предсказывания ошибок на сети (Fault Prediction);
- моделирования поведения сети при внесении изменений;
- оценки времени восстановления;
- оптимизации потребления электроэнергии.

В 2018 году первые опыты такого применения на оборудовании одной из крупных компаний, производителе оборудования 5G⁶, заключались в предсказывании аварий на мобильной сети. В результате используемый алгоритм ИИ по итогам месяца его обучения выявлял, на каком из сегментов произойдет авария, с более чем 85% точностью.

Кроме того, сетевая архитектура для сетей 5G/IMT-2020 и последующих технологий неизбежно будет неоднородной и многоуровневой с ультраплотным развертыванием малых сот/точек доступа для достижения, ожидаемого многократного увеличения пропускной способности с минимальными затратами [92]. Например, смешанное использование распланированных и имеющих

⁶ <https://blog.huawei.ru/technology/5g/ai-%D0%B2-%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B8-5g-%D1%81%D0%B5%D1%82%D1%8F%D0%BC%D0%B8>

централизованное управление базовых станций (макро-БС) и произвольно развернутых точек доступа для обеспечения качества и разгрузки беспроводной связи или фемто-БС в сверхплотной гетерогенной сети будет приводить к трудно предсказуемым сценариям работы, которые невозможно заранее учесть на этапе проектирования сети. Такая форма организации сети 5G/IMT-2020 или последующих поколений требует наличия функции самоорганизации, настройки и восстановления в зависимости от условий эксплуатации за счет тесной координации между различными узлами, слоями и уровнями связи, что с учетом множественности параметров как это уже было отмечено выше, фактически невозможно без ИИ.

В [117] было всесторонне рассмотрено использование ИИ в сетях связи, объединяющее машинное обучение, анализ данных и методы с обработкой естественных языков (NLP) для повышения эффективности сетей связи и использование этих методов для эффективного сбора данных и приобретения знаний, обнаружение, сетевого планирование, эксплуатация и управление сетями следующего поколения. В рамках такого рассмотрения авторы определили следующие направления применения ИИ:

- сбор данных и приобретение знаний;
- сбор данных с учетом контекста из одного/нескольких источников;
- кодированное (адаптивное) кэширование;
- создание онтологии с учетом семантики (KB) из сетевых данных;
- надежное обнаружение знаний из ошибочных (отсутствующих) данных;
- сетевое планирование:
 - развертывание узлов и выделение радиочастот;
 - кэширование и вычисление размещения и обновления контента;
 - моделирование и прогноз энергопотребления;
 - процедура настройки параметров и услуг;
- эксплуатация и управление сетью:

- распределение ресурсов: технология радиодоступа (RAT) и выбор канала, маршрутизация пакетов, распределенное хранение и обработка, планирование пакетов, поддерживающих несколько RAT;
- безопасность: обнаружение вторжений и спуфинг-атак;
- задержка: периферийные (границевые) вычисления и планирование с учетом контекста.

Уже очевидно, что применение ИИ/ML в сетях связи является необходимостью, которая подлежит систематизации и стандартизации наравне с вопросами стандартизации сетей 5G/IMT-2020 и последующих технологических поколений. Стандартизация интерфейсов, процессов и форматов данных имеет большое значение в коммуникациях, поскольку увеличивает надежность, функциональную совместимость и модульность системы и ее соответствующих компонентов. Стандартизованные форматы могут потребоваться для определения того, как обучать, адаптировать, сжимать и обмениваться отдельными алгоритмами машинного обучения, а также для обеспечения правильного взаимодействия нескольких алгоритмов машинного обучения друг с другом и выполнения определенных требований к безопасности или защите личной информации.

Кроме того, можно ожидать появления большого количества новых приложений ИКТ, если сложность современных алгоритмов машинного обучения, особенно глубоких нейронных сетей, может быть снижена до уровня, позволяющего использовать их в вычислительных/окружающая среда с ограниченным энергопотреблением. В секторе ИКТ многие компании стремятся определить, как оптимально использовать ИИ/ML. И на этом фоне МСЭ старается играть ведущую роль в стремлении понять, как оптимально использовать ИИ/ML в будущих сетях, включая сети 5G.

Отвечая на эти вызовы в ноябре 2017 года в Женеве на собрании 13-ой Исследовательской комиссии МСЭ-Т была создана оперативная (фокус) группа МСЭ-Т по машинному обучению для сетей будущего, включая 5G (ОГ-ML5G). Перед группой была поставлена задача провести анализ ML для будущих сетей,

чтобы выявить соответствующие лакуны и проблемы в деятельности по стандартизации, связанные с этой темой.

В настоящее время ОГ-ML5G подготовила ряд спецификаций, которые ИК13 МСЭ-Т может взять за основу для дальнейшего изучения и формирования рекомендаций и стандартов:

- Спецификация ОГ-ML5G: «Требования, архитектура и конструкция для оркестратора функций машинного обучения»⁷;
- Спецификация ОГ-ML5G: «Структура обслуживания для моделей машинного обучения (ML) в будущих сетях, включая IMT-2020»⁸;
- Спецификация ОГ-ML5G: «Экспериментальная среда (sandbox) машинного обучения для будущих сетей, включая IMT-2020: требования и структура архитектуры»⁹;
- Спецификация ОГ-ML5G: «Сквозное управление сегментами сети и оркестровка на основе машинного обучения»¹⁰;
- Спецификация ОГ-ML5G: «Нарезка сети для поддержки вертикалей на основе когнитивной структуры»¹¹.

В настоящее время МСЭ-Т выпустила следующие документы на основе наработок ОГ-ML5G, подготовленные и принятые в ИК13 МСЭ-Т, которые станут частью набора «инструментов» по включению машинного обучения в сети связи.

Рекомендация МСЭ-Т Y.3170 «Требования по обеспечению качества обслуживания на основе машинного обучения для сети IMT-2020».

Одна из первых рекомендаций МСЭ-Т по вопросу ИИ/ML, принятая в сентябре 2018 года [108], и предлагающая функциональную модель обеспечения качества

⁷ <https://extranet.itu.int/sites/itu-t/focusgroups/ML5G/layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=%7bFF1D3964-1562-41FF-B710-D0674281764F%7d&file=ML5G-0-038.docx&action=default>

⁸ <https://extranet.itu.int/sites/itu-t/focusgroups/ML5G/layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=%7bCF7FF25F-49E9-4EB3-B3E5-EFDB8FD93F57%7d&file=ML5G-0-036.docx&action=default>

⁹ <https://extranet.itu.int/sites/itu-t/focusgroups/ML5G/layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=%7bDE867B22-A47D-4261-9A74-9F89DE6EF69C%7d&file=ML5G-0-035.docx&action=default>

¹⁰ <https://extranet.itu.int/sites/itu-t/focusgroups/ML5G/layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=%7b9572D359-9A94-4AF4-BD93-FD25CB175841%7d&file=ML5G-0-037.docx&action=default>

¹¹ <https://extranet.itu.int/sites/itu-t/focusgroups/ML5G/layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=%7bA3B49DCC-CEFA-4ED6-9B4F-65099CE10D26%7d&file=ML5G-0-039.docx&action=default>

обслуживания на основе машинного обучения для сетей 5G/IMT-2020, которые должны обеспечивать производительность сети и различные требования по качеству обслуживания (QoS)/качеству восприятия пользовательского опыта (QoE) для различных сценариев применений, таких как связь машинного типа. (МТС), улучшенная мобильная широкополосная связь (eMBB) и сверхнадежная связь с ультра малой задержкой (uRLLC).

Принимая во внимание огромный разброс требований к QoS (от применений межмашинного взаимодействия (M2M) по сети IMT-2020 до многопользовательскую 3D-трансляцию в прямом эфире, и т.п.) [120] должны поддерживаться следующие возможности в механизмах машинного обучения:

- 1) события, связанные с QoS, которые произошли в прошлом, могут быть восстановлены автоматически и достоверно;
- 2) текущие события, связанные с QoS, могут быть точно и своевременно обнаружены для запуска автоматических и немедленных действий;
- 3) будущие события, связанные с QoS, могут быть предсказаны с высокой степенью уверенности.

Механизмы машинного обучения, способные научить компьютер изучать знания с использованием данных без явного программирования, продемонстрировали свои возможности для решения сложных задач, таких как распознавание изображений и распознавание речи. Механизм машинного обучения, который может интеллектуально изучать сетевую среду и реагировать на динамические ситуации, также может быть применен к сетевым задачам. Используя изученные отношения, эти механизмы могут обнаруживать текущие аномалии QoS и затем запускать автоматическое смягчение последствий или предлагаемые действия. Механизмы машинного обучения также могут с высокой степенью достоверности прогнозировать будущие аномалии, связанные с QoS.

Кроме того, в Рекомендации МСЭ-Т Y.3170 описываются функциональные компоненты, такие как: сбор данных QoS; предварительная обработка данных; хранение данных, моделирование и обучение; Обнаружение и прогнозирование аномалий QoS; принятие решений по политике QoS; исполнение; и отчетность.

Основываясь на возможностях и функциях, описанных в функциональной модели, Рекомендация МСЭ-Т Y.3170 определяет требования высокого уровня и функциональные требования для обеспечения QoS на основе машинного обучения для сети IMT-2020.

Позднее в конце 2019 года было разработано [116] *Добавление 55 к серии Y.3170 МСЭ-Т - «Машинное обучение в будущих сетях, включая IMT-2020: сценарии использования»*, в котором были проанализированы варианты использования машинного обучения в будущих сетях, включая IMT-2020, и были представлены в едином формате. Он предоставляет описания вариантов использования и указывает базовый набор возможных требований для каждого варианта использования. Каждый вариант использования проиллюстрирован базовым набором возможных связанных требований (критические требования, ожидаемые требования, требования к добавленной стоимости). Требования были организованы в соответствии со сбором данных, хранением и обработкой данных, применением результатов машинного обучения. Все приведенные варианты использования разделены на категории.

– Слой сетевой нарезки и другие варианты использования, связанные с сетевыми услугами:

1. Когнитивные гетерогенные сети и самоорганизующиеся сети (SON) на основе ML;
2. Управление радиоресурсами для сетевой нарезки (RRM-NS);
3. Сквозная автоматизация работы сети: конструкция услуг;
4. Сквозная автоматизация работы сети: адаптация сетевых ресурсов;
5. Сквозная автоматизация работы сети: логическая конструкция и развертывание сети;
6. Сквозная автоматизация работы сети: обнаружение и устранение неисправностей;
7. Сетевая нарезка для конкретных приложений с помощью ML в сети;
8. Зеркало интеллектуального трафика - сетевая услуга на основе ML;
9. Сквозное сегментирование (нарезка) сети на основе ML для 5G;

10. Максимизация использования сегментированных (нарезанных) транзитных линий (backhaul) на основе ML;
 11. Энергоэффективная доверенная многопользовательская среда в сети IMT-2020;
 12. Гарантия соглашения об уровне обслуживания (SLA) для сетевой нарезки на основе ML;
 13. Управление услугами для умных городов;
 14. Автоматизированное тестирование сервисов.
- Сценарии использования, связанные с пользовательской плоскостью:
1. Классификация трафика;
 2. Долгосрочное прогнозирование трафика
 3. Экстренные услуги на базе ML.
- Сценарии использования, связанные с приложением:
1. Оптимизация окна протокола управления передачей с помощью сети доступа;
 2. Функция интеллектуального хранения и удержания;
 3. Управляемая данными архитектура для ML на границе.
- Сценарии использования, связанные с сигнализацией или управлением:
1. Прогнозирование модели мобильности на основе ML;
 2. Баланс нагрузки и разделение/объединение сот;
 3. Оптимизация QoE на основе ML;
 4. Управление сетью на основе ML для Индустрии 4.0;
 5. Корреляции на основе ML между транспортными KPI и радио KPI;
 6. Сквозное управление сетью на основе ML
 7. Моделирование каналов и прогнозирование каналов с помощью ML;
 8. Оптимизация адаптации канала на основе ML.
- Сценарии использования, связанные с безопасностью:
1. Борьба с использованием поддельных устройств ИКТ - сетевая услуга с использованием машинного обучения;

2. Идентификация незаконных обменов на основе машинного обучения с использованием SIM-боксов.

Рекомендация МСЭ-Т Y.3172 «Архитектурная основа для машинного обучения в будущих сетях, включая IMT-2020».

Другим основополагающим документом в области использования ИИ/ML в сетях 5G/IMT-2020 [109] является также разработанная на основе материалов ОГ-ML5G Рекомендация МСЭ-Т Y.3172, которая определяет архитектурную основу для машинного обучения в будущих сетях, включая IMT-2020. Основываясь на высокоуровневых архитектурных требованиях, такая структура сначала предоставляет общий словарь и номенклатуру для функций машинного обучения и их взаимосвязей с коммуникационными сетями. В структуре рассматриваются ориентиры для будущих сетей, включая IMT-2020, которые обеспечивают слабосвязанную интеграцию с функциями машинного обучения.

Рекомендация представляет набор архитектурных требований и конкретных архитектурных компонентов, необходимых для удовлетворения этих требований. Эти компоненты включают, помимо прочего, конвейер машинного обучения, а также функции управления и оркестровки машинного обучения. В Рекомендации МСЭ-Т Y.3172 описывается интеграция таких компонентов в будущие сети, включая IMT-2020, и рекомендации по применению этой архитектурной структуры в различных базовых сетях, зависящих от конкретной технологии. Механизмы управления ML также описаны в структуре с учетом существующих принципов управления, которые были определены в сетях IMT-2020. Эта структура позволяет использовать стандартный метод интеграции функций машинного обучения в будущие сети, включая IMT-2020.

Кроме того, в ИК13 МСЭ-Т в области ИИ/ML были разработаны следующие документы:

Рекомендация МСЭ-Т Y.3173 «Структура оценки уровней интеллектуальности будущих сетей, включая IMT-2020» (февраль 2020 г.);

Рекомендация МСЭ-Т Y.3174 «Структура обработки данных для обеспечения возможности машинного обучения в будущих сетях, включая IMT-2020» (февраль 2020 г.);

Рекомендация МСЭ-Т Y.3174 «Интеграция рынка машинного обучения в будущие сети, включая IMT-2020» (сентябрь 2020 г.).

В настоящее время на сайте МСЭ-Т опубликована предварительная редакция одобренной в феврале этого года *Рекомендации МСЭ-Т Y.3177 «Архитектурная структура сетевой автоматизации на основе искусственного интеллекта для управления ресурсами и отказами в будущих сетях, включая IMT-2020»*.

Управление сетями включает в себя следующие две группы функций: проектирование и развертывание (т.е. процедуры времени разработки) и эксплуатацию и управление (т.е. процедуры времени выполнения). В данной Рекомендации [110] описывается архитектурная структура для процедур времени выполнения в будущих сетях, включая IMT 2020 в то время как архитектурная структура для процедур времени разработки находится за пределами ее рассмотрения. Рекомендация обеспечивает вспомогательную основу для реализации вариантов использования и их потенциальных требований, указанных в Добавление 55 к серии Y.3170 МСЭ-Т. Основная техническая цель управления ресурсами и управления сбоями - максимально оптимальное использование доступных ресурсов при сохранении QoS услуг, предоставляемых клиентам, несмотря на изменение состояния сети или возникновение сбоев.

В данной Рекомендации описывается архитектурная структура сетевой автоматизации на основе искусственного интеллекта (ИИ) для управления ресурсами и устранения неисправностей с целью повышения эффективности и производительности сети за счет постоянного мониторинга сети и быстрого принятия решений о соответствующих действиях по адаптации ресурсов и устранению неисправностей с помощью помочь ИИ в том числе машинное обучение.

Таким образом, мы наблюдаем не только повышенный интерес к внедрению ИИ/ML в сети 5G/IMT-2020, но и продолжающиеся исследования, охватывающие

все больше сетевых и радио аспектов, а также работу на дальнейшую перспективу развития сетей связи.

1.4. Сети связи шестого поколения и сети связи 2030

Сети связи шестого поколения являются следующим шагом на пути развития сетей и систем телекоммуникаций. Планируется, что сети связи шестого поколения будут функционировать на реальных сетях со второй половины третьего десятилетия 21 века, т.е. с 2025 года. Основные отличия сетей связи шестого поколения от сетей связи пятого поколения состоят в следующем [106]:

- сверх высокая плотность - планируется, что в сетях связи шестого поколения плотность устройств будет составлять 100 устройств на метр кубический (м^3) вместо 1 устройства на метр квадратный (м^2) в сетях связи пятого поколения,
- задержка на радиодоступе вместо единиц миллисекунд в сетях связи пятого поколения в сетях шестого поколения будет составлять 0,1 мс,
- пиковая скорость на доступе будет достигать 100 Гбит/с – 1 Тб/с вместо 10 Гбит/с для сетей связи пятого поколения,
- позиционирование объектов будет производиться с точностью 10 см в помещении и 1 м вне помещений. В сетях связи пятого поколения требования к позиционированию не регламентировались.

Все вышесказанное связано с переходом к широкому использованию терагерцового диапазона в сетях связи шестого поколения. При этом очевидной является необходимость планирования сетей в объеме, а не на плоскости, поскольку для терагерцового диапазона зачастую непреодолимым препятствием

являются не только стены или иные элементы конструкций зданий и т.п., но и тело человека. Плотность устройств в сети продолжает увеличиваться, но уже в объеме. Появляется понятие сверхплотной сети по сравнению с понятием высокоплотной сети для 5G/IMT-2020 [78].

Сети связи 2030 – это проект, который был начат МСЭ-Т в 2018 году и предусматривал своей целью определить характеристики сети на перспективу до 2030 года [118,119]. По сравнению с сетями связи шестого поколения для сетей связи 2030 были запланированы следующие показатели [9,77]:

- круговая задержка менее 1 мс,
- пиковая скорость на доступе больше 1 Тбит/с,
- потери не более 1×10^{-6} ,
- недоступность сети меньше, чем 2 мс в час.

Кроме того, и это, наверное, самое важное – предусматривается ряд функциональных отличий по сравнению с сетями связи шестого поколения [106]:

- персонализация сети и услуги телеприсутствия [9]. Планируется широкое использование роботов-аватаров [34], голографических копий человека [34], при этом услуги телеприсутствия могут сыграть решающую роль в значимости сетей и систем связи для борьбы с пандемией и подобными явлениями [34],

- масштабное использование нано-сетей [23], что позволит не только получать информацию из нано-мира, но и использовать ее в медицинских целях, при подготовке спортсменов, для предотвращения технологических катастроф и т.д. При этом еще больше возрастет плотность устройств сети,

- полновесная реализация концепции Индустрия 4.0 [34], что предоставит новые возможности по эффективной организации производства, в том числе с использованием роботов-гуманоидов.

Однако самой важной при реализации концепции сетей 2030 должна стать децентрализация сети [7], что даст не только новые возможности для эффективного внедрения цифровой экономики, но и станет реальной основой для ликвидации цифрового разрыва между территориями [7].

Как видим, перспективы развития сетей и систем связи на ближайшие десять лет достаточно широки, но при этом во всех сценариях существенную роль играет принципиальное изменение плотности устройств сети. Поэтому далее остановимся на новых научных задачах, возникающих при появлении высокоплотных и сверхплотных сетей связи.

1.5. Высокоплотные сети

Сегодня известны различные оценки и прогнозы в части интенсивности роста и количества Интернет-вещей [7,9,30], однако все они сходятся к тому, что количество Интернет-вещей будет неуклонно расти и будет значительно превышать число абонентских терминалов и людей. Следует ожидать, что сеть IoT будет иметь высокую плотность устройств, которую оценивают такой величиной, как 1 устройство на 1 м² [34]. Предполагается также использование беспроводных технологий построения сетей ИВ, по крайней мере, на уровне доступа.

Эти сложности могут проявляться как в росте трафика [45,46,47,99,100], общего количества устройств из расчета на одну точку доступа, в снижении отношения сигнал/шум или в комплексных проблемах. При анализе использования внеполосных D2D связей, в данной ситуации, в работах автора [56,57] было показано, что возникают проблемы, связанные со снижением отношения сигнал/шум. Последнее приводит к необходимости ограничения расстояний между устройствами, а при организации ad hoc сети к росту средней длины маршрута.

В работах автора [56,57,122] был проведен анализ влияния плотности сети на условия связи в однородной среде, т.е. в условиях, которые можно сравнить с организацией сети на плоской открытой территории. Практически, такие условия могут встречаться не слишком часто. Например, при организации сети в городских условиях внутри многоквартирных домов, условия распространения сигнала

становятся неоднородными. Также условия неоднородны и при организации сетей внутри промышленных и иных помещений.

Таким образом, можно заметить, что в подобных условиях образуются неоднородные условия, однако, во многих случаях такие условия можно назвать типовыми, поскольку они характерны для типовых пространств, в которых возможно построение сетей интернета вещей.

Неоднородность распределения пользователей в пространстве и неоднородность среды распространения имеют различную физическую природу. В первом случае это группирование устройств вблизи некоторых центров, а во втором наличие физических препятствий на пути распространения радиосигналов. Наличие препятствий проявляется как в затухании, так и в отражении сигналов [43,48].

