

Д.Едилхан, Л.С.Алдашева  
А.С.Амирова, Ә.С.Әбдіраман

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И  
ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
СЕТЕЙ 5G И 6G В SMART CITY:  
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И  
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ**



Д.Едилхан, Л.С.Алдашева,  
А.С.Амирова, Ө.С.Әбдіраман

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И  
ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
СЕТЕЙ 5G И 6G  
В SMART CITY:  
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И  
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Монография



Алматы  
2025

УДК 004  
ББК 32.973.202  
Е 33

Рекомендовано к изданию Ученым советом  
ТОО «Astana IT University»  
(Протокол №11 от 24.04.2025 г.)

**Рецензенты:**

*Есмагамбетова М.М.* – PhD, доцент  
*Қалман Г.* – к.т.н., ассоциированный профессор  
*Абитова Г.А.* – PhD, ассоциированный профессор

**Авторский коллектив:**

*Едилхан Д.* – PhD, Ассост. Профессор, Директор НИЦ “Smart City”  
*Алдашева Л.С.* – к.т.н., ассистент профессор  
*Амирова А.С.* – PhD, ассистент профессор  
*Әбдіраман Ә.С.* – сеньор лектор

*Объем монографии составляет 17 н.л.,  
Едилхан Д. – 3 н.л., Алдашева Л.С. – 6 н.л.,  
Амирова А.С. – 6 н.л., Әбдіраман Ә.С. – 2 н.л.*

**Едилхан Д., Алдашева Л.С., Амирова А.С., Әбдіраман Ә.С.**  
Е33 Повышение надежности и пропускной способности сетей  
5G и 6G в smart city: теоретические основы и практические  
решения / Д. Едилхан, Л.С. Алдашева, А.С. Амирова, Ә.С.  
Әбдіраман. – Алматы: Дарын, 2025. – 268 с.

**ISBN 978-6017698-17-1**

В работе рассмотрена эволюция и современные тенденции развития сетей 5G и 6G, с акцентом на анализ методов повышения их надежности и пропускной способности. Особое внимание уделено архитектурным принципам мобильных сетей, проблемам их функционирования в условиях плотной городской застройки, а также перспективным технологиям оптимизации, включая искусственный интеллект и машинное обучение.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК в рамках программно-целевого финансирования BR24992852 «Разработка интеллектуальных моделей и методов цифровой экосистемы Smart City для устойчивого развития города и повышения качества уровня жизни горожан».

УДК 621.396.93  
ББК 32.973.202

© Едилхан Д., Алдашева Л.С.,  
Амирова А.С. Әбдіраман Ә.С., 2025  
© Издательство Дарын, 2025

ISBN 978-6017698-17-1

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В РАЗВИТИИ СЕТЕЙ 5G И 6G .....	8
1.1 Основные архитектурные принципы сетей 5G .....	8
1.2 Перспективы сетей 6G: отличия и эволюция .....	16
1.3 Проблемы надежности и пропускной способности в условиях плотной городской застройки .....	34
1.4 Роль искусственного интеллекта и больших данных в решении задач сетей 5G и 6G .....	43
1.5 Анализ мирового опыта измерения и оценки производительности мобильных широкополосных сетей.....	50
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ .....	58
2.1 Принципы обеспечения надежности телекоммуникационных сетей .....	58
2.2 Модели пропускной способности для сверхплотных сетей .....	67
2.3 Методы управления интерференцией в городских условиях .....	72
2.4 Теория хэндовера: подходы к обеспечению бесперебойной связи .	
75 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТЕЙ 5G И 6G .....	
87    3.1 Исследование методов повышения пропускной способности и надежности сетей 5G в условиях плотной городской застройки .....	87
3.2 Оптимизация устойчивости мобильности на основе технологий искусственного интеллекта в сверхплотных сетях 5G.....	94
3.3 Управление функциями оптимизации балансировки нагрузки в сетях 5G .....	105
3.4 Эффективные модели принятия решений по хэндоверу на основе технологий AI в сверхплотных сетях 5G .....	122
4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ В СЕТЯХ 5G И 6G .....	133



4.1 Имитационные модели для оценки производительности сетей.....	133
4.2 Разработка мобильного приложения для динамического сбора данных измерений в реальном времени.....	135
4.3 Проектирование панели мониторинга для визуализации и анализа собранных данных большого объема в режиме реального времени ....	160
4.4 Интеграция с облачными сервисами для хранения и обработки данных.....	167
4.5 Исследование и разработка моделей искусственного интеллекта, системы управления мобильностью и инструментов анализа больших данных.....	172
5 ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ OPEN-RAN ДЛЯ 5G И 6G .....	185
5.1 Концепция Open-RAN: ключевые особенности .....	185
5.2 Стандарты и требования к внедрению Open-RAN .....	195
5.3 Возможности интеграции Open-RAN с искусственным интеллектом .....	201
5.4 Open RAN и интеллектуальные технологии в сетях 6G .....	205
6 БЕЗОПАСНОСТЬ И КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТЬ В СЕТЯХ 5G И 6G .....	209
6.1 Анализ угроз и защитных механизмов в сетях 5G и 6G .....	209
6.2 Исследование технологий защиты и конфиденциальности .....	219
6.3 Конфиденциальность и будущее защиты данных.....	223
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	240
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	243

## ВВЕДЕНИЕ

Современные беспроводные сети связи играют ключевую роль в развитии цифровой инфраструктуры, обеспечивая высокоскоростной доступ к данным, поддержку интернет-вещей (IoT) и новые технологические возможности в области искусственного интеллекта, облачных вычислений и автоматизации. Текущий этап эволюции мобильных сетей сосредоточен на развертывании технологий 5G, обеспечивающих повышенную пропускную способность, минимальную задержку и надежность соединения. Однако уже сегодня ведутся исследования в области шестого поколения (6G), которое предполагает еще более высокие скорости передачи данных, интеллектуальное управление ресурсами и глубокую интеграцию с системами искусственного интеллекта. 6G-сети предполагают использование новых диапазонов частот, таких как терагерцевый спектр, что открывает дополнительные возможности для увеличения скорости передачи данных и снижения задержек до ультранизкого уровня.

Настоящая монография посвящена анализу современных тенденций в развитии сетей 5G и 6G, изучению ключевых проблем, таких как надежность соединения и пропускная способность в условиях плотной городской застройки, а также рассмотрению методов повышения эффективности работы телекоммуникационных сетей. Особое внимание уделено таким технологиям, как искусственный интеллект (AI) и машинное обучение (ML), которые находят все более широкое применение в управлении мобильностью пользователей и балансировке нагрузки в сети. Эти технологии позволяют операторам связи внедрять механизмы предсказания пользовательского поведения и адаптивного управления ресурсами сети, что существенно повышает её общую эффективность и стабильность работы.

Отдельный раздел монографии посвящен концепции Open-RAN (Open Radio Access Network) – архитектуре, основанной на принципах открытости и интероперабельности компонентов

Научное издание

Д.Едилхан, Л.С.Алдашева,  
А.С.Амирова, Ә.С.Әбдіраман

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ  
СПОСОБНОСТИ СЕТЕЙ 5G И 6G  
В SMART CITY: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ**

Монография

*Верстка: Ким А.  
Дизайнер обложки: Байсеитова А.*

Подписано в печать 04.05.2025. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Объем 17,0 п.л. Тираж 500 экз.

ТОО "Издательство Дарын"  
г. Алматы, ул. Жамбыла 114/85,  
БЦ Бизнес-Сити, Литер Д, 510 каб.  
info@darynbaspa.kz, +7 747 150 11 77

Отпечатано в типографии ТОО "Издательство Дарын"

Д.Едилхан, Л.С.Алдашева, А.С.Амирова, Ә.С.Әбдіраман

**Повышение надежности и пропускной способности сетей 5G и 6G  
в Smart City: теоретические основы и практические решения**

Астана 2025

**УДК 621.396.93**

**ББК 32.973.202**

ISBN

Рецензенты:

**Есмагамбетова М.М.** – PhD, доцент

**Қалман Г.** – к.т.н., ассоциированный профессор

**Абитова Г.А.** – PhD, ассоциированный профессор

Авторский коллектив:

**Едилхан Д.** – PhD, Асоц. Профессор, Директор НИЦ “Smart City”

**Алдашева Л.С.** – к.т.н., ассистент профессор

**Амирова А.С.** – PhD, ассистент профессор

**Әбдіраман Ә.С.** – сеньор лектор

Едилхан Д., Алдашева Л.С., Амирова А.С. Әбдіраман Ә.С. Повышение надежности и пропускной способности сетей 5G и 6G в Smart City: теоретические основы и практические решения. – Астана, 2025 – 276 с. Объем монографии составляет 17 п.л., Едилхан Д. – 3 п.л., Алдашева Л.С. – 6 п.л., Амирова А.С. – 6 п.л., Әбдіраман Ә.С. – 2 п.л.

ISBN

В работе рассмотрена эволюция и современные тенденции развития сетей 5G и 6G, с акцентом на анализ методов повышения их надежности и пропускной способности. Особое внимание уделено архитектурным принципам мобильных сетей, проблемам их функционирования в условиях плотной городской застройки, а также перспективным технологиям оптимизации, включая искусственный интеллект и машинное обучение. Проведен анализ концепции Open-RAN, её стандартов, возможностей интеграции с AI и преимуществ для сетей нового поколения. Эта монография призвана внести свой вклад в развитие научных исследований в области телекоммуникаций и может быть полезна исследователям, инженерам, специалистам операторов связи и разработчикам сетевого оборудования.

Данная монография выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК в рамках программно-целевого финансирования BR24992852 «Разработка интеллектуальных моделей и методов цифровой экосистемы Smart City для устойчивого развития города и повышения качества жизни горожан».

**УДК 621.396.93**

**ББК 32.973.202**

ISBN

# **СОДЕРЖАНИЕ**

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В РАЗВИТИИ СЕТЕЙ 5G И 6G**

- 1.1 Основные архитектурные принципы сетей 5G
- 1.2 Перспективы сетей 6G: отличия и эволюция
- 1.3 Проблемы надежности и пропускной способности в условиях плотной городской застройки
- 1.4 Анализ мирового опыта измерения и оценки производительности мобильных широкополосных сетей

### **2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ**

- 2.1 Принципы обеспечения надежности телекоммуникационных сетей
- 2.2 Модели пропускной способности для сверхплотных сетей
- 2.3 Методы управления интерференцией в городских условиях
- 2.4 Теория хэндовера: подходы к обеспечению бесперебойной связи

### **3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТЕЙ 5G И 6G**

- 3.1 Исследование методов повышения пропускной способности и надежности сетей 5G в условиях плотной городской застройки
- 3.2 Оптимизация устойчивости мобильности на основе технологий искусственного интеллекта в сверхплотных сетях 5G
- 3.3 Управление функциями оптимизации балансировки нагрузки в сетях 5G
- 3.4 Эффективные модели принятия решений по хэндоверу на основе технологий AI в сверхплотных сетях 5G



## **4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ В СЕТЯХ 5G И 6G**

- 4.1 Имитационные модели для оценки производительности сетей
- 4.2 Разработка мобильного приложения для динамического сбора данных измерений в реальном времени
- 4.3 Проектирование панели мониторинга для визуализации и анализа собранных данных большого объема в режиме реального времени
- 4.4 Интеграция с облачными сервисами для хранения и обработки данных
- 4.5 Исследование и разработка моделей искусственного интеллекта, системы управления мобильностью и инструментов анализа больших данных

## **5 ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ OPEN-RAN ДЛЯ 5G И 6G**

- 5.1 Концепция Open-RAN: ключевые особенности
- 5.2 Стандарты и требования к внедрению Open-RAN
- 5.3 Возможности интеграции Open-RAN с искусственным интеллектом
- 5.4 Open RAN и интеллектуальные технологии в сетях 6G

## **6 БЕЗОПАСНОСТЬ И КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТЬ В СЕТЯХ 5G И 6G**

- 6.1 Анализ угроз и защитных механизмов в сетях 5G и 6G
- 6.2 Исследование технологий защиты и конфиденциальности
- 6.3 Конфиденциальность и будущее защиты данных

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

## ВВЕДЕНИЕ

Современные беспроводные сети связи играют ключевую роль в развитии цифровой инфраструктуры, обеспечивая высокоскоростной доступ к данным, поддержку интернет-вещей (IoT) и новые технологические возможности в области искусственного интеллекта, облачных вычислений и автоматизации. Текущий этап эволюции мобильных сетей сосредоточен на развертывании технологий 5G, обеспечивающих повышенную пропускную способность, минимальную задержку и надежность соединения. Однако уже сегодня ведутся исследования в области шестого поколения (6G), которое предполагает еще более высокие скорости передачи данных, интеллектуальное управление ресурсами и глубокую интеграцию с системами искусственного интеллекта. 6G-сети предполагают использование новых диапазонов частот, таких как терагерцевый спектр, что открывает дополнительные возможности для увеличения скорости передачи данных и снижения задержек до ультранизкого уровня.

Настоящая монография посвящена анализу современных тенденций в развитии сетей 5G и 6G, изучению ключевых проблем, таких как надежность соединения и пропускная способность в условиях плотной городской застройки, а также рассмотрению методов повышения эффективности работы телекоммуникационных сетей. Особое внимание уделено таким технологиям, как искусственный интеллект (AI) и машинное обучение (ML), которые находят все более широкое применение в управлении мобильностью пользователей и балансировке нагрузки в сети. Эти технологии позволяют операторам связи внедрять механизмы предсказания пользовательского поведения и адаптивного управления ресурсами сети, что существенно повышает её общую эффективность и стабильность работы.

Отдельный раздел монографии посвящен концепции Open-RAN (Open Radio Access Network) – архитектуре, основанной на принципах открытости и интероперабельности компонентов различных производителей. Open-RAN позволяет создать гибкую, масштабируемую и экономически эффективную

экосистему для сетей 5G и 6G, обеспечивая возможности интеллектуального управления ресурсами и интеграцию с облачными сервисами. Это снижает зависимость операторов от крупных поставщиков оборудования и способствует развитию конкурентной среды, ускоряя внедрение инновационных решений. Внедрение Open-RAN открывает новые возможности для использования сетей связи в критически важных областях, таких как автономный транспорт, дистанционная хирургия и промышленный интернет вещей (IIoT).

В первой главе рассматриваются современные архитектурные принципы сетей 5G, перспективы развития 6G, а также основные проблемы надежности и пропускной способности в плотной городской среде. Анализ мирового опыта измерения и оценки производительности мобильных сетей позволяет выявить существующие ограничения и возможные пути их преодоления. Важным аспектом является изучение механизмов улучшения качества связи, таких как использование адаптивных антенн, многолучевого формирования диаграмм направленности и динамического управления частотными ресурсами.

Во второй главе излагаются теоретические основы повышения надежности и пропускной способности телекоммуникационных сетей, включая модели и методы управления интерференцией, а также механизмы обеспечения бесперебойной связи при передаче абонентов между сотами (хэндовер). Рассматриваются вопросы оптимизации использования спектра, распределённого управления ресурсами и динамического перераспределения каналов для обеспечения высокой эффективности работы сети.

Третья глава посвящена разработке методов повышения эффективности работы сетей 5G и 6G, включая применение AI/ML для управления мобильностью, балансировки нагрузки и интеллектуального принятия решений по хэндоверу. Подробно рассматриваются алгоритмы прогнозирования пользовательской активности, самоорганизации сетевых узлов и автоматизированного регулирования параметров связи в режиме

реального времени. Такие подходы позволяют значительно повысить уровень обслуживания абонентов и снизить нагрузку на сетевую инфраструктуру.

Четвертая глава представляет практические решения, направленные на реализацию предложенных методов, включая разработку имитационных моделей, мобильных приложений для сбора данных, панелей мониторинга и интеграции с облачными сервисами для хранения и анализа больших данных. Особый акцент сделан на разработке инструментов анализа и предиктивного моделирования параметров сети, что позволяет операторам заранее выявлять потенциальные проблемы и предотвращать их негативное влияние на качество обслуживания пользователей.

В пятой главе рассматриваются перспективы внедрения Open-RAN, его ключевые особенности, стандарты и требования, а также интеграция с технологиями искусственного интеллекта. Особое внимание уделяется преимуществам Open-RAN для повышения надежности и эффективности сетей нового поколения. В этом разделе также анализируются потенциальные трудности и вызовы, с которыми могут столкнуться операторы связи при переходе на Open-RAN, а также предлагаются пути их решения.

Таким образом, данная монография представляет собой комплексное исследование современных методов повышения производительности и надежности мобильных сетей 5G и 6G, уделяя особое внимание перспективным технологиям и архитектурам, таким как AI/ML и Open-RAN. Полученные результаты могут быть полезны для исследователей, инженеров и специалистов в области телекоммуникаций, а также для операторов связи и разработчиков сетевого оборудования. Внедрение данных технологий позволит существенно повысить качество мобильной связи, её доступность и эффективность использования ресурсов сети, открывая новые горизонты для цифровой трансформации общества.



# 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В РАЗВИТИИ СЕТЕЙ 5G И 6G

## 1.1 Основные архитектурные принципы сетей 5G и 6G

За последние несколько десятилетий сети мобильной беспроводной связи претерпели значительные изменения. Поколение мобильной беспроводной связи обычно относится к изменению характера системы, скорости, технологии, частоты, емкости данных, задержке. Каждое поколение имеет стандарты, различные возможности, новые методы и новые функции, которые отличают его от предыдущего.

Сеть мобильной беспроводной связи первого поколения (1G) была аналоговой и использовалась только для голосовых вызовов. Второе поколение (2G) представляет собой цифровую технологию и поддерживает текстовые сообщения. Технология мобильной связи третьего поколения (3G) обеспечивает более высокую скорость передачи данных, увеличенную емкость и поддержку мультимедиа. Четвертое поколение (4G) объединяет 3G с фиксированным интернетом для поддержки беспроводного мобильного интернета, что является эволюцией мобильной технологии и преодолевает ограничения 3G. Оно также увеличивает пропускную способность и снижает стоимость ресурсов. [1]. 5G означает технологию мобильной связи 5-го поколения и станет новой революцией на рынке мобильной связи, которая изменит способы использования сотовых телефонов в очень высокой пропускной способности.

Пользователь никогда ранее не сталкивался с такой ценной технологией, включающей в себя все виды передовых функций, а технология 5G станет самой мощной и востребованной в ближайшем будущем.

Современные мобильные сети пятого поколения представляют собой качественный скачок в области телекоммуникаций. Их архитектура была разработана с учетом новых требований, таких как высокая пропускная

способность, минимальная задержка, поддержка большого числа подключений и энергоэффективность.

Основным отличием сетей 5G от предыдущих поколений является переход от монолитной архитектуры к модульной, гибкой и масштабируемой системе, которая может адаптироваться к различным сценариям использования.

В основе архитектуры лежат несколько ключевых технологий, включая:

- Распределение сетевых функций (NFV, Network Function Virtualization), позволяющее реализовывать многие функции на базе виртуальных сред.

- Сегментацию сети (Network Slicing), которая обеспечивает независимую обработку трафика для различных типов сервисов.

- Технологию многодоступа (MIMO, Massive Input Massive Output), увеличивающую пропускную способность и качество связи.

- Механизмы межсистемного взаимодействия, гарантирующие совместимость с существующими сетями 4G и перспективными технологиями 6G.

Эти принципы закладывают основу для поддержки широкого спектра приложений – от потоковой передачи видео высокой четкости до Интернета вещей (IoT), создавая гибкую и универсальную платформу для будущего цифрового взаимодействия.

5G разработан для соответствия требованиям IMT-2020, установленным спецификацией ITU-R M.2083, с целью предоставления более продвинутых и расширенных возможностей по сравнению с 4G LTE (IMT-Advanced), как показано в таблице 1 [2].

Для поддержки этих возможностей, указанных в таблице 1, архитектура 5G включает новую 5G Core Network (5GC), также известную как 5G Next Generation Core (NG-Core или NGC), которая будет сердцем сети и выступать в качестве средства поддержки для множества приложений и услуг 5G.

Таблица 1 – Требования к производительности сети 5G [2]

Параметр	Значение
Пиковая скорость передачи данных по нисходящему каналу	20 Гбит/с
Пиковая скорость передачи данных по восходящему каналу	10 Гбит/с
Пиковая спектральная эффективность нисходящего канала	30 бит/с/Гц
Пиковая спектральная эффективность восходящего канала	15 бит/с/Гц
Скорость передачи данных по нисходящему каналу, воспринимаемая пользователем	100 Мбит/с
Скорость передачи данных по восходящему каналу, воспринимаемая пользователем	50 Мбит/с
Пропускная способность области (только внутренняя точка доступа eMBB)	10 Мбит/с/м <sup>2</sup>
Минимальные требования к задержке плоскости пользователя	4 мс для eMBB, 1 мс для URLLC
Минимальные требования к задержке плоскости управления	20 мс
Плотность подключения (mMTC)	1 000 000 устройств на км
Надежность	1-10 <sup>-5</sup>
Мобильность	Стационарно до 500 км/ч

Поскольку архитектура системы 5G должна поддерживать такие варианты использования, как AR, VR, операции в реальном времени, а также

такие варианты использования, как интеллектуальное сельское хозяйство, интеллектуальное здравоохранение, интеллектуальный транспорт и интеллектуальные города и т.д., которые все имеют различные требования к сети, в конструкцию ядра 5G было введено несколько концепций [3].

Кроме того, поскольку масштабируемость и защита инвестиций в оборудование приобрели большую важность, также увеличилась программная реализация сети. Поэтому основная сеть 5G должна быть:

1) гибкой: ядро 5G должно иметь возможность гибко добавлять новые услуги и настраивать сеть на общей инфраструктуре.

2) адаптивной: ядро 5G должно сократить время внедрения услуг с часов до минут и обеспечить более быстрое время выхода на рынок (TTM) для новых услуг с месяцев до дней.

3) масштабируемой: ядро 5G должно быстро и высоко масштабироваться с надежностью уровня телекоммуникаций.

4) настраиваемой: ядро 5G должно иметь возможность быстро адаптироваться и оптимизировать сеть в соответствии с условиями эксплуатации. Он также должен поддерживать экономически эффективный переход с 4G на 5G на основе общего ядра, не зависящего от доступа.

Для достижения этих целей ключевыми принципами проектирования 5GC являются:

1) Сетевое нарезание: эта функция обеспечивает независимую масштабируемость и развязанную техническую эволюцию, а также гибкое развертывание и настройку сети в соответствии с потребностями различных услуг.

2) Модульная конструкция функции: это форма функциональной дезагрегации, при которой функция, состоящая из нескольких модулей, может быть создана в соответствии с требованиями варианта использования.

3) Унифицированная структура аутентификации: это полезно в ядре с множественным доступом для эффективности и позволяет операторам предлагать услуги «следуй за пользователем» независимо от метода доступа.



4) «Сетевые функции без сохранения состояния»: с помощью этой функции ресурс «вычислений» отделяется от ресурса «хранения». Эта концепция заимствована из облачных приложений. Она обеспечивает гораздо более эффективное создание и потребление сетевых ресурсов.

5) Поддержка облачных собственных приложений: это еще один шаг от NFV (виртуализация сетевых функций), который улучшает масштабируемость и эффективное создание и потребление сетевых ресурсов.

6) Раскрытие сетевых возможностей: предоставление информации о возможностях сети внутренним и внешним приложениям очень важно, когда операторы хотят интегрировать 5G с вертикальными отраслевыми процессами. Стандартизация этого интерфейса упрощает интеграцию для вертикальных клиентов, особенно тех, которые осуществляют международные операции и имеют многооператорские отношения.

7) Поддержка мобильных периферийных вычислений: это необходимо для поддержки доступа к службам с низкой задержкой, размещенным в локальных центрах обработки данных. Обычно функции пользовательской плоскости могут быть развернуты удаленно, т. е. рядом с пользователем, в то время как плоскость управления является централизованной. В критически важных приложениях с очень низкой задержкой плоскость управления также может быть распределенной.

Архитектура базовой сети 5G, стандартизированная 3GPP, обеспечивает поддержку повышенного спроса на пропускную способность, уменьшенную задержку и повышенную надежность в соответствии с требованиями различных приложений и услуг, которые должна поддерживать 5G. Новое ядро 5G, как определено 3GPP, использует облачную архитектуру на основе сервисов (SBA), которая охватывает все функции и взаимодействия 5G, включая аутентификацию, безопасность, управление сеансами и агрегацию трафика от конечных устройств. Ядро 5G дополнительно подчеркивает NFV как интегральную концепцию дизайна с виртуализированными программными функциями, которые могут быть развернуты в сети. На

рисунке 1 показана архитектура базовой сети 5G на основе шины. Архитектура базовой сети 5G указана в технической спецификации 3GPP 23.501 [4].

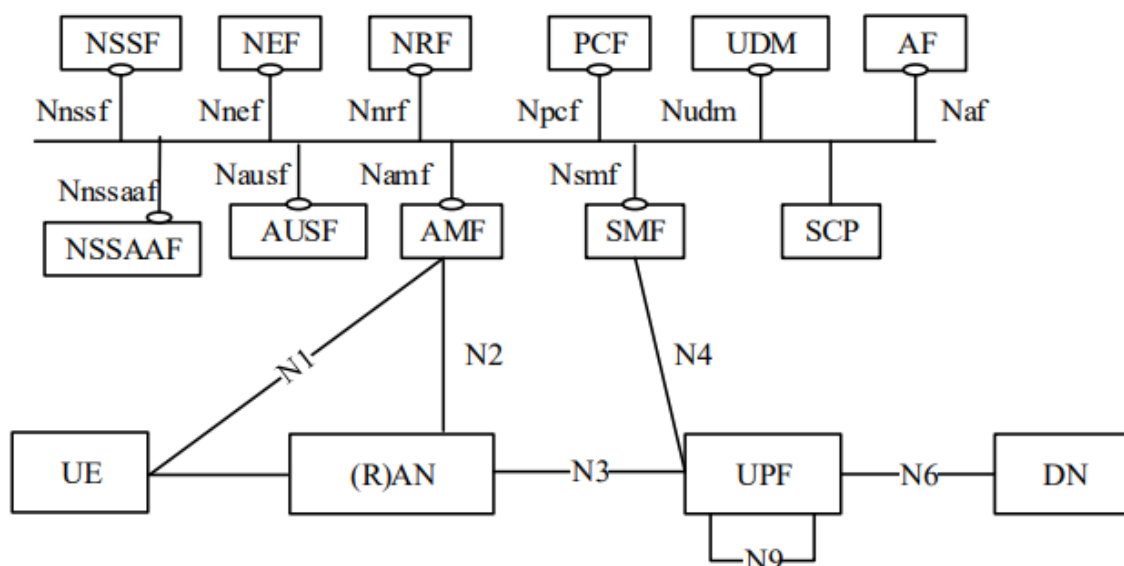


Рисунок 1 – Архитектура 5G [4]

Основные сетевые функции (NF) и их возможности, как они определены в процессе стандартизации сегодня, приведены ниже [4]:

1. Функция сервера аутентификации (AUSF): действует как сервер аутентификации. Он содержит в основном функциональность сервера аутентификации EAP и действует как хранилище ключей и предоставляет материал ключей запрашивающей NF.

2. Функция управления доступом и мобильностью (AMF) Она выполняет завершение сигнализации NAS, шифрование и защиту целостности NAS, управление регистрацией, управление подключением, управление мобильностью, аутентификацию и авторизацию доступа, управление контекстом безопасности. AMF также включает функцию выбора сетевого сегмента (NSSF) и действует как точка завершения для интерфейсов RAN CP (N2).

3. Функция управления сеансом (SMF) Она выполняет управление сеансом (установление, изменение и освобождение сеанса), распределение и управление IP-адресами UE, функции DHCP, завершение сигнализации NAS,

связанной с управлением сеансом, уведомление о данных DL и настройка управления трафиком для UPF для правильной маршрутизации трафика.

4. Функция плоскости пользователя (UPF) Она выполняет маршрутизацию и пересылку пакетов, проверку пакетов, обработку QoS, действует как внешняя точка сеанса PDU для соединения с сетью передачи данных (DN) и является точкой привязки для внутри- и междоменной мобильности RAT.

5. Функция раскрытия сетевой информации (NEF) Поддерживает раскрытие возможностей и событий, безопасное предоставление информации из внешнего приложения в сеть 3GPP и трансляцию внутренней/внешней информации. Действует как шлюз API, который позволяет внешним пользователям, таким как предприятия или партнерские операторы, контролировать, предоставлять и применять политику приложений для пользователей внутри сети оператора.

Таким образом, а. Обеспечивает безопасность, когда службы или функции приложений (AF) получают доступ к узлам ядра 5G b. Действует как прокси-сервер, или точка агрегации API, или транслятор в ядро сети

6. Функция репозитория NF (NRF) Функция репозитория сети (NRF) обнаруживает экземпляры сетевых функций. Когда она получает запрос на обнаружение NF от экземпляра NF, она предоставляет обнаруженные экземпляры NF. Она отсутствует в 4G.

Данная функция поддерживает:

- Профили экземпляров сетевых функций (NF) и поддерживаемые ими сервисы в сети.

- Интерфейсы на основе сервисов, управление и обслуживание.

В SBA функция репозитория NF (NRF) обеспечивает обнаружение сервисов между отдельными сетевыми функциями. Он поддерживает профили экземпляров сетевых функций и поддерживаемых ими служб (например, идентификатор функции, тип функции, идентификаторы сетевых срезов, информация о емкости, поддерживаемые службы и информация о конечных

точках, такая как IP-адреса). В этом смысле он является важным «стержнем» в SBA. NRF играет важную роль в установлении нового сеанса. Здесь запрос на обнаружение и выбор SMF инициируется AMF, когда от UE поступает запрос на установление сеанса данных. NRF используется для помощи в обнаружении и выборе правильного SMF. В контексте сетевого среза происходит тот же процесс: AMF запрашивает NRF для выбора SMF, который является частью экземпляра сетевого среза на основе S-NSSAI, профиля подписки UE и политики оператора, когда UE запрашивает установку сеанса. Функции плоскости управления взаимодействуют друг с другом через NRF через интерфейсы на основе служб (используя транспорт HTTP 2.0). Это автономные программные модули, которые можно использовать повторно независимо друг от друга и которые можно рассматривать как микросервисы.

Сетевая функция является либо производителем, либо потребителем услуг с двумя режимами взаимодействия: либо потребительская NF может запросить ответ от NF производителя – например, чтобы запросить информацию о политике подписчика; либо она может подписаться на производителя и получать уведомления при необходимости – например, если состояние подписчика меняется на неактивный режим.

7. Функция управления политикой (PCF) Она реализует единую структуру политики, предоставляя правила политики функциям CP, доступ к информации о подписке для принятия решений о политике в UDR. Это обеспечивает структуру политики, включающую в себя сетевое нарезание, роуминг и управление мобильностью. Она имеет сходство с существующей функцией правил политики и тарификации – PCRF 4G.

8. Унифицированное управление данными (UDM) Хранит данные и профили абонентов и выполняет генерацию учетных данных аутентификации и соглашения о ключах (AKA), обработку идентификации пользователей, авторизацию доступа, управление подписками.

9. Функции приложений (AF) Функция приложения (AF) напоминает сервер приложений, который может взаимодействовать с другими NF



плоскости управления. AF могут существовать для различных служб приложений и могут принадлежать оператору сети или доверенным третьим лицам. Например, AF поставщика приложений over-the-top может влиять на маршрутизацию, направляя свой трафик на свои внешние пограничные серверы. Для служб, которые оператор считает доверенными, AF может получать доступ к сетевым функциям напрямую, тогда как ненадежные или сторонние AF будут получать доступ к сетевым функциям через NEF.

10. Сеть передачи данных (DN) Это относится к внешней сети передачи данных, через которую можно получить доступ к службам оператора, сторонним службам и т. д. Это новое представление архитектуры ядра 5G с точки зрения сетевых функций (например, функция управления доступом (AMF)) в плоскости управления позволяет другим авторизованным сетевым функциям получать доступ к своим услугам. Связь с этими узлами использует API на основе HTTP, заменяя такие протоколы, как Diameter. Это представляет собой серьезный сдвиг в мире телекоммуникаций с принятием функций без сохранения состояния, интерфейсов на основе API и сигнализирует о переходе к миру программного обеспечения.

Общая конструкция и ее потенциальные преимущества включают [5]:

- Гибкая и расширяемая архитектура
- Более простая интеграция со сторонним программным обеспечением с использованием интерфейсов прикладного программирования (API)
- Многослойное пользовательское оборудование (UE), одно UE одновременно подключается к нескольким услугам через несколько срезов с оптимизированным доступом и сигнализацией мобильности.
- Улучшенное QoS

## 1.2. Перспективы сетей 6G: отличия и эволюция

Быстрый рост интеллектуальных новых технологий и их функций (например, интерактивные услуги в реальном времени) способствовал значительному увеличению беспроводного трафика данных, который не может быть полностью поддержан существующей сетью, даже с системами пятого поколения (5G) [6]. Это указывает на то, что доступные развернутые мобильные сети не смогут полностью и эффективно соответствовать изменяющимся техническим стандартам. Кроме того, прогнозируется более развитое цифровое общество, которое будет движимо почти мгновенной и безграничной беспроводной связью к 2030 году [7]. Это подтолкнуло развитие шестого поколения (6G) к соблюдению высоких технических стандартов новых методов передачи с эффективным использованием спектра и энергии [8].

Ожидается, что мобильные сети 6G будут поддерживать высокоплотную сеть, соединяющую 500 миллиардов машин [9]. Ее пропускная способность может быть в 1000 раз выше, чем пропускная способность 5G. Благодаря мобильной сети 6G с более высоким частотным спектром пользователи могут ожидать еще более высокой скорости (где скорость передачи данных, как ожидается, будет в 100–1000 раз выше, чем у 5G), повышенной пропускной способности и еще более низкой задержки, что может поддержать перспективы новых приложений, включая точную медицину, разведку, прогнозирование катастроф и виртуальную реальность (VR). В частности, 6G будет предлагать скорость передачи данных в Гбит/с до Тбит/с за счет использования многополосного широкополосного спектра, который включает диапазон 1–3 ГГц, диапазон миллиметровых волн (mmWave) (30–300 ГГц) и терагерцовый (THz) диапазон (0,06–10 THz) [10]. Учитывая тенденцию развития более ранних мобильных сетей, первоначальная мобильная сеть 6G примет текущую архитектуру и сильные стороны 5G, такие как более высокие частотные диапазоны и оптимизированную децентрализованную сетевую систему. Хотя мобильная технология 6G предоставит несколько преимуществ будущим сверхплотным сетям, есть несколько вопросов, которые все еще

необходимо выделить, обсудить и затем решить до стандартизации системы 6G.

Рассмотри некоторые потенциальные варианты использования и применения 6G для промышленности и государственных потребителей. Пятое поколение развивается, и то, что было развернуто в 5G, в основном сосредоточено на мобильной широкополосной связи, в то время как другие аспекты 5G, такие как автоматизация, низкая задержка и высокая надежность для производства, электронного здравоохранения, игр и подключенных транспортных средств [11-13].

Сетевая технология развивается в гибкую и динамичную инфраструктуру, и ожидается, что 6G, как и предыдущие поколения, будет находиться под влиянием современных новых технологий. Ожидается, что ключевые темы «Двенадцать глобальных мегатрендов» сформируют общество в целом к 2030 году, как предложено группой Visionary Innovation Group компании Frost & Sullivan [14]. Сеть 6G будет удовлетворять требованиям многих будущих технологических тенденций и тем, таких как фабрики будущего, автономная мобильность и движение к «нулевому» миру («нулевая» энергия, прикосновение и ошибка). До сих пор системы связи передавали данные, которые взаимодействуют с двумя человеческими чувствами, слухом и зрением.

Таким образом, одной из основных целей 6G является передача данных, связанных с другими человеческими чувствами, такими как осязание, обоняние и вкус. Эта дополнительная передача человеческих чувств относится к четвертому измерению (4D), которое позволит системам связи передавать другую сенсорную информацию, такую как загрязнение воздуха, шума и света. В этом отношении 6G можно в целом охарактеризовать как интеграцию между коммуникацией и зондированием, что приведет к гораздо более интеллектуальным, релевантным и персонализированным услугам и эффективно и естественно объединит физический и виртуальный мир вместе [15].

Шестое поколение также будет использовать мобильные технологии для доставки ИИ всем, в любом месте и в любое время, что будет использовать беспроводную сеть 6G в качестве сенсорной сети. Таким образом, интегрируя связь с зондированием и ИИ, 6G станет интеллектуальной сетью, которая откроет и разблокирует несколько новых промышленных приложений, таких как интеллектуальный видеоанализ, повсеместные интеллектуальные системы в реальном времени и интеллектуальные службы взаимодействия с клиентами.

Ниже перечислены некоторые из потенциальных приложений 6G [16]:

- Транспорт: автономные транспортные средства, взаимодействующие с окружающей средой и кооперативное вождение.
- Розничная торговля: сквозные бесконтактные транзакции от производства до потребления в режиме, близком к реальному времени.
- Производство: автономные и динамически реконфигурируемые производственные линии на основе спроса в режиме, близком к реальному времени.
- Здравоохранение: роботизированная хирургия, удаленные хирургические процедуры и улучшенные возможности точной хирургии.
- Промышленные/общественные: кооперативное производство, массивный встроенный интеллект, развертывание маломощных датчиков по всей цепочке поставок и в окрестностях.
- Высококачественные игры: мгновенная игра без загрузки, с поддержкой подписки и моделью прямого распространения.
- Роботизированное строительство: автономное оборудование на рабочих площадках, планирование и строительство на месте в режиме реального времени.
- Мгновенная доставка: массивная логистика автопарка и динамические места доставки.
- Автономизация: автономизация процессов, автономизация когнитивных процессов, виртуальные агенты и аналитика, выполнение на

основе искусственного интеллекта и машинного обучения (ML) и интеллектуальное предприятие.

- По-настоящему захватывающая расширенная реальность (XR): объединение виртуальной реальности, дополненной реальности и смешанной реальности (MR) и использование ее в развлечениях, медицине, науке и образовании.

- Высококачественная мобильная голограмма: как следующее поколение медиатехнологий для предоставления услуг в реальном времени.

Для реализации вышеуказанных приложений в больших масштабах требуется сеть с чрезвычайно высокой скоростью передачи данных, надежностью и энергоэффективностью.

Если сравнивать 6G с 5G, то основное внимание 5G уделяется скорости, массовой связности, надежности и задержке, в то время как предлагаемые направления фокусировки для 6G - это устойчивость, покрытие, связность, синхронизация, геолокация и надежность [17]. Пятое поколение способно обеспечить низкую задержку в одну миллисекунду, хотя оно не было разработано с гарантированной синхронизацией времени.

Следовательно, существует разница во времени между различными потоками или различными сеансами, генерируемыми различными объектами, которым необходимо взаимодействие друг с другом. В 6G несколько объектов будут интегрироваться друг с другом, как в виртуальных, так и в физических мирах. Следовательно, разница во времени между всеми объектами и каналами связи должна находиться в определенных пределах, чтобы обеспечить естественную реакцию и взаимодействие между ними. С другой стороны, временной джиттер также очень важен для будущих коммуникаций, которые выходят за рамки возможностей 5G. Поскольку взаимодействие объектов в 6G имеет важное значение, необходимость в высококачественной и высокоразрешающей геолокации играет жизненно важную роль в реализации 6G.

Связь – еще одна критическая проблема 6G, которую следует решать должным образом. Будущей сети требуется не только сверхскоростная связь, но и устойчивость, а также адаптивное и настраиваемое подключение. Например, для передачи 4D-видео необходимо передавать большой объем данных в диапазоне терабит в секунду; поэтому наряду с высокой пропускной способностью требуются интеллектуальные алгоритмы для сжатия данных, например, с помощью ИИ для прогнозирования следующей позы лица. С другой стороны, такая исчерпывающая передача данных требует массивного обратного соединения с низкой задержкой.

Кроме того, 6G требует гибкого доступа к спектру, информации о состоянии канала высокого разрешения (CSI) и предварительного кодирования для распределенного mMIMO, высокопроизводительного восходящего канала, более высокой пропускной способности и качества сети для мобильного облака XR и маломощного высокоточного позиционирования [18-19].

Другая цель 6G в плане подключения – преодоление цифрового неравенства, когда каждый, независимо от своего местонахождения, имеет достойный доступ к сетевым услугам. С другой стороны, массовые маломощные устройства или «вещи» требуют использования ресурсов для высокой плотности подключения, но при этом поддерживают своевременный, эффективный и надежный механизм доставки данных. Сеть 6G обеспечит очень высокую пиковую скорость передачи данных, до 1–10 Тбит/с, с очень низкой задержкой, всего 10–100 мкс, но все это должно быть достигнуто при значительно более низком потреблении энергии не только на единицу данных, но и в качестве общего энергопотребления [20]. В целом, 6G предлагает замечательные сетевые возможности, которые необходимы для реализации интеллектуального информационного общества 2030 года.

На рисунке 2 представлены технические требования 6G по сравнению с требованиями 4G и 5G, которые включают следующие элементы 6G [21]:

1. Эффективность использования спектра в 5–10 раз выше, чем у 5G;

2. Пиковая скорость передачи данных не менее 1 Тбит/с или до 10 Тбит/с в некоторых случаях, которые включают беспроводную обратную и фронтальную сеть THz (x-haul) [46];

3. Скорость передачи данных, полученная пользователем, составляет 1 Гбит/с или даже до 10 Гбит/с в определенных случаях (например, внутренняя точка доступа);

4. Плотность подключения в десять раз выше, чем у 5G, которая может поддерживать до  $10^7$  устройств на площадь (в  $\text{км}^2$ ) и пропускную способность области до 1 Гбит/с на площадь (в  $\text{м}^2$ ) для точки доступа;

5. Беспроводная сеть, которая может поддерживать различные (или иногда противоречивые) требования;

6. Высокая мобильность ( $\geq 1000$  км/ч) и задержка по воздуху 10–100 мкс для приемлемого качества восприятия (QoE) в случаях, которые включают гипер-HSR и системы авиакомпаний;

7. Огромная плотность подключения до  $10^7$  устройств/км<sup>2</sup>, что означает в 10 раз большую плотность подключения, чем у 5G; кроме того, пропускная способность области до 1 Гбит/с/м<sup>2</sup> для таких сценариев, как точки доступа;

8. в 10–100 раз более высокая энергоэффективность, чем в 5G;

9. в 5–10 раз более высокая эффективность использования спектра, чем в 5G.

Возможности мобильной технологии 6G [22].