Если рассматривать условия города, то основным препятствием распространению сигналов являются различного рода строения, а самыми массовыми строениями в современных городах являются жилые и иные здания. Таким образом, структура сети Интернета вещей определяется городской инфраструктурой, в частности характером застройки и параметрами самих строений.

Влияние городской застройки на структуру сети проявляется не только для сетей Интернета вещей, но и для других сетей беспроводной связи.

Моделирование такой структуры сопряжено с необходимостью моделирования неоднородностей, вносимых городской инфраструктурой.

При построении модели сети будем исходить из условий городской инфраструктуры, полагая, что такие элементы как стены зданий и других сооружений являются препятствиями для распространения радиосигналов. Эти элементы вносят дополнительное затухание, величина которого может быть различна. Также будем полагать, что рассматриваемые элементы сети Интернета вещей расположены в случайных точках и находятся вне этих элементов.

Несложно заметить, что основным элементом изображения на картах населенных пунктов является прямоугольник или отрезки прямых, соединенные

под прямыми углами. Также несложно заметить, что при изменении масштаба, т.е. укрупнении объекта – здание, квартал, микрорайон, в общем, почти сохраняется его форма. Это позволяет сделать вывод о самоподобии этих структур, что характерно для элементов фрактальной геометрии.

В данной диссертационной работе предложено использовать геометрические фракталы в задачах планирования и проектирования сетей связи. В частности, если элементами описываемой структуры, в основном, являются плоские прямоугольные элементы, то можно рассмотреть такие структуры, как например, кривые Пеано или ковер Серпинского [22,59,102], рис.1.6 и рис.1.7.

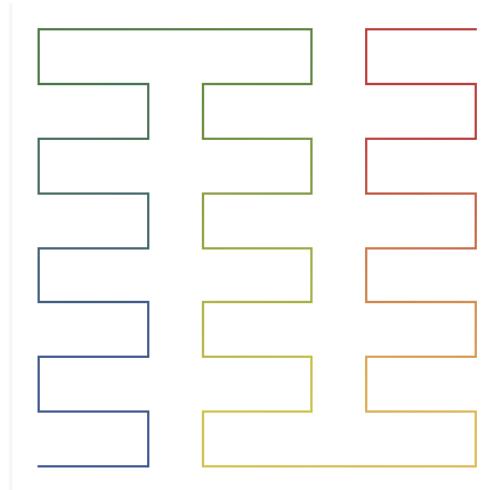


Рис.1.6 – Кривые Пеано

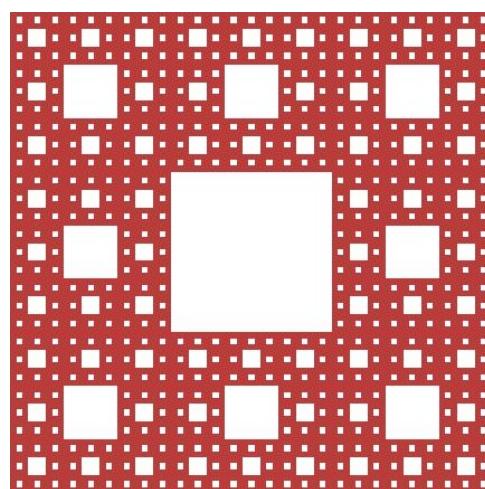


Рис.1.7 – Ковер Серпинского

Все вышеизложенное требует разработки и исследования новых методов планирования сетей связи высокой плотности, которые учитывали бы как самоорганизующуюся структуру сетей Интернета Вещей, так и влияние фрактальной структуры окружения высокоплотной сети. Отметим, что именно сети Интернета Вещей определяют само появление высокоплотных сетей как таковых в сетях связи пятого поколения и сверх плотных сетей в сетях шестого поколения и сетях 2030.

1.6. Цель и задачи диссертационной работы

Исходя из проведенного анализа, сформулируем цель и задачи диссертационной работы.

Цель диссертационной работы состоит в разработке и исследовании методов планирования сетей связи высокой плотности с учетом фрактальных характеристик пространства окружения сети.

Указанная цель достигается путем решения в диссертационной работе следующих задач:

- анализ развития сетей связи пятого и последующих поколений на горизонте планирования до 2030 года,
- анализ особенностей и характеристик высокоплотных и сверх плотных сетей связи,
- анализ особенностей и перспектив развития технологии взаимодействия устройство-устройство D2D для сетей высокой плотности,
- исследование фрактальных свойств пространства окружения высокоплотной сети,
- разработка метода планирования сети высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения,

- разработка метода планирования сети высокой плотности в условиях неоднородной структуры пространства окружения,
- разработка методики выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования сети высокой плотности в условиях неоднородной структуры пространства окружения.

1.7. Выводы

1. Анализ развития сетей и систем связи на горизонте планирования до 2030 года показал, что для этих сетей принципиально изменяются характеристики плотности устройств сети и круговой задержки. При этом сети связи пятого поколения являются сетями высокой плотности, для которых круговая задержка может составлять единицы миллисекунд, а сети шестого поколения и сети 2030 – сверхплотными сетями с круговой задержкой в 1мс и менее.
2. Для сетей связи пятого и последующих поколений необходима разработка и исследование новых методов планирования с учетом особенностей, указанных в п.1 выводов.
3. Для сетей связи пятого поколения высокой плотности предложено при планировании сети учитывать фрактальные характеристики пространства окружения сети.
4. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

ГЛАВА 2. СЕТИ D2D ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОПЛОТНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ В УСЛОВИЯХ ОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВА ОКРУЖЕНИЯ

2.1. Распределение трафика на сетях связи

В течение всей эволюции сетей связи существовали два метода обслуживания поступающего трафика: централизованный и децентрализованный. Применение того или иного метода на конкретном этапе развития сетей связи зависело от технико-экономических показателей. Так, при развитии аналоговых сетей связи широко использовались как подстанции, устанавливавшиеся в местах скопления абонентов, например, в многоквартирных домах, так и замыкание внутренних сообщений, к которым относились соединения абонентов, подключенных к одной и той же станции. При этом доля трафика внутренних сообщений достигала 15-20% для городских сетей и превосходила 40-50% для сельских сетей электросвязи в районных центрах, где устанавливались центральные станции для сельского района [40]. На этапе внедрения сетей и систем NGN преобладало направление, связанное с централизованным предоставлением услуг [26,27].

Для сетей связи пятого и последующих поколений используется комбинированный вариант предоставления услуг, что связано как с требованием обеспечения ультрамалых задержек [3,17,24,25], так и возможностью установления соединений без участия базовой станции при использовании технологии D2D.

С целью обеспечения требований сетей связи пятого и последующих поколений, в первую очередь по задержкам, были разработаны технологии граничных и туманных вычислений [15]. Суть этих технологий сводилась к переносу вычислительных ресурсов как можно ближе к пользователю. При этом могут быть использованы в зависимости от требуемой производительности и вычислительные ресурсы сетевых устройств пользователя [36]. Появилось и еще одно направление научно-исследовательских работ – выгрузка трафика, которая происходит для различных уровней обработки заявок на обслуживание [4,5,15,72,73]. Как видим, формируются различные уровни вычислений, а значит и многоуровневые облачные структуры обработки трафика и предоставления услуг [74].

Классическим примером многоуровневой облачной структуры является разработанная в [3] система для предоставления услуг Тactильного Интернета (рис.2.1).

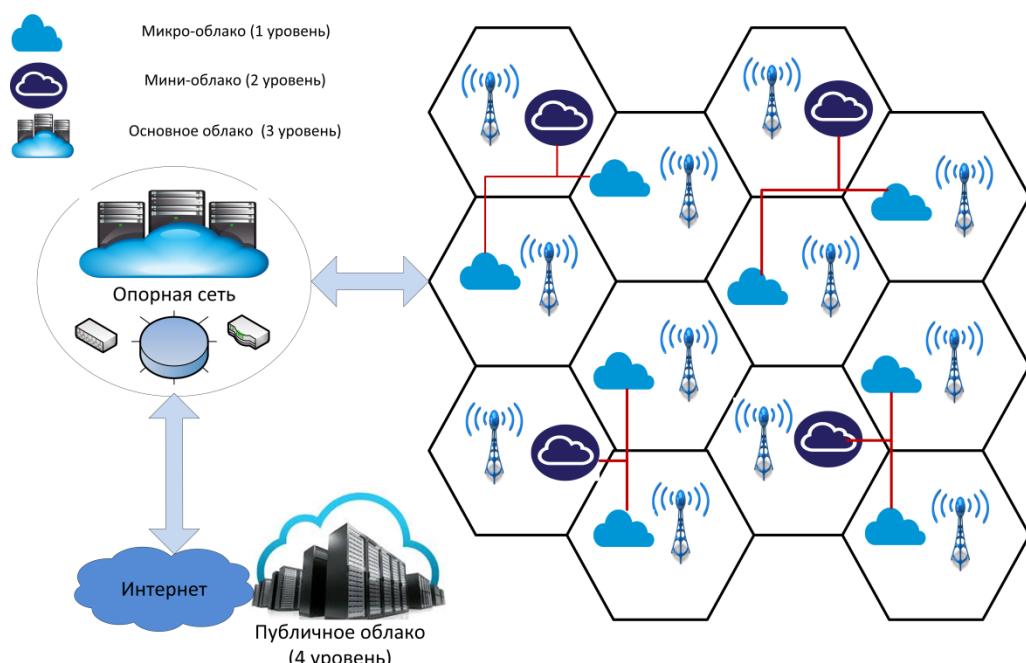


Рис.2.1 – Многоуровневая облачная система для предоставления услуг Тактильного Интернета

Как видим, на уровне базовых станций располагаются микро и мини облака, которые используются для решения задач при предоставлении услуг, требующих ультрамалых задержек, в данном конкретном случае – услуг Тактильного Интернета. Услуги, требующие больших вычислительных ресурсов и при этом не чувствительные к ультрамалым задержкам, предоставляются с использованием облачных структур оператора сети связи и/или публичных облаков (Яндекс, Google и т.п.). Принципиально важным в представленной системе является то, что микро и мини облака связаны между собой высокоскоростными оптическими трактами (красные линии на рисунке 2.1), что во многом и позволяет достичь значений круговой задержки, требуемых при предоставлении услуг Тактильного Интернета.

Точно такого же эффекта можно добиться и используя технологию взаимодействия устройство-устройство D2D. Как уже отмечалось выше, эта технология может решать и проблемы, возникающие в сетях высокой плотности [8].

При этом вследствие большого числа устройств в таких сетях могут быть широко использованы достижения, которые были получены в свое время для беспроводных сенсорных сетей, имеющих схожие задачи, а именно: самоорганизация, кластеризация и алгоритмы маршрутизации.

2.2. Ad Hoc или целевые сети связи

Появление беспроводных сенсорных сетей, а впоследствии и сетей высокой плотности естественным образом привело к целому ряду принципиальных изменений в теории и практике построения сетей связи. Действительно, большое число устройств, расположенных на одной и той же плоскости или в объеме, требует при одновременном их функционировании достаточно большой энергии, которая не всегда может быть доступна в ограниченном пространстве. Кроме того,

устройства эти, как правило, просты и обеспечение их большими источниками питания вряд ли целесообразно. Одновременно с этим в случае, если упомянутые устройства обладают мобильностью, число устройств в сети на конкретной площади или в конкретном объеме может изменяться во времени, причем в значительной степени.

Перечисленные выше особенности таких сетей привели к формированию концепции Ad Hoc или целевых сетей связи [23]. Ad Hoc сети представляют собой самоорганизующиеся сети, в которых число узлов и взаимосвязи между ними являются случайными величинами [23]. Примерами самоорганизующихся сетей являются сети автомобильного транспорта VANET (Vehicular Ad Hoc Network) [29], и уже упоминавшиеся беспроводные сенсорные сети WSN (Wireless Sensor Network) [28]. Наиболее близкими к высокоплотным сетям вследствие параметров устройств, образующих эти сети, являются беспроводные сенсорные сети. Поэтому, целесообразно рассмотреть принципы построения беспроводных сенсорных сетей и используемые при этом методы.

Достаточно большое время с начала внедрения беспроводных сенсорных сетей для их построения использовался протокол ZigBee, обеспечивающий построение сенсорной сети для примерно 64000 тысяч сенсорных узлов [23]. Естественно, если предположить одноранговое построение такой сети, то не исключены случаи, когда потребуется обеспечить передачу информации через очень большое число сенсорных узлов, исчисляемое тысячами, что не только неприемлемо с точки зрения потребления энергии сетью в целом, но и сточки зрения возникающих при этом задержек. Поэтому, уже с самого начала масштабного внедрения беспроводных сенсорных сетей широкое применение нашли иерархические методы построения беспроводных сенсорных сетей, основанные на кластеризации сети, назначении головных узлов, через которые остальные члены кластера осуществляли свое взаимодействие с сетью связи общего пользования [18].

Наиболее известным алгоритмом, с помощью которого осуществлялась кластеризация беспроводных сенсорных сетей, стал алгоритм LEACH (Low Energy

Adaptive Clustering Hierarchy), предложенный в свое время W.Heinzelman [23]. Суть алгоритма была достаточно проста: в момент времени t головным узлом кластера не мог стать сенсорный узел, который был уже головным в предыдущие моменты времени. Этот алгоритм увеличил продолжительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети в 7 раз по сравнению с длительностью жизненного цикла такой же сети без кластеризации [23].

Важно отметить и еще одну особенность кластеризации при использовании алгоритма LEACH. Весь жизненный цикл беспроводной сенсорной сети разбивается на одинаковые по длительности раунды. При этом в каждом раунде последовательно осуществляются следующие действия: назначение головного узла из узлов, имеющих наибольший запас энергии в данный момент времени, формирование кластеров путем подключения к головным узлам членов кластера, имеющих возможность передать ему собранную информацию в соответствии с территориальной удаленностью члена кластера от головного узла, передача информации на головной узел, обработка информации головным узлом с целью исключения передачи далее, например, на базовую станцию, дублирующей информации от членов кластера и передача информации на базовую станцию или другие элементы сети связи.

Этот алгоритм, несмотря на кажущуюся простоту, стал эталонным алгоритмом кластеризации для беспроводных сенсорных сетей и все разработанные впоследствии алгоритмы кластеризации для них, как правило, сравнивались по эффективности именно с алгоритмом LEACH.

Беспроводные сенсорные сети выполняют функции по сбору информации для различных задач мониторинга, управления, контроля и т.д. в самых разнообразных условиях. Не случайно, поэтому, в свое время они получили и еще одно название: всепроникающие сенсорные сети [28]. Такое широкое использование беспроводных сенсорных сетей в различных областях жизнедеятельности человека является причиной того, что до настоящего времени не создано оптимального алгоритма кластеризации для этих сетей. Это способствовало появлению целого

ряда алгоритмов кластеризации, учитывающих те или иные особенности беспроводных сенсорных сетей.

Вполне естественно, что для мобильных беспроводных сенсорных сетей потребовалась разработка иных алгоритмов выбора головного узла при кластеризации. Сначала попытались, и достаточно успешно, модифицировать алгоритм LEACH для мобильных беспроводных сенсорных сетей. Однако особенности мобильных беспроводных сенсорных сетей, связанные с подвижностью узлов сети, в том числе и головного узла кластера (!), приводили иногда к парадоксальным результатам: за время раунда головной сенсорный узел мог покинуть кластер, и у членов кластера отсутствовала далее возможность передачи собранной информации. Принципиальный шаг в развитии алгоритмов выбора головного узла для мобильных сенсорных узлов был сделан учеными СПбГУТ, предложившими использовать прогнозирование при выборе головного узла кластера [31]. Это позволило не только существенно увеличить длительность жизненного цикла мобильной беспроводной сенсорной сети, но и стимулировало последующие работы в области создания алгоритмов с прогнозированием для беспроводных сенсорных сетей.

В ряде случаев требования по надежности функционирования беспроводных сенсорных сетей были существенно выше, чем в целом для этих сетей. Для решения этих проблем было предложено использовать так называемые резервные головные узлы [69], что дало возможность улучшить надежностные характеристики сети.

Все вышеприведенные алгоритмы были разработаны для условий функционирования беспроводной сенсорной сети на плоскости. Это не означает, что их нельзя было использовать в трехмерном пространстве. Однако особенности функционирования беспроводных сенсорных сетей в трехмерном пространстве потребовали создания соответствующих алгоритмов выбора головного узла. Здесь можно отметить работы научной школы СПбГУТ [1,66].

Помимо рассмотренных выше алгоритмов выбора головного узла вплоть до настоящего времени продолжаются научно-исследовательские работы по созданию новых алгоритмов. Это, например, использование нечеткой логики и диаграмм Вороного [2,70].

В работах по D2D кластеризация также имеет важное значение. При этом рассматривают как внутриволосную кластеризацию, так и внеполосную [62,63,71,98]. Под внутриволосной кластеризацией понимается процесс кластеризации при использовании технологий сетей связи общего пользования, а под внеполосной – при использовании технологий IEEE 802.11 [14]. Подробно эти вопросы рассмотрены в работах [98].

2.3. Особенности построения и функционирования сетей D2D.

Перспективы использования технологии D2D при построении сетей связи высокой плотности

Взаимодействия D2D без участия базовой станции ставят несколько вопросов, которые сначала кажутся неразрешимыми с точки зрения оператора сети и государственных служб. Речь идет о тарификации оказываемых услуг связи и возможности обеспечения проведения оперативно-розыскных мероприятий. При внимательном рассмотрении этих проблем обе они решаются достаточно эффективно.

Основными участниками соединений D2D, скорее всего, будут устройства Интернета Вещей. Естественно, что существующие подходы к тарификации, разработанные для традиционных сетей, вряд ли окажутся эффективными для сетей высокой плотности, поскольку потребуют существенно больших расходов на саму систему сертификации вследствие колоссального роста числа устройств.

Поэтому, во многих исследованиях и рекомендациях для сетей Интернета Вещей предлагается использовать абонементный способ оплаты за услуги связи и тарификация по времени или по числу соединений оказывается ненужной.

Для реализации системы оперативно-розыскных мероприятий эффективный способ предложен в [11], который основан на понимании того факта, что вследствие большого числа устройств создаются сети D2D. Решение проблемы предлагается в виде дополнительных маршрутизаторов, устанавливаемых в сети D2D, которые функционально являются такими же терминалами, как и используемые в сети D2D.

При решении указанных проблем сети D2D становятся легальным инструментарием для построения сетей высокой плотности. При этом, естественно, должны быть разработаны новые методы маршрутизации для таких сетей. Вследствие высокой и сверхвысокой плотности устройств в сетях D2D возникают помехи из-за чрезмерной близости расположения устройств. Но эти помехи могут возникнуть только тогда, когда устройство функционирует, т.е. обслуживает трафик. Таким образом, на качество обслуживания в сетях D2D высокой и сверхвысокой плотности существенное влияние может оказать обслуживаемый в конкретный момент времени трафик во фрагменте сети, который может оказаться на пути прохождения маршрута по передаче информации. Этот факт был установлен и изучен в работе [8].

Влияние трафика отдельных фрагментов сети D2D на качество обслуживания вследствие высокой или сверхвысокой плотности сети приводит к тому, что известные оптимальные алгоритмы поиска кратчайшего пути для задач маршрутизации оказываются неэффективными для сетей D2D, поскольку на кратчайшем пути могут оказаться фрагменты сети, обслуживающие большой трафик, и требования по качеству обслуживания будут не выполнены. Разработке новых алгоритмов маршрутизации в таких сетях были посвящены работы [8,10], в которых предложены решения по алгоритмам маршрутизации с учетом влияния трафика сети.

2.4. Разработка метода планирования сети высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения

В отличие от работ в данном разделе будут получены аналитические выражения для зависимости средней мощности помехи в произвольной точке от плотности узлов сети и проверена адекватность аналитической модели с помощью имитационного моделирования. Как уже отмечалось выше, в общем случае функционирование сети высокой плотности зависит от размещения ее узлов и от окружающей обстановки, которые влияют на распространение сигнала между узлами. Стоит заметить, что чаще всего оперируют такими прогнозами и оценками в контексте плоской модели, т.е. говоря о плотности устройств (Интернет-вещей) как числе устройств на единицу площади. Такая модель не всегда соответствует характеристикам пространства окружения сети, особенно если зона связи узлов сети не велика, а сама сеть размещена во многоэтажных строениях, т.е. занимает некоторый объем. В таком случае не вполне ясно, что понимается под плотностью на единицу площади: «плоская» модель с данной величиной плотности устройств на каждом этаже здания или общая плотность устройств, как результат их проекции со всех этажей на основание здания. Разница между этими моделями, конечно же, может быть весьма существенна.

Возможности функционирования такой сети во многом определяются выбором ее структуры. При звездообразной структуре сети, например, при подключении устройств к базовым станциям сети подвижной связи их число в зоне обслуживания базовой станции в соответствии с упомянутыми выше требованиями может быть близко к миллиону или даже нескольким миллионам (в зависимости от зоны покрытия). Обслуживание такого числа устройств может быть или вообще невозможным, или будет создавать проблемы для сети связи.

Также следует отметить, что наряду с неоспоримыми достоинствами централизованной сети, она имеет и ряд недостатков, один из которых заключается в том, что ее живучесть определяется живучестью базовой станции и связанного с ней оборудования сети, а другой – в возможности ее перегрузки при неконтролируемом росте трафика.

С учетом сказанного можно заметить, что построение сети ИВ как ad hoc сети [75] позволяет решить ряд задач, связанных с отмеченными выше проблемами. Это предполагает построение сети ИВ как самоорганизующейся сети, способной производить доставку трафика на значительные расстояния, используя только возможности узлов сети Интернета Вещей [12,41,62]. Как правило, такие сети являются децентрализованными и используют технологии со случайным доступом. Это приводит к взаимным помехам, производимым узлами сети при передаче данных. Естественно, что уровень этих помех зависит от мощности передатчиков узлов, условий распространения сигнала, числа узлов сети (плотности сети) и интенсивности производимого ими трафика [8,10].

Оценим потенциальные возможности такой сети в зависимости от интенсивности трафика, излучаемой мощности сигналов и плотности узлов. Для этого сначала рассмотрим «плоскую» модель, в которой узлы сети распределены случайно в пределах зоны обслуживания. Будем полагать, что мощность излучаемого сигнала одинакова для всех узлов сети.

2.4.1. Модель сети

В силу аддитивной природы мощность помехи p_{0I} в любой точке o обслуживаемой территории представляет собой сумму мощностей всех источников сигналов с учетом затухания в среде распространения p_{oj}

$$p_{0I} = \sum_{j=1}^n p_{oj} \quad \text{Вт} \quad (2.1)$$

Очевидно, что источники сигнала, находящиеся рядом с приемным узлом, могут создавать уровень помех, при котором прием целевого сигнала будет невозможен. В таком случае используется разделение канального ресурса по времени. Будем полагать, что передача и прием целевого сигнала не производится

в случае, когда приемный узел принимает один или несколько сигналов, уровень каждого из которых превышает некоторое пороговое значение p_m .

В таком случае помеха в точке приема создается только сигналами, каждый из которых не превышает данного порогового уровня. В случае однородной среды распространения и равной мощности всех источников сигналов, а также круговой диаграммы направленности антенн, узлы, создающие помехи, будут расположены за пределами круга (рис.2.2) или сферы в 3-х мерной модели с центром в точке приема и радиусом, определяемым как

$$r_m = \arg\{p_0 - a(r) = p_m\} \quad (2.2)$$

где p_0 – излучаемый уровень мощности сигнала (дБм), p_m – пороговый уровень мощности (дБм),

$a(r)$ – затухание, вносимое при распространении сигнала на расстояние r (дБ).

Дадим условные названия областям внутри круга и вне его как областям сигналов и помех соответственно.

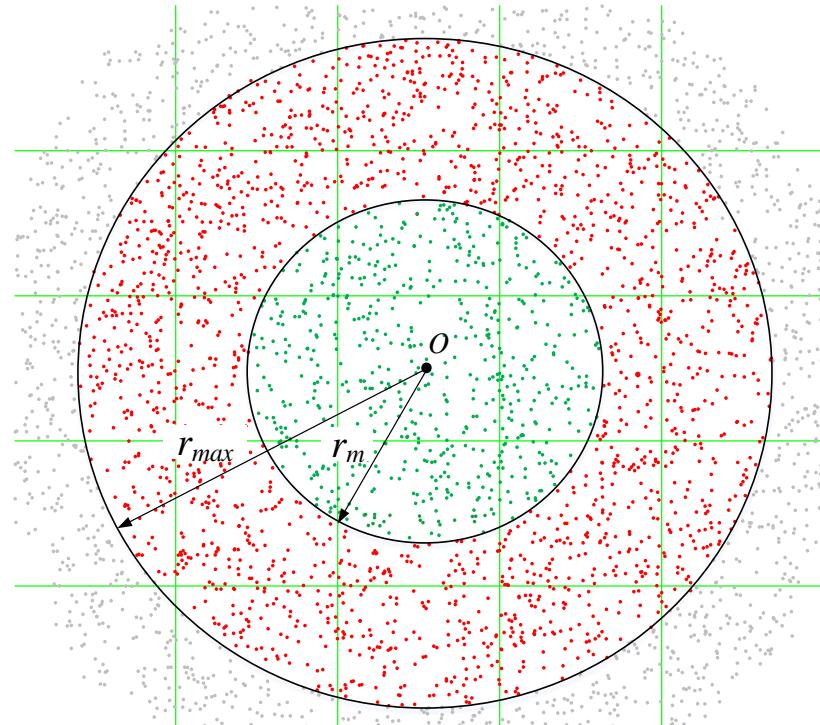


Рис.2.2 – Области сигналов и помех

Для выбора модели затухания рассмотрим модель, рекомендуемую в Р.1411-10 [111]:

$$a(r) = 10\gamma \lg f + 10\alpha \lg r + \beta \text{ дБ} \quad (2.3)$$

где f – частота (ГГц), r - расстояние (м).

Численные значения параметров этих моделей зависят от условий их применения. γ - корректирует зависимость затухания в среде распространения от частоты сигнала, α - определяет рост затухания с расстоянием, β - постоянный коэффициент. При моделировании далее примем $\alpha=2,12$, $\beta=29.2$, $\gamma = 2,11$.

Мощность помехи в произвольной точке o можно определить, как:

$$p_{0I} = \sum_{j=1}^n I_j p_{oj} \quad (2.4)$$

где $I_j = \begin{cases} 1 & p_{oj} \leq p_m \\ 0 & p_{oj} > p_m \end{cases}$ индикаторная функция,

$$p_{oj} = \tilde{p}_o - a(r_{oj}), \text{ дБм}, \quad (2.5)$$

r_{oj} - расстояние между точкой наблюдения и j -м узлом сети.

Величина \tilde{p}_o случайна, полагаем, что она равна мощности излучаемого сигнала p_0 , когда узел передает данные и равна нулю, когда передача отсутствует. Переходы из одного состояния в другое определяются передаваемым трафиком. Тогда

$$\tilde{p}_o = p_0 \mu(t) \quad (2.6)$$

где $\mu(t)$ - двоичная случайная функция времени, описывающая поток кадров, передаваемых передатчиком узла. Ее можно описать как:

$$\mu(t) = \begin{cases} 1 & t_0 + \alpha < t \leq t + \tau \\ 0 & \text{в другом случае} \end{cases}$$

где t_0 - начальный момент времени, α - случайный интервал времени между моментами передачи кадров, τ - случайный интервал времени, равный времени передачи кадра.

Свойства $\mu(t)$ определяются законами распределения α и τ . В общем случае модель (2.5) должна достаточно точно представлять производимый узлом трафик.

С этой целью нужно выбрать соответствующие законы распределения α и τ . Однако в рамках изучаемой проблемы более важна величина помехи (2.4), которая является суммой сигналов от большого числа источников и представляет собой агрегированный поток. В соответствии с [50] свойства этого потока будут близки к свойствам простейшего потока. Распределение средней величины p_{0I} зависит от распределения расстояний до источников сигналов и зависимости затухания от расстояния, т.е. от принятых в модели допущений.

Средняя величина интенсивности трафика ρ определяет долю времени, в течение которого узел передает сигнал. Будем полагать, что она одинакова для всех узлов сети.

2.4.2. Результаты имитационного моделирования

Очевидно, что в условиях принятых ограничений, интенсивность трафика, производимого каждым из узлов сети, будет ограничена числом узлов, находящихся в области сигналов, т.е. пороговой величиной p_m .

$$\rho_{\max} = \frac{1}{\pi r_m^2 d} \quad (2.7)$$

где d – плотность устройств на один м^2 , r_m – радиус области сигналов в соответствии с (2).

Например, при принятых допущениях и $p_0=20$ дБм (0,1 Вт), $p_m=-70$ дБм радиус зоны сигналов составит $r_m \approx 63$ м, а $\rho_{\max} \approx 8 \cdot 10^{-5}$. Величина ρ_{\max} лишь демонстрирует верхний предел, который имеет место при постоянной занятости канала, что практически недостижимо. В реальной сети интенсивность трафика должна быть значительно меньше.

Для моделирования была выбрана сеть в области 200x200 м при случайном размещении узлов сети. Пороговая величина p_m принята равной -70 дБм. Как показали результаты имитационного моделирования, распределение уровня

мощности помехи в произвольной точке области обслуживания при принятых параметрах модели достаточно точно может быть представлено нормальным распределением, рис.2.3.

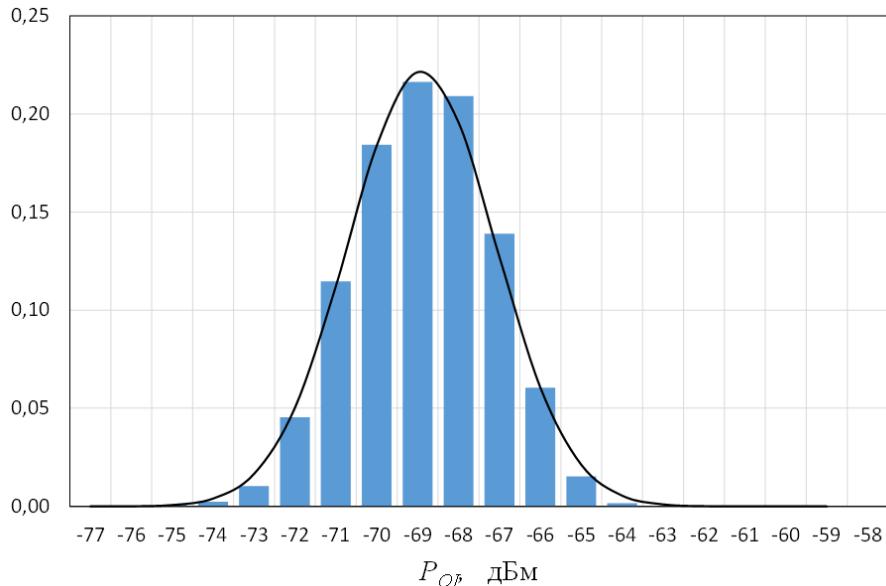


Рис.2.3. Распределение уровня мощности помехи в произвольной точке

На рис. 2.4. приведена зависимость средней мощности помехи в произвольной точке от интенсивности трафика, производимого узлами сети. Под интенсивностью трафика понимается доля времени использования канала узлом. При этом мощность каждого из узлов сети $p_0=0.1$ Вт или 0,01 Вт (уровень 20 и 10 дБм, соответственно).

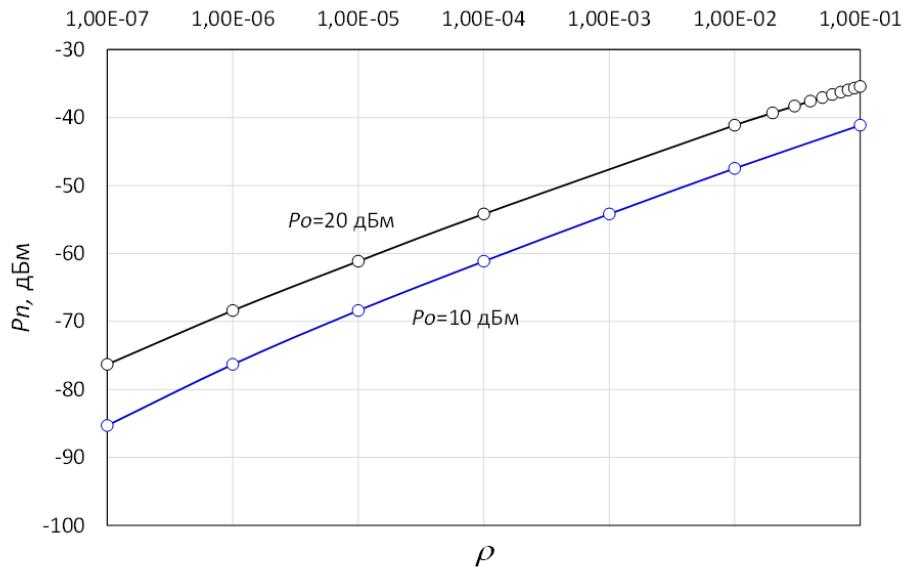


Рис.2.4. Зависимость мощности помех от удельной интенсивности трафика (использования канала одним устройством) при уровне мощности каждого устройства 20 дБм

2.4.3. Аналитическая модель и сравнение с результатами имитационного моделирования

Аналитическую функцию формирования сигнала помехи представим следующим выражением:

$$P_{OI} = d_0 \iint_C k(x, y) dx dy \quad (2.8)$$

где d_0 – мощность помехи, производимая на единице площади $\text{Вт}/\text{м}^2$, $k(x, y)$ - коэффициент, определяющий зависимость мощности помехи в точке O от координат источника помехи,

C – рассматриваемая область.

С некоторым приближением, исходя из модели (2.3), а также с учетом рассматриваемой модели сети (рис.2.2), зависимость $k(x, y)$ можно выразить через расстояние до источника помехи и представить следующим образом:

$$k(r) = \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \frac{1}{r^\alpha} \quad (2.9)$$

где r – расстояние от точки наблюдения O до источника помехи, α - коэффициент, зависящий от условий распространения сигнала ($\alpha \geq 2$), λ - длина волны (м).

С учетом (2.9) и модели (2.8) с помощью перехода к полярным координатам можно вычислить

$$p_{OI} = \int_{r_m}^{r_{max}} rk(r) dr \int_0^{2\pi} d\varphi = 2\pi \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \int_{r_m}^{r_{max}} r^{1-\alpha} dr \quad (2.10)$$

r_m – радиус области сигналов в соответствии с (2.2), r_{max} – радиус области помех, $k(r)$ - зависимость затухания сигнала от расстояния (2.9).

Окончательно, зависимость мощности помехи в точке от параметров рассматриваемой области можно выразить как

$$p_{OI} = \begin{cases} \frac{d_0 \lambda^2}{8\pi} \ln \frac{r_{max}}{r_m}, & \alpha = 2 \\ \frac{d_0 \lambda^2}{8\pi(\alpha-2)} (r_m^{2-\alpha} - r_{max}^{2-\alpha}), & \alpha > 2 \end{cases} \text{ Вт}, \quad (2.11)$$

r_m – радиус области сигналов в соответствии с (2.2), r_{max} – радиус области помех, $k(r)$ - зависимость затухания сигнала от расстояния.

Величина r_{max} определяется фактическими размерами зоны приема сигналов от окружающих источников. Практически это зона прямой видимости. В условиях городской застройки, вероятно, эта зона определяется расстоянием до ближайших строений. При расчетах она была принята равной 500 м.

На рис.2.5 приведены зависимости средней мощности помехи в произвольной точке от плотности сети (числа узлов на один м^2), полученные с помощью имитационного моделирования (черная кривая) и аналитической модели (2.11).

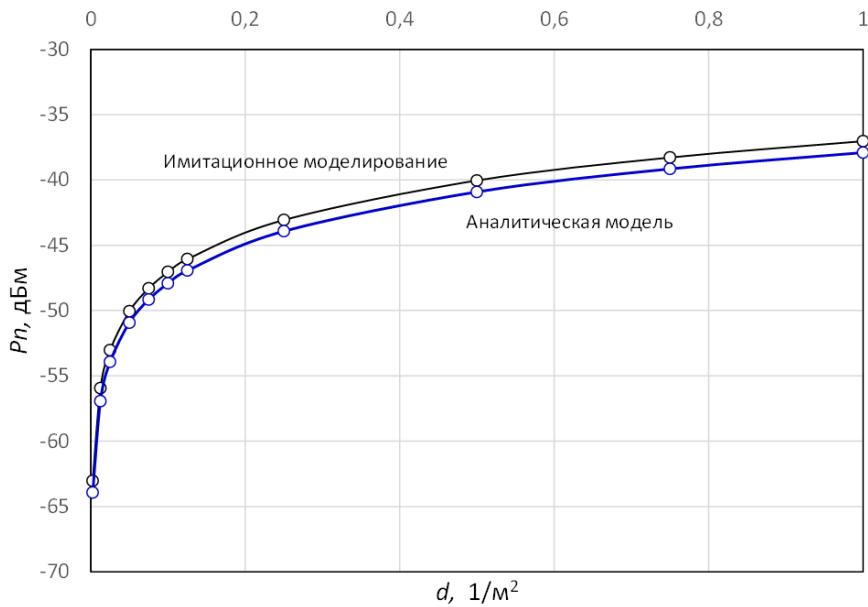


Рис.2.5. Зависимость мощности помех от плотности узлов сети при уровне мощности каждого устройства 20дБм

Как видно, полученные результаты для аналитической и имитационной моделей достаточно близки. Различие между ними обусловлены несколько различными условиями моделирования (формой и размерами, выбранной при имитационном моделировании области по сравнению с аналитической моделью).

2.4.4. Планирование Ad Hoc сети в условиях высокой плотности узлов сети при однородной структуре пространства окружения

Для организации связи с соседними узлами в сети ИВ требуется обеспечить требуемый уровень отношения сигнал/шум (SNR). Здесь под уровнем шума следует понимать суммарную мощность сигналов помехи и других нецелевых сигналов на входе приемника. Однако, учитывая, что сигнал помехи от узлов сети значительно превышает уровень естественных помех, будем рассматривать в отношении SNR только сигнал помехи. Оценим зависимость SNR от расстояния между узлами сети, используя упомянутую выше модель затухания:

$$SNR(r) = p_0 - a(r) - P_{OI}, \text{ дБ} \quad (2.12)$$

где P_{OI} - мощность помехи, создаваемой узлами сети в рассматриваемой точке (дБм), p_0 – мощность излучаемого узлом сети сигнала (дБм), $a(r)$ - зависимость затухания от расстояния (дБ).

На рис.2.6 приведена зависимость SNR от расстояния для различных пороговых уровней p_m . Естественно, что для различных уровней допустима и различная интенсивность трафика, как это было отмечено выше. При моделировании была принята интенсивность $\rho = \rho_{\max} / 2$.

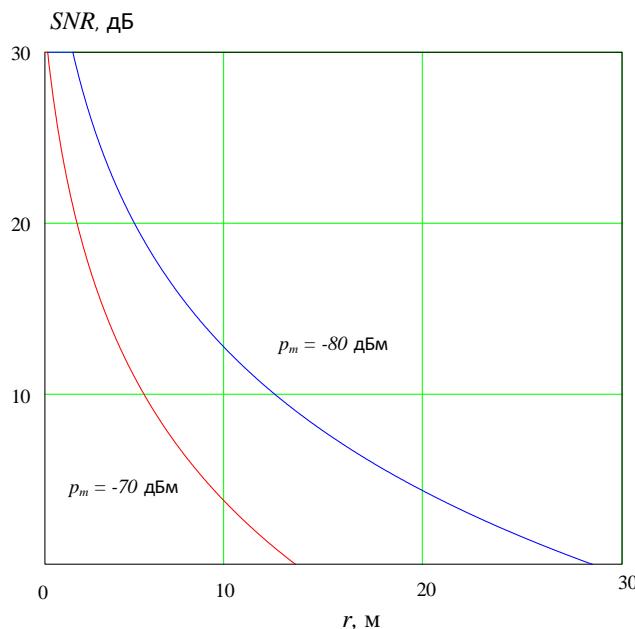


Рис.2.6 – Зависимость SNR от расстояния и выбора пороговой величины

Будем полагать, что приемлемые значения SNR более 5дБ, тогда расстояние между узлами приемника и передатчика должно быть не более 20м при $p_m=-80$ дБм и 10м при $p_m=-70$ дБм.

Таким образом, можно заметить, что реальные значения расстояний при передаче трафика между узлами высокоплотной сети с плотностью узлов один на 1м^2 в маршруте составят не более 20м при интенсивности трафика порядка $1 \cdot 10^{-5}$.

Значения расстояний из рис.2.6 можно интерпретировать как ожидаемый радиус связи узла с учетом помех, тогда можно оценить потенциальные возможности связности сети, рассматривая ее в виде модели случайного графа.

Вероятность связности узла, согласно приведенным расчетам составит

$$p_c = \frac{\pi R^2 d}{n} \quad (2.13)$$

где n – количество узлов в сети, d – плотность узлов ($1/\text{м}^2$), R – радиус связи узла (рис.2.6).

Условие связности сети на основе теоремы Эрдеша-Ренъи [50] можно записать как

$$\pi R^2 d > \ln n \quad (2.14)$$

Как видим, в условиях высокой плотности сети порядка 1 устройства на 1м^2 и R порядка 10м, условие (2.14) будет выполняться для сетей практически любого масштаба.

В соответствии с [76] средняя длина маршрута (число транзитов) будет определяться как $\bar{L} = \ln n$, в сети из 1 млн. узлов эта длина составит около 14 транзитов, однако эта величина не учитывает размера зоны связи узла R , например, при размещении сети из 1 млн. в зоне, представленной кругом, при плотности один узел на 1 м^2 среднее расстояние от центра зоны до узла составит приблизительно 423,1м, а число транзитов при $R=10\text{м}$, соответственно, 42.

Таким образом, для построения ad hoc сети в сети высокой плотности требуется построение достаточно длинных маршрутов. Это сопряжено с выполнением большого объема работы протоколами маршрутизации. Длина маршрута отражается как на качестве обслуживания трафика [42], так и на трудоемкости поиска маршрутов, т.к. она связана с общим числом узлов в сети.