Мобильная технология 6G предлагает различные ключевые факторы, такие как высокая пропускная способность, чрезвычайно надежные каналы связи, повышенная скорость передачи данных, низкая задержка и подходящая среда для приложений ИИ. Эти факторы открывают множество новых областей применения, в которых 6G может использоваться вместо прежней мобильной технологии 5G. Последние приложения охватывают широкий спектр, от военных приложений до личных нужд. С пандемией личные потребности теперь должны удовлетворяться удаленно. Необходимость

надежных услуг связи без ущерба для высоких скоростей передачи данных стала более актуальной проблемой.

Рассмотрим возможности и преимущества мобильной технологии 6G, включая ключевые факторы и примеры.

*Промышленная автоматизация.* В последние годы концепция промышленной автоматизации привлекла все большее внимание с развитием Индустрии 4.0 [23]. Каждый сектор планирует довести свой производственный процесс до полностью автоматизированной версии. Хотя услуги, предоставляемые этими секторами, различны, их главная цель в автоматизации своих систем одна и та же: исключить человеческий фактор из производства. Желание исключить человеческий элемент из системы обусловлено вероятностью ущерба, который может быть нанесен людьми. В этом случае машины, которые будут играть роль в процессе автоматизации, должны быть достаточно надежными, чтобы заменить людей. Для полного процесса автоматизации очевидно, что низкая задержка имеет решающее значение, чтобы избежать проблем, которые могут повлиять на системы и тысячи устройств. Получение ответа от каждого модуля в системе имеет жизненно важное значение для завершения всего процесса. Такая надежная и быстрая передача данных может быть обеспечена только технологией мобильной связи 6G.

*Интернет космических вещей (IoST).* IoST можно рассматривать как расширение IoT на наземные приложения. Необходимость IoST основана на отсутствии гибкости, привносимой IoT с точки зрения типа используемой инфраструктуры. Другим ограничением является проблема покрытия, которая выявляет потребность в новых технологиях. Расходы на строительство могут быть неподъемными, особенно в отдаленных районах, таких как Северный и Южный полюса. Связь между этими удаленными районами или спутниками возможна с помощью мобильной технологии 6G, поскольку она увеличивает скорость передачи данных до 100 Гбит/с и имеет высокую пропускную способность. С помощью этой новой технологии космические данные,



собранные спутниками, могут передаваться без проблем с задержкой, что позволяет нам проводить различные наблюдения, которые могут продвинуть наши технологии и знания в космосе на шаг вперед [24, 25].

*Связь между мозгом и машиной.* Интерфейс мозг-машина представляет собой подход к анализу сигналов мозга, передаваемых на цифровые устройства, и их интерпретации в различные действия или команды. Приблизительная оценка всего спроса на запись мозговых сигналов составляет около 100 Гбит/с, что несовместимо с текущими и ближайшими сетями 5G. Поскольку технология интерфейса мозг-машина (ИММ) все еще находится на ранних стадиях, это требование к скорости является всего лишь предположением. Учитывая, что будущие типы ИМК и сигналов, которые будут передаваться от клеток, еще не обнаружены, эта оценка скорости передачи данных, вероятно, увеличится. Очевидно, что скорость передачи данных, обеспечиваемая мобильной технологией 6G, имеет важное значение для систем ВМІ [26].

Вторым важным требованием ВМІ является надежность постоянной передачи данных [27]. Сектор здравоохранения – это тот, который получит наибольшую выгоду от систем ВМІ. Однако любое нарушение сети может оказаться фатальным для пациентов. Например, пациенты с эпилепсией должны постоянно находиться под наблюдением, поскольку припадки могут привести к постоянной немощи, если передача данных между клетками мозга и врачом не будет осуществляться без каких-либо перерывов. Решением для обеспечения надежности современных технологий беспроводной связи могли бы стать интеллектуальные отражающие поверхности, которые все еще находятся на начальной стадии развития. Важность постоянной скорости передачи данных может быть достигнута с помощью 6G. Обширное зондирование является многообещающим в 6G, которое может работать с будущей технологией ВМІ, которая предусматривает сотни или тысячи наномасштабных систем, взаимодействующих с нейронными клетками [28].

На рисунке 2 представлена иллюстрация различных типов ВТС-коммуникаций в системах 6G.

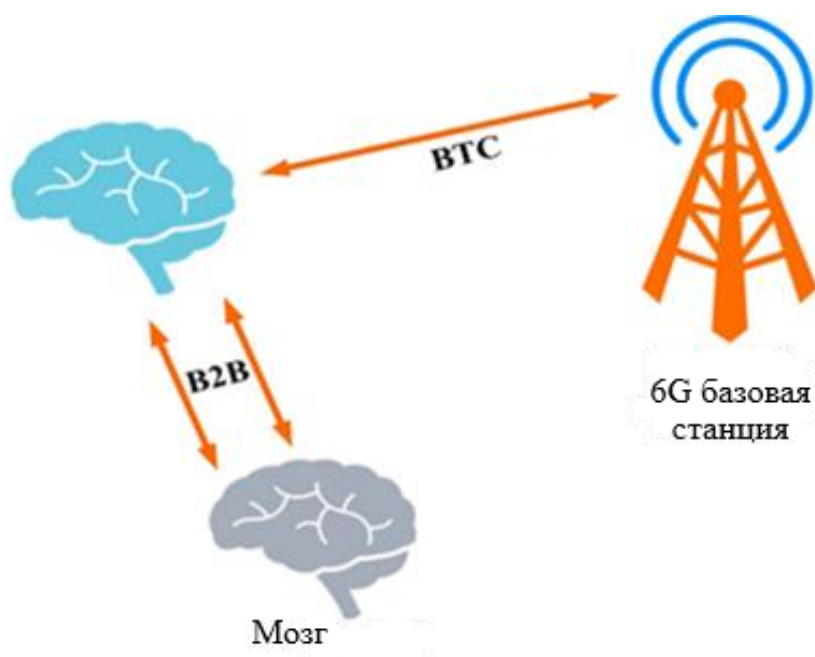


Рисунок 2 – Беспроводное взаимодействие мозга и машины [29]

*Дроны.* Дроны играют важную роль в нескольких приложениях, таких как транспортировка, доставка посылок, наблюдение и производство медиа [30]. При многих возможных областях применения для обеспечения безопасного управления и работы дронов требуется безопасная, надежная и стабильная беспроводная связь. С помощью мобильной технологии 6G можно реализовать решения на основе ИИ для решения различных проблем, таких как проблемы со связью в небе.

Одной из самых больших проблем в применении дронов является проблема бесперебойной связи в небе. Мощность принимаемого фрагментированного опорного сигнала (RSRP) может привести к сбою радиосвязи, частым переключениям и событиям переключения по принципу пинг-понга [31-37]. Для обеспечения непрерывной связи БПЛА в небе обучение с подкреплением является потенциальным решением для содействия

разработке оптимальных правил переключения и обеспечения стабильной связи при минимальной стоимости переключения.

Согласно [38], обычный метод связи дронов (когда дроны подключаются к базовой станции с самым сильным значением RSRP) имеет значительное количество переключения. Решение на основе обучения с подкреплением (RL) может значительно сократить это количество, поскольку оно учитывает компромисс между RSRP и количеством переключения. На рис. 3 показана схема на основе RL для связи дронов в небе.

Как видно на рис. 3, решение на основе RL использует базовую станцию в качестве агента, а комбинацию RSRP и стоимости переключения в качестве функции вознаграждения. Агент взаимодействует с окружающей средой и переходит в новое состояние из текущего состояния в соответствии с вознаграждением/обратной связью, полученными от его действий в текущем состоянии.

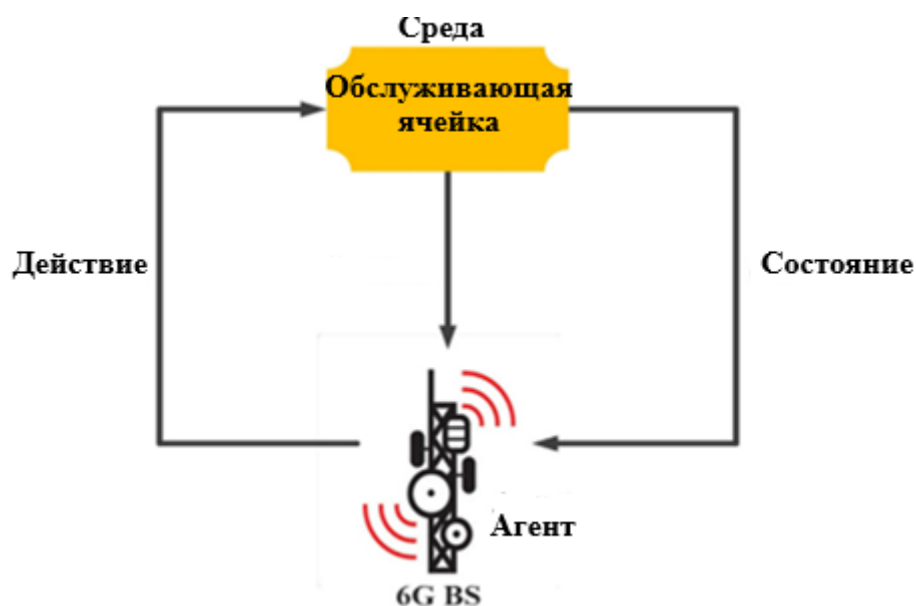


Рисунок 3 – Связь БПЛА на основе обучения с подкреплением [38]

*Удаленные медицинские операции.* С пандемией COVID-19 стали очевидны уязвимости текущей системы здравоохранения. По мере того, как число пациентов, страдающих от коронавируса, увеличивается, становится очевидным отсутствие достаточной медицинской помощи из-за

недостаточного количества медицинского персонала. Транспортировка, важный аспект при серьезных травмах, также неудовлетворительна при современных технологиях.

Согласно [39], большинство пациентов умирают в машинах скорой помощи по пути в больницу, прежде чем машина скорой помощи прибудет к месту назначения. Телехирургия, которая, как ожидается, станет широко распространенным решением многих заболеваний в будущем, требует общения в реальном времени, которое не может быть обеспечено текущей технологией 5G. Телехирургия, или удаленная медицинская помощь, является средством решения проблем медицинской помощи и транспортировки, исключая потребности физических носителей из уравнения. Удаленная медицинская помощь требует общения с высокой скоростью передачи данных и стабильного подключения.

Требования к удаленному медицинскому обслуживанию могут быть удовлетворены с помощью мобильной технологии 6G, поскольку она будет использовать терагерцовый сигнал для передачи данных с высокой скоростью передачи данных, превышающей 1 Тбит/с, и низкой сквозной задержкой, которая составляет менее 1 мс. Дальнейшие достижения могут быть достигнуты в секторе здравоохранения, например, в области голографической связи, которая поддерживает более интерактивное вербальное руководство, или тактильной/тактильной связи, при которой врач может дистанционно помогать во время операции. На рисунке 4 представлена модель связи 6G для удаленного медицинского обслуживания.

*Автономные транспортные средства и робототехника.* Подключенные автономные транспортные средства (CAV) являются важной вертикальной отраслью в 6G. Внедрение подключенной робототехники и автономных транспортных средств облегчается развертыванием систем 6G. Поскольку 6G обеспечивает более высокий спектр с более короткой длиной волны, возможны более точные разрешения зондирования и позиционирования.

Увеличенная пропускная способность данных может быть достигнута за счет использования более высоких частотных диапазонов, тем самым улучшая направленность формирования луча. Диапазон ТГц, который обычно включает в себя диапазон частот в диапазоне от 100 ГГц до 1 ТГц, необходим для высокоскоростных соединений, которые имеют решающее значение для связи между CAV и инфраструктурой.

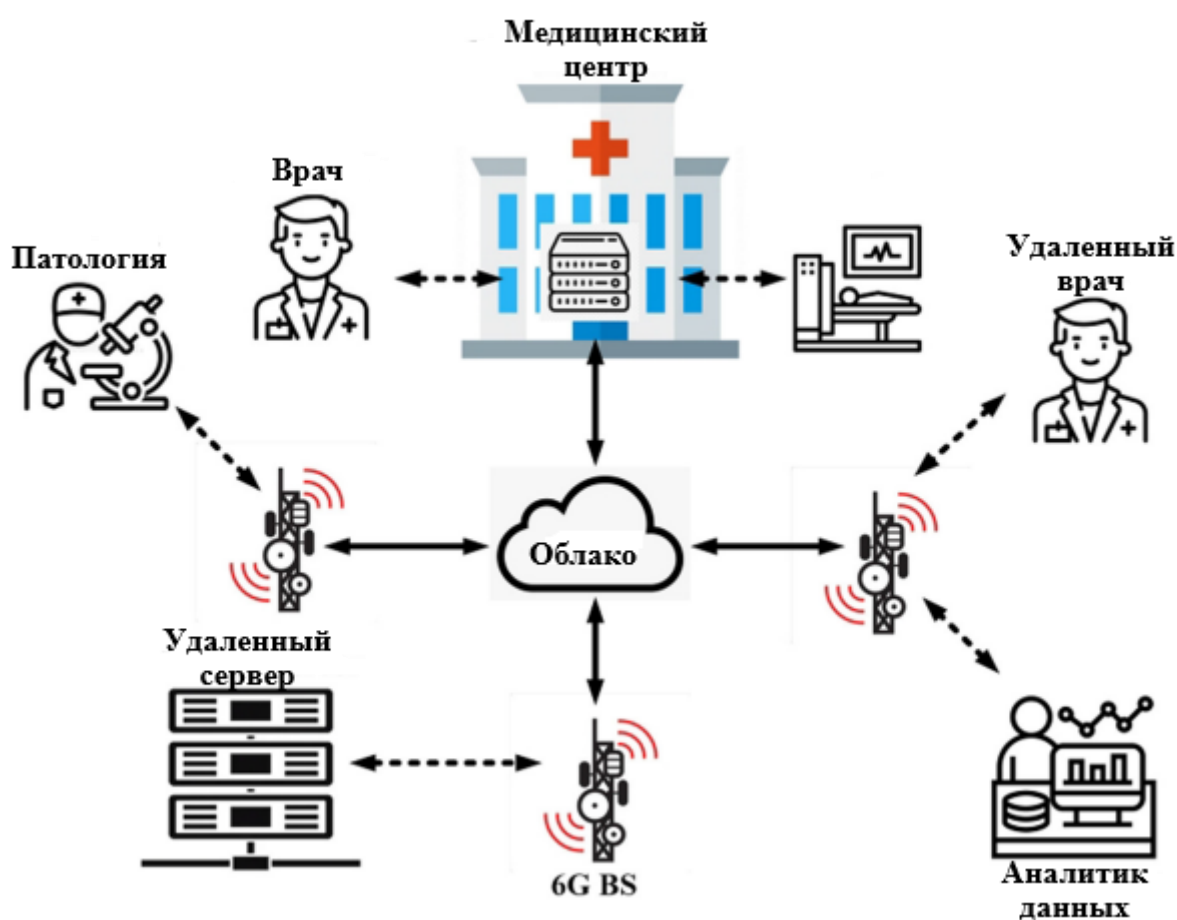


Рисунок 4 – Удалённое медицинское обслуживание с использованием мобильной технологии 6G [39]

Это приведет к удаленному вождению, восприятию необработанных данных датчиков и мобильному пограничному интеллекту [40]. Диапазон ТГц также полезен для зондирования, позиционирования и трехмерной визуализации. Поскольку сигналы ТГц имеют короткую длину волны, размер антенны и расстояние разделения могут быть радикально уменьшены, что

позволяет устанавливать большую антенную решетку в мобильных устройствах и базовых станциях. Большие антенные решетки могут быть точно позиционированы, так что можно достичь меньшей ошибки локализации по сравнению с тем, что обычно наблюдается при традиционном позиционировании на основе спутников GPS.

Высокие несущие частоты также могут использоваться для радиочастотного зондирования, обеспечивая точное местоположение и обнаружение объектов. В целом, 6G обеспечит несколько важных функций, таких как низкая задержка, высокоскоростная связь на основе данных, повышенная надежность и более широкие диапазоны частот для полностью автономного вождения.

*Умные города.* Концепция умных городов восходит к 1994 году. Она стала более необходимой с появлением пандемии COVID-19, поскольку многие человеческие практики (например, образование или культурные мероприятия) вынуждены переходить на цифровые платформы. Попытка сделать города умнее указана как использование автономных транспортных средств, датчиков и камер для управления дорожным движением, систем распознавания и безналичных систем в финансовом секторе. Эти попытки требуют более быстрого подключения, особенно в решениях на основе ИИ, таких как Интернет вещей. Мобильная технология 6G обещает более быстрые соединения, более высокие скорости широкополосного доступа и более быстрые возможности полосы пропускания, необходимые для вышеупомянутых услуг. Возможности подключения, предлагаемые мобильной технологией 6G, в тысячу раз быстрее, чем у 5G, которая в настоящее время позволяет пользователям получать доступ к скоростям 1–10 Гбит/с. Хотя мобильная технология 5G полезна для таких коммуникационных технологий, как IoT, 6G позволяет в полной мере использовать технологию ИИ. С вкладом 6G в ИИ клиентские услуги, предлагаемые IoT, будут расти экспоненциально, обеспечивая легкий доступ к персональным данным или данным об окружающей среде, таким как погодные условия, качество

продуктов питания или загрязнение воздуха в городских районах. Кроме того, расширится разнообразие взаимодействий между этими устройствами и людьми, что приведет к относительно более дешевому и быстрому доступу к персональным или экологическим данным. Необходимость сделать наши города более умными, чтобы легко получать доступ как к экологическим, так и к персональным данным, теперь более важна для нашей жизни, чем в прошлом из-за пандемии [41]. На рисунке 5 представлены основные структурные элементы умного города.



Рисунок 5 – Основные структурные элементы умного города [41]

*Интернет всего IoE* – это сетевое общение людей, процессов, файлов и объектов. Многие утверждают, что 99,4% твердых объектов в будущем будут включены в концепцию IoE [42]. Главное различие между IoT и IoE заключается в том, что IoT можно определить как беспроводную связь между простыми физическими объектами, такими как телефоны, компьютеры или системы сигнализации в наших домах. IoE относится к связи процессов и людей, отличных от этих твердых объектов. Изначально все начиналось в сети. IoE привлекает большое внимание ежедневно. Текущая технология 5G может соответствовать требованиям IoT, но не требованиям IoE. Поскольку IoE охватывает большее количество объектов по сравнению с IoT, его требования будут значительно выше.

Например, для IoE требуются беспроводное подключение и более широкая полоса пропускания, учитывая количество устройств и процессов, которые, как ожидается, будут взаимодействовать друг с другом. Технология IoE также будет использоваться в чрезвычайных ситуациях (таких как кража и взлом). Поэтому передача данных должна быть высокоскоростной и непрерывной. Эти требования могут быть выполнены с помощью мобильной технологии 6G.

Ожидается, что технология IoE будет использоваться в интеллектуальных отраслях, начиная от смартфонов и заканчивая интеллектуальными городами в будущем [43]. На рисунке 6 представлен обзор технологии Интернета всего.

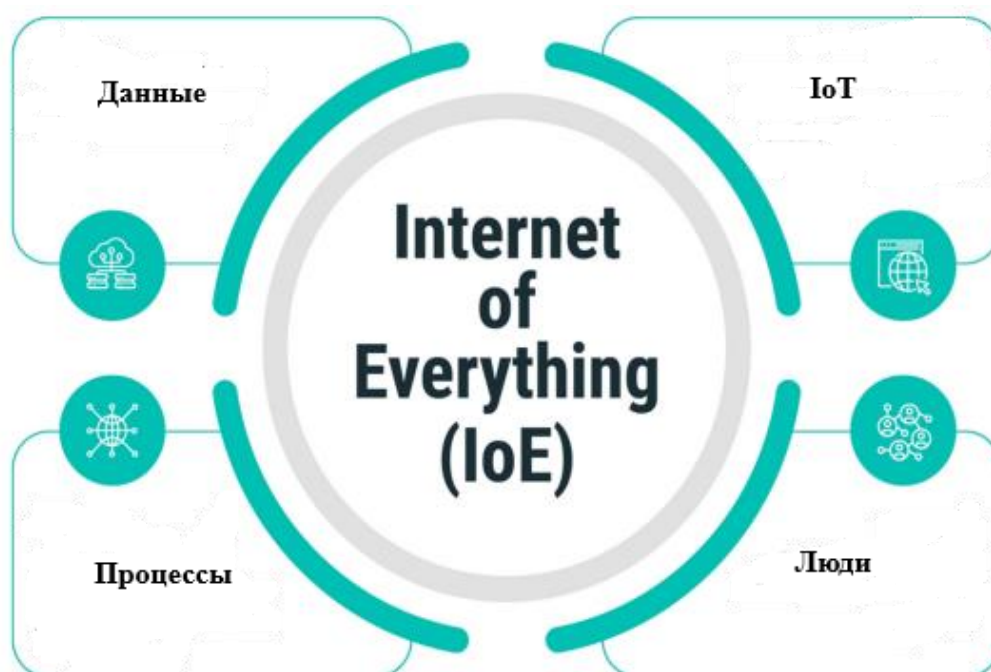


Рисунок 6 – Интернет всего с технологией мобильной связи 6G [42]

*Расширенная реальность.* Высокая пропускная способность и уменьшенная задержка текущей мобильной технологии 5G уже увеличили опыт VR/AR для потребителей. Однако существует ряд проблем с VR в сети 5G, которые необходимо решить в сети 6G. Основной проблемой будет задержка. Возникающая неоднозначность вызывает еще больше проблем. Хотя развертывание VR/AR через облачное хранилище позволяет сделать его



более компактным и доступным, файлы должны быть сжаты для пропускной способности 5G. Передача огромных объемов изображений или видео без потерь в режиме реального времени должна подождать, пока не будет реализована сеть 6G. Динамический опыт VR/AR может быть улучшен еще больше с помощью сетей 6G.

Для сбора сенсорных данных и предоставления входных данных потребителям будут использоваться несколько датчиков. В сетях 6G расширенная реальность (XR) скорее всего будет объединять стандартный URLLC с eMBB или широкополосной мобильной связью и малой задержкой (MBBLL) [44]. Вредоносные действия, управление доступом и внутренний контакт являются одними из самых заметных проблем защиты и конфиденциальности с URLLC и eMBB в мультисенсорных приложениях XR.

Чтобы обеспечить возможность массового подключения для пользователей XR в сети 6G, Эл и др. разработали новый подход множественного доступа под названием DOMA, который можно использовать в мультисенсорных реализациях XR.

Таблица 2 суммирует различия между 5G и 6G. Она показывает, что 6G внесет кардинальные изменения в мобильную связь. Более того, можно сделать вывод, что 6G увеличит скорость передачи данных, задержку, спектр и плотность подключения в 10–100 раз по сравнению с 5G.

Таблица 2 – Сравнение технологий 5G (мм-волны) и 6G (ТГц и VLC)

Технология	5G (мм-волны)	6G (ТГц)	6G (VLC)
<b>Частотный диапазон</b>	3 ГГц – 99 ГГц	100 ГГц – 10 ТГц	430 ТГц – 790 ТГц
<b>Поддерживаемая скорость передачи данных</b>	Гбит/с	Терабит/с	Гбит/с

<b>Потери на распространение</b>	Низкие (по сравнению с ТГц)	Высокие	Высокие
<b>Подводная связь</b>	Нет	Нет	Да
<b>Тип соединения</b>	NLOS (непрямая видимость)	NLOS	LOS (прямая видимость)
<b>Спектр</b>	Лицензируемый	Лицензируемый	Нелицензируемый
<b>Электромагнитные помехи</b>	Да	Да	Нет
<b>Прохождение через непрозрачные объекты</b>	Да	Да	Нет
<b>Вызовы и проблемы</b>	Конструктивные сложности, большие потери на распространение	Молекулярное поглощение, сложности в конструкции схем, большие потери на распространение (по сравнению с мм-волнами), низкая проникающая способность	Малый радиус покрытия, требуется RF-канал для обратной связи, темные объекты поглощают световые волны, подвержены шуму от других источников света

<b>Среда распространения</b>	В помещении/на улице	В помещении/на улице	В основном в помещении
<b>Потенциал</b>	Широкая полоса пропускания, небольшие антенны, сфокусированные лучи, компенсация потерь пути, пространственное мультиплексирование	Высокая полоса пропускания (в 100 раз больше, чем у мм-волн), небольшие антенны, сфокусированные лучи	Дешевое оборудование, низкие помехи, нелицензируемый спектр
<b>Потенциальные области применения</b>	Соты малых размеров, сотовая связь, беспроводная магистральная передача	Автономные транспортные средства, облачные сети, мобильные гетерогенные сети (HetNets)	Li-Fi, системы идентификации по свету, больничные роботы, подводная связь, транспортные системы связи
<b>Мощность передатчика</b>	Высокая	Высокая	Низкая

1.3. Проблемы надежности и пропускной способности в условиях плотной городской застройки

Современные беспроводные сети стремительно развиваются, чтобы удовлетворить растущий спрос на высокоскоростное подключение и обеспечить стабильность связи в условиях стремительного увеличения количества подключаемых устройств. В эпоху 5G и на пороге внедрения 6G технологии становятся ключевыми инструментами для поддержки таких направлений, как Интернет вещей, автономные системы, умные города и индустриальные сети. Однако высокая плотность подключений предъявляет серьезные требования к производительности и надежности сетевой инфраструктуры.

С увеличением числа пользователей и подключаемых устройств в единице площади возникает множество вызовов. Среди них – интерференция сигналов, увеличение задержки, снижение скорости передачи данных, а также угрозы перегрузки сети. Эти факторы могут существенно повлиять на стабильность и надежность работы сети. Сети шестого поколения (6G), в отличие от 5G, направлены на устранение существующих ограничений через использование новых спектров, квантовых технологий и искусственного интеллекта для управления ресурсами.

Данный раздел посвящен анализу влияния высокой плотности подключений на ключевые параметры сетей 5G и 6G, включая их производительность, надежность и способы решения возникающих проблем.

В исследовании [45] анализируется влияние высокой плотности подключений на производительность сетей 5G, особенно в диапазонах миллиметровых волн (mmWave). Авторы указывают на то, что использование mmWave обеспечивает высокие скорости передачи данных, но также требует плотного размещения базовых станций для поддержания качества связи. Это делает 5G особенно актуальной для городских районов с высокой плотностью пользователей, где традиционные методы могут не справляться с нагрузкой.

В статье [46] представляется собой всесторонний обзор последних достижений и будущих задач в области мобильных коммуникаций. Авторы фокусируются на текущем развитии 5G и будущих возможностях 6G, уделяя

особое внимание техническим аспектам, таким как улучшение пропускной способности, снижение задержек и повышение плотности подключений.

Анализ основных достижений 5G: Важными достижениями 5G являются расширенные возможности пропускной способности, сверхнизкая задержка и высокая плотность подключений, что позволяет поддерживать миллионы устройств на малой территории. Эти улучшения уже внедряются в индустрии интернета вещей (IoT), автономных автомобилей и интеллектуальных городов.

Перспективы 6G: Развитие 6G нацелено на использование сверхвысоких частот (терагерцовый диапазон), что обеспечит еще большие скорости передачи данных. Важную роль в 6G сыграет искусственный интеллект (ИИ), который будет использоваться для управления сетью, повышения энергоэффективности и обеспечения более надежных и низколатентных соединений.

Основные вызовы: Один из ключевых вызовов для 6G – обеспечение безопасности сетей и решение проблем, связанных с высокой плотностью подключений. Кроме того, 6G требует значительных изменений в инфраструктуре и использовании новых подходов к управлению спектром.

В статье [47] исследуется моделирование мобильного трафика в крупном метрополитенском районе на основе измерений. Авторы подчеркивают, что точное моделирование трафика критически важно для повышения производительности и надежности сетей 5G и 6G.

В работе применяется анализ больших данных для изучения паттернов трафика в условиях высокой плотности подключений, включая часы пик и праздничные дни. Результаты показывают, что адаптация моделей трафика к динамическим условиям использования позволяет более эффективно управлять ресурсами сети.

Авторы также предлагают методы, которые могут помочь в прогнозировании нагрузки, что особенно важно для обеспечения качественного обслуживания в условиях высокой плотности пользователей. Эти подходы подчеркивают

необходимость интеграции данных о трафике в процессы планирования и управления сетями.

В работе [48] Мигель Багуэна Альбаладехо и др. рассматривают моделирование производительности LTE в Дублине, основываясь на реальных измерениях. Авторы подчеркивают, что понимание текущей производительности LTE является критически важным для планирования и оптимизации сетей следующего поколения, таких как 5G. Исследование выявляет, что факторы, такие как плотность пользователей и уровень интерференции, значительно влияют на качество связи в городской среде.

Статья [49] посвящена разработке линейного в круговой поляризации преобразователя в диапазоне Ka. Авторы акцентируют внимание на том, что преобразователи играют важную роль в современных беспроводных системах связи, особенно в условиях высокой плотности подключений, где необходима высокая производительность. Эта работа подчеркивает значимость эффективных антенн и поляризационных технологий для достижения необходимых характеристик связи в сетях 5G и 6G.

Исследование [50] анализирует совместимость когнитивной широкополосной спутниковой системы и сетей mmWave. Авторы выявляют, что эффективная коэкзистенция этих систем может значительно улучшить производительность и расширить охват сети. Это исследование важно для понимания того, как различные технологии могут сосуществовать и работать вместе в условиях высокой плотности подключений, что является ключевым аспектом для будущих мобильных сетей.

В статье [51] обсуждаются высокопроизводительные и ультраширокополосные метаматериалы, основанные на смешанных механизмах поглощения. Авторы подчеркивают, что такие технологии могут быть использованы для создания более эффективных антенн и устройств, что является важным аспектом для оптимизации работы сетей 5G и 6G в условиях плотной городской застройки.

Работа [52] проводит анализ производительности мобильных широкополосных сетей с учетом тенденций 5G в урбанистических районах Малайзии. Авторы акцентируют внимание на том, что внедрение 5G существенно изменяет динамику трафика и качество обслуживания. Исследование подтверждает, что успешное развертывание 5G требует адаптации существующих сетей к новым условиям эксплуатации, включая плотность подключений и требования к производительности.

В статье [53] рассматриваются ключевые технологии, необходимые для достижения ультранизкой задержки и высокой подключенности в сетях 5G и 6G. Авторы акцентируют внимание на таких решениях, как массивные антенны (Massive MIMO), технологии обработки сигналов и распределенные вычисления. Эти технологии способствуют улучшению производительности сетей при высокой плотности подключений, что особенно актуально для приложений, требующих быстрого отклика, таких как автономные транспортные средства и виртуальная реальность.

Статья [54] фокусируется на проблемах, связанных с высокой плотностью подключений в сетях 5G. Авторы выделяют несколько критических аспектов, включая управление спектром и методы распределения ресурсов. Они подчеркивают необходимость внедрения новых архитектур, таких как сети с малой ячейкой (small cell networks) и технологии координации, для улучшения качества обслуживания в условиях высокой плотности пользователей.

Вместе эти исследования подчеркивают важность комплексного подхода к решению проблем высокой плотности подключений и необходимости разработки инновационных технологий. Эффективное использование массивных антенн и распределенных вычислений, наряду с новыми архитектурными решениями, может значительно повысить производительность сетей 5G и 6G, обеспечивая необходимую надежность и скорость обслуживания.

В статье [55] представлено устройство для генерации вихревых лучей с широким спектром частот. Авторы акцентируют внимание на использовании метаповерхностей Панчарана-Берри, которые позволяют эффективно управлять характеристиками луча и увеличивают его производительность. Эта технология может быть критически важной для повышения качества передачи данных в сетях 5G и 6G, особенно в условиях высокой плотности подключений.

Инновации, предложенные в данной работе, подчеркивают возможность применения вихревых лучей для улучшения спектральной эффективности и повышения надежности связи. Устройство демонстрирует высокую производительность в условиях различных частотных диапазонов, что позволяет ему адаптироваться к требованиям современных сетей.

В статье [56] авторами рассматриваются ключевые проблемы и решения в области управления мобильностью в сетях 5G. Авторы выделяют основные вызовы, такие как увеличение плотности пользователей, управление перемещениями устройств и требования к низкой задержке. Эти факторы существенно влияют на качество связи и надежность сети. Статья акцентирует внимание на различных методах управления мобильностью, включая использование малых ячеек и технологии координации, которые могут уменьшить задержки и повысить качество обслуживания. Авторы также исследуют адаптивные алгоритмы и автоматизированные системы, которые могут улучшить производительность сети в условиях высокой динамики и плотного трафика.

В статье [57] исследуется покрытие сигнала мобильных телекоммуникационных сетей в помещениях в малазийских штатах Селангор и Джохор. Авторы акцентируют внимание на значении indoor-сигнала для качества обслуживания и удовлетворенности пользователей.

Исследование включает анализ сигналов в различных условиях и типах зданий, выявляя области с недостаточным покрытием. Результаты показывают, что физические преграды и плотная городская застройка



значительно влияют на уровень сигнала, что подчеркивает необходимость разработки эффективных решений для улучшения indoor-пок

В статье [58] представляется алгоритм автоподстройки для управления мобильностью в гетерогенных сетях (HetNets) LTE и 5G. Авторы обсуждают важность оптимизации управления мобильностью для повышения качества обслуживания и уменьшения задержек в сетях с высокой плотностью пользователей.

Алгоритм, предложенный в исследовании, настраивается в реальном времени, что позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям сети и пользовательскому поведению. Результаты экспериментов показывают, что использование данного алгоритма приводит к улучшению производительности сети, снижению потерь сигнала и более эффективному распределению ресурсов.

В статье [59] исследуется прогнозирование транспортного потока при наличии пропущенной информации в наборе данных. Авторы применяют три различных метода для моделирования структуры отсутствующих данных и используют два подхода для их восстановления. На основе полученных данных разрабатывается модель прогнозирования с использованием методов глубокого обучения. Эксперименты подтверждают, что методы иммутации на основе глубокого обучения значительно повышают точность предсказаний потоков. Авторы обсуждают подходящие методы прогнозирования в условиях различной степени потерь данных, что предоставляет ценные рекомендации для практического применения.

В статье [60] рассматривается актуальная проблема урбанистического роста, которая привлекает внимание исследователей в области городского планирования. Авторы критикуют существующие методы, которые учитывают только социальные и демографические данные, игнорируя физические условия, такие как границы застройки и защитные зоны, что затрудняет моделирование и прогнозирование городской экспансии.

Для решения этой проблемы используется Географическая Информационная Система (GIS) для анализа временных рядов спутниковых изображений с 1984 по 2018 годы. На основе полученных данных применяется модифицированная методология клеточных автоматов SLEUTH для прогнозирования городского разрастания в Праге, столице Кабо-Верде, до 2050 года.

Результаты показывают, что коэффициенты, связанные с ростом и дорожной инфраструктурой, существенно влияют на городское развитие, предполагая появление новых поселений и застройки вдоль дорог. Этот подход предоставляет важные данные для планировщиков и политиков, помогая им принимать более обоснованные решения в сфере управления городским развитием.

В статье [61] авторы исследуют влияние дождевых осадков на распространение миллиметровых волн (mm-wave) на частоте 26 ГГц в сетях 5G в условиях тропического климата. Авторы анализировали данные, собранные за год, с использованием высокой частоты измерений, и выявили существенные отклонения от модели ITU, особенно в период "худшего месяца". Для более точного прогнозирования потерь сигнала предложены улучшенные эмпирические параметры, адаптированные к тропическим условиям.

Результаты исследования демонстрируют необходимость разработки локализованных моделей для точного учета влияния дождей на сети 5G, особенно в регионах с тропическим климатом, таких как Малайзия. Применение более точных эмпирических данных позволяет оптимизировать проектирование радиосетей и поддерживать надежность сети в условиях интенсивных осадков.

Статья [62] посвящена разработке и анализу моделей потерь на трассе и пропускной способности для систем с ультраширокополосной (UWB) и множественной входной и выходной антенной системой (MIMO) в условиях открытых пространств.

UWB и MIMO технологии играют ключевую роль в обеспечении высокоскоростной передачи данных в беспроводных сетях следующего поколения. UWB позволяет достигать высоких скоростей передачи данных за счет использования широкого диапазона частот, а MIMO системы увеличивают производительность за счет использования множественных антенн для передачи и приема сигналов. Однако точные модели потерь на трассе и емкости канала для таких систем в условиях открытой местности требуют дополнительных исследований, чтобы обеспечить стабильную связь на больших расстояниях и при различных условиях распространения сигналов.

В статье исследуются потери сигнала и производительность канала в системах UWB-MIMO на открытом воздухе. Представленные результаты показывают, что предложенная модель дает более точные оценки для расчета потерь на трассе по сравнению с традиционными моделями. Кроме того, анализ пропускной способности демонстрирует улучшенные показатели производительности в условиях многолучевого распространения. Это важно для внедрения UWB-MIMO технологий в реальные условия, где точное предсказание потерь и оценка емкости канала могут существенно повысить надежность связи.

Статья [63] рассматривает новый механизм стимулирования для выгрузки данных в WiFi сети с использованием обратного аукциона и ограничения задержек. В условиях перегруженных мобильных сетей выгрузка трафика через WiFi становится важным инструментом для повышения эффективности работы сетей 5G.

WiFi-выгрузка помогает распределить трафик с мобильных сетей на WiFi, снижая нагрузку на базовые станции и улучшая качество обслуживания. Однако основная проблема заключается в мотивации пользователей передавать свои данные через альтернативные каналы связи, такие как WiFi. Статья представляет новый подход, использующий механизм обратного

аукциона для поощрения пользователей к использованию WiFi при минимизации задержек и повышении качества обслуживания.

Предложенный механизм, DRAIM, представляет собой инновационную схему, в которой операторы сетей предлагают пользователям стимулирующие предложения через обратный аукцион, чтобы они добровольно выгружали свои данные через WiFi. При этом механизм учитывает временные ограничения, чтобы избежать задержек в передаче данных, что особенно важно для сервисов с жесткими требованиями к времени отклика. Эксперименты показали, что DRAIM эффективно снижает нагрузку на мобильные сети и минимизирует задержки, улучшая общую производительность сетей.

Статья [64] рассматривает параметры качества сигнала в сетях LTE и 5G, которые являются критически важными для оценки производительности связи. Основные параметры, такие как SINR (соотношение сигнал/шум и интерференция), RSRP (уровень принимаемого сигнала) и RSRQ (качество принимаемого сигнала), используются для определения покрытия и надежности сети.

Качество сигнала играет ключевую роль в обеспечении высокой производительности и надежности мобильных сетей. В сетях LTE и 5G параметры, такие как SINR, RSRP и RSRQ, позволяют операторам связи оценивать текущие условия работы сети и оптимизировать её производительность. SINR помогает определить отношение полезного сигнала к уровню шума и помех, RSRP указывает на уровень сигнала от базовой станции, а RSRQ – на качество принимаемого сигнала.

Статья показывает, что использование этих параметров позволяет оценивать текущие условия сети и принимать необходимые меры для улучшения покрытия и производительности, особенно в условиях высокой плотности подключений. В сетях 5G внедрение новых технологий, таких как beamforming и massive MIMO, позволило значительно улучшить показатели качества сигнала, что позволяет поддерживать связь на высоком уровне даже

в сложных условиях, таких как плотная городская застройка и высокая концентрация пользователей.

#### 1.4. Роль искусственного интеллекта и больших данных в решении задач сетей 5G и 6G

Быстрое развитие технологий беспроводной связи привело к развитию сетей 5G и концептуализации 6G. Эти сети нацелены на обеспечение сверхбыстрой скорости передачи данных, малой задержки, массового подключения и повышенной надежности. Однако достижение этих целей сопряжено со значительными проблемами, включая дефицит спектра, перегрузку сети, потребление энергии, угрозы безопасности и необходимость сверхнадежной связи с малой задержкой. Искусственный интеллект (ИИ) и аналитика больших данных стали критически важными технологиями для решения этих проблем и оптимизации производительности сети.

Одной из основных проблем в сетях 5G и будущих сетях 6G является эффективное управление спектром. Растущее число подключенных устройств и приложений с высокой пропускной способностью создает дефицит спектра, требующий интеллектуального распределения спектра. Методы на основе ИИ, такие как обучение с подкреплением и когнитивное радио, обеспечивают динамический доступ к спектру, анализируя использование спектра в реальном времени и прогнозируя оптимальные стратегии распределения. Модели машинного обучения (МО) помогают обнаруживать недоиспользуемые частоты и динамически распределять ресурсы, обеспечивая эффективное использование доступной полосы пропускания [65].

Перегрузка сети и оптимизация трафика также являются насущными проблемами в сетях следующего поколения. Развертывание сверхплотных сетей, характеризующихся высокой плотностью малых ячеек и массовым подключением устройств, требует интеллектуальных решений по управлению трафиком. Модели прогнозирования трафика на основе ИИ анализируют исторические данные и сетевые условия в реальном времени для оптимизации

маршрутизации и предотвращения перегрузки. Алгоритмы глубокого обучения могут обнаруживать аномалии трафика и динамически корректировать конфигурации сети для балансировки распределения нагрузки, улучшая общее качество обслуживания (QoS) и пользовательский опыт.

Энергоэффективность является еще одним важным аспектом сетей 5G и 6G. Экспоненциальный рост потребления данных и расширение сети приводит к увеличению потребления энергии, что вызывает опасения по поводу устойчивости. Методы управления энергопотреблением на основе ИИ позволяют использовать интеллектуальное распределение мощности и режимы сна сети, снижая потребление энергии без ущерба для производительности. Нейронные сети и алгоритмы обучения с подкреплением прогнозируют модели использования сети, позволяя динамически переключать элементы сети между активным и неактивным состояниями. Кроме того, предиктивное обслуживание на основе ИИ обеспечивает упреждающее выявление неисправных сетевых компонентов, сводя к минимуму время простоя и эксплуатационные расходы [66].

Проблемы безопасности и конфиденциальности в современных беспроводных сетях обостряются из-за распространения подключенных устройств и сложных киберугроз. Традиционные механизмы безопасности с трудом поспевают за развивающимися векторами атак. ИИ повышает безопасность сети, обеспечивая обнаружение аномалий и предотвращение вторжений в реальном времени. Системы обнаружения вторжений (IDS) на основе машинного обучения анализируют поведение сети и обнаруживают вредоносные действия, в то время как методы шифрования на основе ИИ усиливают конфиденциальность данных. Механизмы аутентификации на основе ИИ, такие как биометрическое распознавание и поведенческий анализ, улучшают проверку личности и снижают риски несанкционированного доступа.

Машинное обучение и искусственный интеллект – два очень мощных инструмента, которые появляются как решения для управления большими объемами данных, особенно для прогнозирования и предоставления предложений на основе наборов данных. Однако, несмотря на некоторые параллели, они очень часто используются взаимозаменяемо. Машинное обучение иногда рассматривается как подпространство искусственного интеллекта, основанное на концепции, что мы можем позволить машинам учиться самостоятельно, предоставляя им доступ к большим объемам данных. С другой стороны, искусственный интеллект – это расширенное и более широкое восприятие машин, которые становятся способными выполнять задачи разумным образом [67].

По сравнению с обобщенным искусственным интеллектом (обобщенная система искусственного интеллекта, в теории, может справиться с любой задачей), прикладной искусственный интеллект больше подходит для систем связи следующего поколения, поскольку прикладная система искусственного интеллекта может быть разработана для искусного управления и оптимизации беспроводных сетей. В отличие от моделей машинного обучения, модели искусственного интеллекта охватывают мир, приспосабливаются к изменениям и перестраиваются. В то время как машинное обучение отлично подходит для предиктивной аналитики [68], искусственный интеллект выходит за рамки прогнозирования и предписывает планы/предложения с последствиями для реализации выгоды. Управление беспроводными сетями, которые растут в размерах и сложности, становится очень сложным, поскольку необходимо интегрировать новые элементы и технологии, чтобы извлечь выгоду из технологических достижений. Объем данных, которые производят такие большие и сложные сети, слишком велик и слишком сложен. Машинное обучение и искусственный интеллект полезны для аналитики, поскольку они могут извлекать ценную информацию из необработанных данных и генерировать пронизательные советы и прогнозы.

Ожидается, что МО и ИИ будут играть главную роль в разработке и эволюции аналитики, но аналитика не сведется к ним. МО в значительной степени разработано на основе ИИ, поэтому эти два направления пересекаются. МО имеет инструменты для извлечения релевантной информации, предложений и прогнозов из наборов данных, которые слишком велики и слишком сложны. В то время как ИИ имеет более широкую область применения: для копирования человеческого интеллекта или некоторых его аспектов и других когнитивных функций. Кроме того, для неповторяющихся событий нет исторических данных, на которые можно было бы положиться, поэтому реальное поведение сети будет отличаться от прогнозов [69]. Машинное обучение и искусственный интеллект становятся потенциальными помощниками операторов мобильной связи в решении новых задач, в которых отсутствуют исторические данные или которые слишком сложны для понимания с помощью традиционных подходов. Инструменты машинного обучения и искусственного интеллекта могут сопоставлять несколько источников данных и находить то, что имеет значение. Они также могут выявлять взаимосвязи и зависимости, которые ранее не были идентифицированы, поскольку их автоматизированные механизмы обладают способностью более интенсивно и методично анатомировать и проверять данные. Хотя человеческий опыт полезен для сосредоточения внимания на разработке решений и управлении сложными проблемами, он имеет ограниченные возможности в поиске новых решений и идей. Будущее беспроводных сетей, несомненно, будет зависеть от искусственного интеллекта. В [70] авторы представили краткий обзор ряда проблем и вопросов беспроводной связи, которые можно эффективно решить с помощью искусственного интеллекта, а также привели подробные примеры сценариев использования.

Сверхнадежная связь с низкой задержкой жизненно важна для критически важных приложений, таких как автономные транспортные средства, удаленная хирургия и промышленная автоматизация. Достижение



низкой задержки и высокой надежности требует интеллектуального управления сетью. Системы предиктивного обслуживания на базе ИИ предвидят потенциальные сбои и инициируют упреждающие меры для предотвращения сбоев в обслуживании. Периферийный ИИ, который обрабатывает данные ближе к источнику, сокращает задержку, обеспечивая принятие решений в реальном времени на периферии сети. Федеративное обучение, децентрализованный подход на основе ИИ, позволяет нескольким периферийным устройствам совместно улучшать модели без обмена конфиденциальными данными, обеспечивая конфиденциальность и безопасность данных.

Аналитика больших данных играет ключевую роль в повышении производительности сети и принятии решений. Огромный объем данных, генерируемых сетями 5G и 6G, требует передовых методов обработки для осмысленной информации. Аналитика больших данных в реальном времени обеспечивает эффективное управление сетью, определяя шаблоны использования, прогнозируя потребности в трафике и оптимизируя распределение ресурсов. Анализ данных на основе ИИ улучшает качество обслуживания, определяя предпочтения пользователей и соответствующим образом адаптируя конфигурации сети. Персонализированная доставка услуг на основе больших данных улучшает пользовательский опыт и эффективность сети [71].

Прогностическая аналитика на основе больших данных обеспечивает проактивное управление сетью. Анализируя исторические и реальные данные, модели ИИ прогнозируют спрос на сеть, предвидят потенциальные сбои и рекомендуют превентивные меры. Модели больших данных на основе ИИ повышают устойчивость сети, выявляя уязвимости и снижая риски до того, как они повлияют на производительность сети. Кроме того, аналитика больших данных помогает в соблюдении нормативных требований, отслеживая сетевую активность и обеспечивая соблюдение отраслевых стандартов и протоколов безопасности.

По мере того, как отрасль движется к 6G, ожидается, что ИИ и большие данные будут играть еще более значимую роль в формировании будущего беспроводной связи. Конвергенция ИИ, больших данных и 6G позволит создавать интеллектуальные, самооптимизирующиеся сети, способные автономно управлять ресурсами и адаптироваться к динамическим условиям. Однако для обеспечения ответственного развертывания ИИ необходимо решать такие проблемы, как этические соображения, конфиденциальность данных и вычислительная сложность. Научно-исследовательские усилия должны быть сосредоточены на разработке объяснимых моделей ИИ, энергоэффективных алгоритмов ИИ и методов сохранения конфиденциальности для максимизации преимуществ ИИ и больших данных в сетях следующего поколения.

Основываясь на технологиях, реализованных в предыдущих системах мобильной связи, сеть 6G будет в основном построена в соответствии с архитектурой 5G, используя преимущества, достигнутые в 5G [72]. Система 6G будет включать в себя различные технологии, некоторые из которых будут улучшенными версиями архитектуры 5G, а другие будут полностью инновационными. ТГц-связь [73] и связь в видимом свете являются важными методами для улучшения пропускной способности системы 6G, свободного дуплексирования и совместного использования спектра. Безопасность и эффективность стандартного совместного использования спектра могут быть улучшены с помощью блокчейна [74]. Эффективность использования спектра также может быть улучшена с помощью MIMO и OAM, в которых многочисленные параллельные потоки данных мультиплексируются на аналогичном частотном канале. Эффективность вычислений, которая обеспечивает надежную безопасность для 6G, может поддерживаться квантовой связью и квантовым машинным обучением [75].

Несколько исследователей и отраслей уже начали работать над следующим поколением сетей, обсуждая технологии, которые сделают возможным 6G после развертывания 5G. Искусственный интеллект,

технологический тренд сегодняшнего дня, предоставляет несколько полезных функций для разработки 6G. ИИ будет играть ключевую роль в продвижении структуры сети 6G благодаря интеллектуальному использованию, предлагаемому приложениями и функциями 6G для многих областей, таких как архитектура, вычисления, хранение. Методы интеллектуального анализа с использованием ИИ могут быть реализованы в сети 6G.

Одним из методов будет описательный анализ, который может использоваться для лучшего доступа к истории данных и сетевым операциям. Предиктивная аналитика обеспечивает будущие прогнозы с использованием собранных данных и диагностической аналитики, которые жизненно важны для повышения безопасности сети и обеспечения автономного обнаружения. Предиктивная аналитика применяет эти прогнозы для предоставления нескольких атрибуций [76]. ИИ также обеспечивает оптимизацию замкнутого цикла для беспроводных сетей 6G. В этой технике пользователь действует в соответствии с обратной связью устройства. Поддерживая сквозную коллективную оптимизацию на системном уровне, ИИ может быть дополнительно реализован для оптимизации систем беспроводной связи. Этот интеллектуальный уровень предлагает многочисленные возможности, такие как самооптимизация, самообучение и сбор данных [77]. Кратко описанные здесь примеры – лишь малая часть широко распространенных приложений технологий ИИ и инноваций, которые они привнесут в структуру сети 6G.

Машинное обучение (МО) – одна из важнейших технологий, когда речь идет о самообучении и принятии решений. Эта технология на основе ИИ представляет собой вычислительную систему, которая разрабатывает математические модели, распознавая поведение и свойства системы, позволяя машинам обучаться без программирования. Алгоритмы МО нуждаются в данных, собранных из множества различных источников. Они используют собранные данные для оптимизации алгоритмов слоев, таких как физический уровень и более высокие уровни [78]. Беспроводные каналы связи иногда могут приводить к проблемам безопасности. МО позволит устройству учиться

повышать конфиденциальность и безопасность данных, обучаясь на своих функциях принятия решений и прогнозирования. Основанное на методе искусственной нейронной сети, глубокое обучение – это приложение, которое может быстро решать вычислительные задачи, достигая ресурсов, содержащих большие объемы информации. Это сильная техника для физического уровня 6G из-за его быстрых итеративных операций. Она может решать проблемы максимизации, сокращать вычислительную задержку, повышать энергоэффективность и ряд других функций [79]. Технология МО в сочетании с ИИ станет ключом на пути к технологии 6G. Вероятностные методы МО и байесовского вывода предоставят теоретическую основу с богатыми данными приложениями 6G для моделирования многомерных и сложных реальных прогнозов. Использование МО для проектирования самоосознающих и самоадаптирующихся сетей связи имеет существенное значение для структуры сети 6G, выступая в качестве гибкого и динамического уровня безопасности [80]. МО также позволит автоматизировать управление для динамических мобильных сетей, что повысит энергопотребление, работу, конфигурацию сети и производительность сети.

ИИ и большие данные незаменимы для преодоления сложностей сетей 5G и 6G. От управления спектром и оптимизации трафика до повышения безопасности и предиктивной аналитики, эти технологии повышают эффективность, надежность и устойчивость современной беспроводной связи. Продолжающееся развитие ИИ и аналитики больших данных будет играть важную роль в формировании будущего интеллектуальных и устойчивых сетевых архитектур, прокладывая путь для бесперебойного и безопасного подключения в цифровую эпоху.

### 1.5 Анализ мирового опыта измерения и оценки производительности мобильных широкополосных сетей

Мобильные широкополосные сети являются одной из ключевых задач в сетях 5G в связи с постоянно возрастающим спросом на объемы передачи данных. Сети 5G способны обеспечить значительно более высокую скорость передачи данных и стабильное соединение, что отвечает требованиям современных пользователей и способствует развитию новых цифровых сервисов и технологий [81].

На сегодняшний момент в Казахстане только два оператора связи Кселл и Теле2 предоставляют услуги связи посредством 5G технологии. Относительно дальнейшего развития технологии 5G операторы Кселл и Теле2 продолжают работы по расширению покрытия связью 5G в городах Астана, Алматы, Шымкент и областных центрах. На сегодня установлено 1 144 базовых станций в 20 городах.

Согласно информации от оператора связи Кселл технология 5G предоставляют высокоскоростной интернет, достигающий 1600 Мбит/с, обеспечивая пользователям возможность мгновенной загрузки фильмов и потокового воспроизведения видео в формате 8K, что существенно улучшает качество потребления мультимедийного контента.

В свою очередь, зона покрытия по городу Астана предоставления 5G оператора связи Tele2 представлено на рисунке 7.

Также, зона покрытия по городу Алматы предоставления 5G оператора связи Tele2 представлено на рисунке 8.

Стоит отметить, что в целях привлечения клиентов многие мобильные операторы связи не отображают теоретические или заявленные скорости, описанные в стандартах 3GPP [82]. В связи с этим, необходимо проводить независимое исследования в части оценки QoS и QoE показателей существующих услуг по 5G операторов мобильной связи.

Например, в статье [83] авторы исследуют влияние скорости широкополосного интернета на уровень безработицы в округе Теннесси, США, с 2011 по 2016 годы. В ней подчеркивается, что доступ к высокоскоростным и ультра высокоскоростным сетям положительно влияет

на занятость, особенно в сельских районах. Авторы используют данные Национальной карты широкополосного доступа и Федеральной комиссии по связи США, чтобы оценить эффект раннего внедрения скоростного интернета и определить его роль в экономическом развитии регионов, акцентируя внимание на важности доступа к современным технологиям для снижения безработицы.

Исследование в статье [84] посвящена анализу производительности мобильных широкополосных сетей в Малайзии, Сингапуре и Таиланде. В исследовании оценивается качество сети 3G и 4G по таким показателям, как покрытие, скорость загрузки, задержка и удовлетворенность пользователей. Результаты показывают, что сети 4G демонстрируют значительно лучшие показатели, чем сети 3G, особенно в плотных городских районах. Исследование акцентирует внимание на необходимости улучшения МВВ-сервисов для успешного внедрения 5G и повышения удовлетворенности пользователей.

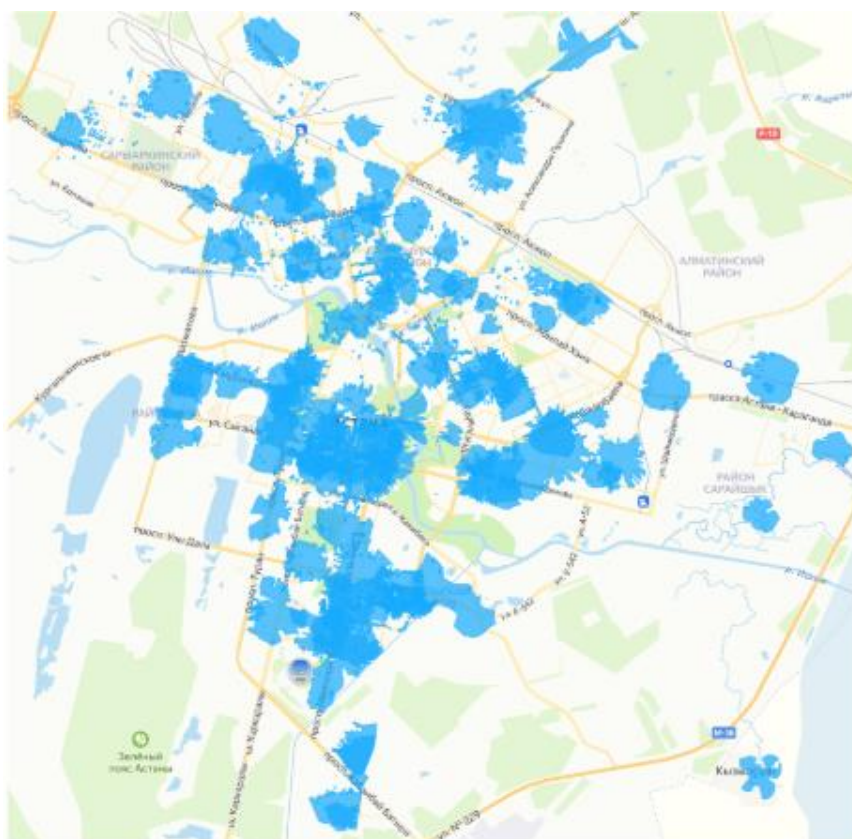


Рисунок 7 – Зона покрытия Tele2 по городу Астана

В исследовании [85], проведенном в Омане, был представлен анализ мобильных широкополосных сетей (MBB) двух национальных операторов связи. Оценка проводилась на основе драйв-тестов в четырех городских и пригородных зонах, где анализировались такие показатели, как пропускная способность, число хэндоверов, скорость пинга, уровень сигнала и качество (RSRP, RSRQ и CQI). Результаты показали, что сеть 4G доминировала на большинстве тестируемых территорий, обеспечивая более стабильное покрытие и высокую скорость передачи данных по сравнению с сетью 3G, особенно в условиях плотной городской застройки.

Рисунок 8 – Зона покрытия Tele2 по городу Алматы

Исследование [86] показывает, что внедрение 5G играет ключевую роль в улучшении качества мобильной связи благодаря использованию миллиметровых волн, которые обеспечивают высокие скорости передачи данных и минимальные задержки. Однако такие частоты подвержены большим потерям на трассе, что требует поддержки небольших ячеек и плотного расположения базовых станций. Эти особенности делают 5G идеальной технологией для повышения эффективности сетей в условиях высокой плотности пользователей и создания новых цифровых услуг, таких как автономные транспортные средства и интеллектуальные города.

В работе [87] проводится оценка производительности сетей 3G и 4G в городских районах Малайзии и их подготовке к внедрению 5G. В качестве метрик для анализа производительности базовых станции мобильных операторов связи рассмотрены:

- Скорость загрузки контента;
- Зона покрытия;
- Удовлетворенность пользователей.

Авторы исследования [88] анализируют сети 3G и 4G в сельских районах Малайзии с целью оптимизации и улучшения MBW-сервисов для внедрения 5G. В качестве метрик для анализа производительности базовых станции мобильных операторов связи рассмотрены:

- Задержка;
- Зона покрытия;
- Скорость загрузки контента

Ввиду географических особенностей авторы выбрали данные метрики, которые являются основными в условиях ограниченной инфраструктуры. Данное исследование показывает наглядно важность планирования и внедрения 5G в сельских регионах и необходимость адаптации сети к географическим особенностям.

Стоит отметить, что исследования в статьях [87] и [88] направлены на повышения эффективности распределения MBW-сетей в различных регионах



Малайзии. В статье [87] акцент делается на развитии городских сетей с учетом высокой плотности пользователей, в то время как статья [88] подчеркивает необходимость улучшения покрытия и качества в сельской местности, где инфраструктура более ограничена.

В статье [89] проводится оценка производительности мобильных широкополосных сетей (MBB) в Малайзии на основе силы принимаемого сигнала (CSS). Исследование охватывает тестирование сетей 3G и 4G трех национальных операторов связи в помещениях в районах Кланг Вэлли, Селангор и Джохор-Бару. Тесты проводились в реальных условиях с использованием смартфонов Galaxy S6, что позволило оценить качество услуг веб-серфинга и потокового видео на различных разрешениях. Результаты анализа дают представление о покрытии и производительности мобильных сетей и могут помочь в улучшении качества услуг для пользователей. Стоит отметить, что данное исследование был проведен в 2016 году. В связи с этим использовался старая модель смартфонов.

Статья [90] оценивает производительность мобильных сетей пяти операторов связи в Малайзии в условиях умного города с развитой технологической инфраструктурой. Проведено тестирование текущих сетей 4G по метрикам, таким как RSRP, RSRQ, SNR, пропускная способность (скорость загрузки и выгрузки), задержка и хэндоверы. Исследование показывает, что для всех операторов требуются улучшения в показателях SNR и пропускной способности для повышения качества связи и подготовки к внедрению 5G. В статье также рассматриваются возможности использования аналогичных методологий и инструментов для анализа сетей 5G, что поможет операторам улучшить работу своих сетей и обеспечить высокоскоростную передачу данных с низкой задержкой.

На первом этапе для проведения драйв теста необходимо разработка мобильного приложения для сетей 5G/6G, которое будет служить платформой для сбора и анализа трафика мобильных данных в режиме реального времени. Приложение позволит проводить исследования процессов управления

мобильностью (MRO), балансировки нагрузки (LBO) и передачи сеансов связи (HOD) в сетях нового поколения. Кроме того, проект направлен на поддержку развития инфраструктуры 5G и 6G, а также на изучение технических требований и вызовов, связанных с развертыванием будущих сотовых сетей в умных городах Казахстана. На основе проведенного литературного обзора для проведения реальных измерений на основе теста драйва предлагается 2 вида сценария тестирования показанный на рисунке 9.

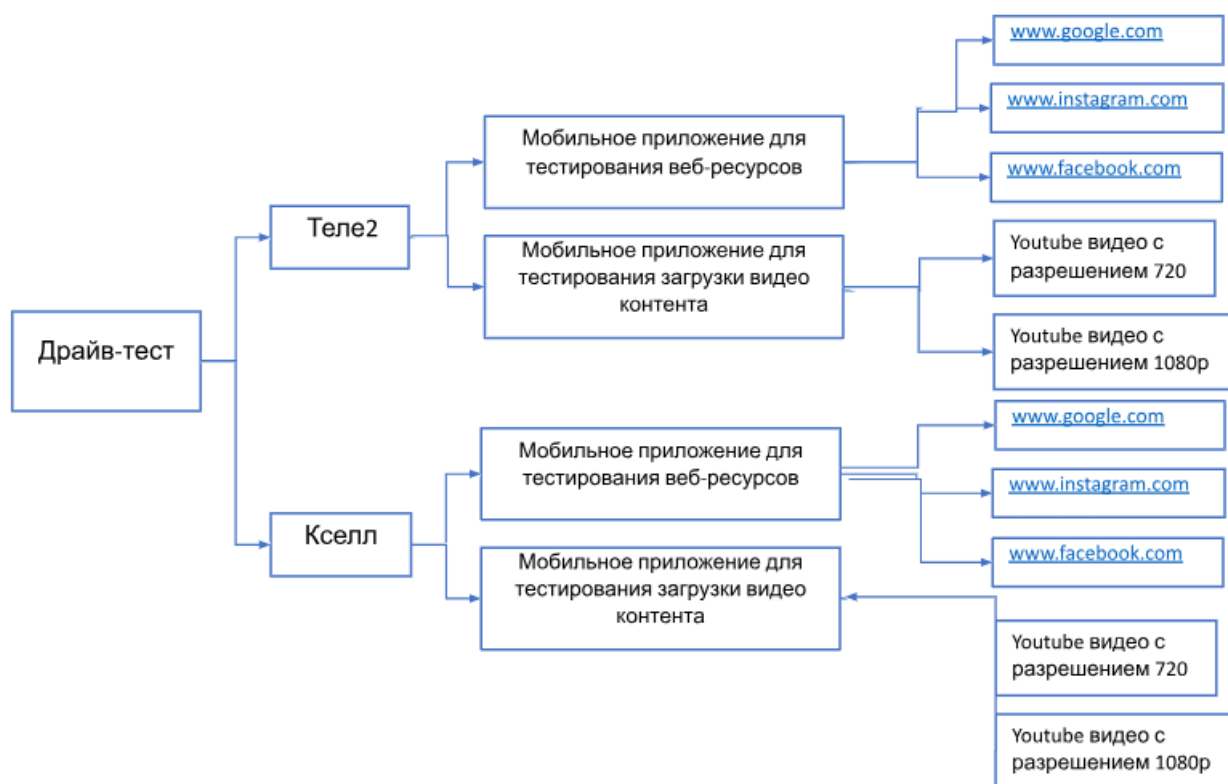


Рисунок 9 – Сценарий драйв теста посредством мобильного приложения

В результате литературного обзора выявлены следующие метрики для проведения измерений веб браузеринга:

- 1) Уровень сигнала сотовой связи (дБм)
- 2) Общее количество попыток обслуживания (количество) и средний коэффициент успешности отображения страниц
- 3) Средняя пропускная способность загрузки страниц (кбит/с)

- 4) Средняя задержка ответа страницы (мс)
- 5) Средняя задержка отображения страницы (мс)
- 6) Средняя задержка RTT пинга (мс)

Для потокового видео:

- 1) Уровень сигнала сотовой связи (дБм)
- 2) Общее количество попыток обслуживания (количество) и средний коэффициент успешности начальной буферизации
- 3) Средний показатель Mobile vMOS (шкала от 1 до 5; худшее = 1; лучшее = 5)
- 4) Средняя общая скорость загрузки видео (кбит/с)
- 5) Средняя начальная задержка буферизации (воспринимаемая пользователем задержка) (мс)
- 6) Средняя задержка RTT пинга (мс)
- 7) Средняя общая задержка повторной буферизации (мс)

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ

### 2.1. Принципы обеспечения надежности телекоммуникационных сетей

Телекоммуникационные сети служат основой современной коммуникации, позволяя обмениваться информацией на больших расстояниях с высокой скоростью и эффективностью. Обеспечение их надежности имеет решающее значение для бесперебойной работы, особенно в критически важных приложениях, таких как аварийные службы, финансовые транзакции и промышленная автоматизация. В этой главе рассматриваются фундаментальные принципы, определяющие надежность телекоммуникационных сетей, включая отказоустойчивость, избыточность, устойчивость и качество обслуживания (QoS).

В ходе эволюции подходов к инженерному проектированию первоначальной заботой было то, будет ли конкретная система работать в рамках набора спецификаций; мало внимания уделялось тому, как долго система будет работать в рамках этих спецификаций.

Подобные потребности возникали по мере того, как простые компьютерные программы превращались в сложное программное обеспечение, что приводило к требованию отказоустойчивого проектирования. Не потребовалось много времени, чтобы понять, что хотя эти две концепции возникли в отдельных областях, а именно, в инженерии и компьютерных науках, соответственно, их конечные цели были схожи, то есть обеспечение производительности системы, оборудования в первом случае, программного обеспечения во втором, в течение некоторых определенных интервалов времени. Это осознание привело к разработке концепции надежности как всеобъемлющей концепции, включающей надежность и отказоустойчивость [91-96].

Поскольку компьютеры в сочетании с коммуникациями образовывали глобальные информационные сети, информационная безопасность и живучесть сети также были введены в качестве важных целей проектирования. Кроме того, для характеристики производительности сложных систем также используются многие другие концепции, такие как надежность, высокая уверенность или высокая достоверность, сверхнадежность и устойчивость. В [93] делается замечание, без какого-либо подробного анализа, что надежность, высокая достоверность, живучесть и надежность – все «по сути эквивалентны по своим целям и направлены на решение схожих угроз».

Эти термины вошли в употребление через разные дисциплины и в разное время. Например, надежность имеет долгую историю использования в статистике и управлении процессами, живучесть была введена как характеристика производительности для военных сетей связи, а безопасность долгое время ассоциировалась с правоохранительными органами и военными операциями. Последние два примера иллюстрируют спецификацию показателей производительности с дискретными физическими сущностями, в то время как первый связывает производительность с измерениями. Поскольку информационные сети стали более сложными, включающими аппаратное обеспечение, программное обеспечение и людей, и заняли видную роль, стало неизбежно, что требования к производительности для услуг, предоставляемых всей системой, должны быть установлены.

Концепции измерения производительности развивались вместе с технологией. Например, надежность электронных устройств привела к надежности схем и, в конечном итоге, к надежности всей операции запуска или, в другом приложении, всей атомной электростанции. Другие концепции были «заимствованы» из одной технологии и использованы в другой. Живучесть началась как характеристика производительности физических сетей связи и была принята для характеристики производительности информационных инфраструктур [97-102].

Еще одна концепция, которая развивалась вместе с технологией, – это качество обслуживания (QoS), которое определяется в ITU-T Rec.X.902 как «набор требований к качеству коллективного поведения одного или нескольких объектов» [103]. На заре цифровой связи производительность канала выражалась в терминах частоты ошибок по битам, за которыми следовало качество обслуживания при описании производительности сетей с коммутацией пакетов [104-106]. С появлением Интернета и потоковой передачи данных концепция качества обслуживания также используется для характеристики производительности приложения [107]. Различные истоки и пути развития этих концепций в сочетании с лексикологическими сходствами поднимают вопрос о том, есть ли некоторая степень совпадения между различными терминами, и в какой степени, если таковые имеются, существуют избыточности при одновременном использовании этих концепций.

Этот вопрос приобретает дополнительную значимость из-за усилий по разработке надежности как интегрирующей концепции, которая охватывает такие атрибуты, как доступность, надежность, безопасность, целостность и ремонтпригодность. Хотя теоретически это весьма желательная цель, некоторые практические проблемы возникают в первую очередь из-за множественности точек зрения и определений.

Например, существует более одного определения надежности [92-94, 102, 103]. Концепции, которые используются в течение длительного времени и в разных дисциплинах, хорошо укоренились в своих соответствующих областях и рассматриваются как конечные цели, а не атрибуты какой-либо другой концепции. Одной из таких широко используемых концепций является надежность. Приложения варьируются от статистического анализа данных до описания производительности социальных систем. Если использовать определение IEEE для надежности «способность системы или компонента выполнять требуемые функции при указанных условиях в течение

определенного периода времени» [104], можно утверждать, что это такое же широкое понятие, как и надежность.

Термин «требуемые функции» достаточно широк, чтобы охватить, например, безопасность и защищенность, которые определяются как атрибуты надежности.

В то время как надежность может быть определена количественно, безопасность и защищенность являются примерами качественных атрибутов, для которых не существует объективного механизма оценки. Если эти атрибуты должны использоваться в качестве параметров проектирования, их необходимо количественно оценить.

Чтобы установить междисциплинарную точку отсчета, можно выделить три различные перспективы системного представления, а именно: уровень компонентов, инфраструктура и обслуживание.

1) Перспектива уровня компонентов: проектирование инженерных систем перешло от уровня компонентов к очень большим сложным системам. Независимо от сложности, проектирование систем включает планирование, которое включает, в частности, цели и спецификации проектирования, компромиссы, баланс между архитектурами и функциями, требования и функциональный анализ, анализ потока, физическое проектирование и интеграцию вместе с тестированием. Определяющей характеристикой перспективы уровня компонентов был контроль, осуществляемый проектировщиком над структурой и работой системы независимо от размера [105].

Эту точку отсчета можно увидеть в транзисторных схемах, программных пакетах, мейнфреймах, сетях связи и других ограниченных системах. Компьютерные системы были мейнфреймами или системами среднего уровня, которые были ограничены, а также централизованно контролировались и администрировались. Это развивалось от наличия в основном нескольких компонентов или устройств, а затем со временем развивалось до полной системы. Проектирование систем основано на

использовании количественных переменных, которые воплощают требования к производительности компонента. Таким образом, концепции, разработанные и используемые при описании таких систем, в основном являются количественными концепциями, такими как надежность и отказоустойчивость. Исторически надежность была одной из основных, а также старейшей концепцией, используемой при проектировании систем. Первоначально она возникла как следствие необходимости обеспечения того, чтобы компоненты выполняли свои функции в рамках указанных требований к производительности, которые включали время. Затем надежность компонентов перешла в общую надежность системы [106]. Появление космической программы можно рассматривать как определяющий момент, когда надежность устройств превратилась в полную надежность системы, связав отказы компонентов с отказом системы. В 1952 году фон Нейман в своей работе по вероятностной логике и проектированию надежных механизмов из ненадежных компонентов изложил основные принципы отказоустойчивости [107]. Впоследствии, в 1967 году Авизиенис интегрировал эти методы обнаружения, диагностики и восстановления в концепцию отказоустойчивых систем [108]. По мере того, как компьютерные системы становились все более сложными и использовались в различных критических приложениях, отказоустойчивость стала фундаментальной концепцией проектирования и отдельной областью изучения, хотя ее источником является концепция надежности.

Еще одна концепция, которая берет свое начало в перспективе уровня компонентов, – это живучесть. Одним из первоначальных применений этой концепции было проектирование военных сетей связи, которые могли бы надежно работать даже при разрушении некоторых узлов или каналов [109]. Концепция живучести последовала за эволюцией сетей связи в компьютерные сети и информационные инфраструктуры и стала применима к крупным сетевым системам [110]. Тем не менее, исходные основные принципы, которые применялись к сетям связи, остались неизменными.



Хотя и отказоустойчивость, и живучесть прослеживают свое происхождение от концепции надежности, они возникли как отдельные дисциплины. Тем не менее, их общее происхождение от надежности дает им некоторую степень совпадения. В других работах они не являются ни разрозненными, ни иерархическими. Перспективу уровня компонентов можно рассматривать как связанную в первую очередь с нижними уровнями эталонной модели OSI, т. е. сетевыми зависимыми уровнями. С другой стороны, надежность и безопасность были разработаны в соответствии с подходом сверху вниз [111]. В этом отношении можно рассматривать надежность и безопасность как связанные с верхними уровнями эталонной модели OSI. В подходе сверху вниз надежность и, в меньшей степени, живучесть рассматриваются как объединяющие концепции, которые включают надежность и отказоустойчивость [112].

2) Перспектива инфраструктуры: объединение компьютеров и коммуникаций для формирования компьютерных коммуникационных сетей превратилось в концепцию информационных систем, за которой последовала более широкая концепция информационной инфраструктуры.

В то время как информационные системы обычно подразумевают ограниченные сети с указанной топологией, местоположением и компонентами, информационная инфраструктура включает в себя набор информационных систем, которые могут быть связаны или разъединены. В отличие от формально запланированных систем, которые строятся с точки зрения уровня компонентов, информационные инфраструктуры, такие как Интернет, растут спонтанно и незапланированно. Поскольку информационные инфраструктуры революционизируют поведение человеческих взаимодействий, они также породили множество новых проблем, начиная от надежности услуг и заканчивая защитой конфиденциальности от угроз, исходящих от правительств и неправительственных субъектов. Эти угрозы присущи открытой природе

информационных инфраструктур, что делает их лучшее преимущество этих систем также их худшим недостатком [113].

Незапланированное развитие информационных инфраструктур не позволило систематически применять методологии проектирования инженерных систем. Частично это объясняется размером и сложностью инфраструктур. По мере того, как системы становились все более сложными и неограниченными, число переменных существенно увеличивалось, и использование количественных моделей, которые были разработаны с точки зрения уровня компонентов, стало непрактичным. В результате появились новые концепции сверху вниз, а предыдущие концепции снизу вверх были пересмотрены в попытке описать и проанализировать характеристики производительности сложных систем с точки зрения информационной инфраструктуры. Надежность является наиболее всеобъемлющей концепцией для моделирования сложных систем, использующих подход сверху вниз. Она развивается в отдельную дисциплину, пытающуюся включить в себя предыдущие концепции надежности и отказоустойчивости. Хотя не существует общепринятого определения надежности, этот термин был принят для использования в общем смысле как зонтичная концепция [114]. Разделительную линию можно проследить до перспектив, с которых определяется этот термин. Перспектива уровня компонентов приводит к определениям, содержащимся в стандартах ISO и CCITT, в то время как разработка надежности как объединяющей концепции следует подходу сверху вниз. Последнее развилось из соображений надежности, доступности и отказоустойчивости [115].

Перспектива информационной инфраструктуры также породила концепцию безопасности. Хотя это гораздо более старая концепция, ее применение к информационной инфраструктуре относительно ново и тесно связано с сетевыми системами.

Открытость информационной инфраструктуры и отсутствие полного проектирования системы, а также огромные объемы хранимой и передаваемой

информации стали причиной злонамеренных вторжений и попыток сбоев. Таким образом, безопасность стала важным фактором в работе информационной инфраструктуры.

В отличие от развития концепции надежности, безопасность развивалась несколько *ad hoc*, особенно в результате уроков, извлеченных из злонамеренных атак. Это привело к сбору теоретических и практических моделей, методов и инструментов как в аппаратном, так и в программном обеспечении [116-121].

К ним относятся качественные методы, кодифицированные как методы управления, физическая защита оборудования и защита данных с помощью программного обеспечения. Одной из пионерских групп в разработке безопасных информационных систем было Отделение компьютерной безопасности Национального института стандартов и технологий (NIST) [117].

Хотя надежность является объединяющей концепцией, безопасность имеет характеристики дополнения к надежности. Помимо того, что она разделяет ряд общих атрибутов, таких как доступность, конфиденциальность и целостность, безопасность также имеет уникальные атрибуты, такие как доступность, подотчетность, подлинность и неотказуемость [122]. Аналогично существуют связи между безопасностью и отказоустойчивостью [123].

После разработки надежности сверху вниз была введена концепция живучести в качестве основы для разработки требований и стратегий. Кроме того, было дано строгое определение живучести как способности системы соответствовать шести кортежам спецификаций живучести. При рассмотрении проектирования крупномасштабных систем необходимость в методах оценки на различных этапах проектирования привела к использованию методов, разработанных для надежности и отказоустойчивости. По сути, подход к выживаемости с точки зрения информационной инфраструктуры слился с подходом с точки зрения уровня компонентов. Хотя концепции надежности и выживаемости развивались

независимо, было обнаружено, что они имеют некоторые общие характеристики.

Аналогично, существует тесная связь между безопасностью и выживаемостью, рассматриваемыми с точки зрения уровня компонентов.

Из этого краткого обзора очевидно, что надежность, отказоустойчивость, надежность, безопасность и выживаемость связаны в результате их эволюции и имеют ряд пересекающихся характеристик. В этом отношении их можно рассматривать скорее как параллельные концепции, а не как некоторые из них, подчиненные другим. Они не являются ни разрозненными, ни идентичными, а находятся где-то посередине. Необходимо определить правильный набор характеристик для всех пяти концепций.

3) Перспектива услуг: хотя перспективы на уровне компонентов и инфраструктуры используют разные подходы, они обе решают проблемы производительности системы посредством анализа и проектирования. Однако перспектива инфраструктуры имеет другое измерение, а именно информационную инфраструктуру как поставщика услуг для пользователей этой инфраструктуры. Можно легко идентифицировать множество таких услуг, например, удаленный поиск в базе данных, бронирование билетов и т.д. Хотя пользователи ожидают некоторого разумного уровня производительности для таких услуг, требования можно классифицировать как в первую очередь качественные.

С появлением загрузки музыки и потокового видео требования к услугам приобрели большую важность, поскольку качество услуг, предоставляемых информационной инфраструктурой, напрямую влияет на качество звука и изображений. Таким образом, перспектива инфраструктуры порождает два набора требований: один для системы и другой для услуг.

Обеспечение надежности телекоммуникационных сетей – многогранная задача, требующая сочетания отказоустойчивости, избыточности, устойчивости, управления QoS и мер безопасности. Внедряя эти принципы, операторы сетей могут гарантировать высокую доступность, минимальное

время простоя и бесперебойную связь для пользователей и критически важных приложений. Достижения в области искусственного интеллекта и автоматизации продолжают повышать надежность сетей, делая телекоммуникационные системы более надежными и адаптивными к сбоям. Ожидается, что будущие разработки в области квантовых сетей и программно-определяемой безопасности еще больше укрепят устойчивость сетей к меняющимся угрозам и вызовам.

## 2.2. Модели пропускной способности для сверхплотных сетей

Сверхплотные сети можно определить как сети, в которых ячеек больше, чем активных пользователей [124], [125-128]. Другими словами,  $\lambda_b \gg \lambda_u$ , где  $\lambda_b$  – плотность точек доступа, а  $\lambda_u$  – плотность пользователей. Другое определение UDN было дано исключительно в терминах плотности ячеек, независимо от плотности пользователей. Дин и др. [129] предоставили количественную меру плотности, при которой сеть можно считать сверхплотной ( $\geq 10^3$  ячеек/км<sup>2</sup>). Фактически, первое определение сходится ко второму, учитывая, что плотность активных пользователей, рассматриваемая в плотных городских сценариях, ограничена сверху примерно 600 активными пользователями/км<sup>2</sup> [130].

Как правило, малые ячейки в UDN можно классифицировать на полностью функционирующие базовые станции (БС) (пикосоты и фемтосоты) и точки доступа макрорасширения (реле и удаленные радиоголовки (RRH)). Полностью функционирующая BS способна выполнять все функции макросоты с меньшей мощностью в меньшей зоне покрытия. В частности, полностью функциональная BS выполняет все функции всего стека протоколов [131]. С другой стороны, узел доступа макрорасширения является расширением для макросоты для эффективного расширения покрытия сигнала, и он выполняет все или некоторые функции только уровня РНУ. Более того, малые соты обладают различными возможностями, мощностью

передачи, покрытием и сценариями развертывания [132, 133]. Таблица II суммирует характеристики различных типов малых сот. Далее мы объясним различные типы малых сот [134]:

Пикосоты – это небольшие BS, которые устанавливаются операторами для покрытия небольшой зоны покрытия в диапазоне ста метров. Обычно пикосоты развертываются в точках доступа (внутри или снаружи) для обслуживания десятков активных пользователей путем разгрузки их трафика из макросоты.

Мощность передачи пикосот обычно составляет до 33 дБм, и они в основном развертываются для целей емкости. Транспортировка пикосот аналогична транспортировке макросот (волоконно-оптические или микроволновые линии связи) для обеспечения идеальных каналов с высокой пропускной способностью и малой задержкой.

Фемтосоты – это внутренние базовые станции, которые устанавливаются пользователем для покрытия внутренних точек (домов, офисов и конференц-залов) для обслуживания небольшого количества пользователей. Мощность передачи фемтосот обычно составляет менее 20 дБм, а дальность покрытия составляет порядка десятков метров. Таким образом, фемтосота обеспечивает большую мощность сигнала внутри помещений для домашних пользователей, где генерируется большая часть трафика данных. Фемтосоты могут быть подключены к сети через любое из широкополосных подключений потребителей, таких как цифровая абонентская линия (DSL), кабель или оптоволокно.

Ретрансляторы – это точки доступа, развертываемые оператором, которые обычно развертываются для покрытия мертвых зон и улучшения производительности макросот на границе. Они передают данные пользователей туда и обратно из макросоты и обратно, демонстрируя то, что считается беспроводным транзитом. Как ретрансляторы, так и пикосоты имеют одинаковое покрытие и мощность передачи, но в основном они различаются по трем свойствам. Во-первых, пикосота – это полностью

функционирующая BS, в то время как ретранслятор – это расширение для макросоты.

Во-вторых, пикосоты развертываются для емкости, а ретрансляторы развертываются для покрытия. Наконец, транзит пикосоты – это идеальный транзит, в то время как транзит ретранслятора – это беспроводной внутриполосный или внеполосный транзит.

RRH – это радиочастотные блоки, которые развертываются для расширения покрытия центральной BS до удаленного географического местоположения. RRH подключаются к центральной BS через высокоскоростные оптоволоконные или микроволновые каналы [135]. Они развертываются для расширения покрытия макросоты и могут использоваться как централизованная альтернатива уплотнения по сравнению с распределенным уплотнением, выполняемым пикосотами или фемтосотами. Важно подчеркнуть, что внутренние малые соты (фемтосоты) работают в трех различных режимах доступа: открытом, закрытом и гибридном. В открытом режиме доступа все абоненты данного оператора могут получить доступ к узлу, в то время как в закрытом режиме доступа доступ ограничен закрытой группой абонентов (CSG). В гибридном режиме все абоненты могут подключиться к фемтосоте, при этом приоритет всегда отдается абонентам CSG. Развертывание малых сот с обычными макросотами в литературе и стандартах называется HetNet. HetNets в целом представляет собой смену парадигмы от однородных сетей [136]. Как показано на рисунке 10, UDN служит еще одной эволюцией HetNets.