Несмотря на возможность построения полносвязной сети Ad Hoc высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения, потребуется построение достаточно длинных маршрутов. Эта проблема может быть решена путем кластеризации сети с использованием хорошо известных алгоритмов, например, из теории и практики беспроводных сенсорных сетей.

Однако в условиях неоднородной структуры пространства окружения высокоплотной сети кластеризация может возникнуть и естественным путем вследствие наличия естественных препятствий на пути распространения сигнала, что подробно будет рассмотрено в последующих главах.

2.5. Выводы

1. Предложена модель сети высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения, в которой для каждого из узлов сети определяются области сигналов и помех. При этом предполагается, что передача и прием целевого сигнала не производится в случае, когда приемный узел принимает один или несколько сигналов, уровень каждого из которых превышает некоторое пороговое значение p_m . В таком случае помеха в точке приема создается только сигналами, каждый из которых не превышает данного порогового уровня. В случае однородной среды распространения и равной мощности всех источников сигналов, а также круговой диаграммы направленности антенн, узлы, создающие помехи, будут расположены за пределами круга или сферы в 3-х мерной модели.
2. Получены аналитические выражения для зависимости мощности помехи в заданной точке от радиуса области сигналов, радиуса области помех и затухания сигнала от расстояния. С помощью имитационного моделирования доказано, что результаты, полученные на основе аналитических выражений и имитационного моделирования близки с достаточной для практического использования точностью.
3. Предложен метод планирования полносвязной сети Ad Hoc высокой плотности 1млн устройств на один 1 м^2 в условиях однородной структуры пространства окружения, отличающийся тем, что полносвязность сети доказана на основе теоремы Эрдеша-Ренни, а в качестве модели сети используется модель,

включающая область сигналов и область помех, радиус связи устройства составляет 10 м.

4. Число транзитов в полносвязной сети Ad Hoc высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения сети оказывается достаточно большим, что отражается на качестве обслуживания трафика, особенно в части допустимых задержек. Эта проблема может быть решена путем кластеризации сети с использованием хорошо известных алгоритмов, например, из теории и практики беспроводных сенсорных сетей. Однако в условиях неоднородной структуры пространства окружения высокоплотной сети кластеризация может возникнуть и естественным путем вследствие наличия естественных препятствий на пути распространения сигнала.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВА ОКРУЖЕНИЯ

3.1. Характеристики пространства окружения высокоплотных сетей связи

В предыдущей главе были рассмотрены характеристики сетей высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения. На практике такие условия встречаются не так часто, особенно в городских условиях.

В общем случае, неоднородность условий может быть вызвана, как неоднородностью распределения пользователей, так и неоднородностью среды распространения. Естественно, что возможны и комплексные причины этого явления. Например, в многоквартирном жилом доме устройства группируются внутри квартир, образуя своего рода «кластеры». Устройства в этих кластерах относительно близки к друг другу, а также на пути распространения сигнала между ними имеют место лишь незначительные препятствия в виде мебели и межкомнатных стен. Сами же кластеры разнесены между собой в большей степени, также на пути распространения сигнала между ними имеются существенные препятствия в виде межквартирных стен здания.

Вероятно, что в ряде случаев такие неоднородности могут играть положительную роль, в части снижения помех со стороны соседних кластеров, увеличивая тем самым пропускную способность каналов между элементами одного кластера.

В работах автора [58,59] предложено для планирования и проектирования сетей высокой плотности в условиях неоднородной структуры пространства окружения использовать геометрические фракталы, что позволяет с достаточной для практики степенью точности представить степень самоподобия [64,82,85] неоднородного пространства окружения, которое, как уже отмечалось выше, создает естественную кластеризацию сети высокой плотности и может играть положительную роль с точки зрения организации связи в высокоплотных сетях.

3.2. Разработка метода планирования сети высокой плотности в условиях неоднородной структуры пространства окружения

На рис.3.1а приведен фрагмент изображения карты города, на котором контрастно выделены строения и свободные участки (дворы, тротуары, проезжие части дорог). На рис.3.1б приведен фрагмент кривой Гильберта [65].

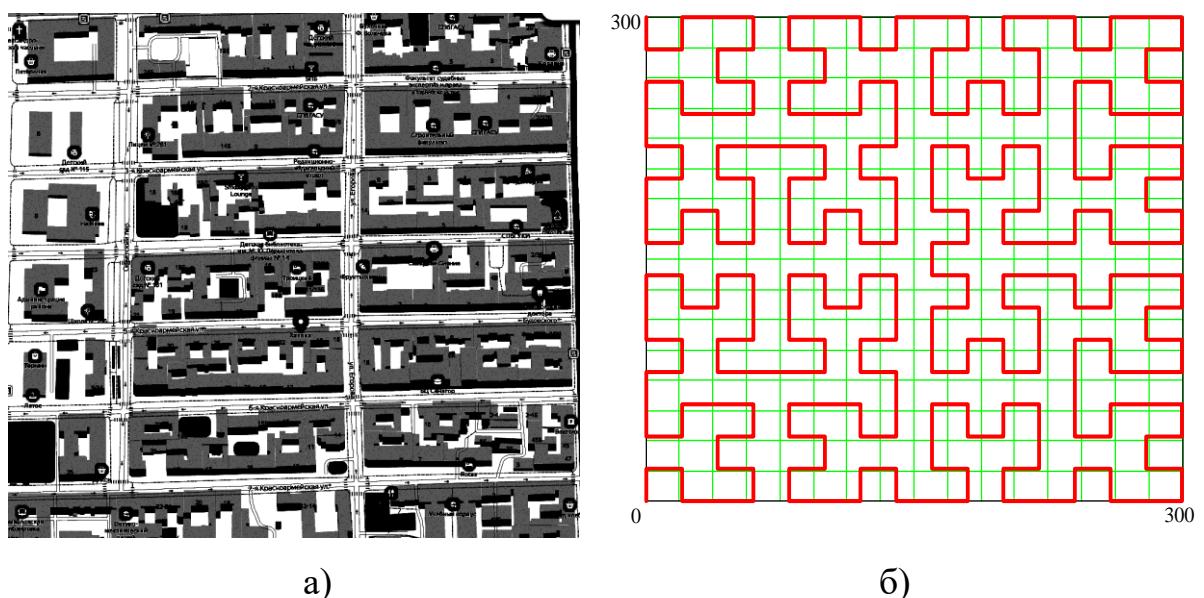


Рис.3.1 – Фрагмент плана города (а) и фрагмент кривой Гильберта (б)

При планировании сети будем полагать, что линия кривой имитирует препятствие. Линия не имеет ширины, однако при выборе позиций размещения элементов сети может быть введена условная минимальная дистанция между элементом сети и точками кривой (минимальное удаление) d_{\min} . Эта дистанция может быть использована для представления геометрических размеров препятствий.

Наряду с эмпирическим подходом к выбору конкретной фрактальной геометрической фигуры можно использовать в качестве численной оценки ее схожести с планируемой структурой сети фрактальную размерность. Фрактальная размерность позволяет характеризовать схожесть в смысле фрактальных свойств.

С этой целью используем оценку фрактальной размерности Минковского [22] как заданного ограниченного множества в метрическом пространстве, которая определяется как

$$D_M = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\lg N(d)}{-\lg d} \quad (3.1)$$

где $N(d)$ - минимальное количество множеств диаметра d , которые покрывают заданное множество.

Такая оценка может быть достаточно просто реализована численными методами анализа растрового монохромного изображения. Данная характеристика не является исчерпывающим показателем схожести структур, однако, она может повысить эффективность эмпирического выбора.

Разумеется, что для исследования конкретной структуры возможно именно ее и использовать для анализа, однако, для исследования общих свойств и типовых структур представляет интерес выбора некоторой модели, изменение свойств которой позволяет имитировать различные условия, характерные для многих приложений.

В данной главе для этой цели был выбран фрагмент кривой Гильберта (частный случай кривых Пеано). Этот выбор отчасти эмпирический, основанный на схожести геометрических форм, но также основан и на близких значениях фрактальной размерности.

Отметим, что оценки фрактальной размерности для изображений, приведенных на рис.3.1а и рис.3.1б составили $D \approx 1,76$ и $D \approx 1,71$, соответственно. Фрактальные свойства модели достаточно близки к фрактальным свойствам выбранной в качестве примера структуры.

При размещении элементов сети случайным образом и выборе в качестве модели фрагмента кривой Гильберта, может быть получена структура, подобная приведенной на рис.3.2.

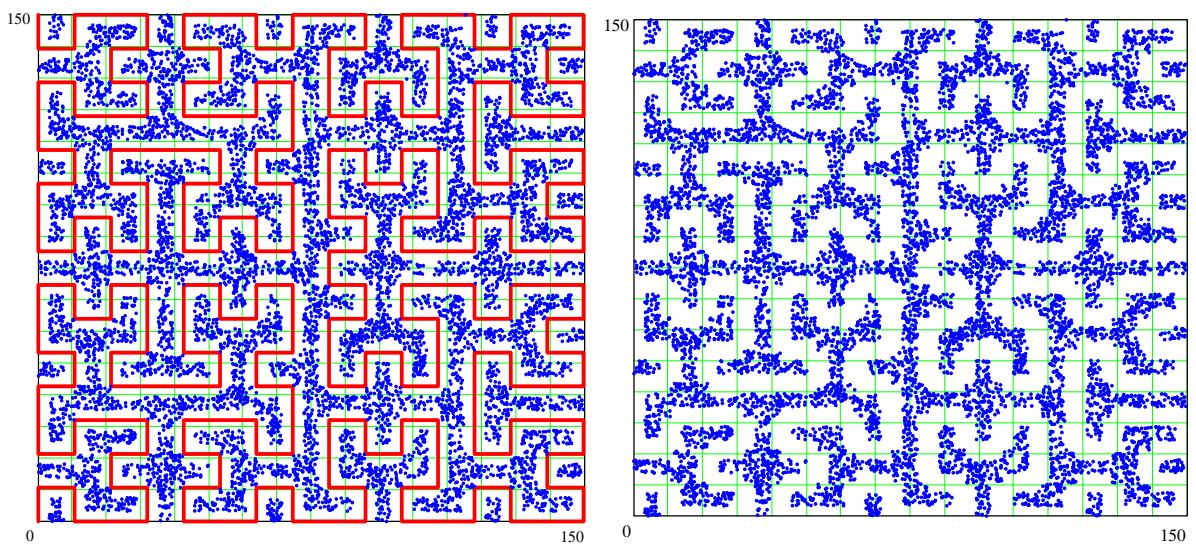


Рис.3.2 – Модель структуры на основе фрагмента кривой Гильберта

На рис.3.2 приведена модель, полученная случайным размещением элементов сети (10 тыс. узлов) в квадратной плоской области со стороной квадрата 150 м. Для большей наглядности в левой части рис.3.2 приведена кривая Гильберта, а в правой части - только элементы (узлы) высокоплотной сети. При принятии в учет общей площади области зоны обслуживания, в данном примере, плотность сети составляет 0,44 узлов на м^2 , а с учетом площади, занимаемой моделью препятствия плотность составляет около 1 узла на м^2 .

Элементы теории фракталов уже широко используются при моделировании сетей связи, а именно, при описании случайных процессов – трафика, например, в [85,103,114] и многих других работах используются понятия теории фракталов для представления свойств трафика. Это применение теории фракталов к описанию

случайных рядов было положено в работах Хёрста [82]. Методы, изложенные Хёрстом и его последователями, применимы не только к временным рядам, но и к случайным рядам вообще [52].

Если рассмотреть зону обслуживания сети, в которой сетевые элементы (пользователи или узлы сети) распределены некоторым случайнм образом (рис.3.2), то число элементов, оказавшихся в заданном фрагменте зоны, тоже будет случайной величиной. Если всю зону разбить на элементарные фрагменты и подсчитать в них число сетевых элементов, то получим случайный ряд, к которому применимы упомянутые методы. Данный подход иложен в основу дальнейшего построения модели.

Будем использовать для описания структуры сети параметр Хёрста H , отражающий степень проявления свойств самоподобия, который также связан с фрактальной размерностью как $D=2-H$ [52]. Проведем его оценку для структуры, изображенной на рис.3.2 с использованием метода изменения дисперсии [39,64].

Метод состоит в следующем. Разобьем рассматриваемую область обслуживания на единичные элементы площади, например, наложив на нее сетку с квадратными ячейками площадью 1 м^2 (ячейки могут иметь и другую площадь). Далее подсчитаем количество узлов сети в каждой из этих ячеек. В результате получим k значений

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}, \quad (3.2)$$

где k количество ячеек сетки.

Далее построим агрегированные структуры, образованные из исходной (рис.3.2) объединением ячеек исходного разбиения по q смежных ячеек в одну. Тогда для агрегированной структуры получим k ячеек, где $k=n/q$. Далее подсчитаем количество элементов сети (узлов) в ячейках агрегированного разбиения и нормируем его по отношению к исходному разбиению. Иллюстрация построения агрегированных структур приведена на рис.3.3.

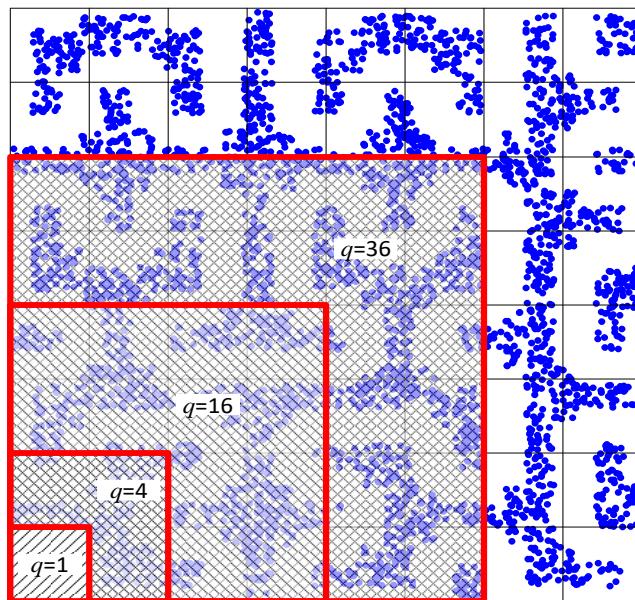


Рис.3.3 – Построение агрегированных структур

В общем случае, при каждом разбиении i будем получать множество значений

$$X_i = \left\{ \frac{x_1}{q_i^2}, \frac{x_2}{q_i^2}, \dots, \frac{x_j}{q_i^2}, \dots, \frac{x_k}{q_i^2} \right\}, \quad k = \left(\frac{w}{q_i} \right)^2, \quad i = 1 \dots n \quad (3.3)$$

где i – номер разбиения $i=1 \dots n$;

q_i – размер стороны ячейки, на которые производится разбиение области обслуживания (м);

$x_j^{(q)}$ – количество элементов сети (узлов), которые попали в j -ю ячейку, размера

q_i ;

w – длина стороны области обслуживания (м);

n – число разбиений.

Для каждого значения q_i вычислим дисперсию полученных значений $d_i = d(X_i)$

$$D_i = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}, \quad k = \left(\frac{w}{q_i} \right)^2, \quad i = 1 \dots n \quad (3.4)$$

Размер ячейки принимает значения из множества $q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$. В данном случае примем, что $q_1 < q_2 < \dots < q_n$.

При этом q_n – длина стороны максимальной ячейки разбиения.

На рис.3.4 приведены результаты агрегирования для значений $q=1, 14, 56, 255$ m^2 , что соответствует значениям $k=150, 75, 40, 20, 10$ соответственно.

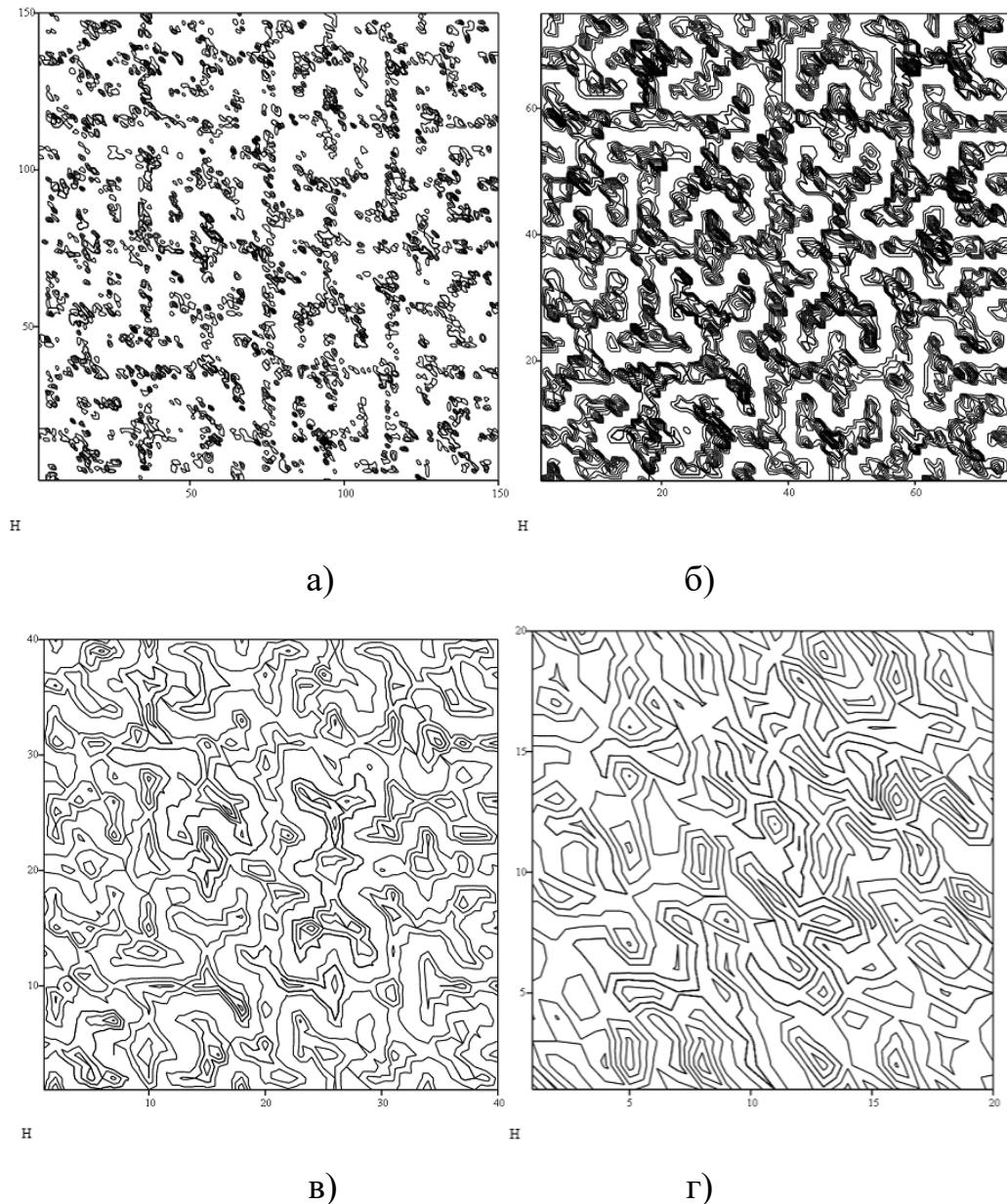


Рис.3.4 – Результаты агрегирования модельной структуры при $q=1\text{м}^2$ (а), 4м^2 (б), 14м^2 (в) 56м^2 (г)

Для оценки значения коэффициента Херста построим график зависимости:

$$\lg d_q = f(\lg q) \quad q = 1 \dots q_{\max} \quad (3.5)$$

Аппроксимируем зависимость (3.5) прямой линией

$$y(\lg q) = a \lg q + b \quad (3.6)$$

Для аппроксимации воспользуемся методом наименьших квадратов, в соответствии с которым:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n \lg q_i \lg d_i - \sum_{i=1}^n \lg q_i \sum_{i=1}^n \lg d_i}{n \sum_{i=1}^n (\lg q_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \lg q_i \right)^2} \quad (3.7)$$

$$b = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \lg d_i \right) - a \sum_{i=1}^n \lg q_i \quad (3.8)$$

Полученная зависимость приведена на рис.3.5.