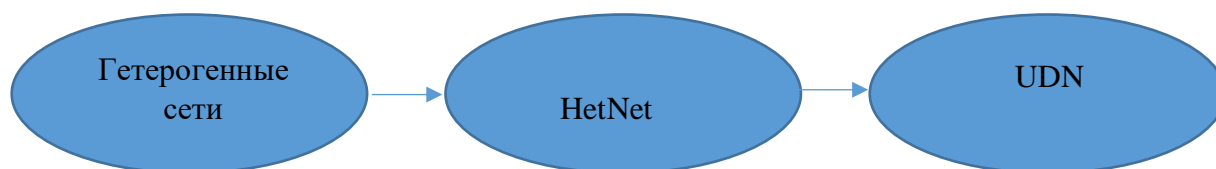


Рисунок 10 – Эволюция традиционная однородная сеть эволюционирует в HetNet, а UDN, в свою очередь, представляет собой уплотненную HetNet

При моделировании проблем в UDN используются различные методы и показатели производительности. В этом разделе мы сосредоточимся на двух наиболее часто используемых методах моделирования, а именно, стохастической геометрии [137] и теории игр [138].

Кроме того, мы определяем ключевые показатели производительности (KPI), которые обычно используются при количественной оценке производительности предлагаемых методов и решений, таких как покрытие и вероятность отключения, покрытие скорости, спектральная эффективность, спектральная эффективность области (ASE), пропускная способность сети, энергоэффективность и справедливость. Более того, мы представляем некоторые варианты использования обсуждаемых методов для моделирования некоторых проблем в UDN, эти приложения дают надежную основу для решения аналогичных проблем, избегая при этом ловушек моделирования таких проблем.

1) Стохастическая геометрия: стохастическое моделирование пространственного распределения малых ячеек достигло значительных результатов в литературе [139]. Незапланированное развертывание узлов доступа отражает случайность в их размещении. Следовательно, положения малых ячеек можно моделировать как точки в двух- или трехмерном евклидовом пространстве, что называется точечным процессом (ПП). Стохастическая геометрия возникает как наиболее подходящий инструмент для изучения таких случайных сетевых сред [140]. Многие результаты были представлены с использованием стохастической геометрии в литературе по традиционным сетям и HetNets [141-148]. Кроме того, ожидается, что применение стохастической геометрии будет иметь значительный успех в плотных средах. Точечный процесс Пуассона (PPP) – это модель точечного процесса, в которой количество BS в заданной области  $A$  в двумерном пространстве или в заданном объеме  $V$  в трехмерном пространстве имеет распределение Пуассона со средним значением  $\lambda bA$  или  $\lambda bV$  соответственно,



где параметр  $\lambda b$  представляет плотность BS на единицу площади или единицу объема.

2) Теория игр: Теория игр – это прикладная математическая дисциплина, которая состоит из набора инструментов и методов для решения проблем конфликта интересов среди набора рациональных существ [149]. Теоретико-игровые подходы изначально были разработаны для решения проблем в экономике. Однако приложения теории игр нашли значительный успех во многих других дисциплинах, таких как биология, политология, информатика и инженерия. Игра характеризуется с точки зрения трех основных элементов, а именно: игроки, действия и выигрыши (предпочтения) [150].

Игроки – это рациональные лица, принимающие решения, у них обычно есть конфликт интересов, и решение одного игрока может навредить другим игрокам. Решение игрока – это действие, которое игрок выбирает из набора действий, чтобы максимизировать свой выигрыш или выгоду. Набор действий может быть конечным, счетным или бесконечным. Предпочтение действия данному игроку – это упорядочивание действий с точки зрения выигрышей.

Две различные категории игр широко изучаются и используются для моделирования проблем в литературе; Некооперативные игры [151] и кооперативные игры [152]. Игроки в некооперативных играх не имеют средств коммуникации, поэтому они не могут договориться о том, как играть в игру, чтобы достичь общей выгоды. Напротив, в кооперативных играх игроки могут торговаться или формировать коалиции, чтобы улучшить свои соответствующие позиции в игре и достичь лучшего выигрыша. Таким образом, мы можем выделить две различные подкатегории кооперативных игр, а именно, игры торга и игры формирования коалиций [153]. В UDN существует множество областей исследований, где теория игр является потенциальным инструментом для разработки эффективных алгоритмов. Управление помехами, обнаружение малых сот, объединение пользователей и передача мобильных абонентов входят в число областей, где инструменты из

теории игр могут найти успешное применение. Конфликт интересов среди большого количества узлов в плотной сети стимулирует разработку распределенных решений для максимизации общесетевой полезности, и в этой ситуации подходы теории игр выступают в качестве инструментария, в котором многие существующие или новые модели могут подойти для решения поставленной задачи.

### 2.3. Методы управления интерференцией в городских условиях

Интерференция и шумы указывают на два фундаментальных явления и критические ограничивающие факторы в мире беспроводной связи, которые находятся в знаменателе формулы емкости Шеннона, известной как отношение сигнал/помеха и шум (SINR), и вызывают ухудшение емкости системы [154]. В отличие от шума, который ведет себя случайным образом, помехи имеют детерминированные характеристики, которые в основном наследуются из статистики передаваемого сигнала (т. е. формы импульса, времени, частоты и пространственных свойств), его взаимодействия с физическим беспроводным каналом, архитектурой телефона и протоколом радиодоступа. Следовательно, для того, чтобы иметь представление об уникальных особенностях помех и о том, чем они отличаются от шума, академические круги и промышленность проводят обширные исследования. Чтобы иметь четкое представление о проблеме помех, мы сочли полезным составить схему ее эволюции, следуя используемым беспроводным технологиям, начиная с 1-го поколения (1G) до сегодняшнего дня. В этом контексте стоит упомянуть, что ортогональное мультиплексирование/передача были ключом к сфере беспроводной связи, независимо от постоянно растущих источников помех. В частности, мультиплексирование с частотным разделением (FDM), мультиплексирование с временным разделением (TDM), мультиплексирование с кодовым разделением (CDM) и, наконец, мультиплексирование с ортогональным

частотным разделением (OFDM) представляют собой основные форматы сигнала, которые использовались и модифицировались в отрасли беспроводной связи вплоть до 4G [155].

В ранних системах сотовой связи с аналоговыми голосовыми услугами помехи соседнего канала (ACI) и помехи внутри канала (CCI) избегались с помощью использования защитной полосы между соседними каналами и повторного использования частот (FR) посредством географического разделения. С введением цифровых систем связи во 2-м поколении (2G) технология Global System for Mobile (GSM) проложила путь для SMS и почтовых служб. В частности, были разработаны схемы кодирования цифровых каналов, направленные на защиту надежности системы от межсимвольных помех (ISI) из-за частотной селективности беспроводного канала [156]. Позднее были интегрированы широкополосные системы для достижения высоких скоростей передачи данных и емкости.

Таким образом, в 3-м поколении (3G) со стандартом Universal Mobile Terrestrial Systems (UMTS) каждому UE было разрешено использовать все доступные временные и частотные RR для связи с помощью отдельных ортогональных кодов. Адаптивное управление мощностью и приемник Rake (Rx) были введены для предотвращения эффекта «ближний-дальний» и достижения усиления разнесения соответственно [157]. LTE на основе OFDM стала прорывной технологией как для достижения высокой спектральной эффективности (SE), так и для обслуживания нескольких UE с помощью простого эквалайзера частотной области (FDE) в 4G [158, 159]. К сожалению, эта схема с несколькими несущими очень чувствительна к межнесущим помехам (ICI), в основном из-за ухудшения канала и оборудования, т. е. временной селективности беспроводного канала, более широкой полосы пропускания и несовершенства радиочастотных (РЧ) телефонов, с которыми в ближайшем будущем придется чаще сталкиваться в связи с уменьшением размеров оборудования и более высокой скоростью передачи данных (более широкий спектр, такой как полосы миллиметровых волн) [160-163].

В сверхплотных сетях помехи возникают, когда несколько устройств или сетевых ячеек работают на одних и тех же частотных диапазонах или соседних каналах, что приводит к ухудшению сигнала, снижению пропускной способности и ухудшению качества обслуживания (QoS). Традиционные методы подавления помех, такие как повторное использование частоты и управление мощностью, больше недостаточны в сильно перегруженных средах.

Сверхплотные беспроводные сети сталкиваются с различными проблемами помех, которые могут существенно повлиять на производительность сети и пользовательский опыт. Понимание различных типов помех имеет решающее значение для разработки эффективных стратегий смягчения. Основные типы помех в плотных беспроводных сетях включают:

#### 1. Помехи в соседнем канале (CCI).

Помехи в соседнем канале возникают, когда несколько беспроводных точек доступа или устройств работают на одном частотном канале. Это может происходить как в сотовых, так и в сетях Wi-Fi, где соседние соты или точки доступа используют один и тот же канал, что приводит к перекрытию радиосигналов. Помехи в соседнем канале могут серьезно ухудшить производительность сети, снижая пропускную способность, увеличивая задержку и вызывая нестабильность соединения. Это может привести к значительному снижению общей эффективности и емкости сети.

#### 2. Помехи в соседнем канале (ACI).

Помехи в соседнем канале возникают из-за перекрытия соседних частотных каналов. Даже если устройства не работают на одном канале, их сигналы все равно могут мешать друг другу, если каналы недостаточно разделены. Помехи в соседних каналах могут повлиять на качество связи, снизить пропускную способность и привести к увеличению потери пакетов и повторных передач.

#### 3. Межсотовые помехи.

В сотовых сетях и средах Wi-Fi с высокой плотностью помехи могут возникать между соседними ячейками или точками доступа. Это особенно распространено в развертываниях с малыми ячейками, где ячейки плотно упакованы и зоны покрытия перекрываются. Наличие разнородных беспроводных технологий, таких как сотовая связь, Wi-Fi, Bluetooth и Zigbee, работающих в одном физическом пространстве, может еще больше усугубить проблемы помех.

#### 4. Межтехнологические помехи.

Межтехнологические помехи относятся к помехам между различными беспроводными технологиями, такими как Wi-Fi, Bluetooth и Zigbee, которые работают в одних и тех же диапазонах частот, как правило, в нелицензируемом спектре 2,4 ГГц и 5 ГГц. Распространение различных беспроводных технологий в плотных средах, известных как гетерогенные сети, может значительно увеличить потенциальные возможности межтехнологических помех, что приводит к ухудшению производительности и снижению надежности.

#### 5. Окружающая среда и внешние источники.

Помимо упомянутых выше беспроводных помех, на плотные беспроводные сети могут также влиять не беспроводные источники помех, такие как микроволновые печи, физические препятствия (например, стены, мебель) и факторы окружающей среды (например, погодные условия). Эти внешние источники помех могут еще больше ухудшить качество беспроводных сигналов, способствуя общим проблемам помех в плотных беспроводных сетях.

### 2.4. Теория хэндовера: подходы к обеспечению бесперебойной связи

Чтобы охватить широкую географическую область и увеличить количество пользователей, сотовые сети делят область на несколько ячеек, в которых связь между пользователями внутри или за пределами региона

осуществляется через одну или несколько стационарных базовых станций (БС) или временные сменные воздушные БС, такие как парящие беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Перспектива роста трафика данных в 1000 раз в будущем ставит перед беспроводной связью серьезную задачу [164]. Сектор радиосвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Р) начал исследования по сотовым сетям следующего поколения в 2012 году, изучая разработку стандартов международной мобильной связи (ИМТ) на 2020 год и позже, которые назывались ИМТ-2020. Затем, в 2015 году, МСЭ-Р опубликовал некоторые точки зрения и цели относительно предстоящего поколения сотовой сети на основе всемирных исследований, сокращенно изложенных в следующих подходах [165]:

Улучшенная мобильная широкополосная связь (eMBB). Повышение производительности в сценариях на основе eMBB и высокоинтегрированный пользовательский опыт по сравнению с существующими технологиями мобильной широкополосной связи,

Сверхнадежная и малозадерживаемая связь (URLLC). Поддержка требовательных требований к эксплуатационной мощности, задержке и доступности для пользователей, таких как беспроводное управление промышленным производством, телехирургия, автоматизация интеллектуальных сетей и обеспечение безопасности транспортных систем,

Массовая машинная связь (mMTC). Поддержка неисчислимого количества подключенных UE, нечувствительных к задержке с низкой скоростью передачи данных.

Пятое поколение сотовых сетей состоит из трех основных частей: а) Пользовательское оборудование (UE): устройство, которое используется конечным пользователем для доступа к услугам, предоставляемым оператором в сети; б) Сеть радиодоступа следующего поколения (NG-RAN): Набор устройств, которые обеспечивают технологию радиодоступа и располагаются между UE и базовой сетью в качестве интерфейса; и в) Базовая сеть 5G-NR: Инфраструктура, которая соединяет различные части сотовой

сети друг с другом или с другими сетями. Управление доступом, управление сеансами, маршрутизация и подключение других сетей могут рассматриваться как основные обязанности базовой сети. Используемое оборудование и программное обеспечение в 5G-NR можно рассматривать как:

- gNB: точка подключения UE к сети (BS),
- Функция доступа и мобильности (AMF): объект управления мобильностью (MME) в 4G заменяется функцией доступа и мобильности (AMF) в сетях 5G, которая берет на себя бремя доступа UE к сети, такое как регистрация и подключение, а также управление мобильностью, аутентификацией и криптографией [166],
- Функция плоскости пользователя (UPF): основной блок для разделения плоскости пользователя и плоскости управления [167],
- Функция управления сеансом (SMF): фундаментальный блок, отвечающий за взаимодействие с плоскостью пользователя, а также за создание, обновление и устранение управления PDU и UPF,
- Сеть передачи данных (DN): отвечает за услуги оператора, такие как Интернет,
- Протокол приложений следующего поколения (NG AP): интерфейс для обмена управляющими сообщениями между BS и AMF,
- Протокол приложений Xn (XnAP): интерфейс для обмена управляющими сообщениями между gNB.

На рисунке 11 показаны блоки, участвующие в процедуре передачи в сетях 5G.

#### Классическая процедура передачи

Поскольку процедура передачи инициируется, если качество сигнала удовлетворяется, измерения являются одним из важнейших этапов в процедуре передачи. Качество сигнала может быть измерено либо в нисходящем, либо в восходящем канале для управления передачей в сетях 5G. В соответствии с сеткой ресурсов физического уровня NR, некоторые

стандартные сигналы, называемые опорными сигналами, определены для измерения качества принимаемых сигналов.

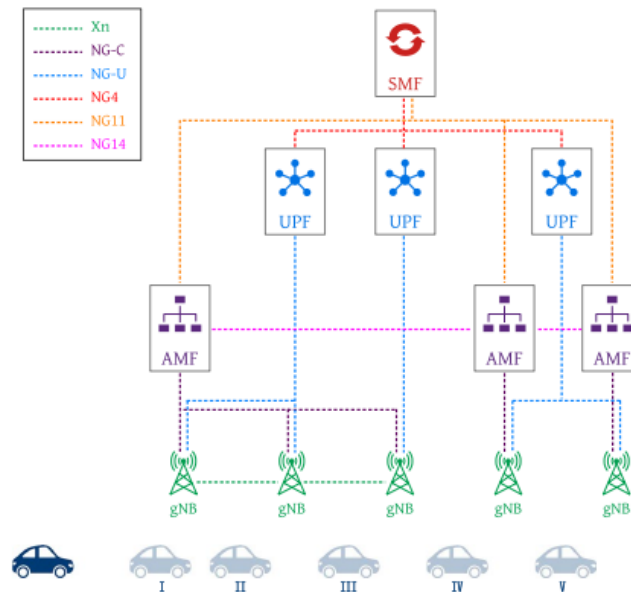


Рисунок 11 – Механизм передачи обслуживания в сетях 5G

Опорные сигналы включают блок сигнала синхронизации (SSB) и блок опорного сигнала информации о состоянии канала (CSI-RS) в нисходящем канале и опорный сигнал зондирования (SRS) в восходящем канале, который используется gNB. Напоминаем, что в сетях LTE это измерение выполняется только в SSB и опорном сигнале, указанном ячейкой, в нисходящем направлении [168]. Подразумевается, что для получения более качественных услуг в подключенном режиме управление передачей обслуживания должно выполняться надлежащим образом. Своевременное решение о смене BS достигается путем измерений качества канала. Эти измерения могут быть получены либо в нисходящем канале UE в классических подходах, либо в восходящем канале BS, что можно найти в недавних исследованиях [169]. При измерениях в нисходящем направлении UE отправляют информацию и измеренные значения об обслуживающей и соседних ячейках в обслуживающую ячейку в кадре управляющего сообщения, называемом отчетом об измерениях (MR). MR содержит различные данные, такие как



качество принятого сигнала в нисходящем канале от обслуживающей и целевой BS. MR состоит из двух фаз: на первой фазе сообщение RRC, включающее конфигурацию этого процесса, отправляется на UE от gNB, а на второй фазе UE измеряет сигналы в требуемом формате и отправляет их на gNB. Эти измерения обрабатываются и усредняются с помощью фильтра L1 на физическом уровне и фильтра L3 на уровне RRC [170]. Затем это сообщение отправляется на обслуживающую BS для начала процесса передачи обслуживания. Из-за колебаний канала на высоких частотах готовятся последовательные измерения качества сигнала вместо одного измерения, которое было бы неподходящим для процесса принятия решений.

Три общих критерия для оценки качества канала в 4G и 5G:

- Мощность принятого опорного сигнала (RSRP): средняя мощность принятого сигнала без учета шума и помех.
- Индикатор уровня принятого сигнала (RSSI): общая мощность принятого сигнала, включая шум и помехи.
- Качество принятого опорного сигнала (RSRQ): отношение rsRP к RSSI.

Было предложено много подходов, основанных на измерениях качества сигнала в восходящем или нисходящем канале, и были применены математические модели с помощью стохастической геометрии, учитывающей технологию, зону покрытия, помехи, модели перемещения пользователей и т. д., для нахождения оптимальных точек. Результаты могут привести к настройке параметров сети для увеличения успешных передач. Следующие ключевые показатели эффективности рассматриваются для анализа производительности передачи и повышения эксплуатационных характеристик системы:

- Частота передачи Она равна количеству попыток в секунду в обслуживающей базовой станции, которое увеличивается за счет увеличения скорости мобильного пользователя и уменьшения зоны покрытия. В качестве компромисса увеличение частоты передачи снижает частоту неудач передачи [171].

- Частота успешной передачи Она определяется как отношение количества успешно выполненных исходящих процедур передачи к количеству попыток исходящих процедур передачи [172].

- Частота неудач передачи Она определяется как отношение неудачных передач к общему количеству попыток передачи в обслуживающей базовой станции.

- Скорость пинг-понговой передачи обслуживания Она равна количеству пинг-понговых передач обслуживания в секунду, которые происходят, если подключенное к целевой BS UE возвращается обратно в обслуживающую соту в течение небольшого интервала времени [173].

- Задержка данных Она определяется как средняя продолжительность времени между последним переданным пакетом перед началом процесса передачи обслуживания в BS и первым полученным пакетом в целевой BS после процесса передачи обслуживания [174].

Хотя упомянутые KPI демонстрируют производительность передачи обслуживания, ранняя настройка передачи обслуживания, поздняя настройка передачи обслуживания и неправильный выбор целевой BS могут быть наиболее важными причинами сбоя процесса передачи обслуживания.

Существует несколько категорий хэндовера.

### **Хэндовер на основе доступа**

Сценарии дерева могут рассматриваться при управлении хэндовером на основе размера, типа и технологии радиодоступа следующим образом:

- Внутричастотный/межчастотный. Если и обслуживающая, и целевая BS используют одну и ту же частоту, хэндовер считается внутричастотным, а если они используют разные частоты, он считается межчастотным.

- Внутрисотовый/межсотовый. Если и обслуживающая, и целевая BS похожи с точки зрения фемтосоты или макросоты, хэндовер считается внутрисотовым, а если они находятся в разной иерархии (одна как фемтосота, а другая как макросота), он считается межсотовым.

- Внутрисотовый/меж-RAT. Если и обслуживающая, и целевая используют одну и ту же технологию, например 4G, хэндовер считается внутритехнологическим, а в противном случае он считается междитехнологическим.

### **Хэндовер на основе сетевых функций**

Процедура передачи различается в зависимости от задействованных сетевых функций. Различные сценарии доступны на рисунке 11, где в этой процедуре участвуют обслуживающий gNB, AMF, плоскость пользователя, NG и Xn. Сценарии описаны следующим образом [175]

- Внутри gNB. Обслуживающий и целевой gNB одинаковы, и процедура передачи происходит на уровне частот или на уровне луча.

- Между gNB (внутри AMF/внутри UPF). Обслуживающий и целевой gNB используют одни и те же AMF и UPF, и, следовательно, процедура передачи может быть достигнута на уровне gNB, если существует интерфейс Xn.

- Между gNB (внутри AMF/внутри UPF). Поскольку только AMF одинаков для обоих gNB, процедура передачи может происходить на уровне gNB, если существует Xn. Управляющие сообщения могут обмениваться через интерфейс NG.

- Inter-gNB (inter-AMF/inter-UPF). Поскольку AMF и UPF не одинаковы для обслуживающих и целевых gNB, процедура передачи выполняется на уровне NG между двумя AMF.

- Inter-gNB (inter-AMF/intra-UPF). Процедура передачи выполняется на уровне NG между двумя AMF, в то время как UPF остается одинаковым для gNB.

### **Хэндовер на уровне соты**

Зона покрытия BS в сетях 4G охватывает круг или сектор круга, который покрывает обширную область. Однако использование высоких частот связи mmWave в сетях 5G сильно ослабляет сигналы, и возникающие потери на трассе истончают эту область.

Эта проблема решается с помощью антенн с формированием луча, так что мощность сигнала концентрируется на небольших областях. В последнем выпуске стандартов LTE для покрытия целевой области применялось только несколько лучей, в то время как в стандартах 5G для этой области рассматривалось использование 64 лучей gNB [176]. В результате процедура передачи может быть выполнена как на уровне ячейки, так и на уровне луча. Из-за ограниченности областей, охватываемых обслуживающими лучами, UE должны постоянно менять свои обслуживающие лучи. Таким образом, одной из важнейших проблем в этих сетях является управление передачей на уровне луча с малой задержкой и высокой надежностью. Чтобы уменьшить задержку, этот вид передачи управляется на физическом и MAC уровнях без участия уровня RRC.

#### **Автономная (SA)/неавтономная (NSA) передача**

Организация 3GPP подтвердила два варианта реализации для сетей 5G: SA и NSA. Эти варианты были представлены в техническом отчете [176] следующим образом:

В архитектуре NSA сеть LTE и основные сети инфраструктуры EPC взаимодействуют с технологией доступа 5G-NR, которая называется двойной связью E-UTRA-NR (EN DC) или вариантом архитектуры 3. В архитектуре SA используется только технология доступа NR вместе с основной сетью 5G. В архитектуре NSA якорь LTE решает проблемы управления сообщениями управления и мобильностью UE. Что касается этих архитектур для сетей 5G и сигнализации, процедура передачи становится другой [177].

Заиди и др. [178] впервые провели комплексное исследование в 2020 году по проблемам мобильности в сверхплотных мобильных сетях и представили углубленное руководство по методам мобильности 5G с основными рисками мобильности устаревших сетей. В этом исследовании были рассмотрены основные результаты недавних исследований и описаны технические сложности и возможности, связанные с мобильностью в новых сверхплотных сотовых сетях.

В комплексном исследовании Гуреса и др. в 2020 году [179] подробно рассмотрено управление мобильностью 5G и его ключевые элементы (требования, архитектура и проблемы), которые характеризуют управление мобильностью в последних поколениях. Также выделены неактивный статус Novel Radio Resource Control (RRC), начальный доступ, процедуры регистрации и пейджинга.

Протоколы Inter-RAN HO в подключенном состоянии и интегрированные ячейки mmWave с технологией 5G были тщательно обоснованы с помощью обзоров литературы. Наконец, были рассмотрены конкретные сложности, влекущие за собой проблемы HO, накладные расходы на сигнализацию, энергопотребление, безопасность и задержку. Были выделены оптимальные решения для выполнения предпосылок управления мобильностью 5G.

Ахмад и др. [180] провели инклюзивное исследование решений HO в двухуровневых сетях 5G (eNB и HeNB) в 2020 году. Первая часть этого исследования предоставила техническую основу для механизмов HO. По сути, архитектура LTE-A обсуждалась с использованием недавно выпущенных версий.

Затем освещаются этапы контроля допуска HeNB и процедуры HO в двухуровневых сетях, а также тонкости HeNB NOM. Интеграция современных алгоритмов HO в гетерогенные сети (HetNets) с использованием основных методов и входных параметров была исследована и классифицирована во второй части исследования на основе проблем HO, с которыми сталкиваются решения HO в двухуровневых сетях. Основной механизм и входные параметры в каждой категории используются в решении HO для обоснования преимуществ и недостатков метода. В частности, репрезентативный алгоритм в каждой категории характеризовал свои метрики оценки производительности. Вышеупомянутые параметры принятия решений HO, ключевая технология принятия решений и метрики оценки

производительности. Статья завершается обсуждением конкретных открытых вопросов, связанных с 5G HetNet HO.

Исследование Джейна и др. в 2020 году [181] представило новое обсуждение функциональных требований стратегий управления мобильностью для этих сетей с подробностями о том, в какой степени текущие механизмы были задуманы органами стандартизации, такими как IEEE (Институт инженеров по электротехнике и электронике), IETF (Целевая группа по инжинирингу Интернета), Проект партнерства третьего поколения (3GPP) (включая недавно определенные стандарты 5G), МСЭ (Международный союз электросвязи) и другие академические и промышленные исследовательские усилия, соответствуют этим условиям. Это было достигнуто с помощью новой качественной оценки, которая оценивала каждый обсуждаемый механизм в соответствии с его способностью соответствовать критериям надежности, гибкости и масштабируемости для будущих стратегий управления мобильностью. Также представлены исследования, касающиеся ограничений в разработке и реализации стратегии управления мобильностью для сетей 5G и за их пределами. Потенциальные альтернативы управления мобильностью и их соответствующие возможности изложены для управления сохраняющимися сложностями. Исследование резюмируется видением механизмов управления мобильностью в сетях 5G и B5G.

Исследование опроса Моллеля и соавторов в 2021 году [182] предложило обширное исследование НОМ в сетях 5G с акцентом на приложения машинного обучения (ML) к НОМ. Новая таксономия, основанная на источнике данных, который будет использоваться при обучении алгоритмов ML, была создана путем следующих двух широких разделов: визуальные и сетевые данные. Опрос, который стремился переключить эмпирический фокус с традиционных методов на визуальные источники данных после потенциального включения их в НОМ, обсуждал, как интеллектуальный НОМ может оказаться проницательным в чрезвычайных

ситуациях с участием мобильных клиник, машин скорой помощи и удаленных больниц. Кроме того, продвинутый НОМ с поддержкой ML в сотовых системах в каждой категории рассматривается с последними исследованиями и разработками по эмпирическим вопросам и будущим направлениям исследований. Исследование Танвира и др. [183] по управлению мобильностью 5G в сверхплотных сетях малых сот (UDSC) с методами обучения с подкреплением (RL) было опубликовано в 2022 году. Текущие исследования были впервые обсуждены до того, как было подчеркнуто значение НОМ в сценарии UDSC. Аналогичным образом, это исследование объяснило, как алгоритмы МО могут способствовать нескольким сценариям НО, и наметило будущие направления и проблемы, связанные с сетями 5G UDSC.

Исследование Хана и др. в 2022 году [184] представило всесторонний обзор НОМ в будущих мобильных сверхплотных HetNets.

Разработаны различные методы мобильности и НОМ, чтобы подчеркнуть их вклад в бесперебойное соединение в условиях мобильности пользователей. Также были исследованы конкретные тонкости, возможности и возможные альтернативы, чтобы выделить ключевые сложности и определить соответствующие решения, которые могут устранить проблемы мобильности в будущих мобильных сетях.

Исследование в [185] рассмотрело различные формы плоских и основанных на распределенном управлении мобильностью (DMM) проектов управления мобильностью Интернет-протокола (IP). Сиддики и др. в 2022 году определили и исследовали стратегии управления мобильностью для беспроводных сетей с точки зрения топологий сети, где трафик в основном передается локально на уровне RAN, а не маршрутизируется по первичной сети. Последние результаты были включены в это исследование вместе с возможными преимуществами обеспечения устойчивой мобильности в динамических системах радиосвязи DMM 5G и B5G. Кроме того, исследование подробно описывает широкий спектр недавних и

продолжающихся исследований и трудностей, а также излагает возможные перспективные направления исследований, связанные с планируемыми плоскими сетями 5G и 6G на основе DMM. Эта статья является многообещающим справочником по проектированию беспроводных сетей для сетей 5G и B5G. Подводя итог, можно сказать, что в отличие от представленных исследований из существующей литературы, которые в основном сосредоточены на существующих проблемах НО и опускают критические ожидаемые проблемы оптимизации НО и потенциальные решения сетей B5G, наш обзор подробно изучает оптимизацию НО сетей B5G. В этом обзоре обсуждаются проблемы и решения методов оптимизации НО для будущих мобильных беспроводных B5G. В нем рассматривается большинство проблем оптимизации НО, с которыми может столкнуться реализация сетей B5G, включая проблемы оптимизации НО потенциальных технологий и методов, которые будут реализованы в сетях B5G. Кроме того, также обсуждаются будущие направления исследований. Одновременно в этом исследовании приводятся наиболее известные методы оптимизации НО и изучаются новейшие потенциальные решения для решения проблем оптимизации НО в контексте B5G.



### 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТЕЙ 5G И 6G

#### 3.1 Исследование методов повышения пропускной способности и надежности сетей 5G в условиях плотной городской застройки

Сети пятого поколения представляют собой современную технологическую платформу, обеспечивающую высокую скорость передачи данных, низкие задержки и широкие возможности подключения. Однако их внедрение сопровождается рядом проблем, особенно в условиях плотной городской застройки, где высокая концентрация пользователей и устройств создаёт существенные вызовы для управления хендоверами и мобильностью.

Gupta et al. (2021) исследовали проблему частых хендоверов в сетях 5G, которые приводят к увеличению задержек и снижению качества связи. Для решения этой проблемы авторы предложили использовать алгоритмы машинного обучения (МО) для предсказания и управления хендоверами. Предложенный подход адаптирует параметры хендовера в реальном времени, что позволяет снизить количество ошибок и улучшить качество обслуживания [186].

Методология исследования включала использование регрессионных моделей и алгоритмов кластеризации для анализа параметров сети и мобильности пользователей. Результаты симуляций показали значительное снижение количества неудачных хендоверов и улучшение таких показателей, как среднее время задержки и пропускная способность сети. Основным ограничением метода является необходимость больших объёмов данных для обучения моделей и высокая вычислительная мощность.

Khan et al. (2022) сосредоточились на разработке ускоренных методов хендовера для ультра-плотных сетей (UDN). Частые хендоверы в таких условиях ухудшают стабильность подключения. Авторы предложили прогнозирование движения пользователей и адаптивное изменение

параметров сети для минимизации времени выполнения хендвера. Использование методов машинного обучения и теории вероятностей позволило улучшить показатели времени выполнения хендверов и общего качества обслуживания [187].

Xian et al. (2023) представили предсказательный алгоритм хендвера, который анализирует данные о движении пользователей и параметры сети с использованием методов глубокого обучения. Такой подход позволяет заранее предсказывать необходимость хендвера и эффективно управлять ресурсами сети [188].

Результаты симуляций показали снижение количества неудачных хендверов, улучшение качества обслуживания и равномерное распределение нагрузки. Основные ограничения связаны с необходимостью больших объёмов данных для обучения и высокой вычислительной мощности, что может осложнить внедрение алгоритма в реальных условиях.

В [189] был предложен комплексный подход к управлению мобильностью в сетях 5G и 6G, учитывающий высокую плотность пользователей и разнообразие устройств. Используя машинное обучение и децентрализованные архитектуры управления, авторы разработали методы прогнозирования и оптимизации параметров хендвера, а также стратегии управления ресурсами.

Результаты исследований показали улучшение пропускной способности и снижение количества неудачных хендверов. Однако реализация таких методов требует значительных вычислительных ресурсов и сложных алгоритмов, что затрудняет их адаптацию к реальным условиям сети.

Shen et al. (2022) предложили кросс-уровневый подход к управлению мобильностью, интегрирующий методы управления на физическом, канальном и сетевом уровнях. Алгоритмы адаптации параметров сети и прогнозирования изменений позволили оптимизировать качество обслуживания и снизить количество неудачных хендверов [190].

Анализ результатов показал улучшение таких показателей, как успешность хендверов, среднее время задержки и пропускная способность сети. Основными ограничениями метода являются значительные вычислительные ресурсы и сложности в согласовании параметров на различных уровнях сетевого стека.

Таким образом, исследование методик повышения пропускной способности и надёжности сетей 5G демонстрирует значительный прогресс, но требует дальнейшей разработки интеграционных решений, снижающих вычислительные затраты и обеспечивающих устойчивую работу в условиях динамично изменяющейся среды [191].

Современные сети 5G сталкиваются с рядом вызовов, обусловленных высокой плотностью пользователей и динамичными условиями городской среды. Ультра-плотные сети (UDN), являющиеся основой для реализации концепции "умных городов", требуют оптимизации в таких аспектах, как управление мобильностью, распределение ресурсов, управление интерференцией и снижение задержек.

Современные подходы к управлению мобильностью и хендверами в сетях 5G демонстрируют высокую эффективность в улучшении качества обслуживания и оптимизации ресурсов сети. Использование алгоритмов машинного обучения и прогнозирования позволяет снизить количество неудачных хендверов, уменьшить задержки и повысить пропускную способность. Однако внедрение таких методов требует решения ряда проблем, включая высокие вычислительные затраты, необходимость больших объёмов данных и сложности адаптации к реальным условиям.

Повышение пропускной способности и надёжности сетей 5G в густонаселенных городских районах – это многогранная задача, требующая сочетания передовых технологий, стратегического планирования и эффективного управления. Этот комплексный подход включает интеграцию малых сот, частот миллиметрового диапазона (mmWave), массивных систем с множественным входом и множественным выходом (MIMO), эффективных

решений для транзитных соединений, периферийных вычислений и надежных стратегий управления помехами [192].

#### Развертывание малых сот

Малые соты – это маломощные узлы сотового радиодоступа, которые охватывают ограниченные области, от 10 метров до нескольких километров. Их развертывание в густонаселенных городских районах имеет решающее значение по нескольким причинам:

Локализованное покрытие: малые соты обеспечивают целевое покрытие в районах с высоким спросом, таких как городские центры и коммерческие районы, гарантируя пользователям постоянную связь и высокую скорость передачи данных. Этот локализованный подход устраняет пробелы в покрытии, которые часто встречаются в городских условиях из-за препятствий, таких как здания и другие сооружения.

Разгрузка трафика: обрабатывая трафик в определенных зонах, малые соты уменьшают перегрузку в сетях макросот. Такая разгрузка улучшает общую производительность сети, снижает задержку и улучшает пользовательский опыт, особенно в часы пиковой нагрузки [193].

Повторное использование частот: стратегическое размещение малых сот позволяет эффективно повторно использовать частоты, максимально увеличивая использование спектра. Это особенно выгодно в городских районах, где ресурсы спектра ограничены, а спрос высок.

Внутреннее покрытие: Малые соты эффективно проникают в здания, обеспечивая надежную связь внутри помещений в таких местах, как торговые центры, офисы и жилые комплексы. Это гарантирует, что пользователи будут поддерживать надежные соединения независимо от их местоположения в городской среде.

Интеграция в гетерогенные сети (HetNets): Объединение малых сот с макросотами создает гетерогенную сетевую архитектуру, которая оптимизирует ресурсы и обеспечивает бесшовное покрытие и пропускную способность в густонаселенных городских районах.

Частоты миллиметрового диапазона (mmWave) [194]

Использование частот mmWave – еще одна стратегия повышения пропускной способности сети 5G в городских условиях:

Высокая скорость передачи данных: диапазоны mmWave обеспечивают значительную пропускную способность, что позволяет передавать данные с чрезвычайно высокой скоростью, что подходит для приложений с интенсивным использованием данных, таких как потоковая передача видео высокой четкости и виртуальная реальность.

Доступность спектра: спектр mmWave менее перегружен по сравнению с традиционными сотовыми диапазонами, что обеспечивает возможности для развертывания новых услуг без значительных помех.

Короткая дальность передачи: хотя сигналы mmWave имеют ограниченный диапазон и подвержены препятствиям, эта характеристика позволяет развертывать плотно упакованные малые ячейки, увеличивая общую пропускную способность сети в городских районах.

Системы Massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) [195]

Технология Massive MIMO подразумевает использование большого количества антенн на базовых станциях для повышения пропускной способности и надежности:

Пространственное мультиплексирование: Massive MIMO позволяет передавать несколько потоков данных одновременно, значительно увеличивая пропускную способность сети без необходимости использования дополнительного спектра.

Формирование луча: эта технология фокусирует энергию сигнала на определенных пользователях, повышая качество сигнала и уменьшая помехи от других устройств. Формирование луча особенно эффективно в плотных городских условиях, где пользователи находятся в непосредственной близости.

Повышенная спектральная эффективность: за счет использования усовершенствованной обработки сигнала Massive MIMO повышает спектральную эффективность, позволяя обслуживать больше пользователей одновременно в одном и том же диапазоне частот.

#### Эффективные решения для транзитных соединений

Надежная инфраструктура транзитных соединений необходима для подключения малых сот и обеспечения бесперебойной передачи данных:

Оптоволоконные соединения: развертывание оптоволоконных соединений обеспечивает транзитные соединения с высокой пропускной способностью и малой задержкой, что необходимо для поддержки требований сетей 5G. Однако в городских районах установка может быть дорогостоящей и сложной с точки зрения логистики.

Беспроводной транспортный канал: использование частот mmWave для беспроводного транспортного канала предлагает экономически эффективную и гибкую альтернативу оптоволокну. Этот подход использует высокую пропускную способность диапазонов mmWave для соединения небольших сот без обширной физической инфраструктуры. Исследования показывают, что беспроводной транспортный канал на основе mmWave Massive MIMO осуществим для сверхплотных сетей 5G, предлагая такие преимущества, как повышенная надежность соединения и экономическая эффективность.

Гибридные решения: сочетание оптоволокна и беспроводного транспортного канала может оптимизировать производительность и стоимость, адаптируясь к конкретным требованиям и ограничениям городской среды.

#### Периферийные вычисления

Внедрение периферийных вычислений приближает обработку данных к конечным пользователям:

Уменьшенная задержка: обрабатывая данные на периферии сети, периферийные вычисления минимизируют задержку, что имеет решающее

значение для таких приложений, как автономные транспортные средства и аналитика в реальном времени.

Эффективность полосы пропускания: локальная обработка данных снижает необходимость передачи больших объемов данных на централизованные серверы, экономя полосу пропускания и уменьшая перегрузку сети.

Повышенная надежность: периферийные вычисления могут поддерживать основные сервисы локально, обеспечивая непрерывность даже при сбоях в работе центральной сети.

Управление помехами [196]

В густонаселенных городских сетях управление помехами имеет жизненно важное значение для поддержания качества обслуживания:

Динамическое управление спектром: распределение ресурсов спектра на основе условий трафика в реальном времени минимизирует помехи и оптимизирует использование спектра.

Координированная многоточечная передача (CoMP): эта технология включает несколько точек передачи, работающих вместе для обслуживания пользователей, уменьшая помехи и улучшая качество сигнала.

Самоорганизующиеся сети (SON): реализация возможностей SON позволяет сети автоматически оптимизировать конфигурации, управлять ресурсами и решать проблемы без ручного вмешательства, повышая общую производительность.

Развертывание этих технологий в городских районах сопряжено с рядом проблем:

Проблемы регулирования и получения разрешений: изучение местных правил и получение разрешений на развертывание инфраструктуры может быть трудоемким и сложным. Сотрудничество с муниципальными властями и четкая коммуникация с общественностью имеют важное значение для решения проблем и оптимизации процессов.

Соображения стоимости: обширная инфраструктура, необходимая для плотного развертывания малых сот, требует значительных инвестиций. Операторы должны сбалансировать затраты на оборудование, установку, обслуживание и решения по транзитным соединениям для достижения экономической жизнеспособности.

Эстетические и экологические проблемы: интеграция сетевого оборудования в городские ландшафты без нарушения эстетики или возникновения экологических проблем требует продуманного проектирования и участия сообщества.

### 3.2 Оптимизация устойчивости мобильности на основе технологий искусственного интеллекта в сверхплотных сетях 5G

Мобильность в беспроводных сетях — это способность пользовательского оборудования (UE) поддерживать соединение с сетью при перемещении между ячейками без разрывов связи, как показано на рисунке 12. Это одно из ключевых преимуществ беспроводных сетей по сравнению с проводными [197].

В управление мобильностью входят несколько функций, включая регистрацию, обновление местоположения, передачу соединения (хэндовер) и роуминг.

Регистрация выполняется при включении мобильного устройства. Оно отправляет в сеть запрос на регистрацию, после чего сеть проверяет его идентификацию и местоположение, обновляя соответствующую информацию в HLR/HSS/UDM.

Обновление местоположения инициируется устройством при перемещении между зонами обслуживания. Сеть фиксирует новое местоположение UE, обрабатывает запрос и обновляет данные в HLR/HSS/UDM.



Роуминг – важный процесс мобильности, обеспечивающий подключение устройства при переходе в сеть за пределами домашней зоны. Это требует выполнения процедур аутентификации, авторизации и учета (AAA), что гарантирует безопасное и стабильное соединение между домашней и гостевой сетью.

С появлением 5G и будущих 6G сетей роуминг становится сложнее из-за повышенных требований к скорости, задержке и масштабируемости. 5G предоставляет улучшенные возможности, включая минимальную задержку, массовое подключение устройств и высокие скорости передачи данных, что делает бесшовный роуминг более значимым. Для этого применяются усовершенствованные протоколы и механизмы безопасности, позволяющие поддерживать стабильное соединение при межсетевых переходах.

В перспективе 6G сети будут использовать искусственный интеллект, периферийные вычисления и спутниковую интеграцию, что обеспечит интеллектуальное управление мобильностью, динамическое распределение ресурсов и усиленные механизмы безопасности AAA. Таким образом, роуминг в 5G и 6G эволюционирует в умный и адаптивный процесс, обеспечивающий надежное соединение в глобальных сетях.

Хэндовер — ключевая процедура, позволяющая UE переключаться между ячейками в процессе соединения. Когда уровень принимаемого сигнала (RSSI) снижается ниже порога, инициируется процедура хэндовера (см. рисунок 12). Обслуживающая базовая станция (BS) отправляет запрос целевой BS для передачи соединения в зону с лучшим сигналом. В идеальных условиях процесс проходит без разрывов связи.

Таким образом, мобильность в беспроводных сетях дает пользователям свободу перемещения, повышает удовлетворенность и обеспечивает стабильную связь для различных сценариев. В данной работе основное внимание уделяется хэндоверу как одной из ключевых функций беспроводных

сетей.

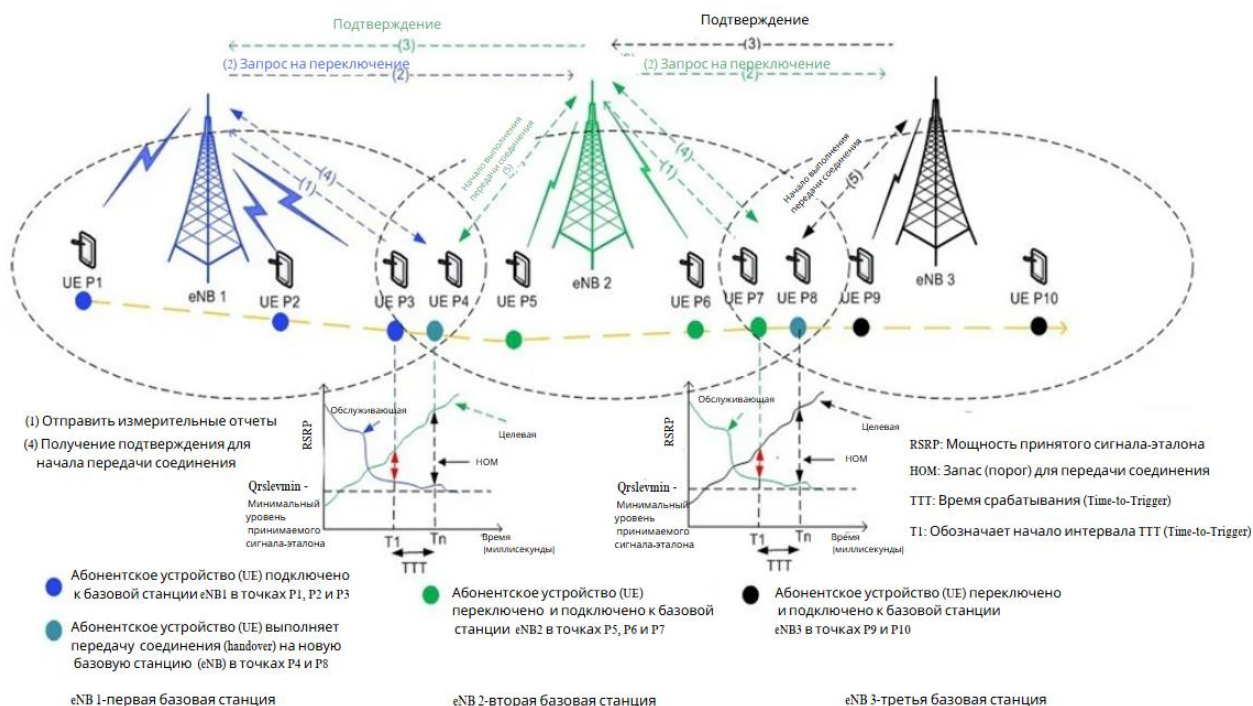


Рисунок 12 – Управление мобильностью с инициированием хэндовера в беспроводных сетях связи [197]

В сетях 5G и 6G существует ряд исследовательских задач, связанных с управлением хэндоверами, которые необходимо определить и решить. Эти задачи касаются факторов, влияющих на мобильность в будущих сетях.

К примеру, ультраплотные сети характеризуются высокой концентрацией пользователей, что может привести к перегрузке сети из-за увеличенного трафика. Это, в свою очередь, сказывается на стабильности соединения при движении пользователей в густонаселенных городских районах.

Кроме того, одним из ключевых факторов, влияющих на мобильность, является использование миллиметровых волн. Из-за значительных потерь в высокочастотных диапазонах зона покрытия ячейки сокращается, что увеличивает вероятность хэндовера. Это, в свою очередь, приводит к проблемам мобильности, таким как высокая частота сбоев при передаче

обслуживания, эффект "пинг-понга" и перебои в радиосвязи [198]. Несколько дополнительных факторов могут усугубить данные проблемы.

Помимо этого, существуют и другие аспекты, усиливающие указанные сложности. В литературе представлены различные исследования, направленные на их решение. Однако до сих пор не было найдено оптимального метода, который бы полностью устранял эти проблемы.

В 2020 году Zaidi S. M. A. и др. [199] опубликовали комплексный обзор, посвященный вопросам мобильности в сверхплотных сотовых сетях. В нем рассматриваются основные вызовы и перспективы, связанные с этой тематикой. Авторы детально анализируют методы обеспечения мобильности в 5G, а также указывают на риски, возникающие при использовании устаревших сетей.

В исследовании представлен обзор современных подходов к управлению мобильностью в 5G, включая механизмы хэндовера, контроль местоположения и оптимизацию параметров передачи обслуживания. Особое внимание уделено техническим сложностям, таким как передача между разными частотными диапазонами и типами сот. Также подчеркивается необходимость оптимизации параметров хэндовера для поддержки различных сервисов 5G.

Работа рассматривает возможности, предоставляемые новыми технологиями 5G, включая сетевое нарезание и граничные вычисления, которые способствуют улучшению мобильности и повышению качества пользовательского опыта. Авторы отмечают важность комплексного подхода к управлению мобильностью в сетях 5G, который учитывает как технические аспекты, так и удобство пользователей.

Таким образом, исследование Zaidi и др. акцентирует внимание на значении мобильности в сверхплотных сетях 5G, выявляя ключевые вызовы и возможные решения. В работе содержатся ценные сведения о технических сложностях и перспективах, подчеркивается необходимость целостного подхода к управлению мобильностью.

В 2020 году Gures E. и др. [200] представили всесторонний обзор ключевых аспектов управления мобильностью в сетях 5G, включая требования, архитектуру и вызовы. Авторы фокусируются на новых аспектах управления радиоресурсами, таких как состояния сна, процедуры начального доступа, регистрации и пейджинга, которые играют важную роль в мобильности современных сетей.

Исследование детально анализирует протоколы хэндовера между различными радиодоступными сетями (inter-RAN) в активном соединении, а также интеграцию миллиметровых волн (mmWave) с технологиями 5G.

Кроме того, в работе [201] представлен критический анализ требований к стратегиям управления мобильностью в сотовых сетях 5G. Авторы оценили существующие механизмы, разработанные органами стандартизации, а также исследовательские инициативы, с точки зрения их соответствия критериям надежности, гибкости и масштабируемости, необходимых для будущих стратегий управления мобильностью. Также были рассмотрены ограничения, связанные с проектированием и внедрением стратегий управления мобильностью в сетях 5G и последующих поколений. Представлены потенциальные альтернативные решения и их возможности для преодоления текущих сложностей.

В завершение исследования изложены перспективы развития механизмов управления мобильностью в сетях 5G и их дальнейшем развитии.

Анализ вышеперечисленных исследований позволяет заключить, что управление мобильностью играет ключевую роль в функционировании сотовых сетей, обеспечивая пользователям возможность свободного перемещения при поддержании стабильного соединения. Для этого необходимы усовершенствованные протоколы сигнализации, эффективное управление базами данных и надежная архитектура сетевой инфраструктуры.

Функция оптимизации надежности мобильности (MRO), разработанная в рамках Проекта партнерства третьего поколения (3GPP) как элемент самоорганизующейся сети (SON) [202], играет ключевую роль в управлении

мобильностью в сетях 5G [203]. MRO направлена на автоматизацию настройки параметров управления передачей обслуживания (HCPs) для обеспечения стабильного качества подключения пользовательского оборудования (UEs). В частности, она обеспечивает точную регулировку параметров, таких как время срабатывания (TTT) и запас передачи обслуживания (HOM), с минимальным вмешательством человека. Алгоритмы MRO оптимизируют соединение между UE и обслуживающими eNodeB, гарантируя, что качество связи остается на требуемом уровне или превышает установленные пороги во время передачи данных. Оптимизация мобильности в 5G NR имеет критическое значение для бесперебойной работы услуг и эффективного управления мобильностью, особенно в плотной городской застройке или при передвижении на высоких скоростях. Использование усовершенствованных алгоритмов хэндовера и анализа сетевых данных в реальном времени позволяет MRO минимизировать такие проблемы, как сбои в хэндовере, нестабильность радиоканала и эффекты пинг-понга. По мере совершенствования стандартов 3GPP MRO продолжит развиваться, адаптируясь к растущим требованиям сетей 5G NR.

Для реализации возможностей самоорганизующихся сетей (таких как самоконфигурация, самооптимизация и самовосстановление) в 5G и 6G необходимо существенно повысить уровень их интеллектуальности. Во-вторых, процесс оптимизации в сетях 5G и 6G требует углубленных исследований и значительных технологических разработок. Постоянное появление новых типов услуг, а также изменения в существующих сервисах создают серьезные вызовы. В текущих реалиях сети 5G и 6G все еще недостаточно развиты для автоматического обнаружения новых сервисов, определения подходящих механизмов их предоставления и формирования соответствующих срезов сети (network slice). В-третьих, сети 5G по-прежнему в значительной степени зависят от централизованной архитектуры, построенной на базе SDN (Software-Defined Networking), что снижает их

гибкость и надежность на фоне усложняющейся и гетерогенной структуры сотовых сетей [204].

В научной литературе было представлено множество алгоритмов MRO, направленных на решение проблем мобильности и дальнейшее совершенствование сетей [205-209]. Эти алгоритмы используют различные подходы, включая нечеткую логику, машинное обучение и другие методы, а также адаптируются к разным условиям развертывания, обеспечивая разные уровни точности и производительности. Однако, несмотря на разнообразие существующих алгоритмов MRO, пока ни один из них не способен предложить оптимальное решение. Определение идеальных значений триггеров для НОМ и ТТТ остается актуальной исследовательской задачей. В последние годы развитие транспортных систем привело к появлению новых вызовов в управлении мобильностью. Необходимы дополнительные исследования для создания оптимизированных функций, способных эффективно работать в высокоскоростных сценариях для различных приложений 5G и 6G. В этих сетях потребуются поддержка множества сценариев использования, включая сверхнадежную связь, требующую более эффективных процедур хэндовера.

Искусственный интеллект (ИИ) превратился в ключевую технологию, особенно в задачах, связанных с ручной настройкой, сложными вычислениями и адаптацией к динамическим условиям. Его способность выявлять закономерности в больших объемах данных и предоставлять аналитические выводы, недоступные человеку, делает его незаменимым в разных областях, включая беспроводные сети. ИИ объединяет междисциплинарные методы, такие как машинное обучение, теория оптимизации, теория игр и теория управления, причем машинное обучение (МО) и глубокое обучение играют решающую роль в беспроводных технологиях будущего. Эти методы применяются для оптимизации архитектур туманных и периферийных вычислений, перемещая вычислительные ресурсы ближе к пользователям. МО охватывает контролируемое обучение для предсказательных моделей, неконтролируемое обучение для выявления скрытых структур и обучение с подкреплением для принятия решений в изменяющихся условиях. Глубокое обучение улучшает интеллектуальные возможности сетей 5G, делая их более адаптивными к сложным задачам [210-212].

ИИ преобразует управление мобильностью в сотовых сетях, предлагая продвинутые способы оптимизации процессов, таких как хэндовер, обеспечивающий стабильную связь при перемещении пользователей. Хэндовер подразумевает переключение пользовательского оборудования (UE) между ячейками без потери соединения, решая проблемы, связанные с ослаблением сигнала, балансировкой нагрузки и ошибками в передаче данных.

ИИ автоматизирует процессы хэндовера, улучшая стабильность соединения. В частности, в рамках оптимизации устойчивости мобильности (Mobility Robustness Optimization, MRO) в 5G и 6G ИИ способствует автоматической настройке параметров хэндовера, таких как время активации (Time-to-Trigger, TTT) и порог передачи (Handover Margin, НОМ). Автоматизация этих параметров снижает необходимость вмешательства человека, поддерживая устойчивое соединение UE даже в сложных условиях и при высокоскоростном движении.

Таким образом, применение ИИ обеспечивает надежную и эффективную работу сетей, улучшая стабильность соединения и повышая производительность в сетях следующего поколения [213, 214].

Более детально, искусственный интеллект (ИИ) применяется для оптимизации параметров хэндовера в следующих аспектах:

### 1. Сбор данных и мониторинг

Оптимизация передачи с использованием ИИ базируется на детальном сборе данных и постоянном мониторинге параметров сети. Современные беспроводные сети создают большие объемы данных, включая уровень сигнала, соотношение сигнал/шум (SNR), поведенческие модели мобильности пользовательского оборудования (UE), нагрузку и уровень потерь пакетов. ИИ использует эти данные для оценки состояния сети и принятия решений. Этот процесс объединяет данные от базовых станций, сетевых систем управления и обратной связи от пользовательских устройств. Периферийные вычисления помогают локально обрабатывать информацию, сокращая задержки и повышая скорость реакции.

Мониторинг позволяет зафиксировать динамические изменения сети, такие как всплески трафика, ухудшение сигнала или усиление помех. Эти данные становятся основой для алгоритмов ИИ, которые выявляют закономерности, прогнозируют потенциальные сбои и оптимизируют параметры передачи. Эффективный сбор данных повышает точность моделей ИИ, позволяя сети адаптироваться к изменяющимся условиям. Автоматизируя мониторинг, операторы получают детализированные сведения о производительности сети, снижая затраты времени и ресурсов на ручной анализ [215].

### 2. Извлечение признаков

Этот этап играет ключевую роль в оптимизации хэндовера, так как он позволяет определить наиболее значимые переменные среди собранных

данных. Процесс направлен на выделение факторов, непосредственно влияющих на передачу, таких как RSSI, качество сигнала, скорость движения пользователя, загрузку соты и уровень помех. Методы ИИ, включая кластеризацию, анализ главных компонентов (РСА) и выбор признаков, позволяют уменьшить объем данных, удаляя нерелевантные или дублирующиеся сведения.

Извлечение признаков упрощает обработку сложных данных, сохраняя ключевые характеристики, необходимые для точного прогнозирования. Например, модель ИИ может определить, какие параметры сигнализируют о вероятном разрыве соединения, и задействовать упреждающее переключение соты. Такой подход снижает вычислительную сложность алгоритмов и повышает их точность. В условиях высокой плотности сетевого покрытия этот этап особенно важен, так как значительные объемы данных могут перегружать традиционные методы обработки. Эффективное извлечение признаков не только повышает точность ИИ-алгоритмов, но и позволяет сфокусироваться на действительно значимых аспектах передачи [216].

### 3. Обучение модели

Модели ИИ проходят тщательное обучение для повышения точности прогнозирования и принятия решений. Обучение основывается на исторических и смоделированных данных, что позволяет системе находить оптимальные стратегии для реальных условий. Применяется контролируемое обучение, при котором алгоритмы анализируют размеченные наборы данных, выявляя зависимости между входными характеристиками и ожидаемыми результатами, например, успешными хэндоверами или снижением потерь вызовов. Для этого используются методы, такие как опорные векторные машины, деревья решений и нейронные сети.



Обучение с подкреплением также играет важную роль в оптимизации хэндовера. В этом подходе модель взаимодействует с виртуальной средой, совершенствуя стратегию посредством проб и ошибок. Она получает вознаграждения за успешные решения и штрафы за неудачные. Со временем алгоритм адаптируется к динамическим условиям сети. Этот процесс требует значительных вычислительных ресурсов и доступа к большим объемам данных, однако позволяет модели эффективно работать в условиях высокой мобильности, изменяющейся нагрузки и помех. Обученная модель способна принимать точные решения, повышая качество обслуживания (QoS) [217].

#### 4. Оптимизация параметров хэндовера

ИИ позволяет сотовым сетям динамически адаптировать параметры хэндовера, обеспечивая стабильное соединение с минимальным вмешательством человека. Мониторинг таких метрик, как частота обрывов вызовов, задержки, качество сигнала и удовлетворенность пользователей, позволяет системе автоматически корректировать параметры хэндовера в режиме реального времени. Например, параметры TTT и NOM могут изменяться в зависимости от текущих условий. В зонах с высокой нагрузкой ИИ может перераспределять трафик или направлять пользователей в менее загруженные соты, снижая вероятность перегрузок.

Этот процесс устраняет зависимость от статических пороговых значений и ручной настройки, обеспечивая гибкость работы сети. ИИ позволяет мгновенно реагировать на изменения, такие как рост трафика или усиление помех. Постоянная оптимизация параметров снижает количество разрывов соединений, задержек и потерь пакетов, что улучшает QoS. Автоматизация процессов также снижает эксплуатационные затраты, позволяя операторам сосредоточиться на стратегическом развитии сети. Внедрение самооптимизирующихся механизмов ИИ способствует созданию более эффективных и интеллектуальных систем связи [218, 219].

## 5. Прогностическая аналитика

ИИ обеспечивает предсказание потенциальных проблем в сети, позволяя заранее корректировать параметры хэндовера. Анализируя исторические данные и текущие тренды, алгоритмы могут прогнозировать ухудшение сигнала, перегрузку сот и другие факторы, влияющие на качество связи. Это дает возможность предпринять превентивные меры, снижая вероятность сбоев. Например, система может предвидеть рост трафика в часы пик и заранее скорректировать параметры хэндовера для предотвращения перегрузок.

Проактивный подход ИИ значительно улучшает пользовательский опыт, повышая надежность сети, особенно в условиях высокой нагрузки. В городских центрах и на массовых мероприятиях такой метод помогает поддерживать устойчивость связи. Прогностическая аналитика также используется для стратегического планирования, помогая операторам оптимально распределять ресурсы. Таким образом, прогнозирование и адаптация в реальном времени позволяют ИИ значительно улучшить управление хэндовером в современных беспроводных сетях.

## 6. Непрерывное обучение

Этот метод позволяет моделям ИИ адаптироваться к изменяющимся условиям сети, совершенствуя свои стратегии на основе новых данных. В отличие от статических алгоритмов, модели с возможностью непрерывного обучения постоянно обновляются, анализируя результаты своих решений. Например, если выбор времени передачи приводит к разрыву соединения, система корректирует параметры, избегая повторения ошибки.

Методы онлайн-обучения и адаптивные алгоритмы позволяют сетям адаптироваться к новым технологиям и стандартам, включая переход с 5G на 6G. Это гарантирует устойчивость и эффективность работы сети, обеспечивая высокое качество обслуживания. Поддерживая процесс постоянного

обновления, системы ИИ способны справляться с новыми вызовами беспроводных коммуникаций.

### 3.3 Управление функциями оптимизации балансировки нагрузки в сетях 5G/6G

#### Обзор методов балансировки нагрузки

С ростом объемов мобильного трафика и увеличением числа подключенных устройств сверхплотные сети (UDN) становятся важнейшим элементом для обеспечения высокой пропускной способности и эффективной передачи данных. Современные сети 5G и перспективные технологии 6G ориентированы на повышение качества обслуживания (QoS) в условиях высокой плотности пользователей и устройств. Одной из главных задач для поддержания оптимальной работы сети в таких условиях является балансировка нагрузки. Она позволяет равномерно распределять трафик между узлами, снижая вероятность перегрузок и повышая качество связи.

В данной работе рассматриваются методы балансировки нагрузки на основе искусственного интеллекта, направленные на адаптивное управление ресурсами в сетях 5G и 6G. Эти методы используют данные в реальном времени и предиктивные алгоритмы, позволяя автоматически перераспределять нагрузку и адаптировать сеть к изменениям. Применение технологий машинного обучения и анализа больших данных способствует увеличению надежности и эффективности работы сети, помогая решать проблемы сверхплотных сетей и массового подключения устройств. Методы машинного и глубокого обучения становятся мощными инструментами для оптимизации сетей 5G и будущих 6G-систем.

Недавние исследования подтвердили потенциал балансировки нагрузки с применением ИИ для повышения производительности сети, улучшения использования ресурсов и обеспечения высокого качества пользовательского опыта (QoE) [220-222].

Возрастающая сложность сетевой инфраструктуры требует гибкого и интеллектуального подхода к управлению ресурсами, особенно в сетях 6G, где ИИ, как ожидается, сыграет ключевую роль на всех стадиях – от проектирования и развертывания до эксплуатации.

Понятие «умные города» (Smart Cities) было впервые сформулировано в 1994 году, однако стало особенно актуальным во время пандемии COVID-19, которая привела к массовому переходу различных сфер деятельности, таких как образование и культурные мероприятия, на цифровые платформы. Примерами таких решений являются автономные транспортные средства, системы управления дорожным движением, камеры с технологией распознавания, а также безналичные платежные платформы в финансовой сфере, как показано на рисунке 13.

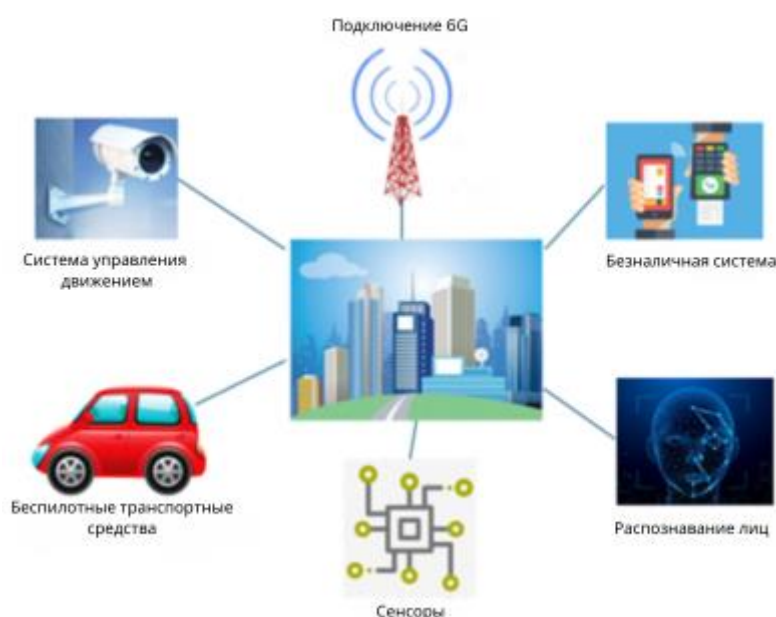


Рисунок 13 – Концепция умных городов с использованием мобильной технологии 6G и различных интеллектуальных сценариев применения

Эти технологии требуют более высокой скорости соединения и внедрения решений, основанных на искусственном интеллекте, для обеспечения массовых широкополосных и IoT-подключений. Ожидается, что мобильная технология 6G обеспечит значительный скачок в

производительности, предлагая более быстрые соединения, увеличенные скорости передачи данных и необходимую пропускную способность для таких сервисов. Прогнозируется, что возможности подключения 6G превзойдут 5G в 100–1000 раз, тогда как современный 5G уже поддерживает скорости на уровне 1–10 Гбит/с.

Хотя 5G значительно улучшил развитие IoT и других технологий связи, сети 6G смогут раскрыть весь потенциал искусственного интеллекта. Ожидается, что с их развитием возрастет количество IoT-ориентированных сервисов, обеспечивающих удобный доступ к персональным и экологическим данным, включая показатели окружающей среды, качество продуктов и уровень загрязнения воздуха в городах. Это усилит взаимодействие между пользователями и устройствами, сделав получение информации быстрее и доступнее.

В современных условиях важность развития городов, обладающих доступом к персональным и экологическим данным, возросла особенно сильно, что связано с влиянием пандемии на повседневную жизнь [223].

С расширением 5G и будущих 6G-сетей важную роль в обеспечении непрерывной связи для пользователей, перемещающихся между ячейками, будут играть эффективные механизмы хэндовера. Однако частые и ненужные переходы соединений, а также сбои, вызванные перегруженностью ячеек или низким уровнем сигнала, представляют собой серьезные проблемы. Эти недостатки не только ухудшают качество обслуживания (QoS), но и создают значительную нагрузку на сетевые ресурсы.

Функции самооптимизации, использующие искусственный интеллект и машинное обучение, рассматриваются как перспективные решения, способные динамически настраивать параметры хэндовера и улучшать производительность сети. Эти функции позволяют сетевым системам адаптироваться в реальном времени, компенсируя изменения сигналов и учитывая мобильность пользователей, что способствует повышению надежности соединений.

Балансировка нагрузки играет ключевую роль в решении этих проблем, поскольку она отвечает за равномерное распределение трафика внутри ячеек, предотвращая перегрузки и недоиспользование сетевых ресурсов. Оптимизация механизмов балансировки нагрузки необходима для устранения недостатков в процессах передачи соединений и поддержки стратегий самооптимизации.

Обзор существующих исследований по балансировке нагрузки охватывает анализ основных методологических подходов, выявление недостатков и изучение инновационных решений, направленных на их интеграцию с управлением хэндовером и функциями самооптимизации. Рассматриваемые методы предлагают способы повышения эффективности сети и улучшения пользовательского опыта в условиях сверхплотных сред.

#### Концепция функции оптимизации балансировки нагрузки

Согласно исследованию [224], оптимизация балансировки нагрузки является одной из ключевых задач сетей 5G и 6G, обусловленной ростом объема передаваемых данных и числа подключенных устройств. В условиях сверхплотных сетей (UDN) потребуется продвинутое управление нагрузкой для эффективного распределения ресурсов между ячейками, особенно с учетом интеграции малых сот в зоны макроячеек. Адаптивные методы балансировки нагрузки позволяют оптимизировать использование сетевых ресурсов, предотвращая перегрузки и улучшая качество обслуживания. Это критически важно для поддержания высокой производительности в зонах с интенсивным трафиком, обеспечения бесшовного соединения и повышения пользовательского опыта в сетях будущих поколений.

Исследование [225] указывает на то, что сети 5G и 6G будут характеризоваться более сложной архитектурой, связанной с развертыванием сверхплотных гетерогенных сетей (HetNets). Для эффективного распределения трафика и максимального использования сетевых ресурсов в ячейках разного типа, включая макро, микро и малые соты, особенно в

областях с высокой концентрацией пользователей, необходимо внедрение механизмов балансировки нагрузки.

#### Балансировка нагрузки в гетерогенных сетях

Одна из ключевых задач управления мобильностью в сетях 6G – обеспечение справедливой балансировки нагрузки между ячейками в гетерогенных сетях (HetNets) [226]. Балансировка нагрузки является неотъемлемой частью управления радиоресурсами беспроводной сети.

Малые ячейки размещаются в зонах с интенсивным трафиком для увеличения общей ёмкости сети. Они работают в дополнение к макроячейкам, компенсируя недостатки покрытия и снижая перегрузку в густонаселённых районах. Однако различия в мощности передачи между разными типами ячеек в HetNets создают проблему: традиционный метод ассоциации пользователей, основанный на максимальной мощности сигнала, приводит к значительному дисбалансу нагрузки [227].

Как правило, устройства подключаются к макроячейкам с наиболее сильным сигналом нисходящего канала, что приводит к их перегрузке. Это, в свою очередь, приводит к недоиспользованию малых ячеек, в которых количество подключенных пользователей значительно ниже, а конкуренция за радиоресурсы слабее. В то же время пользователи перегруженных базовых станций (BS) испытывают нехватку сетевых ресурсов, что снижает качество связи.

Для предотвращения перегрузки ячеек и истощения радиоресурсов необходимо внедрение эффективных методов балансировки нагрузки. На рисунке 14 представлена модель балансировки нагрузки в HetNet, в которой пользователи перегруженных макроячеек перераспределяются на менее загруженные макро- и малые ячейки, способствуя равномерному распределению нагрузки по сети.

Поддержка высоких объёмов данных и обеспечение высоких скоростей передачи являются важнейшими аспектами концепции интеллектуальных сетей 5G/6G.

Балансировка нагрузки – один из наиболее эффективных подходов к управлению растущими скоростями передачи данных. Этот процесс позволяет увеличивать ёмкость системы, контролируя перегрузку ячеек и оптимизируя распределение беспроводных ресурсов для множества подключенных устройств. Внедрение таких механизмов способствует повышению производительности сети, снижению эксплуатационных затрат, а также увеличению её адаптивности и доступности.

Продвинутые решения, такие как алгоритмы на основе машинного обучения, демонстрируют динамическую адаптивность, эффективно управляя нагрузкой и предотвращая перегрузки, что приводит к повышению общей производительности сети. Такой подход позволяет расширять ёмкость системы, а также улучшать качество обслуживания (QoS) для конечных пользователей.

#### Оптимизация балансировки нагрузки

Функция Load Balancing Optimization (LBO) представляет собой динамический механизм настройки параметров управления передачей соединений (HCP), предназначенный для балансировки нагрузки между соседними ячейками, частично перекрывающимися друг друга, иерархическими или смежными зонами покрытия.

В случае возникновения дисбаланса нагрузки алгоритм LBO позволяет ячейке автоматически регулировать параметры HCP и направлять пользовательские устройства (UE) от перегруженной ячейки в соседние, менее загруженные зоны с достаточной доступной ёмкостью. Такой механизм помогает оптимизировать использование ресурсов сети, повышая её эффективность и стабильность.

#### Оптимизация балансировки нагрузки в HetNets

Алгоритм Load Balancing Optimization (LBO) начинается с анализа текущей нагрузки в ячейках, после чего выполняется обмен необходимыми данными между соседними базовыми станциями (gNB). Эти сведения



используются для оценки состояния нагрузки каждой ячейки, которая может классифицироваться как низкая, средняя, высокая или перегруженная.



Рисунок 14 – Распределение нагрузки между ячейками на основе доступной ёмкости системы: пользователи, находящиеся на границе макроячеек с высокой нагрузкой, будут перенаправлены в ближайшие малые ячейки с более низким уровнем трафика или в макроячейки с относительно меньшей загрузкой

Полученный индекс нагрузки помогает определить, какая базовая станция (gNB) наиболее подходит для перераспределения пользователей. Алгоритм LBO активируется в случае перегруженности обслуживающей ячейки или при снижении уровня нагрузки целевой ячейки до среднего значения или ниже. Однако для активации LBO перегрузка в обслуживающей ячейке не должна достигать критического уровня.

Несмотря на то что алгоритм LBO разрабатывался для решения проблем мобильности, остаётся необходимость в более эффективных механизмах балансировки нагрузки [228-232].

Балансировка нагрузки направлена на предотвращение перегрузок путём равномерного распределения нагрузки между ячейками, что

достигается регулировкой параметров управления передачей соединений (НСР). Адаптивные алгоритмы LBO повышают общую ёмкость системы и минимизируют потребность в ручном вмешательстве в управление сетью, способствуя предотвращению перегрузки отдельных ячеек.

#### Подфункции алгоритма LBO

Система эксплуатации и обслуживания (O&M) управляет тремя дополнительными подфункциями LBO: отчётом о нагрузке, балансировкой нагрузки на основе передачи соединений и адаптацией конфигурации передачи с учётом требований балансировки нагрузки. Операторы могут добавлять дополнительные подфункции в зависимости от стратегии управления сетью.

Функция балансировки нагрузки (LB) реализуется через множество взаимосвязанных процессов. Компонент отчёта о нагрузке отвечает за обмен информацией о загрузке ячеек с соседними станциями. Для этого используются интерфейсы X2 и S2, предназначенные для сценариев внутри одной технологии LTE (intra-LTE) и между различными радиодоступными технологиями (inter-RAT) соответственно.

В сценариях intra-LTE передаются три ключевых класса данных: текущее использование радиоресурсов, индикаторы нагрузки (например, низкая, средняя, высокая или перегрузка) и ёмкость ячеек. Эти параметры позволяют системе O&M анализировать и сопоставлять ёмкость различных ячеек в пределах одной технологии радиодоступа. В сценариях inter-RAT передаётся только информация о ёмкости ячеек, что используется для оценки доступных возможностей балансировки нагрузки.

#### Активация балансировки нагрузки

Функция балансировки нагрузки активируется, когда ячейка инициирует передачу соединений из-за перегрузки, после чего вступает в действие процесс контроля приёма целевой ячейки. Этот процесс отличается от механизма контроля приёма, используемого в MRO, и учитывает специфические требования передачи соединений для оптимизации

балансировки нагрузки. Вторая важная подфункция – это адаптация конфигурации передачи, которая включает модификацию параметров передачи в целевых ячейках для адаптации к новым требованиям мобильности. Эта адаптация инициируется обслуживающей ячейкой, которая информирует целевую ячейку о новых настройках, причинах адаптации и возможных значениях параметров передачи.

После успешной валидации обслуживающая ячейка инициирует процедуру передачи, выполняя точную настройку параметров радиосвязи целевой ячейки и проверяя обратную связь перед окончательной адаптацией мобильности [233-235].

Из-за больших размеров зон покрытия и различий в мощности передачи традиционные процедуры хэндовера, основанные исключительно на измерениях уровня сигнала, могут приводить к избыточным передачам и нерациональному использованию сетевых ресурсов, особенно в условиях сверхплотных сетей. Этот дисбаланс наиболее заметен между макро- и малыми ячейками, где различия в мощности сигнала становятся ключевым препятствием для эффективного использования ёмкости сети.

Балансировка нагрузки между малыми и макроячейками в сверхплотных сетях 5G остаётся нерешённой задачей из-за значительных различий в уровнях мощности принимаемого сигнала. В результате традиционные механизмы передачи соединений неэффективны и приводят к недоиспользованию сетевых ресурсов, что отрицательно сказывается на стабильности соединений и качестве обслуживания пользователей.

Рисунок 15 демонстрирует процесс передачи соединений в сети 5G, охватывая как горизонтальные, так и вертикальные переходы, при которых активное пользовательское оборудование (UE) переключается между базовыми станциями (BS) различных gNB. Для обеспечения стабильности соединения и поддержания бесперебойной работы сети критически важно интегрировать несколько технологий радиодоступа, поскольку современные

сети зависят от передовых решений для обеспечения непрерывности сервиса [236].

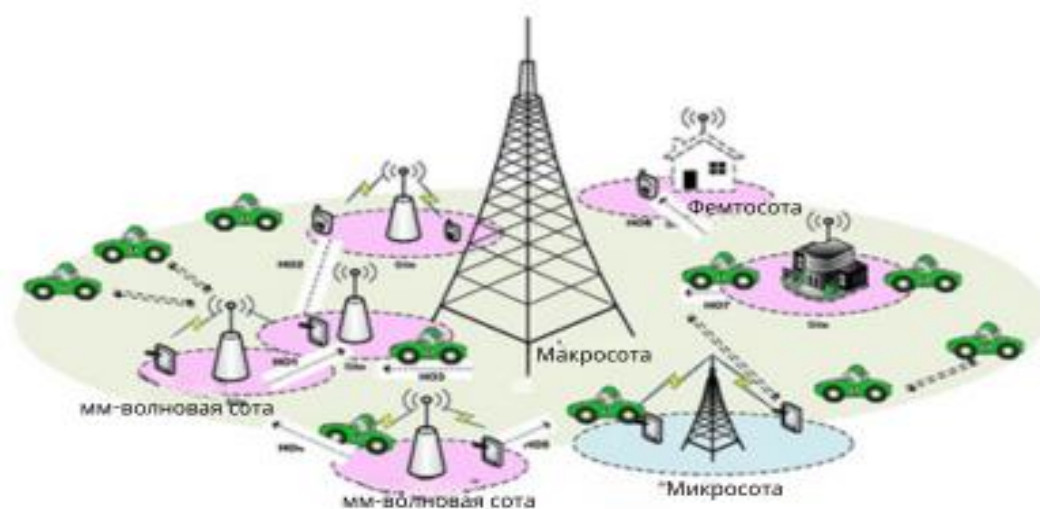


Рисунок 15 – Концепция различных сценариев передачи соединений в будущих гетерогенных сетях (HetNets) в контексте существующих сетей 5G [236]

Алгоритмы принятия решений о передаче соединений играют важную роль в этих процессах, поскольку параметры управления передачей соединений (НСР) определяют момент активации передачи, что критически важно при разработке стратегий оптимизации балансировки нагрузки (LBO). Различные алгоритмы были предложены для настройки НСР с целью достижения оптимальной балансировки нагрузки, и множество подходов подробно рассмотрено в научной литературе.

Однако в сетях 5G использование миллиметровых волн (mmWave) привело к сокращению зоны покрытия, что повысило вероятность передачи соединений (НОР), негативно влияя на производительность сети из-за мобильности пользовательского оборудования (UE).

Большинство существующих решений было разработано для 4G, которая имеет иные зоны покрытия и технические характеристики, поэтому они могут оказаться неэффективными для решения возникающих проблем в 5G. Это также усложняет поддержку мобильности на скоростях до 500 км/ч,

что значительно увеличивает вероятность передачи соединений (HOP), пиковую нагрузку в час (PPHP) и частоту отказов радиолинии (RLF).

Использование высокочастотных диапазонов также приводит к повышенному уровню прерываний вызовов (COR) и увеличенному времени прерываний (LOT), что снижает общую эффективность сети. Все эти вопросы должны быть решены в рамках будущих сетей, ориентированных на обеспечение бесшовного подключения в различных сценариях развертывания [237-239].

Ранее проведенные исследования выявили основные причины отказов передачи соединений (HOF) и ограниченность существующих решений. Стратегии балансировки нагрузки, которые были разработаны для сетей 2G, 3G и 4G, уже не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к сетям 5G и 6G.

В сетях 5G задача оптимизации балансировки нагрузки (LBO) требует комплексного подхода и инновационных решений, чтобы соответствовать передовым стандартам и спецификациям будущих сетей.

#### Проблемы оптимизации балансировки нагрузки

Несмотря на внедрение различных схем оптимизации балансировки нагрузки, ни один алгоритм не смог полностью решить проблемы, присущие гетерогенным сетям 5G. В данной работе анализируются функции балансировки нагрузки и связанные с этим вызовы, включая динамическую настройку параметров управления передачей соединений (HCP) в зависимости от состояния сети в реальном времени. Основные параметры, учитываемые при этом, включают отношение сигнал/интерференция+шум (SINR), доступные физические ресурсные блоки (PRBs) и скорость мобильности пользователей.

Исследования подтверждают необходимость разработки алгоритмов, способных динамически адаптироваться к изменяющимся условиям нагрузки, особенно в условиях высокой плотности малых ячеек. Это позволит увеличить

пропускную способность, повысить спектральную эффективность и снизить вероятность обрывов вызовов.

Согласно [240], оптимизация балансировки нагрузки в сетях 5G/6G связана с управлением большим объемом разнородного сетевого трафика в условиях сверхплотных сред. С увеличением количества малых базовых станций и пользовательских устройств балансировка нагрузки становится критически важной для предотвращения перегрузок и обеспечения высокого качества пользовательского опыта.

Разрабатываются современные методы балансировки нагрузки с применением машинного обучения, что позволяет эффективнее распределять трафик в сети, адаптируясь к динамически меняющимся условиям. Подходы, основанные на машинном обучении, улучшают производительность сети за счёт автоматической настройки параметров, включая управление передачей соединений и распределение нагрузки. Это снижает сложность сетевого администрирования и вероятность ухудшения качества связи.

Методы контролируемого, неконтролируемого и подкрепляющего обучения могут использоваться для постоянной корректировки параметров сети в реальном времени, обеспечивая бесшовные соединения даже в условиях высокой загрузки и динамических изменений в сети. Такая оптимизация позволит улучшить качество обслуживания, повысить устойчивость сети и снизить энергопотребление, продлевая срок её эксплуатации.

Кроме того, балансировка нагрузки играет важную роль в современных сетевых сценариях, таких как Интернет вещей (IoT), облачные вычисления, туманные вычисления и программно-определяемые сети (SDN). В этих областях критически важны эффективное распределение ресурсов и высокая надежность предоставляемых услуг.

В среде IoT правильное управление нагрузкой способствует стабильности и непрерывному подключению большого числа устройств. Это позволяет поддерживать интенсивную обработку данных в широком масштабе и сокращать время отклика системы [241].

Балансировка нагрузки также играет ключевую роль в туманных вычислениях, где обработка данных переносится ближе к периферии сети. Это уменьшает задержки и повышает общую эффективность работы сети, обеспечивая быструю реакцию систем на запросы пользователей [242].

С развитием облачных вычислений сложность балансировки нагрузки возрастает, поскольку необходимо управлять высокодинамичными нагрузками и оптимизировать использование виртуальных ресурсов. В исследовании [243, 244] рассматриваются проблемы предотвращения узких мест и эффективного распределения нагрузки в облачной инфраструктуре.

В области программно-определяемых сетей (SDN) методы балансировки нагрузки адаптированы с учетом преимуществ программируемой архитектуры. Это позволяет осуществлять динамическую маршрутизацию и эффективное управление трафиком. Согласно исследованиям [245-247], централизованное управление в SDN способствует повышению гибкости сети, позволяя корректировать распределение нагрузки в реальном времени и улучшать её масштабируемость.

Стратегии балансировки нагрузки, основанные на методах машинного обучения, позволяют предсказывать изменения в трафике и адаптировать ресурсы сети к изменяющимся условиям [248, 249]. Эти исследования показывают, что такие подходы уменьшают вероятность перегрузки сети и способствуют более эффективному распределению сетевых ресурсов в архитектуре SDN.

Отказоустойчивость является еще одной важной задачей в облачных вычислениях. Согласно [250], механизмы балансировки нагрузки должны минимизировать вероятность сбоев в обслуживании и обеспечивать высокую доступность сети, несмотря на растущий спрос со стороны пользователей.

Обзор существующих методов балансировки нагрузки в различных средах подтверждает их критическую роль в обеспечении эффективного использования ресурсов, стабильности сети и высокой производительности.

Современные сети всё больше ориентируются на интеллектуальные и адаптивные стратегии балансировки, позволяющие эффективно управлять нагрузкой с использованием технологий искусственного интеллекта. Это подтверждают как теоретические, так и прикладные исследования.

Последние разработки в области интеллектуальной балансировки нагрузки с применением методов искусственного интеллекта демонстрируют их высокую эффективность для программно-определяемых сетей (SDN) [251-254].

Как показывают эти исследования, балансировка нагрузки играет важную роль в распределении растущих объемов данных в современных сетях. Она позволяет удовлетворять требования различных вычислительных сред, повышая производительность, надежность и уровень удовлетворенности пользователей.