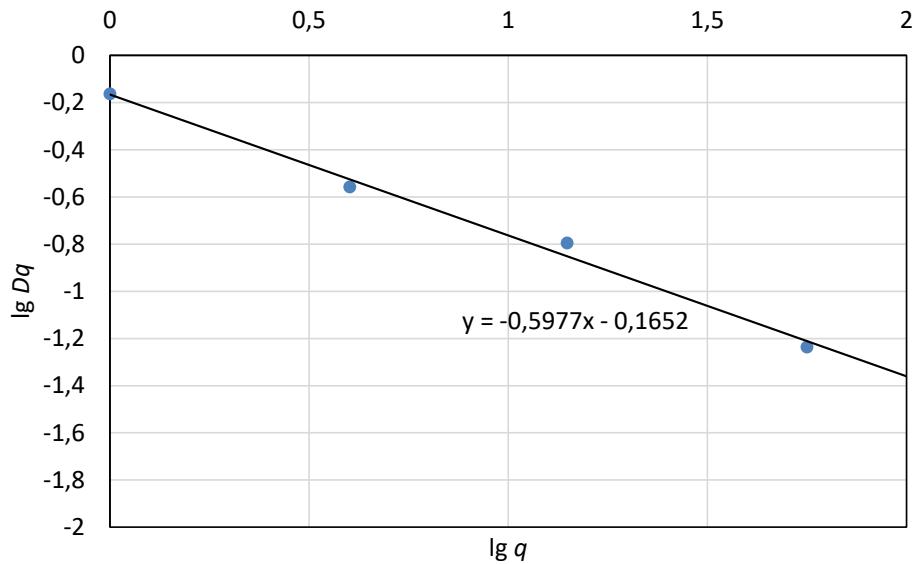


Рис.3.5 – Зависимость дисперсии агрегированных структур от размера квадрата агрегирования

Аппроксимация полученной зависимости прямой и оценка коэффициента Хёрста показала, что для данной структуры $H=0,7$, что соответствует фрактальной размерности $D=1,3$.

Выше была введена величина d_{\min} , определяющая минимально возможное удаление узлов сети от модели препятствия. Если препятствие рассматривать как некоторое строение, то кривую Гильберта можно рассматривать как модель его протяженности (длины) L , а упомянутую величину как его ширину (ширину линии).

Тогда суммарная площадь моделируемых строений S_b на моделируемой территории может быть определена как

$$S_b = d_{\min} L \quad (3.9)$$

Долю площади, занимаемой строениями, также можно рассмотреть, как один из структурных параметров модели:

$$\delta_b = \frac{S_b}{S} \quad (3.10)$$

где $S=wh$ (м^2) – общая площадь рассматриваемой территории, а w и h длина и ширина соответственно.

Поскольку d_{\min} и доля занимаемой строениями (препятствиями) площади линейно зависимы через длину L , которая в данном случае постоянна, то, как d_{\min} , так и δ_b имеют схожее влияние на свойства планируемой структуры.

В приведенном выше примере доля площади, занимаемой препятствиями, составляет 30%.

Для исследования влияния этого параметра на свойства структуры была проведена оценка зависимости от него параметра Хёрста. На рис.3.6 приведена зависимость коэффициента Хёрста от d_{\min} , в данном примере диапазон изменения значений d_{\min} , эквивалентен изменению доли площади препятствий от 0 до 50%.

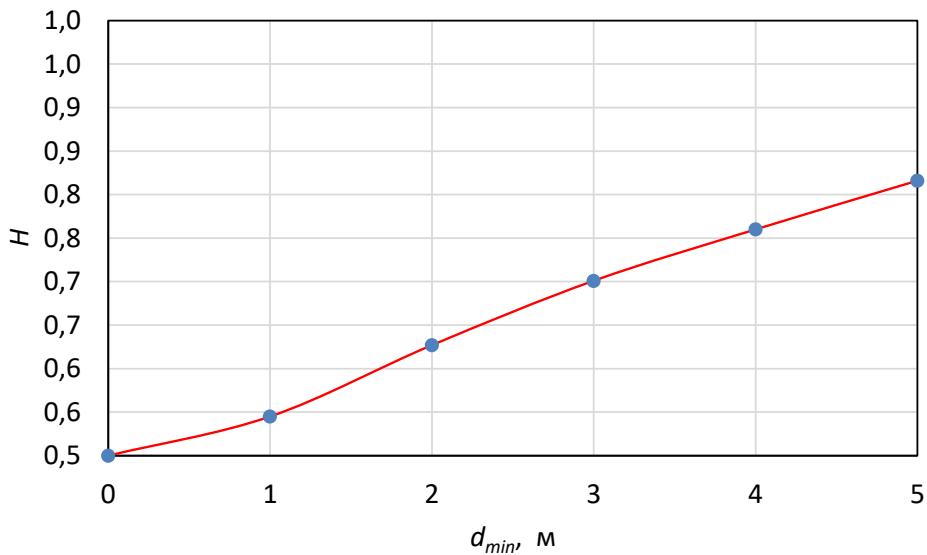


Рис.3.6 – Зависимость параметра Хёрста от величины минимального удаления d_{min}

Из полученных результатов видно, что параметр Хёрста увеличивается с увеличением d_{min} от величины 0,5 при $d_{min}=0$ до более 0,8 при $d_{min}=5\text{м}$ (что соответствует 50% площади, занятой препятствиями).

Значение 0,5 вполне ожидаемо, так как при $d_{min}=0$ препятствия фактически отсутствуют, а структура размещения узлов сети представляет собой пуассоновское поле (равномерное распределение узлов по всей территории). При росте d_{min} структура размещения узлов приминает вид, близкий к фрактальной структуре модели препятствий, это наглядно видно из рис.3.3. Данная структура обладает свойствами самоподобия, что и проявляется в увеличении параметра Хёрста.

При дальнейшем увеличении δ_b или d_{min} площадь, доступная для размещения узлов сети уменьшается настолько, что пример становится практически малоинтересным. Действительно, при δ_b близкой к 100% все узлы сети будут сконцентрированы в одной или нескольких «точках» (областих малой площади) зоны обслуживания, а при значении 100%, в условиях данной задачи возникает неопределенность из-за невозможности размещения узлов сети вообще. Стоит отметить, что эти граничные условия достижимы лишь теоретически, на практике же при δ_b , стремящейся к 100%, сама постановка задачи требует изменения.

Вероятно, в таком случае нужно рассматривать сеть внутри помещений (строений), а препятствия ассоциировать с их конструктивными элементами.

Таким образом, предложенный метод планирования позволяет имитировать структуру сети Интернета вещей, размещенную на некоторой плоской территории, имеющей доступные и недоступные для размещения узлов области, конфигурация которых может быть задана фрагментами кривой Гильберта (возможно и иной геометрической фрактальной фигурой). Параметрами при этом являются: число узлов сети, длина кривой и доля площади, занимаемой препятствиями. Изменение этих параметров позволяет приблизить свойства модели к свойствам имитируемой структуры и тем самым приблизить условия функционирования исследуемой модели сети к условиям реального окружения. Параметр Хёрста является характеристикой структуры сети в части распределения узлов (терминалов) и может быть использован для представления ее свойств с учетом окружения.

3.3. Сравнение разработанных методов по числу транзитных маршрутов

В работе [56] и в третьей главе было доказано, что при равномерном распределении узлов сети в зоне обслуживания в сети высокой плотности происходит снижение отношения сигнал/шум из-за внутриполосных помех, производимых соседними (окружающими) узлами сети, как следствие уменьшение зоны (дальности) связи при организации соединений D2D и увеличение средней длины маршрута между узлами сети. Там же была приведена оценка средней длины маршрута для сети высокой плотности, которая составила в примере около 42 транзитов.

Проведем анализ средней длины маршрута в модели сети, приведенной выше (рис.3.2). В данном случае сеть высокой плотности имеет неоднородную структуру. Оценка средней длины маршрута выполнена с помощью имитационного моделирования.

В имитационной модели реализовано формирование структуры сети (рис.3.2) и поиск всех кратчайших путей между ее узлами. В данном случае модель сети состояла из 10 тыс. узлов, а число возможных маршрутов составляло, соответственно, 100 млн.

Средняя длина маршрута для данного примера составила 83 м. С учетом средней длины одного транзита, которая составила около 5 м, среднее число транзитов в маршруте в данном случае составило около 17 транзитов.

Распределение средней длины маршрутов приведено на рис.3.7.

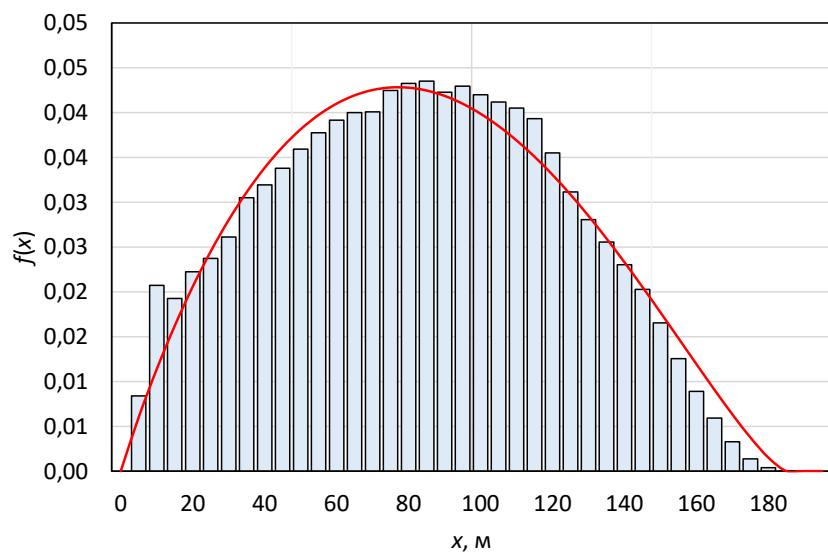


Рис.3.7 – Распределение средней длины маршрутов в условиях неоднородной структуры пространства окружения высокоплотной сети

Полученное распределение имеет колоколообразную форму, которая существенно отличается от гамма-распределения и усеченного нормального распределения. Наиболее близкой аналитической моделью для его представления является β -распределение [13], плотность вероятности которого определяется следующим выражением

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(X-x)^{\beta-1}}{X^{\alpha+\beta-1} \text{Beta}(\alpha, \beta)}, \quad \alpha, \beta > 0, \quad (3.11)$$

где α и β - параметры;

X – максимальное значение;

$Beta(\alpha, \beta)$ - β -функция.

Для данной структуры вероятность связности оказалась равной 0,56. Ее оценка была произведена как оценка доли существующих маршрутов относительно их потенциально возможного количества. Для данной структуры это естественно, несложно заметить на рис.3.2 и рис.3.3, что в структуре имеются несвязные («изолированные») области, это объясняется непрерывностью используемого фрагмента кривой Гильберта, выбранной для планирования сети.

Следует отметить, что это ограничение легко снять. Например, при планировании структуры сети (выборе случайных координат для узлов сети) можно ввести вероятность «преодоления» препятствия, т.е. установки узла в область, недоступную для их размещения. В этом случае в структуре сети появятся узлы, связывающие «изолированные» области сети.

На рис.3.8 приведено распределение длины кратчайшего маршрута, полученное указанным выше способом. При моделировании было выбрано 5% узлов, которые способны связать изолированные области. В этом случае планируемая высокоплотная сеть является полносвязной.

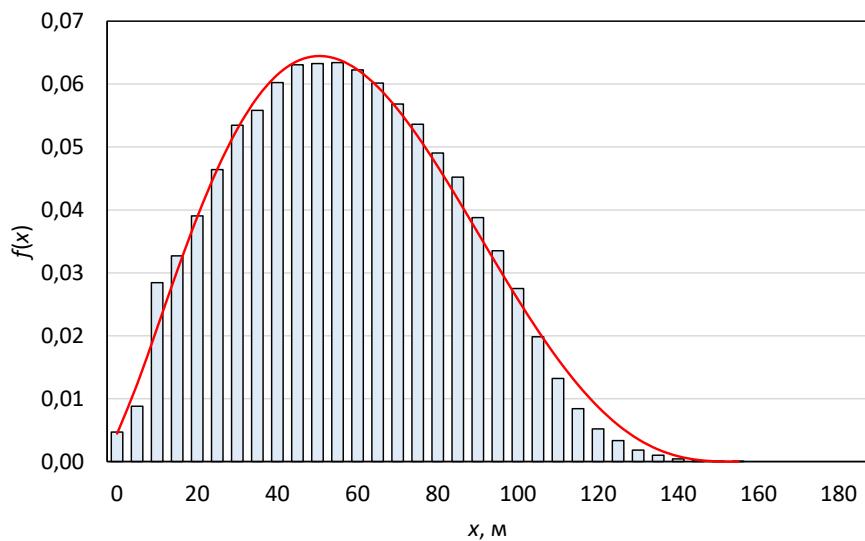


Рис.3.8 – Распределение средней длины маршрутов при полносвязном варианте планируемой высокоплотной сети

Из полученных результатов видно, что средняя длина маршрута при этом сократилась до 58м (12 транзитных участков).

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что средняя длина маршрута в условиях неоднородного пространства окружения и, как следствие, неравномерного распределения узлов сети меньше, чем в условиях их равномерного распределения [56], причем при обеспечении полной связности сети длина маршрута еще более уменьшается.

Таким образом, предложенный метод использования геометрических фракталов для планирования высокоплотной сети в условиях неоднородной структуры окружения сети приводит, в некотором смысле, к улучшению свойств сети высокой плотности, что проявляется в уменьшении средней длины маршрута. Это объясняется наличием препятствий распространения радиосигнала, которые снижают мощность помех от узлов сети за счет уменьшения числа «доступных» узлов, находящихся в ограниченной зоне.

Предложенный метод может быть адаптирован для имитации различных условий путем выбора соответствующей фрактальной кривой, ее длины, доли занимаемой площади, числа узлов сети их параметров и модели затухания сигнала.

3.4. Выводы

1. Предложен метод планирования сети связи, отличающийся тем, что при планировании сети связи высокой плотности учитывается самоподобная структура неоднородного пространства окружения сети путем использования геометрических фракталов, при этом для планирования высокоплотной сети была использована кривая Гильберта, что позволяет с достаточной для практики степенью точности учесть неоднородность пространства окружения планируемой сети.

2. Для планирования сети высокой плотности при использовании кривой Гильберта предложено ввести параметр условной ширины кривой, что позволило оценивать площадь, занимаемую строениями. При планировании сети будем полагать, что линия кривой имитирует препятствие. Линия не имеет ширины, однако при выборе позиций размещения элементов сети может быть введена условная минимальная дистанция между элементом сети и точками кривой Гильберта (минимальное удаление) d_{\min} . Эта дистанция может интерпретироваться, как условная ширина кривой и быть использована для представления геометрических размеров препятствий.

3. При планировании высокоплотной сети с использованием кривой Гильберта используются также следующие параметры: число узлов, длина фрагмента кривой Гильберта и доля площади, занимаемой строениями.

4. Сравнение результатов имитационного моделирования высокоплотных сетей для метода планирования сети с использованием фрактальной кривой Гильберта, учитывающего неоднородную структуру пространства окружения сети, доказало, что для этого метода требуется более, чем в два раза меньшее число транзитов при маршрутизации сообщений по сравнению с методом планирования сети, предполагающим однородную структуру пространства окружения. Было установлено также, что длина маршрута при неоднородной структуре пространства окружения может быть представлена β -распределением.

5. Предложенный метод планирования сетей высокой плотности при неоднородной структуре пространства окружения может быть использован как для планирования сетей, располагаемых вне помещений, так и сетей, располагаемых внутри помещений. При этом план города заменяется планом здания, а фрактальная кривая моделирует препятствия, которыми являются стены и иные элементы зданий.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ФРАКТАЛЬНОЙ ФИГУРЫ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО ПРОСТРАНСТВА ОКРУЖЕНИЯ

4.1. Фрактальные свойства пространства окружения сети высокой плотности

В предыдущей главе был разработан метод планирования высокоплотной сети в условиях неоднородной структуры пространства окружения, основанный на учете самоподобных свойств этого пространства вследствие типовых проектов развития городов, многоквартирных домов и т.д. Учет самоподобия неоднородной структуры окружения было предложено осуществлять путем использования при планировании и проектировании сетей связи геометрических фракталов. При этом детально был исследовано использование фрактальной кривой Гильберта. Полученные результаты показали существенное преимущество при использовании предложенного метода по сравнению с известными методами, для которых при планировании и проектировании сетей высокой плотности не учитывалась самоподобная структура пространства окружения сети. Исходя из сказанного, представляется необходимой разработка методики планирования и проектирования высокоплотных сетей в условиях неоднородного пространства окружения с использованием фрактальных кривых, учитывающих самоподобные характеристики такого пространства.

Тенденции развития Интернета вещей (ИВ) и его роль в современной инфраструктуре среды обитания человека отмечались и обсуждались во многих работах [8,9,30,56]. Сети ИВ уже сегодня имеют значительную плотность

устройств (количество устройств на единицу площади). В недалеком будущем они станут сверхплотными, когда число устройств будет составлять одно и более на квадратный метр. Заметим, что локально сети высокой плотности уже довольно давно существуют, например, сети доступа беспроводного доступа (WiFi) на стадионах и подобных сооружениях. В приведенном примере структура сети, как правило, регулярна и содержит достаточно большое количество точек доступа, которые равномерно распределены в зоне обслуживания с учетом особенностей сооружения.

Однако перспективные сети ИВ будут строиться в самых разнообразных элементах инфраструктуры поселений, а также на природных объектах, например, таких как берега рек, горные и лесные массивы, морские побережья и прочее. В таких условиях внешняя среда определяет возможную структуру размещения узлов сети. При этом форма сети в некоторой степени повторяет форму тех объектов, в которых она строится.

Пожалуй, самым очевидным подходом является копирование свойств окружения целевой сети, т.е. составление плана и его перенос некоторым способом в среду модели сети. Такой способ реализуется многими системами имитационного моделирования сетей беспроводной связи. Его достоинством является максимальная схожесть структуры модели со структурой планируемой сети. Недостаток этого способа присущ всем численным методам и заключается в том, что он дает частное решение и не позволяет делать обобщений и анализа взаимосвязей параметров окружения и планирования сети.

Такой анализ требует проведения множества имитационных экспериментов, анализа и обобщения их результатов. Частные решения дают весомый эффект при существенной «индивидуальности» условий, «нестабильности» структур, которая имеет место при относительно малом числе сетевых элементов.

В сетях высокой плотности число сетевых элементов настолько велико, что образуемые сетевые структуры могут быть достаточно «стабильны», это позволяет делать обобщения и устанавливать их связь со структурой окружения.

Большинство объектов пространства окружения, в котором создается сеть, т.е. природных и архитектурных объектов, обладают свойствами фрактальных фигур (ФФ) [38,52]. В работах многих авторов, например [38,79], доказана самоподобная структура таких объектов. Численной характеристикой формы в таком случае является фрактальная размерность (ФР), понятие которой как раз и было введено при исследовании самоподобных объектов [38,52,115].

В работах автора [59,102,123] и в третьей главе был рассмотрен подход к планированию структуры высокоплотной сети путем введения границ размещения, форма которых схожа с формой той среды, где планируется ее построение. Для этой цели была использована фрактальная фигура, а именно: кривая Гильберта. Действительно, как было показано в [59], форма этой кривой схожа с формой объектов окружения (зданий и строений на плане города). В приведенном примере степень схожести оценивалась как фрактальная размерность, определенная для фрагмента кривой Гильберта и плана территории, на которой будет расположена высокоплотная сеть.

Цель этого подхода состоит в том, чтобы приблизить структуру модели сети к структуре реальной сети. Сложность данной задачи состоит в представлении и оценке схожести форм окружения планируемой сети и пространства окружения.

4.2. Метод представления пространства окружения высокоплотной сети

Данную задачу можно рассматривать как подбор модели для представления пространства окружения планируемой сети. Критерием выбора модели является наибольшая схожесть окружения целевой сети и модели. Оценка схожести представляет определенную сложность: во-первых, необходимо определить каким образом может быть задано описание окружения, модель которого следует построить, во-вторых необходимо определить критерий и метод оценки схожести.

Следуя методу, предложенному в [102], будем использовать для представления окружения сети ФФ. Например, как это показано на рис.4.1 для салфеток Серпинского. Узлы сети имеют случайные координаты, определяемые как

$$\begin{cases} x_i = \text{uniform}(x_{\min}, x_{\max}) & d(x_i, O) \geq d_{\min} \\ y_i = \text{uniform}(y_{\min}, y_{\max}) & d(y_i, O) \geq d_{\min} \end{cases} \quad (4.1)$$

где x_{\min} и x_{\max} , y_{\min} и y_{\max} – определяют границы по координатам x и y , O – линия модели объекта окружения, $d(x_i, O)$ - расстояние от точки до линии объекта окружения, d_{\min} – минимальное расстояние между узлом сети и линией модели объекта.

В данной модели узлы сети могут находиться на расстоянии не менее d_{\min} от объекта окружения и их координаты имеют равномерное распределение в заданных границах. В [59] было показано, что точечное поле (модель сети), образованное таким образом, обладает фрактальными свойствами (свойствами самоподобия), которые обусловлены фрактальными свойствами объекта, использованного для представления окружения.

В частности, отметим, что пуассоновское поле, которое бы в данной модели имело место при отсутствии учета пространства окружения, не имеет свойств самоподобия. Наличие и степень выраженности этих свойств характеризует структуру сети. Это приобретает особое значение при высокой плотности узлов сети и ее планировании и проектировании.

Связь свойств модели со свойствами объекта, выбранного в качестве модели окружения, дает возможность подобрать для планирования сети фрактальную фигуру, имеющую схожие свойства со свойствами объектов в планируемой структуре.

Как было выше отмечено, в качестве модели окружения для городской инфраструктуры может быть использована кривая Гильберта [52]. Это далеко не единственная фигура, метод построения которой и фрактальные свойства известны.