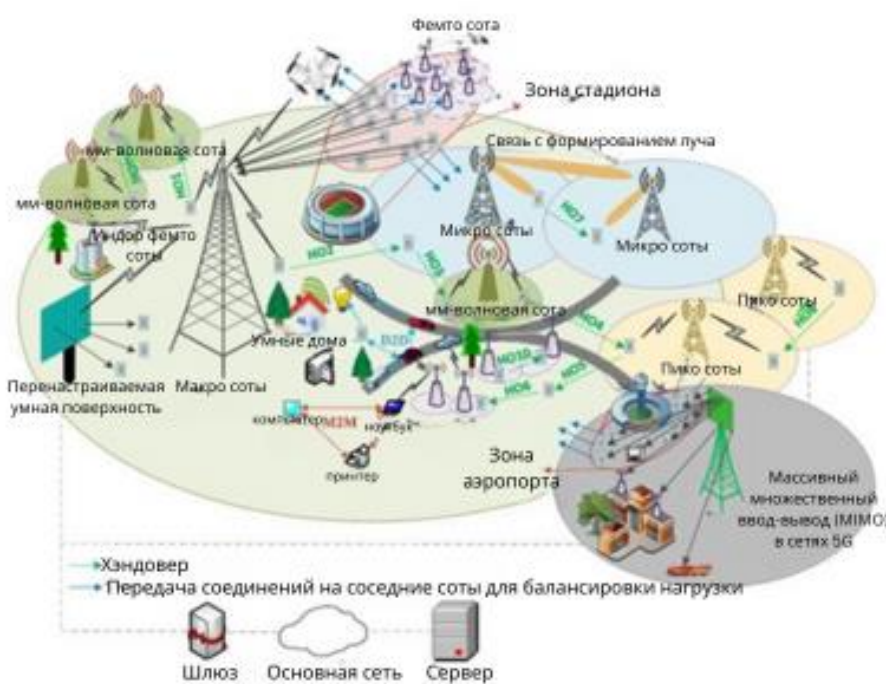


Рисунок 16 – Передача соединений и балансировка нагрузки в сверхплотных гетерогенных сетях (HetNets)

Тем не менее, это также приведёт к увеличению частоты передач соединений вследствие мобильности пользователей, особенно в сценариях с



высокой скоростью движения. Для мобильных пользователей крайне важны более эффективные и плавные процедуры передачи соединений, обеспечивающие высокое качество связи между пользовательским оборудованием (UE) и eNodeB. Хотя передача соединений является давно существующей частью мобильных сетей, её необходимо адаптировать к современным технологическим достижениям. Производительность сети, особенно в условиях мобильности, напрямую зависит от эффективности реализации процессов передачи соединений. Процедура передачи должна быть оптимизирована для пользователей с разной скоростью передвижения – от пешеходов до транспортных средств высокой скорости.

Кроме того, машинное обучение и глубокое обучение исследуются с целью оптимизации передачи соединений, в частности для определения наилучшего момента её активации. В данном исследовании рассматриваются эти вопросы и анализируется существующая литература по теме. На рисунке 2.5 представлены горизонтальные и вертикальные передачи соединений в различных условиях. Горизонтальная передача выполняется, если обслуживающая и целевая ячейки используют одну технологию радиодоступа (RAT). Вертикальная передача, напротив, происходит при смене RAT из-за перекрытия сетей. Например, макроячейка может передать соединение целевой SBS для увеличения скорости передачи данных UE либо вернуть UE в макроячейку при высокой скорости передвижения, чтобы минимизировать ненужные передачи. Однако вертикальные передачи увеличивают вероятность отказов передачи соединений и снижения производительности системы из-за различий между RAT. Таким образом, в гетерогенных сетях будущего уровень передач соединений будет расти стремительно.

Исследование [258] подчёркивает значимость оптимизации балансировки нагрузки в сетях 5G/6G для управления высокой плотностью

устройств и значительными требованиями к данным. По мере роста числа малых базовых станций в сверхплотных сетях адаптивная балансировка нагрузки в реальном времени становится необходимой для управления перегрузками и обеспечения стабильного качества обслуживания. Методы машинного обучения применяются для динамической настройки параметров сети, перераспределения трафика и балансировки нагрузки, что способствует удовлетворению требований мобильных систем следующего поколения, особенно в загруженных городских районах, снижает задержки и повышает эффективность сети.

Согласно [259], соответствующие алгоритмы динамически корректируют параметры передачи соединений для минимизации задержек и обеспечения стабильности сетей с высокой плотностью пользователей. В работе [260] описывается реализация адаптивной балансировки нагрузки с помощью методов машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ), которые перераспределяют трафик для снижения перегрузок и повышения надёжности сети. Такие подходы оптимизируют управление соединениями, эффективно распределяя ресурсы гетерогенных сетей. Это снижает задержки и повышает пропускную способность, что соответствует строгим требованиям мобильных систем нового поколения.

Авторы [261] утверждают, что гетерогенные сети требуют эффективного управления балансировкой нагрузки в условиях увеличенного трафика и высокой мобильности пользователей. Данный подход использует автоматическую весовую функцию для динамической корректировки параметров НСР (например, SINR, PRB и скорости пользователей), что способствует равномерному распределению нагрузки между малыми ячейками и улучшению общей производительности сети. Экспериментальные результаты показывают, что данный метод уменьшает дисперсию нагрузки, увеличивает пропускную способность, спектральную эффективность и снижает уровень обрывов соединений, решая ключевые проблемы 5G HetNets.

Статья [262] подчеркивает роль радиодоступной сети на основе ИИ (AI-RAN) в оптимизации балансировки нагрузки между ячейками. Это необходимо для эффективного использования сетевых ресурсов и поддержания высокого качества обслуживания в условиях сверхплотных сетей. Адаптивные алгоритмы, основанные на машинном обучении, динамически регулируют трафик, передачи соединений и распределение ресурсов для снижения перегрузок и уменьшения задержек. Такой метод повышает устойчивость сети и её способность соответствовать сложным требованиям систем связи будущего.

В соответствии с [263], интеллектуальные методы управления направлены на оптимизацию распределения радиоресурсов и снижение интерференции для эффективного использования сети, поддержания качества обслуживания и удовлетворения требований 5G-приложений. В исследовании [264] рассматриваются механизмы самооптимизации, позволяющие динамически управлять нагрузкой и перераспределять соединения из перегруженных ячеек в соседние, обладающие большими ресурсами. Этот метод снижает перегрузки, улучшает пользовательский опыт и оптимизирует ёмкость сети, используя продвинутые алгоритмы для решения проблем неравномерного распределения пользователей и мобильных сценариев.

Таким образом, балансировка нагрузки играет критически важную роль в оптимизации работы гетерогенных сетей 5G и 6G. Это особенно актуально для сверхплотных сред с высокой пользовательской активностью и увеличением трафика. Новый динамический алгоритм балансировки нагрузки с автоматической весовой функцией способен эффективно решать эти задачи, динамически настраивая HSP в реальном времени с учётом SINR, PRB и пользовательского опыта. Этот подход улучшает распределение нагрузки, снижает перегрузки сети, увеличивает пропускную способность, спектральную эффективность и уменьшает уровень обрывов соединений. Адаптивность метода и его высокая эффективность делают его

перспективным решением для мобильных систем будущего. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на обобщении результатов с включением дополнительных параметров, чтобы ещё больше повысить производительность в сложных сценариях мобильности, обеспечивая бесшовное подключение и стабильное качество обслуживания в сетях 6G.

### 3.4 Эффективные модели принятия решений по хэндоверу на основе технологий AI в сверхплотных сетях 5G

Интеллектуальные транспортные системы, умные энергетические решения, цифровые двойники, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), передовые технологии здравоохранения, кибербезопасность – ключевые сферы, в которых большие данные играют важную роль. Обширные массивы данных позволяют создавать более интеллектуальные системы по сравнению с традиционными подходами, а также существенно сокращают время отклика на пользовательские запросы. Модели машинного обучения и искусственного интеллекта способны соответствовать требованиям, предъявляемым к обработке больших данных в различных условиях. В сетях 6G особое внимание уделяется технологиям ИИ, которые планируется применять в управлении антенными системами, полнодуплексной связи, канальным оценкам, эквалайзингу, балансировке нагрузки и другим важным процессам. Управление хэндовером также окажется в центре внимания, поскольку переход на новые стандарты создаст множество проблем, связанных с передачей соединений в условиях сверхплотного развертывания сетей.

В литературе представлено множество исследований, касающихся применения ИИ для оптимизации хэндовера. В 2023 году Yazıcı İ. с соавторами подготовили обзор использования машинного обучения в различных сценариях, поддерживаемых мобильными системами будущего, а также анализ методов машинного обучения, необходимых для реализации интеллектуальных решений в современных и перспективных сетях [265].

Проведённый анализ объединяет имеющиеся исследования, формируя их целостный обзор. В статье рассматриваются варианты машинного обучения для будущих систем мобильной связи, включая обучение с учителем, обучение без учителя и обучение с подкреплением. Также подробно рассматриваются сценарии применения машинного обучения в беспроводных системах нового поколения, среди которых интеллектуальные транспортные системы, умные энергетические решения, кибербезопасность, цифровые двойники, беспилотные летательные аппараты и здравоохранение. В статье обсуждаются исследования, основанные на концепциях машинного обучения и искусственного интеллекта, а также представлены количественные результаты. Завершая обзор, авторы выделяют ключевые направления дальнейших исследований в области применения ИИ и машинного обучения в беспроводных сетях. Важной особенностью данной работы является то, что она опирается более чем на 170 источников, охватывая не только будущие мобильные технологии, но и смежные области применения машинного обучения.

С развитием новых стандартов мобильной связи значительно возрастают требования к пропускной способности, снижению задержек и повышению эффективности передачи соединений. Современные услуги предъявляют строгие требования к характеристикам хэндовера, а плотное развертывание сетей высокой частоты приводит к увеличению числа переключений. В результате возникает задача оптимизации хэндовера, так как существующие методы LTE и New Radio всё ещё основаны на сравнительно простых алгоритмах, анализирующих мощность сигнала. В 2020 году авторы [266] предложили метод оптимизации хэндовера в сетях 5G, основанный на рекуррентных нейронных сетях с дополнительной классификацией. В работе рассматриваются две архитектуры рекуррентных сетей: LSTM (Long Short-Term Memory – длинная краткосрочная память) и GRU (Gated Recurrent Units – управляемые рекуррентные блоки). На базе этих архитектур была реализована нейросеть, способная предсказывать количество пользователей в

сети 5G. Результаты экспериментов подтвердили, что архитектура GRU обеспечивает лучшие результаты за минимальное время, позволяя оперативно реагировать на изменения в среде. Согласно моделированию, точность прогноза трафика достигает 90 %. Метод LSTM также был использован в исследовании [267].

Основной задачей предиктивного хэндовера является улучшение показателей мобильности по сравнению с традиционными методами (включая MRO) за счёт обучения модели и оптимизации времени запуска хэндовера с учётом специфики мобильной среды. Такая модель использует в качестве входных данных измерения опорного уровня принимаемого сигнала (RSRP) от мобильной станции относительно  $K$  доступных ячеек. Она анализирует эти сигналы и обучается прогнозировать вероятность того, что определённая сота обеспечит наилучший уровень RSRP в будущем моменте времени  $J$ . Такой прогноз специфичен для географической зоны. Если целевая сота не является текущей обслуживающей ячейкой, но имеет наибольшую прогнозируемую вероятность, происходит переключение соединения. Таким образом, модель решает задачу многоклассовой классификации, которую нейросеть LSTM должна освоить.

Модель тестировалась в сложной промышленной среде и продемонстрировала улучшенные показатели за счёт сокращения числа отказов радиоканала и уменьшения общего времени простоя, связанного с мобильностью пользовательского оборудования. Полученные результаты подтверждают, что интеллектуальные методы управления хэндовером способны значительно повысить эффективность мобильных систем по сравнению с традиционными подходами.

В 2023 г. Lima J.H. и др. использовали в своем исследовании похожий метод. Они предложили метод глубокого обучения, использующий стандартные сигналы измерения мощности (RSRP) системы LTE [268]. Цель работы заключается в прогнозировании решения о передаче путем оценки условий в канале, которые приводят к триггерным событиям. Сначала авторы

проанализировали выходные данные радиоканала полученных в ходе симуляции и сбора данных в реальной сети. После этого была разработана модель глубокого обучения для оценки будущих образцов мощности сигнала с помощью LSTM. На выходе модель была дополнена классификатором, который выясняет, приводит ли входная последовательность данных к срабатыванию хэндовера. Предложенная авторами архитектура представлена на рисунке 17.

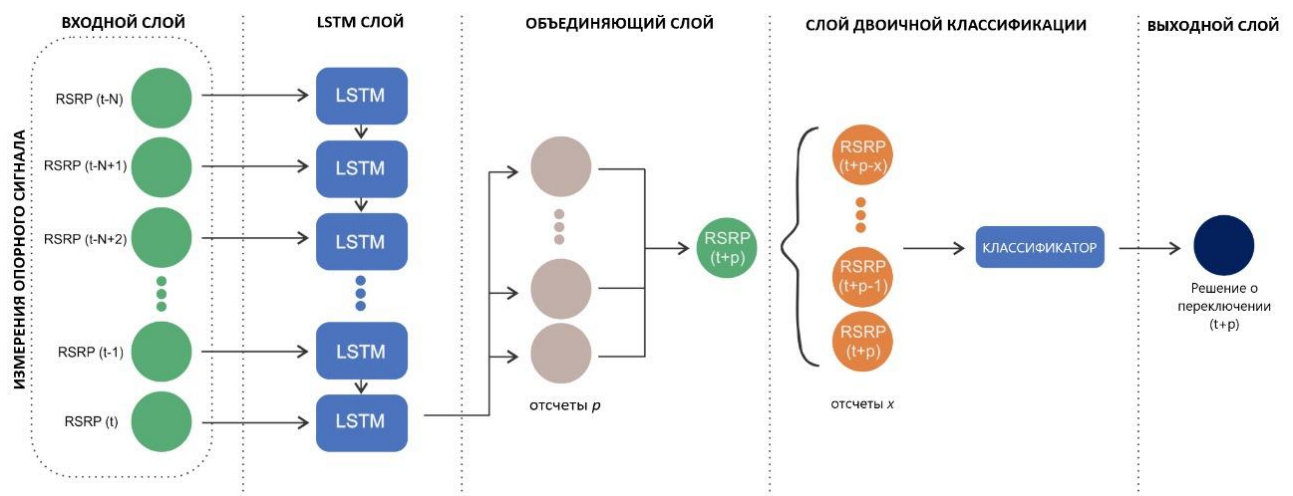


Рисунок 17 – Архитектура модели на основе LSTM для прогнозирования хэндовера [268]

Выходные данные модели могут быть адаптированы для различных приложений, обеспечивая более эффективную координацию сети во время процедуры хэндовера. Согласно результатам моделирования, нейросеть, использующая метод LSTM в сочетании с дополнительным классификатором, демонстрирует прогнозную точность, достигающую 97%.

Авторы работы [269] также реализовали нейронную сеть на базе LSTM, однако в ином контексте – для морских транспортных сетей. Современные возможности технологии 5G открывают перспективы внедрения автономных транспортных платформ в различных средах. Одной из таких сред является

морская, которая по сравнению с наземными сценариями сталкивается с особыми трудностями, особенно в аспекте передачи данных. Возможность предсказания параметров передачи данных может помочь в подготовке к потенциальным сбоям и их предотвращению. Для решения этой задачи машинное обучение предоставляет множество инструментов. В ходе экспериментов авторы продемонстрировали, что предсказание хэндовера в условиях полевых испытаний достигает 85% точности благодаря LSTM, обученной на основе смоделированных данных с учетом приблизительных параметров реальной системы, используя методику обучения с переносом.

Значительное количество исследований в области интеллектуального управления хэндовером сосредоточено на алгоритмах машинного обучения с подкреплением. Одним из таких решений для миллиметровых волн стала работа авторов [270]. Они предложили новую схему переключения, направленную на оптимизацию общей пропускной способности сети, снижение задержек, а также обеспечение заданного качества обслуживания (QoS) для каждого устройства пользователя. Разработанная схема хэндовера, получившая название O-MAPPO (Multi-Agent Proximal Policy Optimization – многоагентная оптимизация проксимальной политики), основана на методе обучения с подкреплением и выборе оптимальной базовой станции в качестве целевой. Предложенная система анализирует и регулирует производительность сети, учитывая совокупную пропускную способность и уровни задержек при соблюдении требований QoS для пользовательских устройств. По результатам моделирования было установлено, что этот метод превосходит альтернативный алгоритм обучения с подкреплением – DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient). Централизованное управление параметрами хэндовера в каждой ячейке больше подходит для мобильных сценариев. Shao S. и др. разработали самооптимизирующийся алгоритм управления параметрами передачи соединения для гетерогенных сетей LTE и связи видимого диапазона [271]. Алгоритм основан на методе Q-обучения и предназначен для оптимизации значения параметра Time-to-Trigger и



повышения пропускной способности мобильной станции. Авторы сосредоточились на алгоритме Q-обучения, которая подходит для работы с динамической средой HetNets. Q-обучение – это внеполитический алгоритм управления временной разницей в обучении с подкреплением. В Q-обучении агент пытается найти оптимальную политику в соответствии с историческим опытом взаимодействия с окружающей средой. В работе проведено моделирование для оценки влияния различных параметров алгоритма обучения (например, коэффициента компромисса, пространства состояний, количество временных слотов) на сходящуюся пропускную способность и скорость сходимости. Результаты моделирования показывают, что по сравнению с фиксированной схемой TTT алгоритм, основанный на Q-обучении, повышает среднюю пропускную способность на 25 % для мобильных пользователей. С увеличением количества временных слотов сходящаяся пропускная способность Q-learning приближается к оптимальной за счет снижения скорости сходимости.

В исследовании [272] предложена схема централизованного обучения с подкреплением (CRL, Centralized Reinforcement Learning), которая существенно повышает пропускную способность сети по сравнению с традиционными гибридными методами. В CRL процесс обучения сосредоточен в централизованном узле, что минимизирует накладные расходы на обмен данными. Работа [273] посвящена анализу стратегий хэндовера в рамках стандарта IEEE 802.11. В ней представлена модель, имитирующая процесс передачи соединения с учетом препятствий в реальной среде, основанная на глубоком обучении с подкреплением.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты активно применяются в таких сферах, как сельское хозяйство, развлечения, логистика и мониторинг, благодаря их высокой скорости, маневренности и широким возможностям. Для стабильной и продолжительной работы БПЛА в этих областях требуется надежное сетевое соединение, что делает необходимым разработку эффективных механизмов управления мобильностью. Однако

современные сотовые сети ориентированы на обслуживание наземных устройств, а не беспилотных летательных аппаратов. В 5G-сетях размеры сот значительно уменьшены, что приводит к учащению переключений между базовыми станциями и росту затрат на передачу сигнала, а также усложняет поддержание связи с БПЛА. К тому же, в отличие от наземных пользователей (gUE), беспилотники перемещаются в трехмерном пространстве с высокой скоростью, что создает дополнительные сложности. Эти особенности требуют специальной схемы принятия решений о передаче соединения, адаптированной для БПЛА.

Исследования [274, 275] предлагают модель управления хэндовером беспилотников, основанную на глубоком обучении с подкреплением, которая преодолевает ограничения предыдущих подходов. Разработанный алгоритм UND (UAV Handover Decision) использует в качестве входных параметров уровень сигнала (RSSI) от окружающих базовых станций, а также текущее положение БПЛА для оптимизации выбора целевой станции и определения оптимального момента переключения. Моделирование показало, что UND уменьшает количество ненужных хэндоверов, обеспечивая стабильное соединение по сравнению с существующими методами. Достижение этого результата связано с небольшим снижением RSSI, однако уровень сигнала остается в диапазоне, обеспечивающем устойчивую и качественную передачу данных. Предложенный алгоритм демонстрирует превосходство над схемами, основанными на Q-обучении.

В исследовании Kim G. и коллег [276] также применен алгоритм, основанный на глубоком обучении с подкреплением, для управления процессом хэндовера беспилотных летательных аппаратов. В ходе перемещения в воздушном пространстве БПЛА вынуждены выполнять частые переключения между базовыми станциями для поддержания устойчивого соединения. Однако традиционные алгоритмы, разработанные для наземных пользователей сотовых сетей, не учитывают особенности движения беспилотников, что может привести к возникновению эффекта «пинг-понг»,

при котором происходит избыточное количество хэндоверов. Кроме того, с увеличением высоты и скорости полета БПЛА возрастает вероятность нарушений в передаче данных. В данной работе авторы проанализировали актуальные тенденции в использовании обучения с подкреплением для совершенствования хэндовера беспилотных аппаратов в мобильных сетях. Также они предложили новые подходы к управлению сигналом, в которых применяется сочетание глубокого обучения с подкреплением и Q-обучения для повышения стабильности соединения.

Ожидается, что сети шестого поколения (6G) будут использовать многдиапазонные частотные технологии для увеличения пропускной способности и уменьшения задержек. Одним из перспективных направлений исследований в этой области является связь в видимом спектре (VLC, Visible Light Communication). Несмотря на преимущества VLC, существуют значительные проблемы, требующие решения. Ключевые сложности связаны с затуханием сигнала и физическими препятствиями в закрытых пространствах. В связи с этим точки доступа 6G должны выполнять функцию централизованных координаторов, принимая решения о передаче соединения. Для таких сценариев исследователи разрабатывают эффективные алгоритмы на основе машинного обучения. В частности, авторы работы [277] утверждают, что обучение с подкреплением более предпочтительно, чем глубокое обучение, так как оно не требует обработки больших объемов входных данных. Однако наиболее эффективным подходом считается их сочетание в виде DRL (Deep Reinforcement Learning), что позволяет адаптировать модель для сложных задач управления хэндовером в условиях сверхплотного развертывания сетей связи на основе VLC.

В своей работе авторы предложили протокол, обеспечивающий бесшовное переключение между точками доступа, а также алгоритм на базе DRL, который формирует адаптивный механизм хэндовера для гибридных 6G-сетей. Разработанный протокол дает мобильным устройствам возможность переходить на новую точку доступа без прерывания передачи данных по

нисходящей линии связи, что существенно снижает задержку при переключении и делает этот процесс незаметным для пользователя. В исследовании также представлено сравнение предложенной модели с существующими алгоритмами обучения с подкреплением. Моделирование показало, что средняя скорость передачи данных по нисходящей линии связи в предложенном методе превосходит показатели алгоритмов глубокой Q-сети (DQN), Sarsa и Q-learning на 8 %, 13 % и 13 % соответственно. Это свидетельствует о том, что алгоритм DRL, использующий стратегию уменьшения пространства воспроизведения опыта, демонстрирует более высокую эффективность обучения по сравнению с альтернативными методами, входящими в контрольную группу.

В исследовании [278] была реализована система двойного глубокого обучения с подкреплением (DDRL), предназначенная для минимизации вероятности отказов хэндовера, снижения числа потерь радиосигнала и уменьшения эффекта «пинг-понг» в сетях 5G, а также в будущих стандартах связи. Результаты моделирования показали, что предложенная схема управления хэндовером на основе DDRL с выключенной политикой превосходит существующие методы переключения соединений, применяемые в современных 5G-сетях.

Для будущих беспроводных сетей частотные диапазоны миллиметровых волн (mmWave) рассматриваются как перспективный вариант, поскольку способны удовлетворять требованиям высокой скорости передачи данных благодаря широкополосному спектру. Однако передача сигналов на дальние расстояния в этих диапазонах оказывается сложнее по сравнению с традиционными микроволнами, так как ммВолны имеют свойство сильно направляться, что требует более плотного размещения базовых станций (БС). С увеличением числа БС возрастает вероятность частых переключений (НО) пользовательского оборудования (UE). Это обуславливает необходимость эффективной стратегии НО, поскольку неудачно выполненный хэндовер может привести к частым переходам типа «пинг-понг» или сбоям

радиосигнала (RLF), что негативно сказывается на качестве связи. В этом контексте 3GPP в Release 16 представил условный хэндовер (CHO), который отличается от стандартных методов НО тем, что предоставляет UE возможность самостоятельно решать, необходимо ли выполнение переключения. В работе [279] предложена усовершенствованная схема управления CHO для систем mmWave, основанная на глубоком обучении с подкреплением (DRL), что позволяет оптимально балансировать между частотой хэндоверов и спектральной эффективностью. Результаты моделирования демонстрируют, что данный метод управления CHO на основе DRL превосходит традиционные решения НО, использующие гистерезис.

Некоторые исследования используют библиотеку XGBoost. Так, в работах [280, 281] этот алгоритм был применен для оптимизации хэндовера. Авторы сравнили XGBoost с алгоритмом «k Ближайших Соседей» (KNN, K-Nearest Neighbors), и результаты показали, что метод XGBoost превосходит традиционные механизмы хэндовера, построенные на основе KNN. Manalastas M. и соавторы расширили этот подход, рассматривая задачу прогнозирования ошибок хэндовера как проблему бинарной классификации. В данном контексте метки точек данных предсказываются путем сопоставления входных признаков с соответствующими классами. В исследовании [282] в качестве входных признаков использовались измерения, которые пользовательские устройства отправляют на БС и которые служат триггером для хэндовера. Основной метрикой авторы выбрали RSRP обслуживающей и целевой БС. Для решения задачи классификации исследовались шесть алгоритмов: вспомогательная векторная машина (SVM), наивный байесовский классификатор (NBC), дерево решений (DT), случайный лес (RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost) и k-Nearest Neighbors (KNN). Эти методы были выбраны с учетом их эффективности в качестве бинарных классификаторов, способности работать с ограниченными данными и простоты реализации.

Итоговые результаты показали, что XGBoost превосходит остальные алгоритмы, обеспечивая точность предсказания успешного хэндовера до 93%.

В работе [283] исследуется применение методов машинного обучения для организации передачи данных в гибридных сетях. Авторы предложили схему вертикального хэндовера между сетями WiFi и LiFi, основанную на искусственной нейронной сети. Данная модель учитывает параметры канала связи, доступность ресурсов и уровень мобильности пользователя. В отличие от предыдущих исследований, предложенный подход использует нейросеть для адаптивного обучения коэффициента, который корректирует приоритеты при выборе между WiFi и LiFi в зависимости от текущих условий.

В исследовании [284] проведен статистический анализ тенденций в области хэндовера и машинного обучения с учителем. Для построения модели использовались данные, собранные в течение 20 дней от мобильного оператора с клиентской базой более 2 миллионов абонентов. Разработанная модель машинного обучения позволяет предсказывать изменения успешности хэндовера в зависимости от параметров задержки наступления события A3, которое фиксируется, когда уровень сигнала от соседней БС превышает уровень сигнала обслуживающей БС на заданное значение. Аналогичный подход с анализом реальных данных был применен в работе [285], где использовался метод машинного обучения для уменьшения задержек в беспроводных сетях за счет автоматической замены некоторых традиционных и трудоемких процедур. Предложенная методика позволила сократить время, необходимое для сбора и обработки данных при выборе целевой соты во время процедуры межчастотного перехода.

Khoder R. и коллеги рассмотрели проблему вертикального хэндовера (VHO) в гетерогенных сетях, предназначенных для транспортных платформ [286]. В таких системах бортовое оборудование автомобилей может

подключаться к разным радиочастотным технологиям, что требует эффективного механизма переключения. Авторы отметили, что вертикальный хэндовер должен инициироваться при ухудшении качества обслуживания (QoS), вызванном помехами от других транспортных средств. В этом контексте было предложено решение на основе различных методов машинного обучения. В ходе исследования проведен детальный анализ эффективности различных алгоритмов, и было показано, что наиболее подходящим для данной задачи является метод случайного леса.

## 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ В СЕТЯХ 5G И 6G

### 4.1 Имитационные модели для оценки производительности сетей

Имитационные модели играют ключевую роль в оценке производительности сетей 5G, позволяя исследовать и оптимизировать различные аспекты их функционирования. Ниже представлены основные подходы и инструменты, используемые для моделирования сетей 5G:

Среды моделирования:

**AnyLogic:** Эта среда используется для разработки моделей распределенных сетей 5G. Например, была создана модель с одной базовой станцией и шестью вышками с различными параметрами (нагрузка, количество поступающих пакетов, приоритет) для оценки эффективности передачи данных и анализа влияния характеристик вышек на качество обслуживания пакетов данных [287].

**NI AWR Design Environment:** Применяется для моделирования аналогового радиотракта базовой станции 5G. В этой среде проводилась валидация модели усилителя мощности путем сравнения результатов измерений нелинейных параметров амплитудной характеристики СВЧ-усилителя, полученных на макете усилителя, с результатами симуляции нелинейной модели усилителя [288].

Моделирование трафика и сегментирование сети:

**Слайсинг сети (Network Slicing):** В интеллектуальных средах для оценки сегментирования сети по параметрам качества обслуживания (QoS) 5G моделируются системы передачи различных типов трафика между ретрансляционным узлом и микростанциями. Основное внимание уделяется задержке в восходящей линии связи и приоритетам между сегментами, что позволяет обеспечить качественное обслуживание различных приложений [289].

Модели и методы анализа:



Оценка характеристик сетей связи 5G: Анализ стандартов и рекомендаций международных организаций, таких как 3GPP и ETSI, выявил необходимость разработки комплексных моделей, учитывающих особенности методов управления доступом и механизмов резервирования ресурсов в сетях 5G. Это включает в себя построение моделей обслуживания абонентов на базовых станциях и специфику использования беспроводного интерфейса доступа на абонентском участке

Тестирование и валидация:

Тестирование 5G RAN: Включает моделирование масштабного трафика от устройств пользовательского оборудования (UE) для проверки производительности и надежности радиодоступа сети 5G. Это позволяет оценить гибкость и модульность архитектуры сети, а также ее способность поддерживать различные сценарии мобильности [290].

Прогнозирование ключевых показателей производительности (KPI):

Машинное обучение для прогнозирования KPI в сетях 5G и B5G: Операторы сетей сталкиваются с новыми вызовами, связанными с ростом трафика и появлением новых сервисов. В этой связи используются модели машинного обучения для оценки пропускной способности и других KPI в сетях 5G и B5G с использованием сквозных (E2E) сетевых слайсов. Это позволяет улучшить обеспечение качества обслуживания и оптимизировать управление сетью [291].

Таким образом, использование имитационных моделей в сочетании с современными инструментами и методами анализа позволяет эффективно оценивать и улучшать производительность сетей 5G, обеспечивая высокое качество обслуживания и адаптацию к растущим требованиям пользователей.

4.2. Разработка мобильного приложения для динамического сбора данных измерений в реальном времени

В 2024 году Shayeа и соавторы провели исследование эффективности мобильных широкополосных сетей (MBW) в условиях городских улиц в

Малайзии, Сингапуре и Таиланде [292]. Их работа была сосредоточена на анализе производительности MBV в сетях 3G и 4G с целью оценки качества связи и пользовательского опыта, что могло бы способствовать эффективному внедрению 5G в этих регионах. В исследовании подчеркивается необходимость точного измерения характеристик MBV в сетях 3G и 4G, особенно в условиях уличных сред, так как существующие данные не дают достаточной информации о покрытии, скорости, задержке и удовлетворенности пользователей. Это затрудняет планирование и развёртывание сетей 5G. В качестве решения в статье предложена комплексная методика измерения и оценки производительности MBV, включающая драйв-тесты и использование приложения Speedvideo для сбора ключевых показателей эффективности (KPI), таких как покрытие, скорость загрузки, задержка и качество работы видеостриминговых сервисов. Полученные результаты предназначены для выявления областей, требующих улучшений в инфраструктуре MBV, и помогают при проектировании сетей 5G. Методология включала проведение драйв-тестов с использованием смартфонов Samsung Galaxy S6 и prepaid SIM-карт различных операторов в крупных городах Малайзии, Сингапура и Таиланда. Приложение Speedvideo применялось для сбора данных по KPI, включая параметры покрытия, скорость загрузки, задержку и субъективную удовлетворённость пользователей (vMOS), измеренные во время потоковой передачи видео с различными разрешениями. Тестирование проводилось в стабильных условиях, а собранные данные систематически сравнивались по регионам и операторам, что позволило получить объективную картину работы сетей. Однако основное внимание исследование уделяло производительности видеостриминга, оставляя без рассмотрения важные 5G-приложения, такие как онлайн-игры, дополненная реальность (AR) и Интернет вещей (IoT), требующие минимальной задержки и высокой надёжности соединения. Кроме того, тестирование проводилось исключительно в городских условиях и в непиковые часы, что ограничивает возможность применения полученных

выводов к сценариям высокой нагрузки, сельским регионам и закрытым помещениям. Так как в исследовании не рассматривалась инфраструктура 5G, сделанные выводы в большей степени касаются ограничений 4G и могут не полностью учитывать особенности 5G-сетей.

В 2018 году Busari и коллеги оценивали производительность и вызовы, связанные с 5G-сетями MBW на миллиметровых волнах (mmWave) [293]. Исследование было направлено на анализ возможностей технологий mmWave, массивных MIMO и сверхплотных сетей (UDN) в обеспечении высоких скоростей передачи данных для будущих MBW. Авторы изучали влияние данных технологий на ёмкость сети и качество соединения. В статье предложена двухуровневая архитектура сети, сочетающая малые соты mmWave с традиционными макроячейками на микроволнах. Такой подход был направлен на повышение ёмкости сети при минимизации проблем, свойственных mmWave, включая значительные потери сигнала и высокую интерференцию. В исследовании использовались симуляции на уровне системы с применением 3D-канальных моделей 3GPP, что позволило точно воспроизвести различные условия распространения радиоволн и проанализировать ёмкость сети и спектральную эффективность в различных конфигурациях. Методология включала моделирование с учетом параметров, таких как SINR, полоса частот, мощность передатчика и коэффициент усиления антенны, с последующим сравнением работы макроячеек и малых сот в сценариях с пользователями как на открытых пространствах, так и внутри зданий. Результаты продемонстрировали, что технологии mmWave способны существенно повысить скорость передачи данных для пользователей на открытом воздухе, однако внутри помещений производительность снижается из-за высоких потерь при проникновении сигнала. Это указывает на необходимость дополнительных методов улучшения SINR в зданиях. Однако исследование имело ряд ограничений, включая использование идеализированных моделей каналов, которые могут не полностью отражать реальные сценарии интерференции и мобильности

пользователей. Кроме того, акцент на открытых пространствах и макроячейной структуре снижает применимость результатов для внутри зданий, где проблемы проникновения сигнала mmWave становятся наиболее критичными. В качестве направлений для будущих исследований авторы предложили оптимизацию алгоритмов формирования диаграмм направленности антенн и управления мощностью передачи, чтобы повысить стабильность соединения как на открытых площадках, так и в помещениях.

В 2022 году El-Saleh и соавторы провели исследование, направленное на измерение и оценку производительности сетей MBW и будущих тенденций развития 5G в Омане [294]. Основной целью работы было предоставление детальной информации о качестве существующих MBW-сетей (3G и 4G) в разных городах Омана для их последующего совершенствования и планирования внедрения 5G. В качестве решения предложена методика оценки производительности сети на основе ключевых показателей (KPI), таких как уровень сигнала, пропускная способность, задержка и частота передачи соединений, измеренные в ходе драйв-тестов в четырёх крупных городах (Маскат, Ибра, Сур и Бахла). Методология включала применение приложения G-NetTrack Pro на устройствах Samsung Galaxy, что позволило собирать данные по KPI в стандартизированных условиях для достижения высокой точности измерений. Полученные результаты дали объективную оценку работы сетей MBW в урбанизированных и пригородных зонах. Согласно итогам тестирования, сети 4G в целом демонстрируют стабильное покрытие, обеспечивая средние скорости загрузки и выгрузки данных на уровнях 8 Мбит/с и 13 Мбит/с соответственно. Однако исследование имеет свои ограничения: тестирование проводилось только на открытых пространствах, что не позволяет сделать выводы о производительности внутри зданий, где качество связи может значительно ухудшаться. Это особенно важно для будущих 5G-приложений, таких как IoT и критически важные сервисы, требующие высокой надёжности соединения. Также тесты не охватывали периоды пиковой нагрузки и не учитывали влияние мобильности

пользователей, что могло бы отразить поведение сети в более реальных условиях эксплуатации. В качестве дальнейших направлений исследований авторы рекомендуют расширение анализа на внутренние пространства и сельские регионы, а также проведение испытаний в условиях высокой нагрузки для более всесторонней оценки готовности сетей к развертыванию 5G.

В 2023 году El-Saleh и соавторы провели исследование, направленное на анализ производительности сетей 4G и 5G MBW в различных условиях Омана, уделяя особое внимание таким ключевым параметрам, как уровень сигнала, задержка, пропускная способность и стабильность соединения [295]. В данной работе рассматривается проблема нехватки детального анализа производительности сетей 4G и 5G в урбанизированных и сельских районах Омана, где текущие данные не дают полной картины ключевых параметров, необходимых для оптимизации пользовательского опыта и эффективного развертывания 5G. В качестве решения предложена методология оценки производительности 4G и 5G, основанная на полевых измерениях, охватывающая показатели качества сигнала, скорости передачи данных и стабильности соединения с целью получения более точного понимания текущего состояния сети и разработки стратегий внедрения 5G. Измерения проводились в пяти городах Омана с использованием смартфонов Samsung Galaxy A32 5G и приложения G-NetTrack для регистрации таких параметров, как уровень сигнала, качество соединения, задержка и пропускная способность. Для обеспечения всестороннего анализа применялись как драйв-тесты в условиях открытых пространств, так и замеры в помещении во время пеших испытаний, что позволило учесть широкий спектр сред, от густонаселённых городов до сельской местности. Полученные результаты выявили значительные различия в качестве связи в различных регионах, предоставляя ценные данные для улучшения сети. Однако исследование имеет свои ограничения, включая небольшую географическую выборку и ограниченный временной промежуток, что может не отразить всей динамики

работы 5G в Омане. Также отсутствует анализ работы сети в условиях высокой загрузки, влияние климатических факторов и тестирование в сценариях высокой мобильности, а специфические 5G-применения, такие как IoT и сверхнадежные сети с низкой задержкой, остались вне рассмотрения, что ограничивает полноту анализа.

В 2016 году Arshad и соавторы выполнили исследование, посвященное оценке производительности мобильных широкополосных сетей (MBB) в Пакистане [296]. Основной целью работы было восполнение пробела в данных о работе MBB в стране, с акцентом на параметры, критически важные для пользовательского опыта, такие как задержка, пропускная способность, джиттер и потеря пакетов. В рамках исследования было предложено использовать разработанное Android-приложение My Speed Test PK, предназначенное для измерения характеристик сети в реальном времени среди крупнейших пакистанских операторов сотовой связи (Ufone, Telenor, Zong, Warid и Mobilink). Это приложение позволяло пользователям самостоятельно собирать данные о производительности сети, что давало представление о надежности соединения и определении зон, требующих улучшений. Методология включала участие 102 пользователей из четырёх крупных городов Пакистана (Исламабад, Лахор, Карачи и Пешавар), которые в течение двух месяцев собирали данные при помощи My Speed Test PK. Среди ключевых измеряемых параметров были пропускная способность, задержка при доступе к популярным веб-ресурсам, уровень сигнала и задержка на последнем участке сети, которые анализировались по каждому оператору. Результаты показали, что сети 3G и 4G оператора Zong обеспечивали наилучшую пропускную способность, тогда как Mobilink продемонстрировал более высокое качество сигнала и стабильность задержки. В то же время у Ufone наблюдались высокие задержки на последнем участке соединения, что указывало на необходимость модернизации инфраструктуры. Однако исследование имеет ряд ограничений, включая фокус на урбанизированных зонах, что не позволяет учесть специфику работы MBB в сельских районах, а

также короткую продолжительность замеров, что могло не зафиксировать сезонные или пиковые вариации производительности сети.

В 2021 году Shayeа и соавторы выполнили анализ производительности MBV с акцентом на развитие 5G в урбанизированных районах Малайзии [297]. Исследование было направлено на оценку работы сетей 3G и 4G в качестве основы для внедрения 5G, с фокусом на четыре ключевых показателя: уровень покрытия, задержку, пользовательскую удовлетворённость и скорость передачи данных. Предложенным решением выступила методология оценки производительности сетей 3G и 4G, основанная на драйв-тестах и специализированных приложениях (MBV Explorer и Speedvideo) для анализа качества MBV при веб-серфинге и потоковой передаче видео. В рамках методологии проводились тестовые поездки по городским районам в четырёх малайзийских штатах (долина Кланг/Селангор, Джохор, Саравак и Сабах) с использованием смартфонов Samsung Galaxy S6. Замеры охватывали такие показатели, как уровень сигнала, задержка, скорость загрузки и качество видеопотока, с применением тестов на YouTube (720p и 1080p) и тестов загрузки веб-страниц. Результаты показали, что сети 4G значительно превосходят 3G по всем метрикам, обеспечивая лучшее покрытие и меньшую задержку. Однако исследование имеет ограничения, включая акцент исключительно на городской среде, без учета сельских территорий и внутренних помещений, а также отсутствие анализа приложений, специфичных для 5G. В качестве дальнейших шагов предлагается расширение покрытия и модернизация инфраструктуры 4G, что позволит использовать его в качестве платформы для развертывания неавтономных (NSA) 5G-сетей в Малайзии.

В 2020 году Shayeа и соавторы провели анализ производительности мобильных широкополосных сетей (MBV) в сельских районах Малайзии, сосредоточив внимание на технологиях 3G и 4G и их готовности к развертыванию 5G [298]. Исследование было направлено на анализ качества услуг MBV, включая просмотр веб-страниц и потоковую передачу видео, с

измерением таких показателей, как покрытие, задержка, пользовательская удовлетворенность и скорость загрузки в сельской местности, где сетевая инфраструктура обычно менее развита. В качестве решения предложен комплексный подход к измерению качества сети, включающий проведение драйв-тестов и использование специализированных инструментов (MBV Explorer для веб-серфинга и Speedvideo для потоковой передачи), позволяющих собирать данные о производительности сети. Испытания проводились в трёх малайзийских штатах: Джохор, Саравак и Сабах, при помощи смартфонов Samsung Galaxy S6. Методология позволила оценить такие параметры, как сила сигнала, время отклика сети, задержка отображения веб-страниц, скорость загрузки и качество видео (vMOS). Полученные данные показали, что сети 4G демонстрируют значительно более высокие показатели по сравнению с 3G, особенно в аспектах задержки, скорости загрузки и общего уровня удовлетворенности пользователей. Например, сети 4G обеспечили меньшую задержку и более высокие оценки vMOS, что указывает на лучший пользовательский опыт при просмотре веб-страниц и потоковой передаче. Однако исследование имеет ограничения, связанные с фокусировкой на тестах в сельской местности на открытом воздухе, без учета работы сети в закрытых помещениях и сценариях с высокой нагрузкой, что может привести к вариациям производительности в реальных условиях эксплуатации. В 2023 году El-Saleh и др. провели комплексный анализ производительности сетей MBV в Киберджае, Малайзия, сосредоточившись на технологиях 3G и 4G в различных городских условиях [299]. Целью этого исследования было устранение недостатка данных о производительности сетей MBV в густонаселенных городских районах с использованием ключевых показателей, таких как качество сигнала, пропускная способность, задержка и скорость передачи данных, для понимания и улучшения качества обслуживания в рамках подготовки к будущему развертыванию 5G. Предлагаемое решение включало обширные тесты с использованием приложения G-NetTrack для сбора показателей производительности MBV как



в помещениях, так и на открытом воздухе в Киберджае. Данные о мощности принимаемого опорного сигнала (RSRP), отношении сигнал/шум (SNR) и скорости загрузки/выгрузки были собраны у основных операторов мобильной связи (MNO), таких как Maxis, Celcom, Digi, U Mobile и Unifi. Результаты показали, что, хотя большинство MNO обеспечивали приемлемые скорости передачи данных вне помещений с максимальной средней пропускной способностью 14,3 Мбит/с для нисходящей линии связи и 7,1 Мбит/с для восходящей линии связи, покрытие внутри помещений было более сложным, и скорость передачи данных часто падала примерно до 2 Мбит/с. Ограничения этого исследования включают фокусировку на городских районах и ограниченный сбор данных в часы пик и непиковые часы, исключая более широкие условия, такие как сельские районы или различные сценарии мобильности.

На основе проведенного обзора исследований, приложение MBV Explorer использует следующие KPI для оценки качества веб-браузинга в мобильных сетях:

Уровень сигнала сотовой связи (дБм) – измеряет силу сигнала мобильной сети, что напрямую влияет на стабильность соединения.

Общее количество попыток обслуживания (количество) и средний коэффициент успешности отображения страниц – характеризует доступность веб-служб, фиксируя число попыток подключения и процент успешного отображения страниц.

Средняя пропускная способность загрузки страниц (кбит/с) – отражает скорость загрузки веб-страниц, что является критическим показателем удобства использования интернет-услуг.

Средняя задержка ответа страницы (мс) – показывает, сколько времени требуется серверу для ответа на запрос пользователя, влияя на скорость загрузки контента.

Средняя задержка отображения страницы (мс) – фиксирует временной интервал от момента запроса страницы до её полного отображения в браузере.

Средняя задержка RTT пинга (мс) – измеряет время приема-передачи пакетов данных между клиентом и сервером, что важно для оценки задержек в сети.

Эти ключевые метрики являются важными показателями качества веб-просмотра в мобильных сетях, предоставляя информацию о скорости, надежности и общем пользовательском опыте.

Таблица 3 представляет сравнительный анализ мобильных приложений, применяемых для измерения производительности сети в различных регионах и условиях эксплуатации.

Таблица 3 содержит сравнительный анализ различных мобильных приложений, используемых для оценки производительности мобильных сетей в разных странах, таких как Малайзия, Оман, Пакистан и другие. Рассматриваемые приложения включают Speedvideo, G-NetTrack, My Speed Test PK и MBV Explorer, с подробным описанием их методов тестирования, типов используемых устройств, ключевых показателей эффективности (KPI) и сред тестирования.

Обзор охватывает широкий спектр подходов к оценке сети, включая драйв-тесты и пешие обходы в различных условиях – как в городских, так и в сельских районах. Основное внимание уделено измерению покрытия, задержки, скорости передачи данных и удовлетворенности пользователей, что позволяет всесторонне оценить качество мобильных широкополосных сетей (MBV).

Таблица 3 – Сравнение исследований тестирования MBV по регионам и показателей эффективности

Авторы	Тестируемые регионы	Название мобильного приложения	Метод тестирования	Используемое устройство	Ключевые показатели эффективности (KPI)	Тестируемая среда
Shayea и др.	Малайзия, Сингапур, Тайланд	Speedvideo (Huawei)	Драйв-тесты с потоковым видео с разным разрешением	Смартфоны Samsung Galaxy S6	Покрытие Скорость загрузки Задержка vMOS	Вне помещения (Городские и густонаселенные районы)
El-Saleh A. A. и др.	Оман (5 городов)	G-NetTrack	Драйв тесты на открытом воздухе и пешие тесты в помещении	Samsung Galaxy A32 5G smartphones	Качество сигнала пинг Скорость передачи данных Скорость хэндовера Пропускная способность	Городские и сельские условия (в помещении и вне помещения)

	Карачи и Пешавар)		крупных городов)		Задержка на популярных веб-сайтах Уровень сигнала Джиттер и задержка последней мили	
Shayea и др.	городские районы Малайзии	MBB Explorer Speedvideo	Драйв тест в в городских районах четырех малазийских штатов	Samsung Galaxy S6	покрытие задержка удовлетворенность пользователей скорость	городская среда
Shayea и др.	Сельс кие местности Малайзии	MBB Explorer Speedvideo	Драйв тест в сельской местности	Samsung Galaxy S6	покрытие задержка удовлетворенность пользователей скорость	Сельские местности (Джохор, Саравак, Сабах)

На основании вышеизложенного обзора последних исследований мобильных приложений для оценки производительности сети выявлено, что исследователи применяли различные инструменты, включая Speedvideo, MBV Explorer и G-NetTrack, для измерения ключевых показателей эффективности в сетях 3G, 4G и 5G. Эти исследования показали недостатки существующих методов оценки, включая узкую специализацию на внутренних или наружных условиях и отсутствие всестороннего тестирования в различных сценариях, таких как часы пик, сельская местность и зоны высокой мобильности. Более того, большинство приложений в основном ориентированы на 3G и 4G, недостаточно учитывая специфические особенности 5G, такие как URLLC (сверхнадежная связь с низкой задержкой) и массовый Интернет вещей (IoT). В связи с этим возникает необходимость разработки более комплексного инструмента, который сможет учитывать новые развертываемые сети и их ключевые параметры. В ответ на эту проблему представленный проект направлен на создание нового мобильного приложения, которое устранил существующие ограничения.

Данная часть исследовательского проекта сосредоточена на разработке мобильного приложения, получившего название Mobile Robust Tester (MobTest). Основная цель MobTest — закрытие выявленных пробелов и обеспечение точной оценки производительности мобильных сетей. Приложение применялось для измерений в различных условиях, как в открытых пространствах, так и в помещениях. Разработка MobTest в качестве адаптивного инструмента для всестороннего анализа сетей способствует улучшению процессов планирования и оптимизации будущих сетей, гарантируя высокое качество связи для различных пользовательских сценариев.

Приложение MobTest создано на языке Dart с использованием фреймворка Flutter. Выбор Flutter обусловлен его кроссплатформенными возможностями, что позволяет приложению работать как на Android, так и на iOS, требуя минимальных изменений кода. Это обеспечивает широкий охват

пользователей и упрощает процесс обновления, поскольку изменения могут внедряться единообразно на всех платформах. Flutter также предлагает высокую производительность и богатый набор виджетов, что позволяет создавать современные и интерактивные пользовательские интерфейсы — ключевой аспект для приложения, предназначенного для визуализации данных о сети.

Язык Dart, являясь основным для Flutter, был выбран за интеграцию с этим фреймворком и эффективную обработку асинхронных операций, которые имеют решающее значение для сетевых задач. Асинхронное программирование в Dart упрощает работу с сетевыми данными, обеспечивая непрерывное обновление информации о сети в реальном времени, а также обработку пользовательских взаимодействий, не снижая отзывчивость приложения. Сочетание Dart и Flutter делает их мощным инструментом для разработки приложений, которые требуют интерактивной визуализации данных и обработки информации в реальном времени.

Ключевые особенности мобильного приложения:

Мониторинг сети в реальном времени:

MobTest использует `PhoneStateListener` и `TelephonyCallback` для непрерывного обновления данных о сети. Приложение применяет API, такие как `TelephonyDisplayInfo` (доступен на Android 12+), что позволяет точно определять соединения 5G, LTE и LTE+. Данная функция особенно полезна для пользователей, отслеживающих изменения сети, а также для приложений, которым необходимы детализированные данные о подключении.

Приложение также включает функцию оценки производительности сети через одновременную загрузку нескольких веб-страниц. Для каждой страницы фиксируются время загрузки и другие ключевые показатели, которые в совокупности с данными об устройстве (например, уровень сигнала, местоположение) передаются на сервер для последующего анализа. Данная функция позволяет оценить пропускную способность сети и ее эффективность при различных уровнях нагрузки.

Сбор и обработка данных:

MobTest фиксирует уровень и тип сетевого сигнала, позволяя пользователям в режиме реального времени следить за состоянием сети. Это особенно актуально для мобильных пользователей, поскольку дает объективную оценку стабильности сети в различных условиях. Анализируя эти параметры, пользователи могут лучше понимать поведение сети в разных географических локациях.

Приложение собирает детализированные сведения о сети, включая:

Тип сети (LTE+, 5G и др.),

Название оператора связи (например, Activ),

Уровень сигнала (в дБм),

Мобильный код страны (MCC),

Код мобильной сети (MNC),

Код зоны местоположения (LAC),

Идентификатор соты,

Данные о производительности сети (скорость загрузки страниц, URL-адреса, время отклика) и географическое местоположение (широта, долгота).

Эти сведения автоматически отправляются на сервер и отображаются на панели управления, обеспечивая администраторам и пользователям полное представление о текущем состоянии сети. Такой высокий уровень детализации делает MobTest ценным инструментом для диагностики, анализа и оптимизации сетевой инфраструктуры. По мере поступления новых данных функция обрабатывает их в режиме реального времени. Входящие данные `signalData` включают различные параметры сети, такие как:

- **Signal Strength:** Уровень принимаемого сигнала,
- **lac:** Код области местоположения,
- **apn:** Имя точки доступа (Access Point Name),
- **cid:** Идентификатор ячейки (Cell ID),
- **mcc:** Код мобильной страны (Mobile Country Code),

- **mnc**: Код мобильной сети (Mobile Network Code),
- **networkType**: Тип сети (например, 4G, 5G).

Мобильное приложение **MobTest** собирает данные во время драйв-тестов и передает их на сервер. Сервер обрабатывает эту информацию и отображает её на мониторинговом дашборде в виде таблицы. Таблица структурирует собранные данные по следующим колонкам:

1. **Test Time** – Время проведения теста.
2. **Test Type** – Тип теста, указывающий цель измерения (например, проверка уровня сигнала или тест скорости сети).
3. **Device Model** – Модель устройства (например, Samsung SM-G781B).
4. **Device ID** – Уникальный идентификатор устройства.
5. **Phone Number** – Номер телефона (при необходимости скрыт или зашифрован).
6. **Network Type** – Тип сети, в которой работает устройство (например, LTE, 5G).
7. **Operator** – Название мобильного оператора (например, Activ).
8. **Signal Strength** – Уровень сигнала сети, измеряемый в dBm.
9. **MCC/MNC** – Код мобильной страны и код сети оператора.
10. **LAC** – Код области местоположения.
11. **Cell ID** – Уникальный идентификатор ячейки сети.
12. **URL** – Адрес запрашиваемой страницы во время теста.
13. **Response Flag** – Статус выполнения запроса (например, Success или Fail).
14. **Page Response** – Время отклика страницы, измеряемое в миллисекундах.
15. **Page Download Speed** – Скорость загрузки страницы, измеряемая в Кбит/с.
16. **Latitude/Longitude** – Географические координаты местоположения теста.
17. **Ping** – Задержка сети (ping), измеряемая в миллисекундах.



Данная структура позволяет эффективно анализировать собранные данные и предоставляет детальное представление о производительности сети в различных условиях. Часть собранных данных представлена на Рисунке 18.

Рисунок 18 – Пример собранных данных

Фрагмент кода, приведенный на рисунке 19, иллюстрирует процесс инициализации приложения Flutter с использованием виджета MaterialApp, который задает основную архитектуру интерфейса, определяет ключевые параметры навигации и настраивает визуальную тему приложения.

```

@override
Widget build(BuildContext context) {
  return MaterialApp(
    theme: ThemeData(
      useMaterial3: true,
      colorSchemeSeed: const Color(0xFF4376F8),
    ), // ThemeData
    initialRoute: '/',
    routes: {
      '/': (context) => const FirstScreen(),
      '/info': (context) => const MyHomePage(),
      '/curl': (context) => const Curl(),
      '/video': (context) => const Video(),
      '/about': (context) => const About(),
      '/config': (context) => ConfigPage(),
    },
  ); // MaterialApp
}

```

Рисунок 19 – MobTest: Конфигурация маршрута и реализация тематизации

Функция `checkAndRequestPermission`, представленная на рисунке 2.9, предназначена для обеспечения того, чтобы приложение обладало необходимыми разрешениями для доступа к данным устройства и местоположению, критически важным для его основной функциональности.

Функция сначала проверяет, есть ли у приложения доступ к данным телефона, используя `Permission.phone.isGranted`. Если соответствующее разрешение отсутствует, система предлагает пользователю предоставить его, вызывая `Permission.phone.request()`. Аналогично, функция проверяет доступ к геолокации через `Permission.location.isGranted` и при отсутствии разрешения отправляет запрос на его предоставление.

Оба разрешения необходимы для точного сбора данных о параметрах сети и местоположении устройства. Такой подход гарантирует, что приложение имеет требуемый доступ для выполнения ключевых сетевых и геолокационных операций, что улучшает пользовательский опыт, повышая точность данных. Это наглядно продемонстрировано на рисунке 20.

```

Future<void> checkAndRequestPermission() async {
  if (!await Permission.phone.isGranted){
    PermissionStatus phoneStatus = await Permission.phone.request();
    if (!phoneStatus.isGranted){
      checkvar++;
    }
  }

  if (!await Permission.location.isGranted){
    PermissionStatus locationStatus = await Permission.location.request();
    if (!locationStatus.isGranted){
      checkvar++;
    }
  }

  if (checkvar == 0) {
    if (kDebugMode) { print("----- Доступ предоставлен."); }
    functions.collectDeviceInfo();
    functions.fetchNetworkInfo();
    functions.startListeningSignalStrength(); // Запуск слушателя при старте приложения
    functions.startLocationUpdates();
    functions.getUserLocation();
    await fetchConfig();
  } else {
    if (kDebugMode) { print("----- Доступ к разрешениям отклонен. Переход в настройки."); }
    _showPermissionDialog(); // Check if mounted before showing dialog
    setState(() {
      statusText = "Ошибка, необходимые разрешения отсутствуют.";
    });
  }
}
}

```

Рисунок 20 – Запрос разрешения и логика инициализации MobTest

Функция `startChecking` иницирует непрерывный процесс проверки URL-адресов в списке с целью поддержания активного сеанса путем включения функции `WakelockPlus`, которая предотвращает переход устройства в спящий режим, как показано на рисунке 21. Сначала функция устанавливает `isChecking` в значение `true`, указывая на то, что процесс проверки активен.

```

void startChecking() {
    WakelockPlus.enable();
    setState(() {
        isChecking = true;
    });

    _checkingFuture = Future.doWhile(() async {
        if (!isChecking) return false; // Проверка на остановку

        if (index >= urls.length) {
            index = 0; // Сброс индекса
        }
        Functions().displayLog("Проверка URL: ${urls[index]}");
        setState(() {});
        await Functions().checkUrl(urls[index]);
        List<Future> futures = urls.take(10).map((url) => Functions().checkUrl(url)).toList();
        futures.addAll( urls.take(10).map((url) => Functions().checkUrl(url)).toList());
        await Future.wait(futures);
        index++;
        setState(() {});

        return true; // Продолжать цикл
    });
}

```

Рисунок 21 – Мониторинг URL-адресов и асинхронное управление задачами в MobTest

Далее применяется цикл `Future.doWhile`, который выполняет асинхронные проверки URL-адресов и повторяет их до тех пор, пока `isChecking` остается истинным. В каждом итерационном цикле код проверяет, достиг ли текущий индекс конца списка URL-адресов. Если это произошло, индекс сбрасывается в ноль, что позволяет процессу перезапуститься с начала списка.

Для каждого URL-адреса функция регистрирует процесс проверки с помощью `displayLog`, а затем вызывает `checkUrl` для выполнения асинхронного запроса. С целью оптимизации создается список задач `Future`, в котором одновременно обрабатывается до 10 URL-адресов. Эти задачи добавляются в список `futures`, а затем `Future.wait` ожидает завершения всех процессов в пакете, прежде чем перейти к следующему набору URL-адресов. Такой подход к параллельной обработке значительно уменьшает время проверки веб-адресов.

После завершения проверки каждого URL-адреса индекс увеличивается, и цикл продолжается. На уровне пользовательского интерфейса этот процесс выглядит так: при нажатии кнопки “Начать” приложение MobTest начинает непрерывное открытие заданных URL-адресов, пока пользователь не нажмет кнопку “Завершить”.

Функция `checkUrl`, представленная на рисунке 22, вызывается основным процессом проверки для выполнения HTTP-запроса к указанному URL. Она собирает важные данные о сети и устройстве, а затем передает их на сервер. Такая детальная реализация гарантирует полноценный мониторинг сети, обеспечивая точную диагностику и анализ данных.

```
Future<void> checkUrl(String url) async {
  if (kDebugMode) {
    print("Проверка URL: $url");
  }

  final stopwatch = Stopwatch()..start();
  try {
    final response = await http.get(Uri.parse(url));
    stopwatch.stop();

    final downloadSpeed = stopwatch.elapsedMilliseconds > 0 ? response.contentLength! / stopwatch.elapsedMilliseconds / 1000 * 8 : 0;
    //String pingTime = '0'; //await ping(url);
    String pingTime = await ping(url);
    if (kDebugMode) {
      print(DateTime.now());
    }
    // Собираем все данные
    final data = {
      'TestType': 1,
      'TestTime': DateTime.now().toString(),
      'IMEI': deviceData['imei'],
      'Device': deviceData['marka'],
      'DeviceModel': deviceData['model'],
      'DeviceModelCode': deviceData['modelCode'],
      'PhoneNumber': networkInfo!['myPhoneNumber'],
      'NetworkType': networkInfo!['networkType'],
      'Operator': networkInfo!['operatorName'],
      'SignalStrength': networkInfo!['signalStrength'],
      'MCC': networkInfo!['mcc'],
      'MNC': networkInfo!['mnc'],
      'LAC': networkInfo!['lac'],
      'CellID': networkInfo!['cid'],
      'URL': url,
      'ResponseFlag': response.statusCode == 200 ? "Success" : "Fail",
      'PageResponseLatencyMS': stopwatch.elapsed.inMilliseconds,
      'PageDownloadSpeedKBPS': downloadSpeed,
      'Latitude': userPosition?.latitude ?? 'Unknown',
      'Longitude': userPosition?.longitude ?? 'Unknown',
      'PingTime': pingTime,
      'Speed': (speed * 3.6).toStringAsFixed(2),
      'AppVersion': version,
      'DeviceId': networkInfo!['deviceId'],
    };

    // Отправляем данные на сервер
    await sendDataToServer(data);
  } catch (e) {
    if (kDebugMode) {print('Ошибка при проверке URL: $e');}
    displayLog("Ошибка при проверке URL: $e");
  }
}
```

Рисунок 22 – Функция проверки URL-адресов и сбора данных

При запуске функция `checkUrl` активирует секундомер для измерения времени отклика HTTP-запроса. Затем она выполняет GET-запрос к указанному URL-адресу и рассчитывает скорость загрузки, деля размер содержимого на прошедшее время, что позволяет оценить производительность передачи данных. Помимо этого, функция измеряет время пинга, что дополнительно помогает оценить скорость отклика сети.

Вдобавок к показателям производительности сети, `checkUrl` собирает разнообразную информацию об устройстве, включая IMEI, марку и модель телефона, имя оператора, уровень сигнала и данные о местоположении (широта и долгота). Все эти сведения объединяются в структурированный объект данных, который содержит такие параметры, как тип теста, временная метка, уровень сигнала, MCC, MNC, LAC, CID и статус URL-адреса (успешно обработан или недоступен в зависимости от статус-кода ответа).

После сбора всех параметров функция вызывает `sendDataToServer`, чтобы передать эти данные на сервер для дальнейшего анализа. В режиме отладки `checkUrl` логирует детальную информацию о проверке URL и фиксирует ошибки, возникшие в ходе выполнения запроса. Такой метод обеспечивает детализированный снимок состояния сети и устройства при каждой проверке URL-адреса, что упрощает глубокий мониторинг и анализ производительности сети.

Функция `startListeningSignalStrength`, представленная на рисунке 23, предназначена для получения данных о мощности сигнала и сетевом подключении в режиме реального времени. Перед запуском проверяется, имеются ли необходимые разрешения на доступ к местоположению телефона. Если разрешения уже предоставлены, функция устанавливает соединение с `EventChannel` (конкретно с `kz.aituester/signalStrength`) для прослушивания обновлений уровня сигнала. Этот канал передает сетевые данные в непрерывном режиме, а их обработка выполняется с помощью `signalStrengthSubscription`.

```

void startListeningSignalStrength() async {
  if ( await Permission.phone.isGranted && await Permission.location.isGranted) {
    const signalChannel = EventChannel('kz.aitutester/signalStrength');
    signalStrengthSubscription = signalChannel.receiveBroadcastStream().listen(
      (dynamic signalData) {
        if (kDebugMode) {print('${DateTime.now().toString()} Received signal strength data: $signalData');}
        networkInfo?['signalStrength'] = signalData['signalStrength'] ?? "Unavailable";
        networkInfo?['lac'] = signalData['lac'] ?? "Unavailable";
        networkInfo?['apn'] = signalData['apn'] ?? "Unavailable";
        networkInfo?['cid'] = signalData['cid'] ?? "Unavailable";
        networkInfo?['mcc'] = signalData['mcc'] ?? "Unavailable";
        networkInfo?['mnc'] = signalData['mnc'] ?? "Unavailable";
        networkInfo?['networkType'] = signalData['networkType'] ?? "Unavailable";
      },
      onError: (error) {
        if (kDebugMode) {print('Error listening to signal strength: $error');}
      },
    );
    startLocationUpdates();
  }
}

```

Рисунок 23 – Реализация сканирования уровня сигнала в реальном времени

Каждый извлеченный параметр записывается и сохраняется в карте `networkInfo`. Если какой-либо фрагмент данных отсутствует, ему присваивается значение по умолчанию — «Недоступно». В режиме отладки функция фиксирует временную метку и полученные данные, что позволяет осуществлять мониторинг и отслеживание информации.

Функция `startLocationUpdates`, представленная на рисунке 24, инициализирует процесс отслеживания местоположения и измерения скорости устройства в режиме реального времени с настройками высокой точности. В начале она задает `locationSettings` с максимальной точностью и `distanceFilter` в 5 метров, что означает, что координаты будут обновляться каждые 5 метров движения.

Далее функция активирует `positionStream`, вызывая `Geolocator.getPositionStream`, который непрерывно отслеживает изменения местоположения устройства в соответствии с установленными `locationSettings`.

```

void startLocationUpdates() {
    const LocationSettings locationSettings = LocationSettings(
        accuracy: LocationAccuracy.high,
        distanceFilter: 5, // Обновление каждые 10 метров (можно изменить)
    );

    positionStream = Geolocator.getPositionStream(locationSettings: locationSettings)
        .listen((Position position) {
            userPosition = position;
            speed = position.speed; // Скорость в м/с
            if (kDebugMode) { print('Position updated: ${position.latitude}, ${position.longitude}'); }
            noMovementTimer?.cancel();
            noMovementTimer = Timer(const Duration(seconds: 5), () {
                speed = 0; // Сброс скорости до нуля при отсутствии движения
            }); // Timer
        });
}

```

Рисунок 24 – Обновление местоположения в режиме реального времени и мониторинг скорости

При каждом получении новой позиции функция обновляет `userPosition` и скорость устройства, где скорость выражается в метрах в секунду. Если приложение работает в режиме отладки, оно регистрирует обновленные координаты (широту и долготу) для диагностики.

Кроме того, функция активирует таймер (`noMovementTimer`) для обнаружения бездействия. Если в течение 5 секунд не фиксируется никакого движения, значение скорости сбрасывается до нуля.

Этот механизм позволяет автоматически определять момент остановки пользователя, обеспечивая точное отслеживание как местоположения, так и скорости. Такой подход особенно полезен для динамического мониторинга, включая навигационные приложения и анализ производительности сети в движении.

Фрагмент кода на рисунке 25 демонстрирует метод преобразования кодов типов сетей, получаемых из диспетчера телефонии устройства, в понятные пользователю названия сетевых технологий.



```

val networkTypeCode = telephonyManager?.networkType
networkType = when (networkTypeCode) {
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_NR -> "5G"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_LTE -> "LTE"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_HSPAP -> "HSPA+"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_HSDPA -> "HSDPA"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_HSUPA -> "HSUPA"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_UMTS -> "UMTS"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_EDGE -> "EDGE"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_GPRS -> "GPRS"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_CDMA -> "CDMA"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_1xRTT -> "1xRTT"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_IDEN -> "iDEN"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_EVDO_0 -> "EVDO rev. 0"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_EVDO_A -> "EVDO rev. A"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_EVDO_B -> "EVDO rev. B"
    TelephonyManager.NETWORK_TYPE_EHRPD -> "eHRPD"
    else -> "Unknown"
}

```

Рисунок 25 – Сопоставление кодов типов сетей с названиями сетевых технологий

Переменная `networkTypeCode` получает текущий код типа сети через `telephonyManager?.networkType`, определяя мобильную сеть, к которой подключено устройство.

С помощью выражения `when` в Kotlin каждый код сети соотносится с соответствующей меткой технологии:

- `NETWORK_TYPE_NR` → «5G»,
- `LTE` → «4G»,
- `HSPA+` и `UMTS` → «3G»,
- `EDGE` и `GPRS` → «2G».

Этот механизм охватывает широкий спектр сетевых технологий, включая устаревшие (`CDMA`, `iDEN`) и расширенные (`eHRPD`, `EVDO` различных версий для 3G).

Если код сети не совпадает с predetermined значениями, он получает значение по умолчанию – «Неизвестно», указывая на нераспознанный тип сети.

Такой подход позволяет приложению отображать понятные пользователю названия сетей, улучшая взаимодействие с интерфейсом и обеспечивая доступную информацию о подключении.

Интерфейс мобильного приложения MobTest, разработанного нашей проектной группой, представлен на рисунке 26.

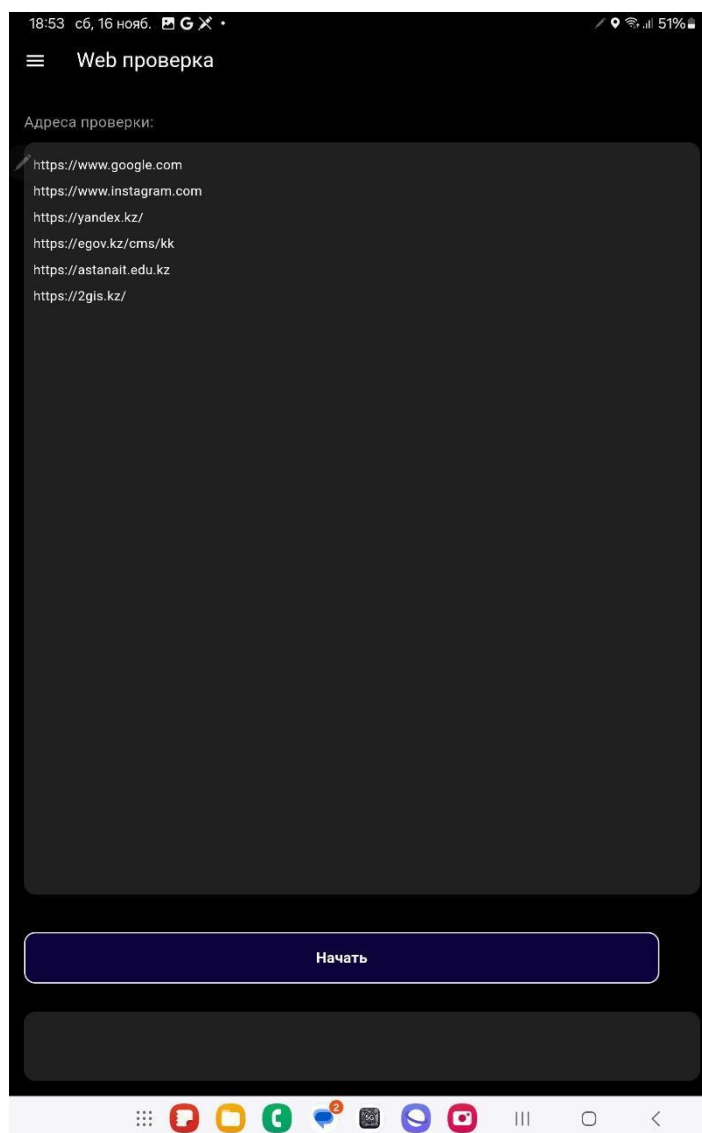


Рисунок 26 – Интерфейс приложения MobTest

Интерфейс прост и ориентирован на функциональность, позволяя пользователям отслеживать статус тестов веб-проверки в режиме реального

времени, просматривать список проверяемых URL-адресов и проверять статус передачи данных, собранных в ходе каждого теста.

Сценарий проведения драйв-теста для сетей 5G/6G, включающий разработку мобильного приложения, которое станет платформой для сбора и анализа трафика мобильных данных в режиме реального времени представлено на рисунке 27.

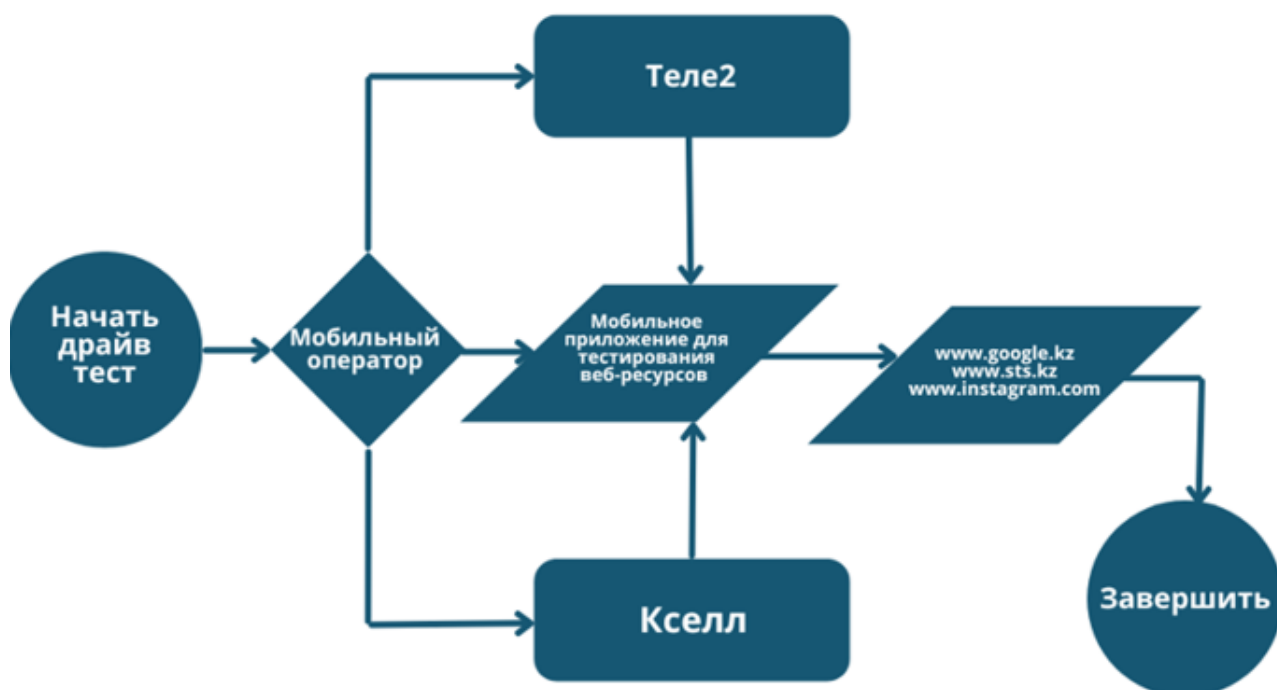


Рисунок 27 – Алгоритм проведения драйв-теста для сетей 5G/6G с использованием мобильного приложения для сбора и анализа данных в реальном времени

На первом этапе драйв теста данное приложение позволит проводить исследования ключевых процессов, таких как управление мобильностью (Mobility Robustness Optimization, MRO), балансировка нагрузки (Load

Balancing Optimization, LBO) и передача сеансов связи (Handover Decision, HOD) в сетях нового поколения.

#### 4.3 Проектирование панели мониторинга для визуализации и анализа собранных данных большого объема в режиме реального времени

Для визуализации данных о параметрах MBV согласно KPI, собранных через мобильное приложение MobTest, была выбрана среда Grafana.

Grafana предоставляет мощные инструменты для создания интерактивных панелей мониторинга, позволяя пользователям анализировать сетевые показатели и отслеживать тенденции в реальном времени.

С ее помощью разработчики и пользователи могут следить за ключевыми параметрами сети, такими как:

- уровень сигнала,
- скорость загрузки и выгрузки,
- задержка (ping),
- стабильность соединения,
- и другие показатели, необходимые для оценки качества сетей разных технологий.

Созданная мониторинговая платформа в Grafana позволяет группировать и анализировать данные по различным параметрам, таким как:

- местоположение,
- скорость движения во время драйв-теста,
- тип соединения,
- и другие факторы.

Эта платформа обеспечивает визуализацию собранных данных в ходе драйв-теста.

На рисунке 28 представлена панель мониторинга MBV (дашборд), который отображает данные MobTest по заданным KPI.

Такой дашборд позволяет:

- контролировать параметры МВВ в реальном времени,
- анализировать производительность сети в разных местах и условиях,
- проводить исследования,
- получать ценные данные для оптимизации работы сети.

Все метрики представлены визуально, что делает анализ данных удобным и наглядным.



Рисунок 28 – Интерфейс мониторинговой системы на платформе Grafana

Важно отметить, что использование Grafana в связке с мобильным приложением MobTest предоставляет гибкий и эффективный инструмент для мониторинга состояния МВВ.

Данное решение включает все необходимые инструменты для анализа и визуализации КРІ, что играет ключевую роль в оптимизации сетей и обеспечении их качества.

Например, график на панели управления (рисунок 29) отображает среднее время пинга для различных веб-сайтов, обеспечивая наглядное представление о сетевой задержке.

Заголовок «Среднее время пинга» указывает, что данный раздел измеряет среднее время отклика (ping) от устройства до каждого из перечисленных URL-адресов.

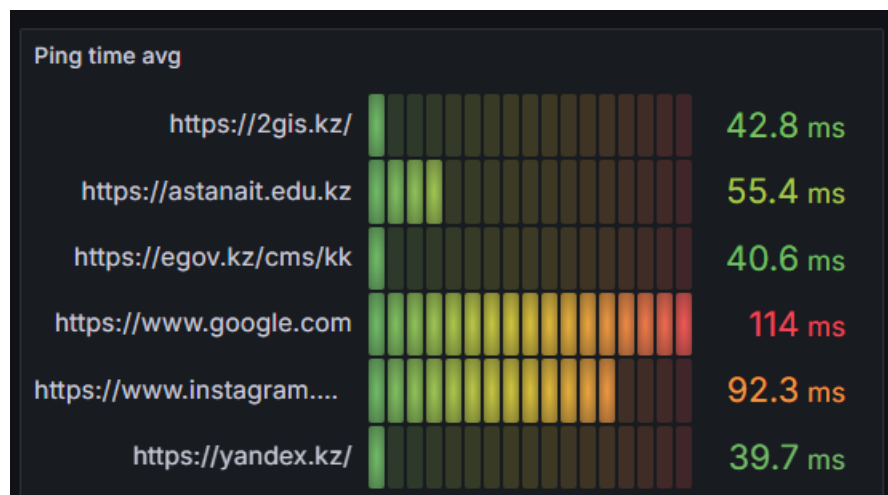


Рисунок 29 – Среднее время пинга для различных веб-сайтов

Зелёные полосы на графике указывают на низкую задержку, что свидетельствует о качественном подключении и быстром времени отклика.

Желто-красные полосы обозначают повышенную задержку, что может указывать на замедленное соединение или возможные проблемы с производительностью.

В данном представлении <https://2gis.kz/>, <https://astanait.edu.kz/>, <https://egov.kz/cms/kk> и <https://yandex.kz/> демонстрируют относительно низкое время задержки, что подтверждается зелёными полосами.

Однако <https://www.google.com/> и <https://www.instagram.com/> имеют более высокий пинг (114 мс и 92,3 мс соответственно), что обозначено желто-красными полосами и может свидетельствовать о замедленном подключении к этим ресурсам.

Данный график позволяет пользователям оперативно оценивать качество сетевого соединения, выявлять потенциальные задержки и проблемы подключения с помощью наглядного цветового кодирования.

Кроме того, панель инструментов включает карту, которая визуализирует уровень сигнала, маршрут драйв-теста и скорость транспортного средства, выполняющего тестирование.

На рисунке 30 представлена визуализация карты по уровню сигнала.

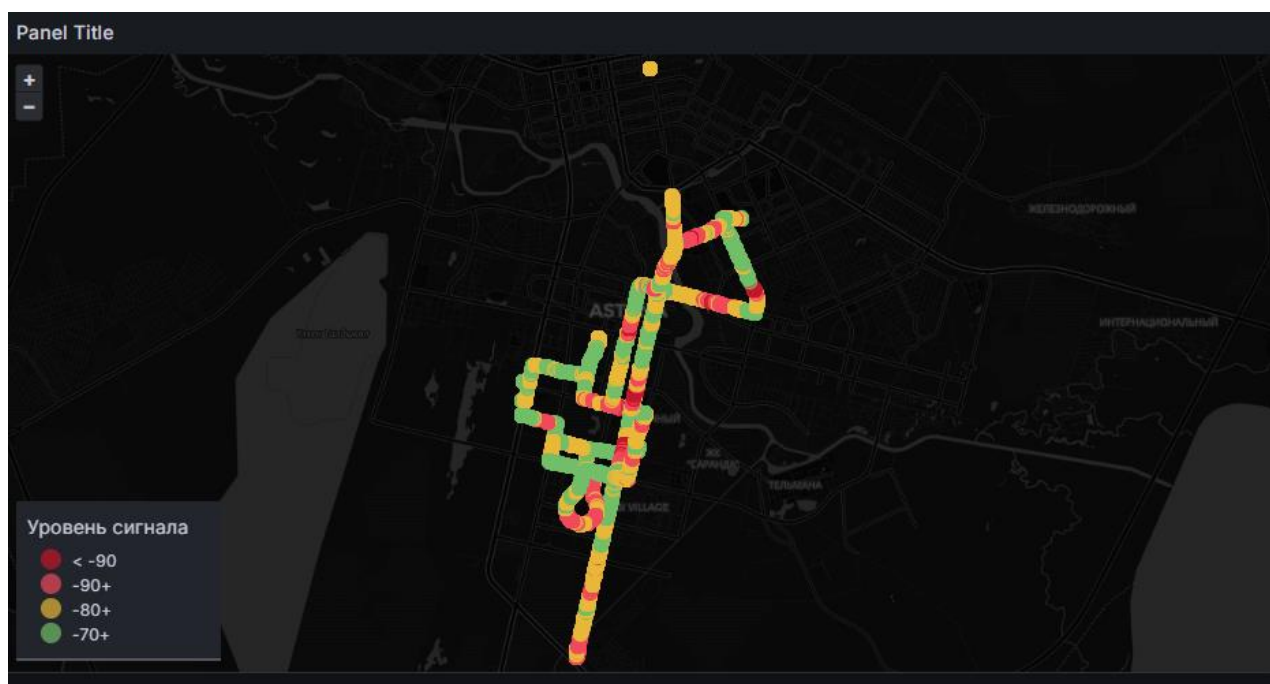


Рисунок 30 – Карта для отображения КРІ

На данной карте каждая точка отображает местоположение на маршруте драйв-теста, окрашенное в определённый цвет в зависимости от уровня сигнала:

Красный обозначает слабый сигнал (ниже -90 дБм),

Жёлтый – умеренный уровень (от -90 дБм до -70 дБм),

Зелёный – сильное соединение (выше -70 дБм).

Данная визуализация позволяет пользователям наблюдать географическое распределение качества связи, выделяя зоны с хорошим или слабым сигналом.

Помимо этого, карта отслеживает скорость движения транспортного средства, предоставляя аналитические данные о том, как изменяется производительность сети во время движения.

Эта функция незаменима для выявления зон с плохим покрытием, оценки стабильности сети и анализа взаимосвязи между уровнем сигнала и динамикой передвижения.

На рисунке 31 представлен график из дашборда, отображающий время загрузки веб-страницы в миллисекундах (мс) за конкретный промежуток времени.

В данном случае на рисунке 2.20 проанализирован период с 18:30 до 21:45.

По графику можно определить, как изменялась продолжительность загрузки страниц в разные моменты времени.

Стоит отметить, что резкие скачки (пики) на графике свидетельствуют о значительном увеличении времени загрузки, что может указывать на задержки или перебои в работе сети.

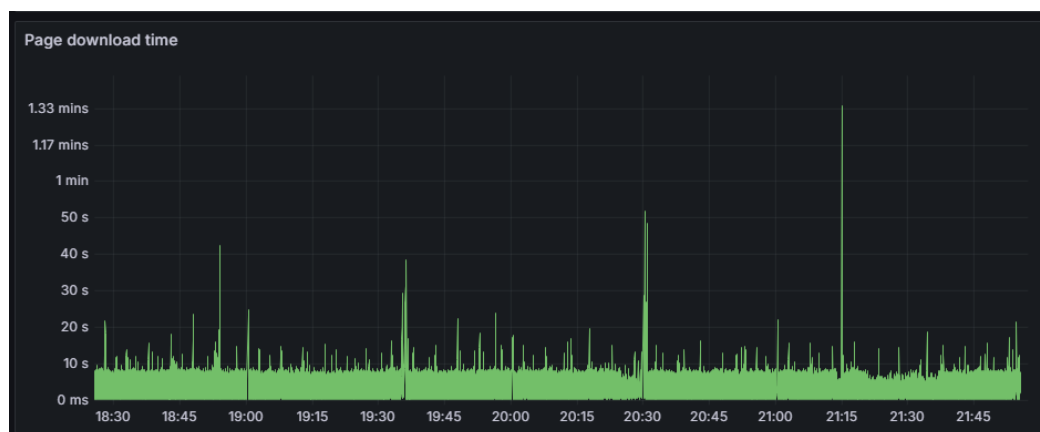


Рисунок 31 – Время загрузки веб страницы

На протяжении всей временной шкалы периодически наблюдаются резкие скачки, достигающие 1 минуты и более, что указывает на моменты, когда скорость загрузки веб-страниц значительно снижалась. Это может быть



связано с перегрузкой сети, нестабильным подключением или изменениями качества сигнала.

Непрерывный мониторинг времени загрузки страниц позволяет получить важную информацию о стабильности сети и её отклике, помогая выявить конкретные периоды или условия, при которых производительность ухудшается.

Подобные графики дают возможность оценить общую надёжность сети, а также предоставляют данные для возможных корректировок, направленных на повышение эффективности загрузки веб-страниц.