На рис.4.1 приведен пример построения модели сети, в качестве окружения для которой использовано изображение ФФ – салфетки Серпинского [38,52], полученной на 6-ой итерации построения.

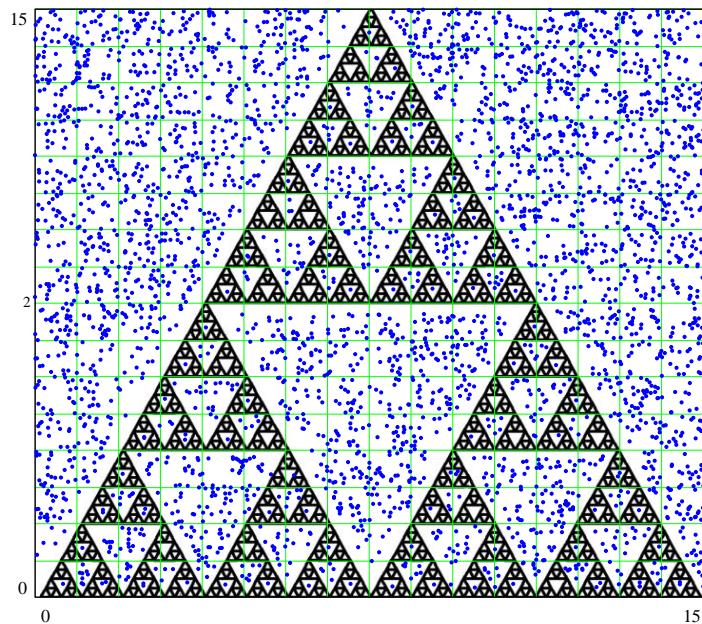


Рис.4.1 – Пример структуры высокоплотной сети при использовании салфеток Серпинского

Существует достаточно много фрактальных фигур, для которых хорошо известны методы построения и их фрактальные свойства. Эти фигуры также могут быть использованы при решении задач планирования структуры сети, однако для выбора конкретной фигуры следует определить параметры, позволяющие произвести ее выбор для конкретных условий.

Таким образом, задача данной главы состоит в определении метода выбора и оценки параметров для сравнения свойств планируемой структуры сети и структуры модели для создания методики планирования и проектирования высокоплотных сетей связи в условиях неоднородной структуры пространства окружения.

4.3. Фрактальные размерности

Будем полагать, как и в главе 3, что окружение задается изображением (план местности, карта, фотография и т.д.). Полагаем также, что изображение таково, что на нем визуально можно различить необходимые объекты (здания и сооружения или природные объекты). Также будем полагать, что модель окружения задается аналогичным образом.

В качестве критерия схожести в работе [59] используется наибольшая близость численных оценок ФР объекта и модели.

Вероятно, что ФР является наиболее общей характеристикой с точки зрения представления формы и не зависит от размещения, поворотов и наклонов изображения.

Однако, цифровое изображение, полученное как фотография, имеет особенности, которые определяются рядом его параметров. Поэтому, оценка ФР одного и того же изображения при различных значениях параметров изображения и метода его предварительной обработки может дать существенно различные результаты. Предварительная обработка предполагает введение некоторой величины порога яркости для пикселей изображения, ниже которой пиксели игнорируются, это можно иллюстрировать выделением границ объектов.

На рис.4.2 приведены границы объектов на фотографии местности, полученные для изображений с различными настройками контрастности. Из данного рисунка видно, что полученные в результате планирования структуры существенно отличаются [124]. Для выделения границ использовалась функция `findContours` библиотеки OpenCV-python [97].

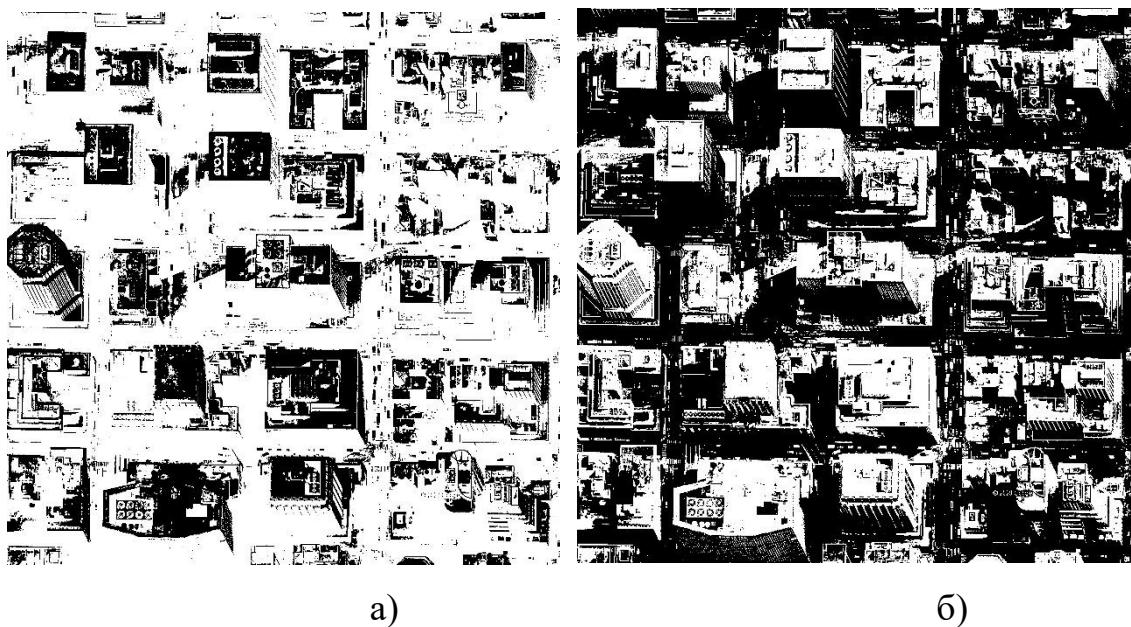


Рис.4.2 – Пример оценки фрактальной размерности изображений 1,719 (а) и 1,872 (б), отличающихся уровнем контрастности

Оценивая приведенные рисунки визуально, можно заметить, что рисунок 4.2а в большей степени отражает структуру окружения с точки зрения размещения элементов сети, чем рисунок 4.2б. Таким образом, следует учитывать особенности исходных изображений и производить их соответствующую предварительную обработку.

На рисунке 4.3а приведен результат использования цветного изображения (с последующим преобразованием в монохромное и выделением уровней яркости) фрагмента карты города. На рисунке 4.3б приведена модель, в качестве которой выбран ковер Серпинского [52]. Модель выбрана из соображений близости значений величины ФР.

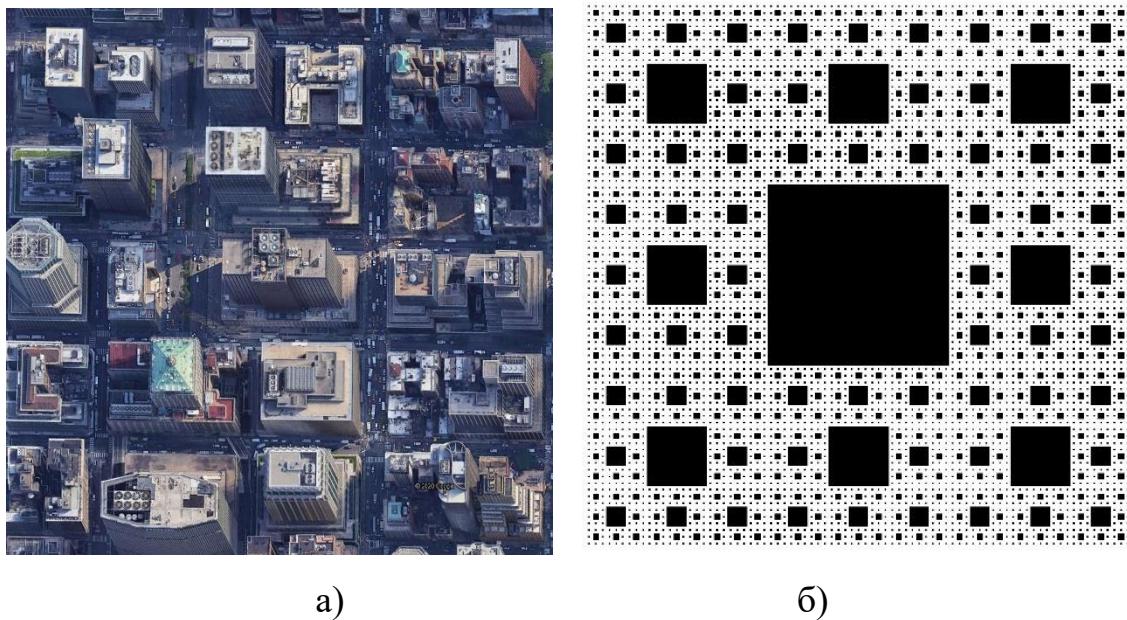


Рис.4.3 – Фрагмент карты города (а) и модель (ковер Серпинского) (б)

ФР приведенного на рисунке 4.3а изображения составила 1,719. Наиболее близкая по ФР модель – ковер Серпинского, для нее ФР составляет 1,723. Модель получена как пятая итерация построения данной фрактальной фигуры. Измерение ФР проводилось программным методом Миньковского (box-counting) [52]. Для представленных изображений было использовано программное обеспечение [38].

На рисунке 4.4а приведен другой, аналогичным образом полученный фрагмент карты города. Как видно из рисунка, его структура отличается от прежнего фрагмента, основу которого составляли элементы прямоугольной формы. В отличие от него на этом фрагменте доминируют объекты, по форме близкие к треугольникам.

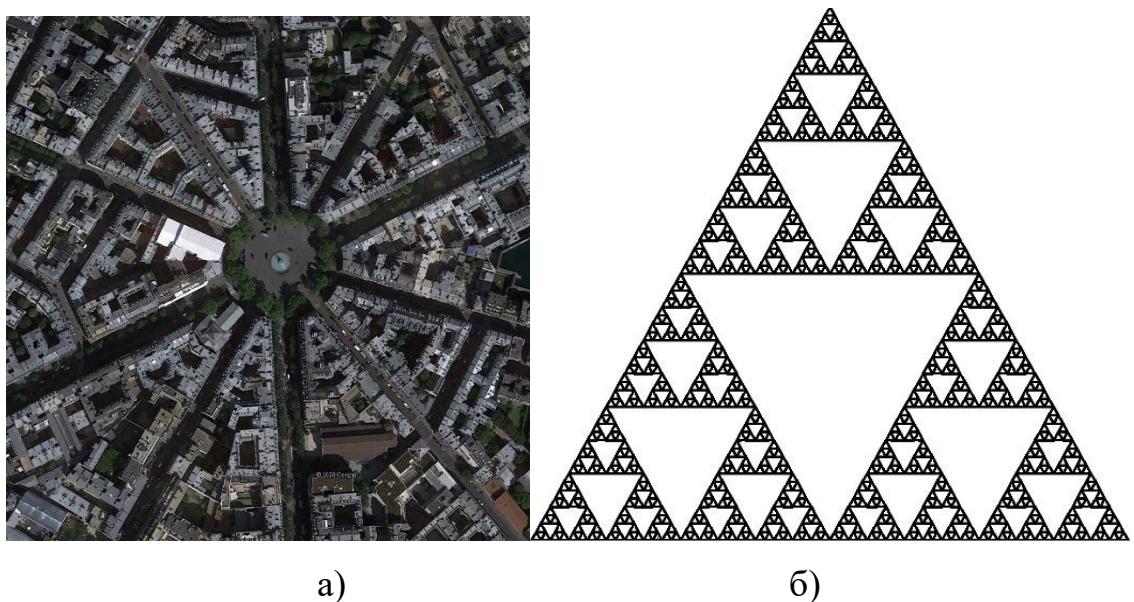


Рис.4.4 – Фрагмент карты города (а) и модель (салфетка Серпинского) (б)

Оценка фрактальной размерности фрагмента карты составила 1,756. Для сравнения на рисунке 4.4б приведена модель – салфетка Серпинского, полученная шестью итерациями построения. Фрактальная размерность составила при этом 1,771.

На рисунке 4.5а приведен фрагмент карты города, ФР изображения для которой составила 1,808. Форма объектов на этой карте преимущественно имеет прямоугольный характер. На рисунке 4.5б приведен пример модели – фрагмент кривой Гильберта, полученной четырьмя итерациями, ФР изображения кривой составляет 1,862.

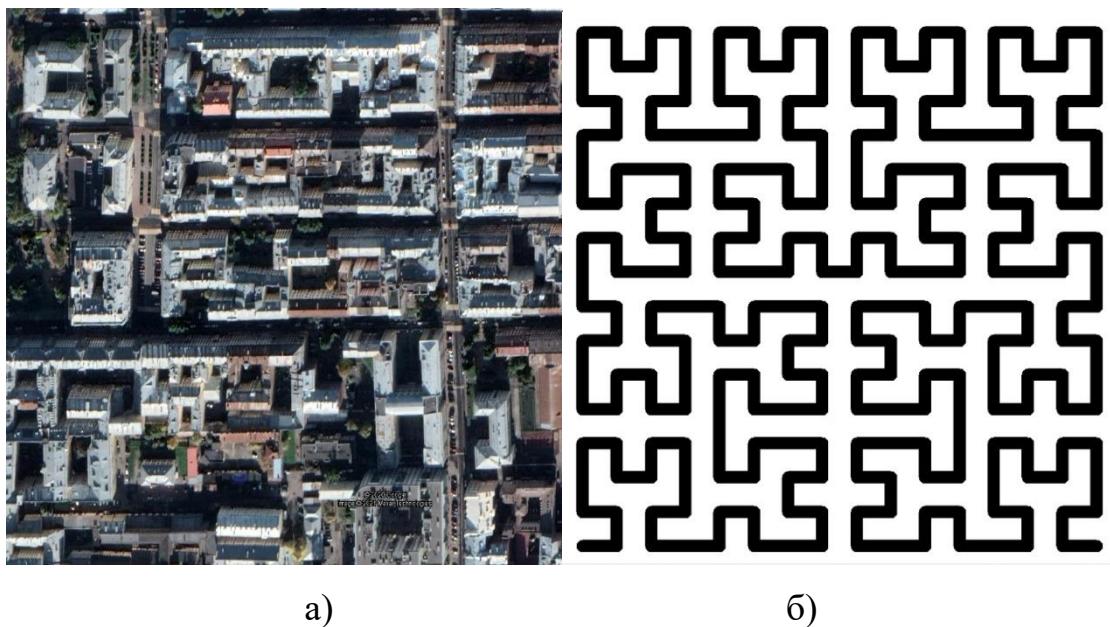


Рис.4.5 – Результат предварительной обработки фрагмента карты города (а) и модель (кривая Гильберта) (б)

В приведенных выше примерах использованы фрагменты фрактальных фигур. Теоретически длина кривой ФФ бесконечна. При таком условии ФР фрактальной фигуры равна своей теоретической оценке. Приведенные фрагменты получены при ограничении, а именно: конечное число итераций построения фрактальной кривой. Далее для этих фрагментов построены изображения, для которых и производилась оценка ФР. Это объясняет некоторое отличие полученных оценок от теоретических значений для соответствующих фракталов. Например, кривая Гильберта по определению при количестве итераций, стремящемуся к бесконечности, заполняет единичный квадрат. Согласно этому определению ее фрактальная размерность равна 2.

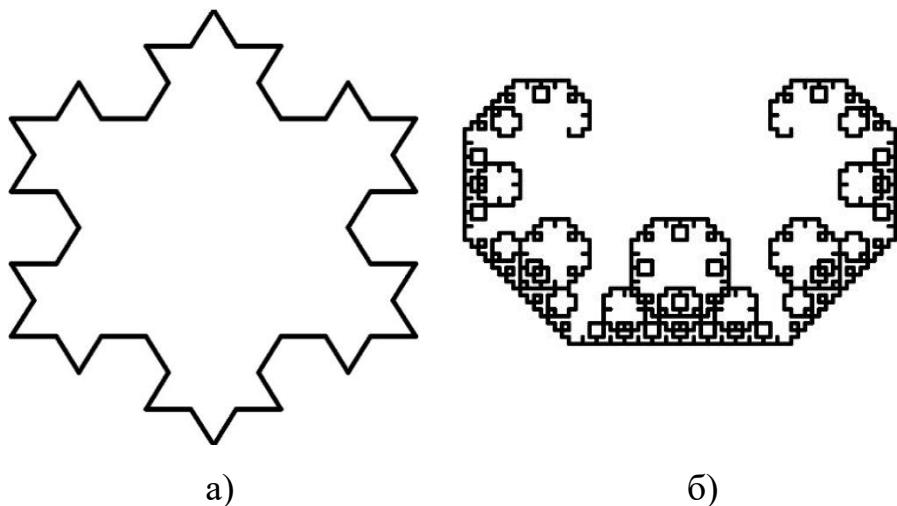
Анализируя полученные результаты можно заметить, что выбор модели только на основании величины фрактальной размерности не вполне формален. Достаточно большое количество ФФ имеют близкие значения ФР, а при анализе пространства окружения также вносится некоторая неопределенность, поэтому круг выбора может быть достаточно широк.

4.4. Фрактальные фигуры для представления неоднородного пространства окружения сети высокой плотности

На рисунке 4.6 приведены построения фрагментов некоторых ФФ, которые могут найти применение при планировании сети. Это такие фракталы как: снежинка Коха (а), кривая Леви (б), кривая Пеано-Госпера (в), кривая Серпинского (д), квадрат Госпера (е), кривая дракона (ж) [86].

Как видно из приведенных рисунков, эти фигуры отличаются формами базовых элементов, которые следует учитывать при выборе модели. В данных примерах можно использовать различные построения как под прямым углом, так и с иными углами.

Сравнения приведенных моделей с различными вариантами пространства окружения показали большую близость моделей с прямоугольными построениями пространства, в которых доминируют объекты прямоугольной формы, а для иных моделей - когда доминируют различного рода многоугольники.



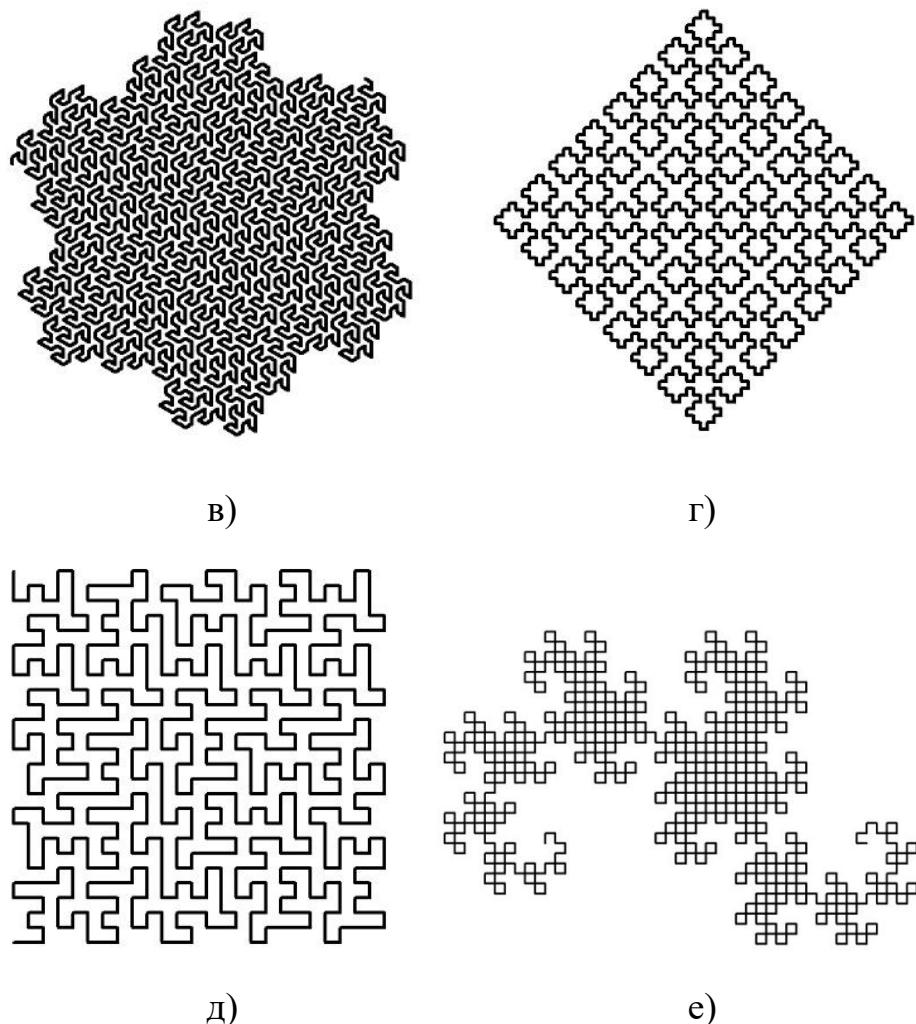


Рис.4.6 – Примеры фрактальных фигур

В таблице 4.1 приведены значения ФР некоторых фракталов, правила построения которых достаточно хорошо известны.

Таблица 4.1 – Фрактальные размерности

| N | Наименование фрактала | Теоретическая ФР | Результат оценки | |
|---|-----------------------|------------------|------------------|-------|
| | | | D_f | D_L |
| 1 | Кривая Гильберта | 2,0000 | 1,862 | 0,374 |
| 2 | Ковер Серпинского | 1,893 | 1,723 | 0,403 |
| 3 | Салфетка Серпинского | 1,585 | 1,771 | 0,356 |
| 4 | Кривая Коха | 1,262 | 1,589 | 0,334 |
| 5 | Кривая Леви | 1,934 | 1,641 | 0,354 |

| | | | | |
|----|----------------------|-------|-------|-------|
| 6 | Кривая Пеано-Госпера | 2,000 | 1,837 | 0,428 |
| 7 | Кривая Серпинского | 2,000 | 1,605 | 0,367 |
| 8 | Ковёр Аполлония | 1,306 | 1,351 | 0,409 |
| 9 | Кривая дракона | 1,524 | 1,490 | 0,401 |
| 10 | Мозаика «Вертушка» | 1,723 | 1,689 | 0,389 |

4.5. Методика выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования сети высокой плотности

В теории представления фрактальных объектов используют различные понятия размерности. В частности, для описания мульти фрактальных объектов используют понятия как фрактальной, так и информационной и корреляционной размерности. Эти понятия обобщают понятие размерности Ренни (обобщенной размерности) [44,52]. Обобщенная размерность определяется на сетке с ячейкой размера ε , покрывающей фрактальный объект, как

$$D_g = \frac{1}{1-g} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^g}{\log \varepsilon} \quad (4.2)$$

где ε - размер ячейки сетки, p_i вероятность попадания аттрактора в ячейку i , q – параметр, определяющий характер данного выражения.

При $q=1$ выражение (4.2) дает фрактальную размерность:

$$D_f = D_{g=0} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{-\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon}, \quad (4.3)$$

При $q=0$ выражение (4.2) не определено, но после применения правила Лопитала оно дает выражение для информационной размерности

$$D_I = D_{g=1} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon) \log p_i(\varepsilon)}{\log \varepsilon}, \quad (4.4)$$

При $q=2$ выражение (4.2) дает корреляционную размерность

$$D_C = D_{g=2} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^2(\varepsilon)}{\log \varepsilon}, \quad (4.5)$$

При рассмотрении единственного монофрактала выражения (4.2), (4.4) и (4.5) равны и представляют единственный параметр – равный фрактальной размерности.

В частности, известны подходы к описанию городской инфраструктуры с использованием размерностей (4.2), (4.4) и (4.5) [79].

В соответствии с определением p_i в выражениях (4.2) и (4.4) – это вероятность попадания аттрактора в ячейку i , т.е. вероятность того, что ячейка содержит фрагмент фрактала. При монофрактале (единственном фрактале), т.е. когда в условиях данной задачи все эти вероятности равны, рассматриваются только те ячейки, которые содержат фрагменты фигуры.

Будем характеризовать вероятность p_i вероятностью попадания точки аттрактора в i -ю ячейку. Эта вероятность зависит от доли аттрактора L_i , попадающей в данную ячейку, которую определим, как

$$\tilde{p}_i = L_i / L \quad (4.5)$$

где L – общая длина аттрактора (рассматриваемого фрагмента фрактала).

$$L = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} L_i \quad (4.6)$$

Теоретически при уменьшении размера ячейки L стремится к бесконечности, однако при оценке размерности реальных изображений L конечно, как конечно и число ячеек.

Поскольку в практических приложениях используются цифровые изображения, будем оценивать длину L_i в количестве пикселей, попадающих в i -ю ячейку. В таком случае, \tilde{p}_i будут различны, а выражение (4.4) может быть записано через \tilde{p}_i

$$D_L = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \tilde{p}_i(\varepsilon) \log \tilde{p}_i(\varepsilon)}{\log \varepsilon}. \quad (7)$$

Поскольку числитель (7) аналогичен (4), то его смысл также может быть интерпретирован как энтропия (информация) с той разницей, что в данном случае \tilde{p}_i характеризует вероятность попадания точки ФФ в i -ю ячейку.

Наряду с показателями, характеризующими форму окружения, для модели пространства окружения существенную роль играет доля площади, занятой различными объектами, например, зданиями и иными сооружениями на плане города. В отличие от плана модель в виде фрагмента ФФ не занимает площади за исключением предельных условий. Например, кривая Гильберта по определению в пределе заполняет единичный квадрат.

В главе 3 введено минимальное удаление для элементов сети от модели кривой d_{\min} , которое имитирует физические размеры сооружений. Для сравнения предлагаемых моделей с планируемым пространством окружения также введем условную величину d , которую будем рассматривать как ширину линии модели. Тогда с учетом d можно будет оценить площадь, занимаемую моделью кривой

$$S_m = Ld \quad (4.7)$$

где L – общая длина линии модели, d – ширина кривой.

Доля площади, занимаемая моделью на планируемой площади, определяется как

$$\delta = Ld/S_0 \quad (4.8)$$

где S_0 – площадь планируемой территории.

Для примеров, приведенных на рис 4.2, 4.3 и 4.4 доля площади для соответствующих планов и их моделей составляет 0,384 и 0,403 (рис.4.2), 0,381 и 0,336 (рис.4.3), 0,387 и 0,374 (рис.4.4).

Величина δ для модели зависит от величины d , которая может быть ориентировочно выбрана в соответствии с выражением (4.8), если для модели известна длина линии L , а требуемая величина δ получена при анализе планируемого пространства окружения.

С использованием полученных результатов можно разработать методику выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования высокоплотной

сети в условиях неоднородного пространства окружения сети. На рисунке 4.7 приведен соответствующий алгоритм, определяющий такую методику.

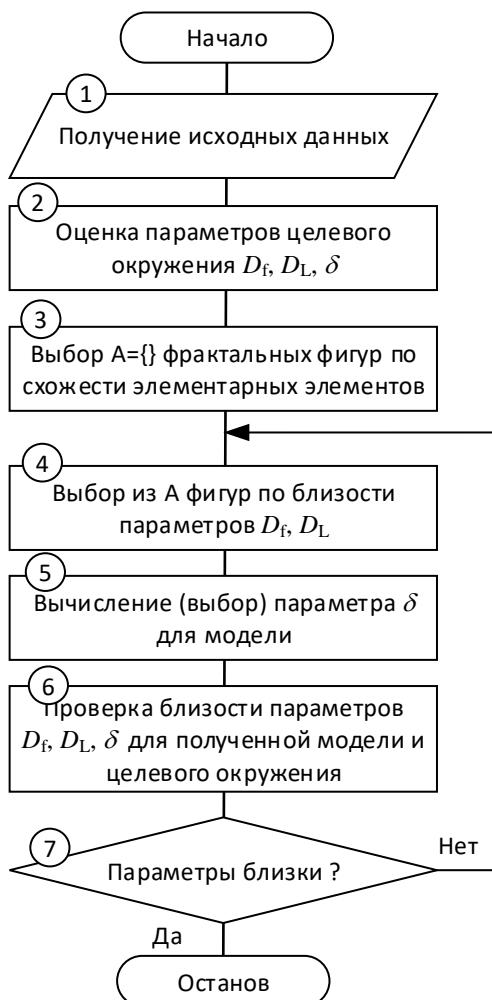


Рис.4.7 – Алгоритм выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования высокоплотной сети в условиях неоднородного пространства окружения сети.

Приведенный алгоритм позволяет формализовать выбор модели окружения для планирования и проектирования высокоплотной сети. Он включает в себя 6 основных шагов и проверку свойств полученной модели.

Единственным элементом данного алгоритма, не имеющим полной формализации, является третий шаг, который заключается в выборе модели по схожести элементарных элементов. Этот элемент достаточно сложно

формализовать, к тому же, следует иметь в виду, что не всегда схожесть формы элементарных элементов структуры даст лучший результат.

4.6. Выводы

1. Рассмотрены примеры использования различных фрактальных фигур для представления пространства окружения высокоплотной сети, в том числе салфетки Серпинского, ковер Серпинского и кривая Гильберта. Для каждого из примеров получены оценки фрактальной размерности методом Миньковского.
2. Для сравнительной характеристики фрактальных фигур и структуры планируемого пространства окружения сети могут быть использованы оценки фрактальной размерности и схожести элементарных ячеек планируемой структуры и фрактальной модели. В качестве параметра численного сравнения предложено также использовать параметр, характеризующий форму модели, который можно получить на основе выражения для информационной размерности.
3. Для выбора фрактальной фигуры предложено также использовать параметр, характеризующий долю площади, занимаемой в площади пространства окружения сети строениями, стенами и иными элементами этого пространства.
4. Разработана методика выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования высокоплотной сети в условиях неоднородного пространства окружения, основанная на близости параметров фрактальной размерности, модифицированной информационной размерности и доли площади, занимаемой в площади пространства окружения сети иными элементами этого пространства. Методика реализована в виде алгоритма выбора фрактальной фигуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

1. Анализ развития сетей и систем связи на горизонте планирования до 2030 года показал, что для этих сетей принципиально изменяются характеристики плотности устройств сети и круговой задержки. При этом сети связи пятого поколения являются сетями высокой плотности, для которых круговая задержка может составлять единицы миллисекунд, а сети шестого поколения и сети 2030 – сверхплотными сетями с круговой задержкой в 1 мс и менее.
2. Для сетей связи пятого и последующих поколений необходима разработка и исследование новых методов планирования и проектирования с учетом высокой плотности сети.
3. Предложена модель сети высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения, в которой для каждого из узлов сети определяются области сигналов и помех. При этом предполагается, что передача и прием целевого сигнала не производится в случае, когда приемный узел принимает один или несколько сигналов, уровень каждого из которых превышает некоторое пороговое значение p_m . В таком случае помеха в точке приема создается только сигналами, каждый из которых не превышает данного порогового уровня. В случае однородной среды распространения и равной мощности всех источников сигналов, а также круговой диаграммы направленности антенн, узлы, создающие помехи, будут расположены за пределами круга или сферы в 3-х мерной модели.
4. Получены аналитические выражения для зависимости мощности помехи в заданной точке от радиуса области сигналов, радиуса области помех и затухания сигнала от расстояния. С помощью имитационного моделирования доказано, что результаты, полученные на основе

аналитических выражений и имитационного моделирования близки с достаточной для практического использования точностью.

5. Предложен метод планирования полносвязной сети Ad Hoc высокой плотности 1 млн устройств на один 1m^2 в условиях однородной структуры пространства окружения, отличающийся тем, что полносвязность сети доказана на основе теоремы Эрдеша-Ренъи, а в качестве модели сети используется модель, включающая область сигналов и область помех, а радиус связи устройства составляет 10 м.

6. Число транзитов в полносвязной сети Ad Hoc высокой плотности в условиях однородной структуры пространства окружения сети оказывается достаточно большим, что отражается на качестве обслуживания трафика, особенно в части допустимых задержек. Эта проблема может быть решена путем кластеризации сети с использованием хорошо известных алгоритмов, например, из теории и практики беспроводных сенсорных сетей. Однако в условиях неоднородной структуры пространства окружения высокоплотной сети кластеризация может возникнуть и естественным путем вследствие наличия естественных препятствий на пути распространения сигнала.

7. Предложен метод планирования сети связи, отличающийся тем, что при планировании сети связи высокой плотности учитывается самоподобная структура неоднородного пространства окружения сети путем использования геометрических фракталов, при этом для планирования высокоплотной сети была использована кривая Гильберта, что позволяет с достаточной для практики степенью точности учесть неоднородность пространства окружения планируемой сети.

8. Для планирования сети высокой плотности при использовании кривой Гильберта предложено ввести параметр условной ширины кривой, что позволило оценивать площадь, занимаемую строениями. При планировании сети будем полагать, что линия кривой имитирует препятствие. Линия не имеет ширины, однако при выборе позиций размещения элементов сети может быть введена условная минимальная дистанция между элементом сети

и точками кривой Гильберта (минимальное удаление) d_{\min} . Эта дистанция может интерпретироваться, как условная ширина кривой и быть использована для представления геометрических размеров препятствий.

9. При планировании высокоплотной сети с использованием кривой Гильберта используются также следующие параметры: число узлов, длина фрагмента кривой Гильберта и доля площади, занимаемой строениями.

10. Сравнение результатов имитационного моделирования высокоплотных сетей при неоднородной и однородной структурах пространства окружения сети доказало, что для сети в условиях неоднородной структуры требуется более, чем в два раза меньшее число транзитов при маршрутизации сообщений, чем для однородной структуры пространства окружения, что объясняется наличием естественной кластеризации в условиях неоднородной структуры. Было установлено также, что длина маршрута при неоднородной структуре пространства окружения может быть представлена β -распределением.

11. Предложенный метод планирования сетей высокой плотности при неоднородной структуре пространства окружения может быть использован как для планирования сетей, располагаемых вне помещений, так и сетей, располагаемых внутри помещений. При этом план города заменяется планом здания, а фрактальная кривая моделирует препятствия, которыми являются стены и иные элементы зданий.

12. Рассмотрены примеры использования различных фрактальных фигур для представления пространства окружения высокоплотной сети, в том числе салфетки Серпинского, ковер Серпинского и кривая Гильберта. Для каждого из примеров получены оценки фрактальной размерности методом Миньковского.

13. Для сравнительной характеристики фрактальных фигур и структуры планируемого пространства окружения сети могут быть использованы оценки фрактальной размерности и схожести элементарных ячеек планируемой структуры сети и фрактальной модели. В качестве

параметра численного сравнения предложено также использовать параметр, характеризующий форму модели, который можно получить на основе выражения для информационной размерности.

14. Для выбора фрактальной фигуры предложено также использовать параметр, характеризующий долю площади, занимаемой в площади пространства окружения сети строениями, стенами и иными элементами этого пространства.

15. Разработана методика выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования высокоплотной сети в условиях неоднородного пространства окружения, основанная на близости параметров фрактальной размерности, модифицированной информационной размерности и доли площади, занимаемой в площади пространства окружения сети строениями, стенами и иными элементами этого пространства. Методика реализована в виде алгоритма выбора фрактальной фигуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов П.А. Алгоритм выбора головного узла кластера сенсорной сети в трехмерном пространстве. Электросвязь, №4, 2014.
2. Аль-Наггар Я.М. Алгоритм выбора головного узла кластера для всепроникающих сенсорных сетей с использованием нечеткой логики и диаграмм Вороного. Электросвязь, №8, 2014.
3. Атея, А.А. Многоуровневая облачная архитектура для услуг Тактильного Интернета / А.А. Атея, А.И. Выборнова, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2017. – № 2. – С. 26-30.
4. Атея А.А., Энергоэффективная граничная облачная система для 5G / Филимонова М.И.; Атея А.А.; Мутханна А.С.А.; Киричек Р.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 4. С. 78-84.
5. Атея, А.А. Архитектура сотовой системы 5G на базе МЕС / Атея, А.А.; Мутханна, А.С.; Кучерявый, А.Е.; // В книге: Молодежная научная школа по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям (АРТСТ-2017) материалы молодежной научной школы. Российский университет дружбы народов; Под общей редакцией К. Е. Самуилова, Е. А. Кучерявого, А. Н. Дудина. 2017. С. 23-29.
6. Большова Г.Н. Проблемы стандартизации сетей мобильной связи / Г.Н. Большая, Л.М. Невдяев // BYTE Россия. – 2002. - №6 (47). / <https://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=6602>
7. Бородин, А.С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2017. – № 5. – С. 45-49.
8. Бородин А.С. Особенности использования D2D-технологий в зависимости от плотности пользователей и устройств. / Бородин А.С., Кучерявый А.Е., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2018. № 10. С. 40-45.
9. Бородин А.С. Сети связи 2030 / А.Е.Кучерявый, Р.В.Киричек // Электросвязь, №11, 2018, с.52-56.

10. Бородин А.С. Маршрутизация трафика в сети беспроводной связи, построенной на базе D2D-технологий / Бородин А.С., Парамонов А.И. // Электросвязь, №2, 2019, с. 38-44.
11. Бородин А.С. Метод построения сети связи на базе D2D-технологий с использованием дополнительных маршрутизаторов / А.С.Бородин, А.Е.Кучерявый, А.И.Парамонов // Электросвязь, №4, 2019, с.86-92.
12. Бузюков Л.Б., Проблемы построения беспроводных сенсорных сетей / Бузюков Л.Б., Окунева Д.В., Парамонов А.И. // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 1. С. 5-12.
13. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.
14. Викулов А.С., Анализ основных видов помех в задаче планирования сетей Wi-Fi с высокой плотностью пользователей / Викулов А.С., Парамонов А.И. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 1. С. 21-31.
15. Владыко А.Г., Мутханна А.С., Кучерявый А.Е. Метод выгрузки трафика в V2X/5G сетях на основе системы граничных вычислений // Электросвязь. 2020. № 8. С. 64-70.
16. Вопрос 18-1/2, Добавление к Руководству по плавному переходу существующих сетей подвижной связи на IMT-2000 для развивающихся стран (РУПП), МСЭ-Т, Женева, 2010.
17. Выборнова А. И., Кучерявый А. Е. Тактильный интернет: новые возможности и задачи //Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2016. Первый научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» ЗТ-2016. Самара, 2016. С. 133–134.
18. Гимадинов, Р.Ф. Кластеризация в мобильных сетях 5G. Случай частичной мобильности / Гимадинов, Р.Ф., Мутханна, А.С., Кучерявый, А.Е. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. Т. 3. № 2. С. 44-52.
19. Гольдштейн Б.С., Сети связи пост-NGN / Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. // БХВ, С.Петербург, 2013.

20. Ким Дж.-О., Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка, М. С. Олдендерфер, Р. К. Блэшфилд // М.: Финансы и статистика, 1989.—215 с.
21. Кучерявыи А.Е., Бондарик В.Н. Прогнозирование развития Интернета Вещей на горизонте планирования до 2030 года. Труды МФТИ, том 5, №3, 2013, с.92-96.
22. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Москва: Постмаркет, 2000. — 352 с.
23. Кучерявыи, А.Е. Самоорганизующиеся сети / Кучерявыи А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявыи Е.А. – СПб.: Любавич, 2011. – 312 с.
24. Кучерявыи, А.Е. Тактильный Интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявыи, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2016. – № 1. – С. 44-46.
25. Кучерявыи А.Е., Тактильный Интернет / Кучерявыи А.Е., Выборнова А.И. // Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО-2016. Том 1. С. 6-11.
26. Кучерявыи А.Е., Пакетная сеть связи общего пользования / Кучерявыи А.Е., Гильченок Л.З., Иванов А.Ю. // Наука и техника, СПб, 2004, 272 с.
27. Кучерявыи А.Е., Сети связи следующего поколения. / А.Е. Кучерявыи, А.Л. Цуприков // Центральный научно-исследовательский институт связи (ЦНИИС), Москва, 2006.
28. Кучерявыи А.Е., От е-России к и-России: тенденции развития электросвязи / Кучерявыи А.Е., Кучерявыи Е.А. // Электросвязь, №5, 2005, с.10-11.
29. Кучерявыи А.Е. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчёта / А.Е. Кучерявыи, А.И. Парамонов, Е.А. Кучерявыи // – М. : ФГУП ЦНИИС, 2008. - 290 с.
30. Кучерявыи А.Е. Интернет Вещей // Электросвязь, №1, 2013, стр.21-24.

31. Кучеряый А.Е., Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017-2020 годы / Кучеряый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Пирмагомедов Р.Я. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 3. С. 1-14.
32. Кучеряый А.Е., Сети связи с малыми задержками / Кучеряый А.Е., Парамонов А.И., Аль-Наггар Я.М. // Электросвязь. 2013. № 12. С. 15-19.
33. Кучеряый А. Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 [Текст] / Волков А. Н., Мутханна А. С. А., Кучеряый А. Е. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 2. С. 32–43.
34. Кучеряый А.Е. Сети связи с ультрамалыми задержками / Кучеряый А.Е. – Труды НИИР. – 2019. - №1.
35. Маколкина М.А. Развитие услуг дополненной реальности в рамках концепции Тактильного Интернета // Электросвязь, №2, 2017, с.36-40.
36. Маколкина М.А. Распределение ресурсов при предоставлении услуги дополненной реальности / Маколкина М.А.; Парамонов, А.И.; Гоголь, А.А.; Кучеряый, А.Е. // Электросвязь. 2018. № 8. С. 23-30.
37. Мандель И.Д. Кластерный анализ // М.: Финансы и статистика. 1988. – 176. С.
38. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М. Издательство компьютерных исследований. 2002. 665 с.
39. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002, 160 стр.
40. Нормы технологического проектирования. Городские и сельские сети. НТП 112-2000, РД 45.120-2000.
41. Нуриллоев И.Н., Метод оценки и обеспечения связности беспроводной сенсорной сети / Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И., Кучеряый А.Е. // Электросвязь. 2017. № 7. С. 39-44.
42. Нуриллоев И.Н., Эффективная связность беспроводной сенсорной сети. / Нуриллоев И.Н., Парамонов А.И. // Электросвязь. 2018. № 3. С. 68-74.

43. МСЭ-Р. Р.1238-5. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зоновых радиосетей в частотном диапазоне 900 МГц – 100 ГГц.
44. Остапчук А.К., Овсянников В.Е. Применение теории фракталов в математическом моделировании и технике: Учебное пособие. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2009. – 76 с.
45. Парамонов А.И. Разработка и исследование комплекса моделей трафика для сетей связи общего пользования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. СПбГУТ, СПб, 2014.
46. Парамонов А.И., Модели потоков трафика для сетей M2M / Парамонов А.И. // Электросвязь. 2014. № 4. С. 11-16.
47. Парамонов А.И., Проблемы развития инфокоммуникационных услуг и их влияние на перераспределение трафика / Парамонов А.И., Сенькина Н.С. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 1. С. 46-54
48. Рекомендация МСЭ-Р Р.1238-8. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зоновых радиосетей в частотном диапазоне 300 МГц – 100 ГГц. Серия Р. 2015г.
49. Рекомендация МСЭ-Р М.2083-0, (09/2015), Концепция IMT – Основы и общие задачи будущего развития IMT на период до 2020 года и далее [Текст], Женева, 2017.
50. Райгородский, А.М. Модели случайных графов и их применения / А.М. Райгородский. – М.: Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2, № 4. – С. 130-140.
51. Рыжков А.Е., Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMAX / Рыжков А.Е., Сиверс М.А., Воробьев В.О., Гусаров А.С., Слыжков А.С., Шуньков Р.В. // – СПб: Линк, 2012. – 226с.
52. Федер Е. Фракталы. М. Мир, 1991. – 254 с.
53. Футахи А., Сенсорные сети в гетерогенной зоне системы длительной эволюции / А. Футахи, А.И.Парамонов, А.В. Прокопьев, А.Е.Кучерявый // Электросвязь, №3, 2015.

54. Тихвинский В.О., Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура / Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. // 2010, 284 с.
55. В.О. Тихвинский. Сети 5G и IoT – инновационная среда для цифровой экономики России // Электросвязь, №8, 2017, с.18-24.
56. Тонких Е.В. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявыи А.Е. // М. Электросвязь – №1, 2020 – С. 51-55.
57. Тонких Е.В. Анализ характеристик плотности устройств в сетях связи пятого поколения // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 1.
58. Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявыи А.Е.- Планирование структуры сети интернета вещей с использованием фракталов // Электросвязь. - 2021. - № 4.
59. Тонких Е.В. Свойства самоподобия сетевой структуры и ее моделирование для сети Интернет вещей высокой плотности. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявыи А.Е. // Электросвязь. 2020. № 8. С. 18-24.
60. Тонких Е.В. Анализ рекомендаций МСЭ-Т и МСЭ-Р в области сетей связи пятого поколения // Труды НИИР. – 2021. - №3. С. 2-5.
61. Тонких Е. В., Развитие технологий сетей доступа, в том числе радиочастотное регулирование, для развития IoT и M2M // Секция «Информационные технологии как средство повышения качества жизни населения». Доклад на Форуме «Интернет + Город», организованного Институтом Развития Интернета, при поддержке Минкомсвязи России, ПАО «Ростелеком» и ФРИИ, РИА Новости, Москва, 6 октября 2016. <http://files.runet-id.com/2016/iri-forum-gorod16/6oct.iri-forum-gorod16-2-15-00-16-30--tonkih.pdf>
62. Хуссейн О.А., Анализ влияния технологий D2D на функционирование беспроводных сетей связи / Хуссейн О.А., Парамонов А.И. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 2. С. 79-86.

63. Хуссейн О.А., Анализ кластеризации D2D-устройств в сетях пятого поколения / Хуссейн О.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2018. № 9. С. 32-38.
64. Шелухин, О.И. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / О.И. Шелухин, А.В. Осин, С.М. Смольский. М.: Физматлит. – 2008. – 368 с.
65. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. -528 с.
66. Abakumov, P. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN / P. Abakumov, A. Koucheryavy // Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. ICACT 2014. Phoenix Park, Korea.
67. Andreev, S. Intelligent Access Network Selection in Converged Multi-Radio Heterogeneous Networks / Andreev S, Gerasimenko M., Galinina O. et al. // IEEE Wireless Communications, 2017 – Vol. 21, № 6. – P. 86-96.
68. Agiwal, M. Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey / Agiwal, M., Roy, A. and Saxena, N // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18(3), pp.1617-1655, 2016.
69. Al-Qadami, N. Mobility Adaptive Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks with Mobile Nodes / N. Al-Qadami, I. Laila, A. Koucheryavy, A.S. Ahmad // ICACT'2015, Proceedings, 1-3 July, Phoenix Park, Pyeongchang, Korea.
70. Al-Naggar, Y. Fuzzy Logic and Voronoi Diagram Using for Cluster Head Selection in Ubiquitous Sensor Networks / Y.Al-Naggar, A. Koucheryavy // LNCS, Springer. 14th NEW2AN, LNCS 8638, 27-29, August 2014.
71. Asadi, A. Network-assisted Outband D2D-clustering in 5G Cellular Networks: Theory and Practice / A. Asadi, V. Mancuso // IEEE Transactions on Mobile Computing. – December 2016, issue 99. – 17 p.
72. Ateya, A. 5G framework based on multi-level edge computing with D2D enabled communication / Ateya, A.; Muthanna, A., Koucheryavy, A. // In Advanced

Communication Technology (ICACT), 2018 20th International Conference on, IEEE, pp. 507-512, Feb. 2018.

73. Ateya, A. End-to-end system structure for latency sensitive applications of 5G / Ateya, A.; Al-Bahri, M.; Muthanna, A. and Koucheryavy, A. // Электросвязь, (6), pp. 56-61, 2018.
74. Ateya, A.A. Multilevel cloud based Tactile Internet system / Ateya, A.A.; Vybornova, A.; Kirichek, R.; Koucheryavy, A. // In Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), Bongpyeong, Korea, pp. 105–110, 19–22 February 2017.
75. Michel Barbeau, Evangelos Kranakis Principles of Ad-hoc Networking, John Wiley & Sons, 2007. P.254.
76. Bollobás B. Random Graphs. — Cambridge Univ. Press, 2001. — 520 c.
77. Borodin A. Future Networks 2030: Architecture & Requirements / Yastrebova A., Kirichek R., Koucheryavy Y., Koucheryavy A. // 10th International Congress ICUMT, 2018.
78. Galinina, O. 5G Multi-RAT LTE-WiFi Ultra-Dense Small Cells: Performance, Dynamics, Architecture, and Trends / O.Galinina, A.Pyattaev, S.Andreev et al. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – March 2015. –P.1224-1240.
79. Chen, Y. Understanding the Fractal Dimensions of Urban Forms through Spatial Entropy. Entropy 2017 / Chen, Y.; Wang, J.; Feng, J.// MDPI and ACS Style, 19, 600. <https://doi.org/10.3390/e19110600>.
80. Fettweis G. P., “The tactile internet: Applications and challenges,” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 64–70, 2014.
81. Hurst H. E., Long-term storage: an experimental study Long-term storage: an experimental study / H. E. Hurst, R. P. Black, Y. M. Simaike // Constable, 1965 – p.145.
82. Koucheryavy A. State of Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models // ICACT'2014, Proceedings, 16-19 February, Phoenix Park, Korea.

83. Koucheryavy A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks / A. Koucheryavy, A. Salim // Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2010. ICACT 2010. Phoenix Park, Korea.
84. W. E. Leland, W. Willinger, M. S. Taqqu, D. V. Wilson, "On the self-similar nature of Ethernet traffic", ACM SIGCOMM Computer Communication Review 25, 1995 – pp.202-213.
85. List of fractals by Hausdorff dimension [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_fractals_by_Hausdorff_dimension (Дата обращения: 10.01.2021).
86. LTE Device to Device (D2D) Proximity Services (ProSe) User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 12). 3GPP TR 36.877 V12.0.0 (2015-03).
87. Maier, M. The tactile internet: vision, recent progress, and open challenges / Maier, M.; Chowdhury, M.; Rimal, B. P.; Van, D. P. // IEEE Communications Magazine. 2016, 54(5), 138-145.
88. Makolkina M. The Augmented Reality Service Provision in D2D Network / Makolkina M., Vikulov A., Paramonov A. // Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 700. – P. 281-290.
89. Makolkina M. The Models of Moving Users and IoT Devices Density Investigation for Augmented Reality Applications / M. Makolkina, A. Koucheryavy, A. Paramonov // Lecture Notes in Computer Science, 2017, v.10351, pp.683-692.
90. Mahmood O.A., Optimization of Routes in the Internet of Things. / Mahmood O.A., Paramonov A. // 18th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking (NEW2AN), and 11th Conference on Internet of Things and Smart Spaces (ruSMART) conference proceedings. 2018. C. 584-593.
91. MHD Nour Hindia and all. Interference Cancelation for High-Density Fifth-Generation Relaying Network using Stochastic Geometrical Approach // International Journal of Distributed Sensor Networks, v. 15, issue 3, July 3, 2019.

92. Muthanna A., Comparison of Protocols for Ubiquitous Wireless Sensor Network / Muthanna A., Paramonov A., Koucheryavy A., Prokopiev A. // В сборнике: International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops 6. Сеп. "2014 6th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014" 2015. C.334-337.
93. Muthanna, A. Analytical Evaluation of D2D Connectivity Potential in 5G Wireless Systems / Muthanna, A.; Mašek, P.; Hošek, J.; Fujdiak, R.; Hussein, O.; Paramonov, A.; Koucheryavy, A.// Lecture Notes in Computer Science, 2016, Vol. 9870, pp. 395-403.
94. Muthanna A., Enabling M2M Communication through MEC and SDN / Muthanna A., Khakimov A., Ateya A.A., Paramonov A., Koucheryavy A. // Communications in Computer and Information Science. 2018. T. 919. C. 95-105.
95. R. Li, Z. Zhao, X. Zhou, G. Ding, Y. Chen, Z. Wang, and H. Zhang, "Intelligent 5G: When cellular networks meet artificial intelligence," IEEE Wireless Communications, vol. PP, no. 99, pp. 2-10, 2017.
96. OpenCV [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.opencv.org/master/index.html> (Дата обращения: 10.01.2021).
97. Paramonov A., Clustering Optimization for Out-of-Band D2D Communications. / Paramonov A., Hussain O., Samouylov K., Koucheryavy A., Kirichek R., Koucheryavy Y. // Wireless Communications and Mobile Computing. 2017. T. 2017. C. 6747052.
98. Paramonov A., Investigation Of Machine-To-Machine Traffic Generated By Mobile Terminals. / Chornaya D., Paramonov A., Koucheryavy A. // International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops 6. Сеп. "2014 6th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2014" 2015. C. 210-213.

99. Paramonov A., M2M Traffic Models and Flow Types In Case Of Mass Event Detection / Paramonov A., Koucheryavy A. // Lecture Notes in Computer Science. 2014. T. 8638. C. 294-300.
100. Paramonov A., Connectivity Estimation in Wireless Sensor Networks / Nurilloev I., Paramonov A., Koucheryavy A. // Lecture Notes in Computer Science. 2016. T. 9870. C. 269-277.
101. Paramonov, A.; Muthanna, A.; Aboulola, O.I.; Elgendi, I.A.; Alharbey, R.; Tonkikh, E.; Koucheryavy, A. Beyond 5G Network Architecture Study: Fractal Properties of Access Network. /Paramonov, A.; Muthanna, A.; Aboulola, O.I.; Elgendi, I.A.; Alharbey, R.; Tonkikh, E.; Koucheryavy, A.// MDPI and ACS Style, Appl. Sci. 2020, 10, 7191. <https://doi.org/10.3390/app10207191>.
102. Park K., Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation / Kihong Park, Walter Willinger // John Wiley & Sons, 2000 - 558p.
103. RecomendationY.1541 Network performance objectives for IP-based services. Telecommunication Standardization Sector of ITU, Geneva, 2018.
104. Recommendation ITU-T Y.3101 – Corrigendum 1, (04/2018), Requirements of the IMT-2020 network, Geneva, 2018.
105. K.Leppanen, M.Latva-aho. Key Drivers and Research Challenges for 6G. Fifth ITU Workshop on Network 2030. Geneva, Switzerland, 14-16 October 2019. <https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019101416/Pages/programme.aspx>
106. Recommendation ITU-T Y.3106, (04/2019), Quality of service functional requirements for the IMT-2020 network, Geneva, 2019.
107. Recommendation ITU-T Y.3170, (02/2021), Architectural framework of artificial intelligence based network automation for resource and fault management in future networks including IMT-2020, Pre-published, Geneva, 2021.
108. Recommendation ITU-T Y.3172, (06/2019), Architectural framework for machine learning in future networks including IMT-2020, Geneva, 2019.

109. Recommendation ITU-T Y.3177, (02/2021), Architectural framework of artificial intelligence-based network automation for resource and fault management in future networks including IMT-2020, Geneva, 2021.
110. Recommendation ITU-R P.1411-10, Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, Geneva, 2019.
111. Report ITU-R M.2370-0, (07/2015), IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030, Geneva, 2015.
112. Report ITU-R M.2375-0, (06/2015), Architecture and topology of IMT networks, Geneva, 2015.
113. Shaohua T., Self-similarity networks and self-similarity network group / Shaohua Tao, Zhanshen Feng and Zhili Zhang // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 2014, 6(5) – pp.186-197.
114. Soumya, R. On Calculation of Fractal Dimension of Color Images / Soumya R. Nayak, Jibitesh Mishra // International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP), Vol.9, No.3, pp.33-40, 2017.
115. Supplement 55 ITU-T Y.3170-series – Machine learning in future networks including IMT-2020: Use cases, (10/2019), Geneva, 2019.
116. Tadilo Endeshaw Bogale, Xianbin Wang and Long Bao Le / Machine intelligence techniques for next-generation context-aware wireless networks// ITU Journal: ICT Discoveries, Special Issue No. 1, 2 Feb. 2018.
117. Technical Report FG-NET2030, (16 January 2020), FG-NET2030-Sub-G1 – Representative use cases and key network requirements for Network 2030, Geneva 2020.
118. Technical Specification FG-NET2030, (June 2020), Network 2030 Architecture Framework, Geneva 2020.
119. Tonkikh E.V., Burobina K.D. and Shurakhov A.A., "Possible Applications of Sixth Generation Communication Networks," 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-6.

120. Evgeny Tonkikh, 5G networks development in the Russia: experience and plans // Session 1: National strategies for 5G implementation, Regional Seminar for Europe and CIS on “5G Implementation in Europe and CIS: Strategies and Policies Enabling New Growth Opportunities”, 3 - 5 July 2018, Budapest, Hungary. [https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/2018/5GHungary/S1%20EvgenyTonkikh_Seminar%205G%20rev%202%20\(EN\).pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/2018/5GHungary/S1%20EvgenyTonkikh_Seminar%205G%20rev%202%20(EN).pdf)
121. Paramonov A., Tonkikh E., Koucheryavy A., Tatarnikova T.M. (2020) High Density Internet of Things Network Analysis. In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2020, ruSMART 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12525. Springer, Cham.
122. Paramonov A., Muthanna A., Koucheryavy A., Aboulola O.I., Alharbey R., Elgendi I.A., Tonkikh E. Beyond 5G network architecture study: fractal properties of access network. Applied Sciences (Switzerland). 2020. T. 10. № 20. C. 1-18.
123. Zhou Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 13, no. 4, pp. 600-612, April 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
124. Waldner, J.-B. Nanocomputers and Swarm Intelligence / J.-B. Waldner // ISTE, John Wiley & Sons, 2008.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Экз. 1 из 3



МИНИСТЕРСТВО
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский
институт радио имени М.И. Кривошеева»
(ФГУП НИИР)
Казакова ул., д. 16, Москва, 105064
Телефон: (495) 647-18-30, для справок: (499) 261-63-70,
Факс: (499) 261-00-90, E-mail: info@niir.ru
<http://www.niir.ru>
ОКПО 01181481, ОГРН 1027700120766
ИНН/КПП 7709025230/770901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель генерального
директора ФГУП НИИР, кандидат
технических наук



М.Ю. Сподобаев

2021 г.

№ _____

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Тонких Евгения Викторовича на тему
«Разработка и исследование методов планирования сетей связи высокой плотности»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе:

Председатель комиссии – директор НТЦ Анализа ЭМС В.Э. Веерпалу, д.т.н.;
Члены комиссии – зам. директора НТЦ Анализа ЭМС С.Ю. Пастух, к.т.н.;
начальник отдела НТЦ Анализа ЭМС Н.В. Варламов,

установила, что в диссертационной работе заместителя начальника отдела НТЦ Анализа ЭМС ФГУП НИИР Евгения Викторовича Тонких на тему «Разработка и исследование методов планирования сетей связи высокой плотности» получены новые научные результаты, которые внедрены в 2019 году в рамках выполнения государственного контракта по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций администрации связи Российской Федерации в части, касающейся международно-правовой защиты интересов Российской Федерации в области электросвязи и радиосвязи в виде предложений (вкладов) проектов стандартов от имени администрации связи Российской Федерации (Министерства цифрового развития, связи

и массовых коммуникаций Российской Федерации) Исследовательские комиссии (ИК) в Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

Эти вклады представлены на заседаниях Исследовательской комиссии 13 МСЭ-Т «Будущие сети, включая облачные технологии» (ИК13 МСЭ-Т):

Вклад на ИК13 МСЭ-Т «5G/IMT-2020 networks deployment in the Russian Federation».

Вклад на ИК13 МСЭ-Т по проекту Рекомендации МСЭ-Т Y.13.13-2020-PRA-NSA "Priority areas for 5G/IMT2020 network services application".

Вышеуказанные вклады определили позицию администрации связи Российской Федерации в области сетей связи пятого и последующих поколений, в том числе по высокоплотным сетям и сетям связи с ультра малыми задержками, и легли в основу разрабатываемых стандартов (рекомендаций) Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

Председатель комиссии



В.Э. Веерпалу

Члены комиссии



С.Ю. Пастух



Н.В. Варламов

Подписи В.Э. Веерпалу, С.Ю. Пастуха, Н.В. Варламова заверяю.

Начальник отдела кадров ФГУП НИИР




Е.П. Буянова



«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Тонких Евгения
Викторовича на тему «Разработка и исследование методов планирования
сетей связи высокой плотности»

Настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Тонких Евгения Викторовича «Разработка и исследование методов планирования сетей связи высокой плотности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Методики планирования сетей связи высокой плотности для Интернета вещей».

При разработке были использованы следующие новые научные результаты из диссертации Е.В. Тонких:

- Метод планирования сети связи высокой плотности на основе фрактальной кривой Гильберта, позволяющий с достаточной для практики степенью точности учесть неоднородность пространства окружения планируемой сети;

- Методика планирования сети связи высокой плотности на основе процедуры выбора фрактальной фигуры для планирования и проектирования в условиях неоднородного пространства окружения, базирующаяся на близости параметров фрактальной размерности, модифицированной информационной размерности и доли площади, занимаемой в площади пространства окружения сети иными элементами этого пространства.

Председатель комиссии:

Заместитель директора
департамента - начальник отдела



А.А. Иванов

Члены комиссии:

Главный специалист



Ю.А. Нопина

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И
МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

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

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

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232
Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159
E-mail: rector@sut.ru
ИНН 7808004760 КПП 784001001
ОГРН 1027809197635 ОКТМО 40909000

14.07.2021 № 1339/534
на № _____ от _____



Утверждаю

И.Г.Имараектора по научной работе
А.Г.Владыко

Акт

о внедрении научных результатов,

полученных в диссертационной работе Евгения Викторовича Тонких "Разработка и
исследование методов планирования сетей связи 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 лаборатории кафедры сетей связи и
передачи данных О.И.Ворожейкиной составила настоящий акт в том, что научные
результаты, полученные Евгением Викторовичем Тонких в диссертации "Разработка
и исследование методов планирования сетей связи высокой плотности",
использованы:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий для бакалавров по
дисциплине «Интернет вещей и самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа
регистрационный номер №20.05/534-Д), разделы Программы:
 - Сети связи пятого поколения как база для развития сетей связи. Сверхплотные сети
и сети связи с ультра малыми задержками,
 - Сети связи шестого поколения,
 - Сети связи 2030.

2. При чтении лекций и проведении практических занятий для аспирантов по дисциплине «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (Рабочая Программа регистрационный номер №20.05/712-Д), раздел Программы:

- Основные задачи построения и эксплуатации систем, сетей и устройств телекоммуникаций.

В указанных дисциплинах используются следующие новые научные результаты, полученные Евгением Викторовичем Тонких в диссертационной работе:

- Метод планирования сети связи высокой плотности на основе фрактальной кривой Гильберта, позволяющий с достаточной для практики степенью точности учесть неоднородность пространства окружения планируемой сети,
- Метод планирования сети с использованием фрактальной кривой Гильберта, учитывающий неоднородную структуру пространства окружения сети, требует более, чем в два раза меньшее число транзитов при маршрутизации сообщений по сравнению с методом планирования сети, предполагающим однородную структуру пространства окружения.

Декан факультета ИКСС,

к.т.н., доцент

Д.В.Окунева

Профессор кафедры ССиПД,

д.т.н., доцент

М.А.Маколкина

Заведующая лабораторией

кафедры ССиПД

О.И.Ворожейкина