График на рисунке 32 предоставляет детализированное сравнение стабильности сигнала в различных сетевых технологиях.

Анализ изменения уровня сигнала позволяет выявить зоны с низким качеством покрытия или факторы, влияющие на определённые типы сетей, такие как доступность 5G.

Исследовательская группа проекта, используя данные, собранные через мобильное приложение MobTest, может построить подробную картину качества покрытия сети в разных технологиях и предложить эффективные решения для улучшения мощности сигнала в различных сетевых стандартах.



Рисунок 32 – Сравнение стабильности сигнала в различных сетевых технологиях

Кроме того, путем нажатия на метки каждой сетевой технологии (5G, 4G и 4G+) пользователи могут анализировать статистику для каждой сети передачи данных отдельно.

Эта интерактивная функция дает возможность изучать тенденции мощности сигнала, характерные для каждого типа сети, позволяя пользователям изолированно рассматривать производительность 5G, 4G и 4G+.

Такой функционал делает панель мониторинга удобнее, обеспечивая детализированную разбивку качества сети и способствуя точному анализу покрытия и стабильности каждой технологии.

Данные, собранные мобильным устройством, безопасно передаются на сервер, где они хранятся в специальной базе данных.

Этот процесс гарантирует, что все ключевые показатели сети, такие как мощность сигнала, скорость загрузки и другие параметры, централизованно регистрируются для дальнейшего анализа.

Сохраняя данные на сервере, приложение может проводить углубленную оценку производительности, обеспечивать исторические сравнения и поддерживать постоянный мониторинг для оптимизации сети.

Для визуализации данных используется Grafana – гибкая платформа с открытым исходным кодом, широко применяемая в ИТ-инфраструктуре благодаря надежности и адаптивности.

Grafana создает интерактивные панели мониторинга, которые позволяют отслеживать сетевые показатели в режиме реального времени.

С помощью панели мониторинга пользователи могут анализировать среднюю скорость загрузки по URL-адресам, уровень сигнала для каждой сети и географическое распределение сигнала.

Кроме того, панель мониторинга оснащена разнообразными фильтрами для уточнения отображаемых данных.

Пользователи могут фильтровать результаты по сетевому оператору и типу сети, что облегчает детальный анализ определенных аспектов производительности сети.

Этот уровень гибкости позволяет фокусироваться на конкретных параметрах, делая интерпретацию данных более точной и осмысленной.

Благодаря инструментам визуализации и фильтрации Grafana, система предоставляет ценные аналитические данные о качестве сети, помогая улучшить производительность и повысить удобство для пользователей.

Для корректной работы приложения требуются определенные разрешения, включая доступ к местоположению устройства и статусу телефона.

Эти разрешения позволяют собирать точные данные о состоянии сети и мощности сигнала, что необходимо для эффективного мониторинга и анализа.

Доступ к геолокации помогает привязывать сетевые показатели к конкретным координатам, предоставляя информацию о качестве сети в разных зонах.

Кроме того, активация геолокации на устройстве во время тестирования крайне важна, поскольку она позволяет непрерывно отслеживать местоположение в реальном времени.

Это особенно полезно для создания детализированных карт покрытия сети и качества сигнала.

Привязывая сетевые параметры к точным локациям, приложение формирует полное представление о состоянии сети, помогая улучшить анализ, оптимизировать сеть и устранять проблемы.

#### 4.4. Интеграция с облачными сервисами для хранения и обработки данных

В качестве основной системы управления базами данных (СУБД) для данного проекта была выбрана MySQL, и она успешно развернута для удовлетворения потребностей в хранении и обработке данных.

Этот выбор обеспечивает высокую производительность, стабильность и масштабируемость, необходимые для обработки больших объемов данных, собираемых приложением.

MySQL отличается надежностью, широкими возможностями настройки и поддержкой сложных транзакций, что делает ее идеальным решением для обеспечения корректной работы всех микросервисов, взаимодействующих с базой данных.

Применение MySQL способствует повышению целостности данных и создает устойчивую платформу для дальнейшего масштабирования приложения в соответствии с возрастающими требованиями к обработке информации.

Структура базы данных представлена на рисунке 33.

Структура таблицы		Связи							
#	Имя	Тип	Сравнение	Атрибуты	Null	По умолчанию	Комментарии	Дополнительно	Действие
<input type="checkbox"/>	1 id	int			Нет	Нет		AUTO_INCREMENT	Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	2 test_time	timestamp(3)			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	3 imei	varchar(32)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	4 device	varchar(50)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	5 device_model	varchar(50)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	6 device_model_code	varchar(20)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	7 device_id	varchar(30)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	8 phone_number	varchar(20)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	9 network_type	varchar(20)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	10 operator	varchar(20)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	11 signal_strength	int			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	12 mcc	int			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	13 mnc	int			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	14 lac	int			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	15 cell_id	int			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	16 url	text	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	17 response_flag	varchar(20)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	18 page_response_latency	int			Да	NULL	Время загрузки страницы Milliseconds		Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	19 page_download_speed	double			Да	NULL	килобит в секунду Kbps		Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	20 latitude	double			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	21 longitude	double			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	22 ping_time	double			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	23 speed	double			Да	NULL			Изменить Удалить Ещё
<input type="checkbox"/>	24 app_version	varchar(10)	utf8mb4_0900_ai_ci		Да	NULL			Изменить Удалить Ещё

Рисунок 33 – Структура базы данных

Структура базы данных разработана для сбора и хранения полного спектра параметров, полученных в ходе сетевых тестов.

Ключевые поля включают:

test\_time – временная метка проведения каждого теста.

imei, device, device\_id, device\_model, device\_model\_code – уникальные идентификаторы и сведения об устройстве, на котором выполняется тест.

phone\_number и Operator – информация об операторе сети пользователя.

network\_type и signal\_strength – данные о типе сети (например, 4G, 5G) и силе сигнала во время теста.

mcc, mnc, lac, cell\_id – технические идентификаторы мобильной сети, включая код страны, код сети, код зоны местоположения и идентификатор соты.

url – URL-адрес страницы, проверяемой на производительность сети.

response\_flag – индикатор состояния, показывающий, был ли ответ страницы успешным или нет.

page\_response\_latency и page\_download\_speed – метрики, указывающие время загрузки страницы в миллисекундах и скорость загрузки в килобитах в секунду.

latitude и longitude – географические координаты тестового местоположения, обеспечивающие пространственный контекст данных.

ping\_time и speed – индикаторы сетевой задержки и скорости тестируемого устройства.

app\_version – версия приложения, используемого во время теста, что полезно для отслеживания изменений между обновлениями.

Преимущества структуры базы данных:

Эта схема обеспечивает эффективное хранение и извлечение детализированных данных о производительности сети, позволяя системе анализировать тенденции и выявлять возможные проблемы на основе множества технических параметров.

Хорошо организованная архитектура базы данных поддерживает функции визуализации и анализа в Grafana, что способствует бесперебойному мониторингу производительности сети в различных условиях.

Настройка инфраструктуры сервера:

В рамках реализации проекта была успешно настроена и сконфигурирована серверная инфраструктура на облачной платформе.

Основной сервер развернут с использованием усовершенствованной операционной системы Ubuntu 24.04.1 LTS, что обеспечивает:

Надежную и безопасную среду для всех компонентов системы.

Стабильность, безопасность и совместимость с новейшими инструментами и технологиями.

Устойчивую основу для развернутых сервисов, как представлено на рисунке 34.

```
version: '3.8'

services:
  db:
    image: mysql:latest
    volumes:
      - db_data:/var/lib/mysql
    environment:
      MYSQL_ROOT_PASSWORD:
      MYSQL_DATABASE: aitu_mobile
    ports:
      - "3306:3306"
  phpmyadmin:
    image: phpmyadmin/phpmyadmin:latest
    environment:
      PMA_HOST: db
      PMA_PORT: 3306
      PMA_USER:
      PMA_PASSWORD:
    depends_on:
      - db
    ports:
      - "8080:80"
  grafana:
    image: grafana/grafana:latest
    ports:
      - "3000:3000"
    volumes:
      - ./grafana_data:/var/lib/grafana
    environment:
      GF_SECURITY_ADMIN_PASSWORD: admin
      GF_DATASOURCES_MYSQL_URL: http://db:3306/aitu_mobile
      GF_DATASOURCES_MYSQL_USER:
      GF_DATASOURCES_MYSQL_PASSWORD:
  web:
    image: php:apache
    volumes:
      - ./www:/var/www/html
    ports:
      - "8081:80"
    environment:
      - APACHE_DOCUMENT_ROOT=/var/www/html
    build:
      context: .
      dockerfile: Dockerfile
volumes:
  db_data:
  grafana_data:
```

Рисунок 34 – Конфигурация Docker Compose для развертывания нескольких сервисов

Архитектура проекта была организована на основе подхода микросервисов как показано на рисунке 35. Все компоненты проекта были

развернуты как отдельные микросервисы, что обеспечило модульность, масштабируемость и высокую отказоустойчивость. Для управления и оркестровки контейнеров микросервисов использовался Docker. Этот подход обеспечил быстрое развертывание, независимость сервисов и стабильную работу всех компонентов системы. Контейнеризируя каждый сервис, Docker позволяет каждому микросервису работать изолированно, сводя к минимуму конфликты и упрощая обслуживание системы в целом.

CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS	PORTS	NAMES
fa50382fdb0f	grafana/grafana:latest	"/run.sh"	4 weeks ago	Up 4 weeks	0.0.0.0:3000→3000/tcp, :::3000→3000/tcp	aitu-grafana-1
454e85b3aa01	php:apache	"docker-php-entrypoi..."	4 weeks ago	Up 4 weeks	0.0.0.0:8081→80/tcp, :::8081→80/tcp	aitu-web-1
eb459efa83d7d	phpmyadmin/phpmyadmin:latest	"/docker-entrypoint..."	4 weeks ago	Up 4 weeks	0.0.0.0:8080→80/tcp, :::8080→80/tcp	aitu-phpmyadmin-1
4bec1ac2c081	mysql:latest	"docker-entrypoint.s..."	4 weeks ago	Up 4 weeks	0.0.0.0:3306→3306/tcp, :::3306→3306/tcp, 33060/tcp	aitu-db-1

Рисунок 35 – Активные Docker-контейнеры с отображением портов и статуса

Архитектура микросервисов данного проекта обеспечивает высокую гибкость в управлении инфраструктурой.

Она минимизирует риски, связанные со сбоями отдельных компонентов, поскольку изолированные проблемы решаются без влияния на всю систему.

Позволяет быстро адаптировать и масштабировать отдельные элементы, избегая простоев и сбоев всей инфраструктуры.

Этот подход обеспечивает долгосрочную масштабируемость, гарантируя, что каждый компонент может быть обновлён или расширен для удовлетворения будущих потребностей.

Серверная инфраструктура:

В проекте использована контейнеризация с Docker, где ключевые компоненты развернуты в изолированных средах, что гарантирует бесперебойную работу и модульность системы.

Список активных контейнеров Docker:

grafana/grafana:latest

Контейнер "aitu-grafana-1"

Отвечает за визуализацию данных через Grafana

Доступен через порт 3000

php:apache

Контейнер "aitu-web-1"

Обрабатывает веб-сервисы

Работает через порт 8081, с дополнительным доступом через порт 80

phpmyadmin/phpmyadmin:latest

Контейнер "aitu-phpmyadmin-1"

Обеспечивает управление базой данных

Функционирует через порт 8080

mysql:latest

Контейнер "aitu-db-1"

Основной компонент базы данных

Доступен через порт 3306

Хранит и организует все критически важные данные проекта

Преимущества контейнерной архитектуры:



Гибкость и модульность – каждая служба функционирует независимо.

Высокая доступность – контейнеры можно управлять, обновлять и масштабировать отдельно, не влияя на другие компоненты.

Стабильность и устойчивость – система сохраняет работоспособность даже при изменениях отдельных сервисов.

Такой контейнерный подход обеспечивает устойчивость всей инфраструктуры, позволяя эффективно управлять сервисами и поддерживать высокую надёжность проекта.

4.5 Исследование и разработка моделей искусственного интеллекта, системы управления мобильностью и инструментов анализа больших данных

Основное внимание проведённого исследования было сосредоточено на разработке первой фазы мобильного приложения и тестировании его производительности в сетях 2G, 3G, 4G и 5G.

В рамках исследования:

Произведён выбор компонентов системы и измерительных инструментов, необходимых для интеграции в сильную сетевую архитектуру, пригодную для проведения драйв-тестов.

Разработана сетевая архитектура с учётом технических требований для анализа сетей, функционирующих в Астане, которые выступают основой для оценки производительности.

Настроенная система ориентирована на изучение параметров мобильных приложений в различных сетевых условиях, с акцентом на покрытие, задержку и пропускную способность данных.

Адаптация системы необходима для создания динамических решений и моделей, способных оптимизировать качество обслуживания и пользовательский опыт в условиях технологического прогресса.

Ключевые компоненты драйв-теста:

Исследовательская среда

Архитектура сети

Планшеты с поддержкой 5G

Операторы и SIM-карты

Мобильное приложение для сбора данных

Приложение для отслеживания местоположения

Типы услуг

Сотовые сети

Тип услуги

Сервер

Панель инструментов

Исследование охватывает конкретные локации в пределах Астаны, выбранные как ключевые точки сбора данных.

Астана — технологически развитый урбанистический центр, что делает её идеальной площадкой для тестирования телекоммуникационных решений.

Столичный статус города подчёркивает необходимость модернизации сетей, а высокая плотность городского использования создаёт оптимальные условия для исследований.

Оценка сотовых сетей 2G, 3G, 4G и 5G:

Анализ качества сигнала, уровня задержек и пропускной способности данных.

Учёт особенностей городской инфраструктуры и потребностей пользователей.

Проверка надёжности соединения в реальных условиях эксплуатации.

Сетевая архитектура — основа исследования, и её разработка была приоритетной задачей на первом этапе.

Все смартфоны для тестирования имеют идентичные технические характеристики для всех операторов, что обеспечивает 100% единообразие и сопоставимость данных.

Мобильное приложение для драйв-тестов:

Разрабатывалось с учётом реальных условий тестирования.

Является ключевым инструментом для анализа поведения сети.

Взаимодействует с инфраструктурой сети, поддерживая надёжную систему связи.

Позволяет проводить тестирование в различных сценариях, обеспечивая точность данных.

Гарантия точности и стабильности:

Все планшеты в драйв-тесте идентичны по характеристикам.

Это исключает аппаратные различия, позволяя проводить прямые сравнения данных разных операторов.

Архитектура тестирования представлена на рисунке 36, демонстрируя взаимосвязь всех элементов, необходимых для точного анализа производительности сети.



Рисунок 36 – Общая концепция сетевой архитектуры

В целях обеспечения точности и стабильности в процессе проведения драйв-теста все используемые планшеты обладают идентичными техническими характеристиками для всех операторов.

Это 100%-ное единообразие исключает возможную вариативность, возникающую из-за различий в аппаратном обеспечении, что позволяет проводить прямые и объективные сравнения данных, собранных от различных операторов сетей.

Каждое устройство, задействованное в исследовании, представляет собой планшет Samsung Galaxy Tab S9 SM-X716BZEES с:

Диагональю экрана – 11 дюймов

Объёмом памяти – 256 ГБ

Поддержкой сетей – WiFi и LTE

Цветовой моделью – бежевый

Эта модель была выбрана целенаправленно, поскольку обладает:

Высокой производительностью,

Достаточным объёмом памяти,

Совместимостью с необходимыми приложениями для сбора и отслеживания данных.

Преимущества унификации аппаратного обеспечения:

Обеспечивает точность анализа, так как любые различия в производительности сетей обусловлены исключительно сетевыми параметрами.

Создаёт точную базу для оценки качества обслуживания операторов.

Гарантирует объективную оценку состояния сетей, исключая влияние факторов, связанных с различиями в устройствах

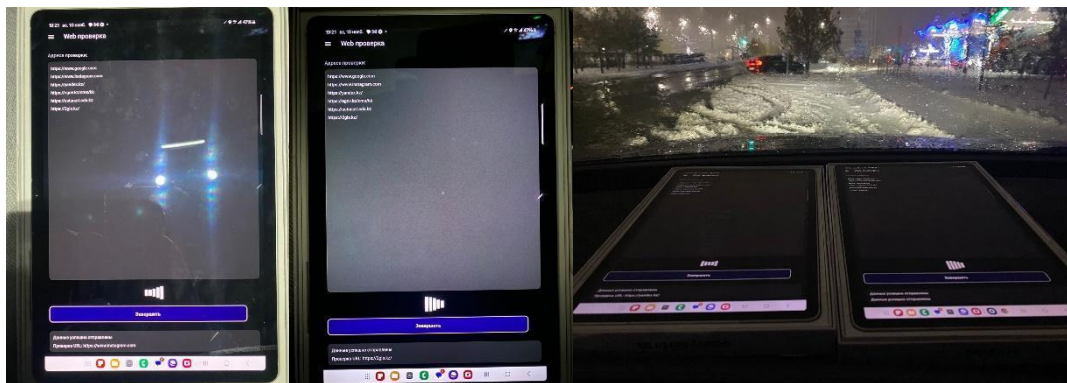


Рисунок 37 – планшеты, используемые для измерений во время тест-драйва

### Операторы и SIM-карты

В данном исследовании рассматриваются два ведущих оператора мобильной связи Казахстана, обозначенные как Оператор А и Оператор В. Для сохранения объективности и избежания предвзятости при анализе их работы, операторы были анонимизированы. Такой подход гарантирует нейтральность представленных результатов и позволяет сосредоточиться на анализе технических характеристик сетей, не затрагивая репутационные аспекты.

Каждое тестируемое мобильное устройство было оснащено отдельной SIM-картой от каждого оператора, что обеспечило возможность параллельного сбора данных с обеих сетей в реальном времени при идентичных условиях эксплуатации. Это критически важно для оценки

ключевых показателей эффективности сети (KPI), таких как уровень принимаемого сигнала, пропускная способность и задержка. Исключая потенциальную предвзятость, данный метод позволяет объективно сравнить характеристики каждой сети.

Использование SIM-карт для всех устройств в исследовании обеспечило всесторонний и сопоставимый набор данных, позволяя выявить как сильные, так и слабые стороны каждой сети в различных условиях эксплуатации. Это помогает определить зоны с наиболее эффективным и стабильным подключением, а также области, где связь может испытывать затруднения.

#### Приложение для отслеживания

Для обеспечения точности данных о географическом местоположении при проведении измерений использовалось специализированное мобильное приложение, разработанное для точного трекинга и записи координат пользователей. Приложение действует аналогично навигационной системе, фиксируя ключевые параметры производительности сети в привязке к точным координатам.

С его помощью исследователи могут регистрировать долготу и широту каждой точки измерения, что позволяет соотносить показатели эффективности сети с конкретными географическими зонами. Такой метод дает возможность учитывать пространственные и экологические факторы, которые могут оказывать влияние на качество связи.

Приложение обеспечивает детализированный анализ данных, позволяя исследователям оценивать, как различные условия окружающей среды и плотность застройки сказываются на работе сети. Это особенно важно в контексте выявления потенциальных зон с перегрузкой или слабым покрытием.

#### Мобильное приложение для сбора данных

В рамках исследования было разработано специализированное мобильное приложение, предназначенное для сбора данных во время драйв-тестов. На текущем этапе оно находится в стадии тестирования и используется

для регистрации таких ключевых показателей, как уровень сигнала, скорость передачи данных и задержка.

Приложение позволяет вести журнал данных в реальном времени, фиксируя значения KPI по мере передвижения между различными тестовыми зонами. Этот метод сбора информации гарантирует точность и достоверность данных, создавая надежную основу для последующего анализа.

На первом этапе работы приложение тестируется и дорабатывается, что позволяет исследователям оптимизировать процесс измерений и повысить точность оценки производительности сети. В дальнейшем его функционал будет расширен для проведения более сложных испытаний и интеграции с дополнительными аналитическими инструментами.

#### Тип услуги

На первом этапе тестирования основное внимание уделялось анализу работы сети при доступе к веб-браузерным сервисам. Это позволило получить базовые сведения о работе мобильного интернета в различных условиях.

Для тестирования были выбраны наиболее популярные сайты, представляющие как глобальные, так и локальные интернет-ресурсы:

[Google](#)

[Instagram](#)

[Яндекс](#)

[Астана IT университет](#)

[2ГИС Казахстан](#)

[Электронное правительство Казахстана](#)

Эти ресурсы были выбраны в качестве тестовых площадок, так как они широко используются среди мобильных пользователей Казахстана и представляют собой репрезентативный набор сервисов с различными требованиями к пропускной способности сети.

#### Сотовые сети

Исследование охватывает основные технологии мобильной связи, доступные в Астане: 2G, 3G, 4G и 5G. Драйв-тесты позволили провести

предварительную оценку производительности каждой сети в условиях городской среды, выявляя особенности покрытия и скорости передачи данных.

Используемые в тестах смартфоны поддерживают все четыре технологии, что позволило анализировать работу алгоритмов передачи соединений (handover) при переключении между различными стандартами связи.

Проведенные измерения дадут представление о том, какие технологии доминируют в тестируемых зонах, а также помогут оценить перспективы внедрения 5G и будущих 6G-сетей. Эти данные станут основой для дальнейшего исследования, направленного на выявление проблемных зон и предложений по улучшению качества связи.

#### Сервер данных

Центральное место в исследовании занимает сервер, который выполняет функции сбора, хранения и анализа данных, полученных в ходе драйв-тестов. Он позволяет мониторить производительность сети в режиме реального времени, а также проводить последующий углубленный анализ.

Благодаря высокой вычислительной мощности сервер способен обрабатывать большие объемы информации, регистрируя все ключевые метрики сети с высокой частотой. Это гарантирует точность измерений и возможность сравнения данных за различные периоды времени.

Использование централизованного сервера упрощает управление данными, повышает их безопасность и обеспечивает удобный доступ для исследователей, работающих над проектом.

#### Панель инструментов

Для удобного анализа собранных данных была разработана интерактивная панель мониторинга, которая позволяет в режиме реального времени отслеживать ключевые показатели эффективности сети (KPI).



Данная панель визуализирует данные на карте, предоставляя исследователям удобный инструмент для оценки покрытия сети, уровня сигнала, задержки и других параметров.

Ключевые функции панели:

Географическая привязка данных – возможность отображения результатов измерений на карте с точными координатами.

Фильтрация по KPI – позволяет анализировать отдельные метрики, такие как уровень сигнала или скорость соединения.

Динамическое обновление данных – обеспечивает актуальность информации в режиме реального времени.

Использование панели мониторинга значительно ускоряет процесс выявления проблемных зон и анализа тенденций в работе мобильных сетей. Это позволяет оперативно принимать решения о возможных путях оптимизации сетевой инфраструктуры.

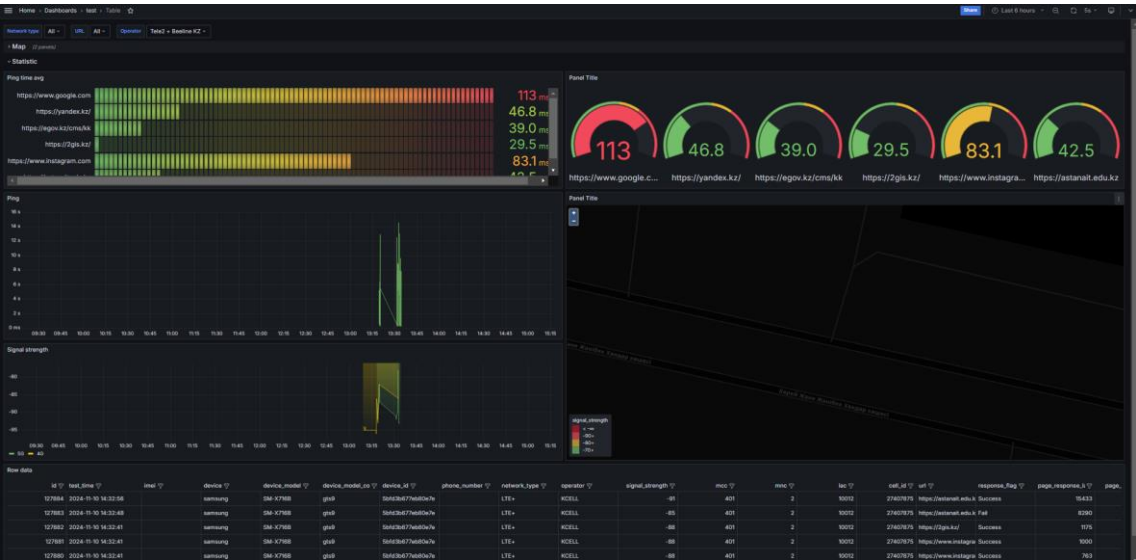


Рисунок 38 – Панель инструментов, используемая для анализа данных

Операция

Разработанная система ориентирована на детализированный анализ и оценку эффективности функционирования различных технологий

обслуживающих сетей в различных эксплуатационных условиях. В рамках первичного этапа система использует специально созданное мобильное приложение, предназначенное для автоматизированного сбора данных в режиме реального времени, что обеспечивает исследователям возможность проводить измерения производительности сетей стандартов 2G, 3G, 4G и 5G.

Используемое мобильное приложение функционирует в различных средах, где тестирование организовано с учетом городских и сельских зон, что позволяет учитывать влияние инфраструктуры, плотности застройки и потенциальных физических преград на стабильность связи.

При проведении тестов собираются основные ключевые показатели эффективности (KPI), включая уровень принимаемого сигнала, скорость передачи данных, задержку и стабильность соединения. Такой метод анализа позволяет комплексно оценить производительность мобильных сетей в условиях изменяющейся нагрузки и динамики покрытия.

Анализ полученных данных помогает исследователям изучить, как разные сети реагируют на колебания спроса, переход пользователей между различными зонами покрытия, а также на возможные перегрузки трафика. Этот начальный этап тестирования закладывает основу для углубленного анализа сетевых параметров, что впоследствии позволяет выявить сильные и слабые стороны текущей телекоммуникационной инфраструктуры. Эти данные являются важными для прогнозирования необходимых улучшений и модернизации сетей будущего.

#### Собранные данные

В ходе драйв-тестов система собирает и фиксирует обширный объем необработанных данных, формирующих базу для комплексного анализа производительности мобильных сетей. В перечень ключевых показателей эффективности (KPI), зафиксированных с помощью мобильного приложения, входят:

Мощность принимаемого сигнала – показатель, определяющий качество покрытия, стабильность и уровень сигнала, что позволяет выявлять зоны с сильным и слабым покрытием сети.

Скорость передачи данных – метрика, отображающая пропускную способность сети, а также демонстрирующая реальную скорость загрузки и отправки данных в различных зонах.

Задержка соединения – измерение временных интервалов при передаче данных, что критично для оценки отзывчивости и надежности сети.

Каждый параметр фиксируется с привязкой к географическим координатам, что позволяет картографировать производительность сети в тестируемых локациях. Дополнительно фиксируется временная метка, что дает возможность отслеживать динамику изменений сети во времени, учитывая такие факторы, как варьируемая нагрузка и влияние окружающей среды.

Систематизация и анализ этого комплекса данных служат основой для выявления узких мест и проблемных зон в мобильных сетях, что позволяет разрабатывать стратегии их дальнейшей оптимизации.

#### Использование данных измерений и Big Data для ИИ-моделей

Целью драйв-тестов является не только сбор данных о текущем состоянии сетей, но и создание информационной базы, которая может быть использована для совершенствования сетей 5G и подготовки к внедрению сетей 6G. Обработка и анализ этих данных открывают возможности для интеграции передовых моделей искусственного интеллекта (ИИ), направленных на повышение эффективности управления мобильностью.

Современные телекоммуникационные сети сталкиваются с проблемами, связанными с высокой плотностью подключенных пользователей, ростом объемов передаваемых данных и необходимостью обеспечения бесшовного соединения даже при интенсивном передвижении пользователей. В этих условиях традиционные методы управления мобильностью уже не всегда справляются с возросшими требованиями.

Анализ больших данных (Big Data) предоставляет детальную информацию в реальном времени о состоянии сети, поведении пользователей и характеристиках мобильных устройств. Эти данные имеют ключевое значение для обучения ИИ-моделей, которые могут стать основным инструментом управления сотовыми сетями следующего поколения.

Основные метрики, используемые для ИИ-моделей:

Уровень сигнала – помогает определить устойчивость покрытия сети.

Скорость передачи данных – фиксирует эффективность использования канала связи.

Задержка – важный фактор для оценки качества соединения.

Географическое положение устройства – позволяет учитывать влияние местоположения на качество связи.

Нагрузка на ячейки сети – показатель, демонстрирующий загруженность конкретных участков сети.

Эти параметры собираются в динамике и формируют многомерную картину работы сети. Их анализ позволяет выявить закономерности в передвижении пользователей, предсказать необходимость смены соты (handover) и заранее определить зоны возможных проблем с подключением.

Влияние больших данных на обучение ИИ

Сбор и обработка исторических и актуальных данных позволяют искусственному интеллекту прогнозировать, в каких зонах могут возникнуть потери сигнала и когда требуется handover. Таким образом, ИИ может заранее принимать решения, минимизируя риски разрывов соединения и снижая нагрузку на сеть.

Это особенно важно в условиях развертывания 5G и последующего внедрения 6G, где низкие задержки и высокая надежность соединения критически важны для таких инновационных приложений, как:

Автономный транспорт – бесперебойная связь необходима для управления беспилотными автомобилями.

Дистанционное здравоохранение – проведение сложных медицинских операций с использованием удаленных манипуляторов требует стабильного подключения.

Виртуальная и дополненная реальность – требуют высокой скорости передачи данных и минимальных задержек для создания комфортного пользовательского опыта.

ИИ-модели, обученные на больших данных, смогут:

Автоматически оптимизировать параметры handover в реальном времени.

Повышать эффективность использования сетевых ресурсов.

Уменьшать вероятность разрывов соединений для пользователей.

Будущее 5G и 6G сетей с применением ИИ

Интеграция ИИ и анализа Big Data создаст условия для разработки автономных и адаптивных систем управления мобильными сетями. Эти системы смогут:

Автоматически корректировать параметры передачи соединения (handover).

Минимизировать перегрузки сети за счет интеллектуального распределения нагрузки.

Повышать стабильность подключения в сложных сценариях мобильности.

В условиях растущего числа пользователей и стремительного увеличения объема передаваемых данных сети будущего должны стать более интеллектуальными и самонастраивающимися. Взаимодействие анализа Big Data и ИИ-моделей позволит обеспечить высокую надежность соединения и максимально комфортный пользовательский опыт.

По мере увеличения нагрузки на сотовые сети 5G и подготовки к 6G искусственный интеллект станет неотъемлемым инструментом для управления мобильными соединениями, обеспечивая их бесперебойную работу в любых условиях городской и сельской среды.

## 5 ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ OPEN-RAN ДЛЯ 5G И 6G

### 5.1 Концепция Open-RAN: ключевые особенности

Развитие мобильных сотовых систем – это непрерывный процесс, который начался в 1970-х годах [300, 301]. За эти годы было опубликовано и выпущено множество стандартов этих систем. Эволюция от аналоговой к цифровой эпохе произошла в 1980-х годах. Затем, в конце девяностых, третье поколение мобильных сетей облегчило пакетную коммутацию связи.

До 5G все устаревшие поколения имели некоторые общие черты: как минимум, они были предназначены в основном для потребительского рынка; главной целью было обеспечение более высокой пропускной способности для конечных пользователей; они могли использовать более широкую полосу пропускания и новые диапазоны частот, чем раньше; основные сценарии применения были связаны с голосовой связью и подключением к Интернету. Сравнивая эти устаревшие системы, для 5G были установлены новые области требований [302, 303]. По замыслу 5G RAN должна как минимум соответствовать энергоэффективной парадигме, должна быть чрезвычайно надежной и должна поддерживать 1 000 000 пользователей на км<sup>2</sup>. Такой подход должен позволять предоставлять услуги мобильной/беспроводной связи не только для потребительского рынка, но и для отраслей, частных и корпоративных пользователей. Поскольку ожидается, что будет поддерживаться множество сценариев, во время спецификации было принято решение о том, что архитектура RAN должна быть более модульной, чем раньше [304].

В прошлом предпринимались попытки развернуть базовые станции разложенным способом и более чем одним поставщиком на сайт на основе стандартизированных эталонных архитектур.

Широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов (WCDMA) в эпоху 3G разделяет RAN на контроллер радиосети (RNC)

и базовую станцию (называемую NodeB), обеспечивая соединения «один ко многим» между этими объектами. Четвертое поколение (4G) Долгосрочная эволюция

(LTE), развертывания, многопоставочные соединения между базовыми станциями RAN (eNB) и базовыми сетями (CN) на основе стандартизированного интерфейса имеют общие черты. Однако интерфейсы, применяемые в RAN среди соответствующих узлов, по-прежнему являются проприетарными. Несмотря на достижения и сложность сети мобильного доступа, зрелые решения, реализованные на базовых станциях, поставляются одним поставщиком, что раньше определялось как привязка к поставщику.

Хотя Проект партнерства третьего поколения (3GPP) определил некоторые интерфейсы и выпустил общедоступные спецификации, поставщики развертывают собственные решения и интерфейсы.

Это в конечном итоге привело к внедрению сетей RAN в заданных диапазонах и в заданной географической области одним поставщиком. В настоящее время мы наблюдаем монолитный подход одного поставщика к развертыванию RAN (eNB) по всему миру, т.е. сети не открыты через определенный стек протоколов.

Количество абонентов мобильных сетей превышает общую численность населения мира. Ожидается, что количество ячеек и сайтов будет продолжать расти в будущем из-за уплотнения сетей и внедрения новых диапазонов частот. Согласно [305], прогнозируется, что в 2026 году будет активным 8,8 миллиарда мобильных подписок, включая 3,5 миллиарда подписок 5G. Это показывает, что нам нужны гибкие и более централизованные развернутые сети по замыслу. Гибкость может быть гарантирована путем декомпозиции сетевых элементов в архитектуре стека протоколов радиодоступа. Однако такой подход все еще не означает открытости с точки зрения собственника. В последнее десятилетие потребность в гибком и открытом подходе в разработке RAN была выявлена операторами мобильных сетей и поставщиками сетевого оборудования, что в конечном итоге было названо Open RAN. OpenRAN – это

широкий термин, который охватывает готовность игроков отрасли (операторов, поставщиков, нейтральных хостов, интеграторов, частного бизнеса и т. д.) открыть архитектуру RAN с целью упрощения развертывания и интеграции сетей мобильного радиодоступа от нескольких поставщиков, устраняя потенциальные блокираторы в дальнейших разработках. Такая открытость была гарантирована благодаря спецификации надлежащих интерфейсов между логическими узлами и внедрению новых сетевых элементов, которые способны включать интеллект посредством внедрения искусственного интеллекта/машинного обучения (ИИ/МО) и парадигмы сети, управляемой данными. Open RAN также касается эволюции декомпозиции аппаратного (HW) и программного (SW) элемента сети, что на практике означает: многие поставщики могут предоставлять решения, может использоваться коммерческое готовое (COTS) оборудование, и продукты могут обновляться с помощью программного обеспечения гибким способом.

Ранее развертывание мобильной сети основывалось на монолитном подходе, в котором блоки обработки основной полосы частот и радиомодули размещались рядом с антенной. Эти два основных элемента составляют то, что мы обычно называем RAN, которая является основной частью мобильных сетей рядом с базовой сетью, терминалами и транспортом. В 4G/LTE поставщики начали поставлять узлы eNB, разделенные на радиоуправляемые головки (RRH) и блоки основной полосы частот (BBU), которые размещаются в непосредственной близости от сайта, что обычно называется распределенной RAN (D-RAN). Обратите внимание, что RRH называется удаленным блоком (RU) в спецификациях, связанных с 3GPP 5G NewRadio (5G NR). BBU выполняет ресурсоемкие операции, связанные со стеком RAN, такие как обработка сигналов для многих ячеек, управление ресурсами, исправление ошибок передачи и т.д. [306]. В таких развертываниях D-RAN используются фирменные интерфейсы для обеспечения связи между RRH и BBU, например, на основе протоколов Common Public Radio Interface (CPRI) или Open Base Station Architecture Initiative (OBSAI) [307]. Принимая во внимание



статистическое поведение пользователей, подключенных к ячейкам, т. е. постоянную и мгновенную передачу данных, для смягчения переоценки ресурсов в основной полосе частот, на основе протоколов Common Public Radio Interface (CPRI) или Open Base Station Architecture Initiative (OBSAI) [308].

Принимая во внимание статистическое поведение пользователей, подключенных к ячейкам, т.е. время вызова и мгновенную передачу данных, для смягчения переоценки ресурсов в основной полосе частот, ресурсы могут быть объединены вместе. Таким образом, уплотнение сети мотивирует перемещать эти ресурсы в централизованные офисы и Концепция централизованной RAN (C-RAN) заключается в перемещении части обработки основной полосы частот в центральный офис (концентратор). C-RAN был предложен China Mobile в 2009 году для поддержки приложений с высокой пропускной способностью [309]. Централизация BBU мотивирована максимизацией эффективности передачи данных и координацией ресурсов, среди прочего. Еще один шаг к декомпозиции RAN был сделан Small Cell Forum, который определил и объявил о преимуществах виртуализации и централизации в сетях с малыми ячейками вместе с реализацией разделения MAC/PHY в 2015 году [310]. С того времени было проведено множество эволюций потенциального будущего функционального разделения сетевой архитектуры.

Функциональное разделение определяет, насколько централизована сеть. Согласно [311], функциональное разложение RAN необходимо для различных транспортных требований с точки зрения различных требований к производительности и для адаптации к различным типам трафика с различными целями производительности, например, очень высокая пропускная способность против чрезвычайно низкой задержки. Авторы [312] рассмотрели различные исследования, касающиеся функционального разделения, и оценили преимущества и недостатки этих разделений. Согласно [313], централизованная обработка основной полосы частот обеспечивает

лучшую координацию между сотами и, таким образом, позволяет балансировать нагрузку и снижать затраты за счет увеличения пула оборудования/программного обеспечения и снижения расходов на аренду площадки.

#### Интеллектуальные мобильные сети и Open-RAN

##### Ограничения традиционных базовых станций

Современные телекоммуникационные сети сталкиваются с проблемами, вызванными динамической природой беспроводной среды. Традиционные базовые станции часто оказываются неэффективными в использовании ресурсов, так как не способны адаптироваться к изменяющимся сетевым условиям [314]. Их жесткие архитектуры затрудняют оптимальное управление пропускной способностью, энергопотреблением и другими ключевыми параметрами. В условиях резких всплесков пользовательского спроса или непредвиденных сбоев оборудования эти недостатки становятся особенно заметными.

Растущий объем подключенных IoT-устройств также создает дополнительные вызовы для сетевой инфраструктуры, так как требует повышенной гибкости и адаптивности. Различные сценарии, такие как умные города, автономный транспорт и промышленные системы, предъявляют уникальные требования к телекоммуникационным сетям. Для удовлетворения этих потребностей сети должны уметь в реальном времени перераспределять ресурсы, обеспечивать низкую задержку и гарантировать высокую надежность соединений.

Одним из возможных решений данной проблемы является внедрение интеллектуальных сетевых систем, способных к автономной оптимизации и адаптации. В основе таких систем лежат программные механизмы, использующие методы искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО). Благодаря анализу больших объемов данных сети могут прогнозировать изменения нагрузки, корректировать параметры связи и минимизировать потери ресурсов.

## Эволюция мобильных сетей и виртуализация

Телекоммуникационные технологии претерпели значительные изменения, начиная с первых поколений мобильных сетей и заканчивая современными стандартами 5G. Каждое новое поколение предлагало улучшенную производительность, однако до определенного момента основное внимание уделялось аппаратным усовершенствованиям [316].

Существенный прорыв в развитии сетей произошел с внедрением концепции виртуализации. Этот подход позволил разделить аппаратные и программные компоненты сети, сделав возможной гибкую настройку инфраструктуры [317]. Одним из ключевых достижений на этом пути стала централизованная архитектура C-RAN (Centralized Radio Access Network). Она позволила переместить обработку данных с отдельных базовых станций в крупные центры обработки данных, что значительно повысило эффективность использования вычислительных мощностей и ресурсов сети.

Следующим шагом в эволюции сетей стало появление Open-RAN – концепции, направленной на создание открытых интерфейсов и обеспечение совместимости между оборудованием разных производителей. Open-RAN стал революционной парадигмой, которая устранила привязку программных решений к конкретным аппаратным платформам.

Одним из ключевых элементов Open-RAN являются Радио-интеллектуальные Контроллеры (RIC, Radio Intelligent Controller). Эти системы обеспечивают централизованное управление ресурсами сети с использованием алгоритмов ИИ и МО. Интеграция интеллектуальных решений в Open-RAN открывает новые возможности для оптимизации мобильных сетей, позволяя автоматически корректировать параметры связи, прогнозировать перегрузки и адаптироваться к изменениям в трафике.

### Преимущества интеграции ИИ и МО в Open-RAN

Интеграция ИИ и МО в Open-RAN обеспечивает целый ряд преимуществ:

Гибкость управления ресурсами. Сети могут динамически перераспределять мощности в зависимости от текущих условий, повышая эффективность работы.

Автоматизация принятия решений. Благодаря машинному обучению сеть способна прогнозировать потенциальные проблемы и предотвращать их до появления сбоев.

Оптимизация энергопотребления. Интеллектуальные алгоритмы помогают минимизировать затраты энергии путем адаптивного управления передатчиками и базовыми станциями.

Уменьшение задержек. Автоматизированное распределение трафика снижает задержки при передаче данных, что критически важно для IoT, автономного транспорта и других приложений.

Снижение операционных затрат. Использование виртуализации и интеллектуальных алгоритмов позволяет операторам сократить расходы на поддержку и обновление сетевой инфраструктуры.

Виртуализация играет ключевую роль в развитии интеллектуальных мобильных сетей. Она позволяет абстрагировать аппаратные компоненты, представив их в виде виртуальных сетевых функций (VNF, Virtual Network Function). Это значительно упрощает развертывание новых сервисов, их масштабирование и интеграцию с существующей инфраструктурой.

#### Проблемы и вызовы

Несмотря на все преимущества, процесс внедрения интеллектуальных решений в Open-RAN сталкивается с рядом сложностей:

Сложность интеграции. Переход от традиционных сетей к Open-RAN требует значительных изменений в архитектуре и настройках инфраструктуры.

Обеспечение безопасности. Использование открытых интерфейсов увеличивает уязвимость сетей к кибератакам, что требует разработки эффективных механизмов защиты.

Обучение моделей МО. Алгоритмы машинного обучения нуждаются в больших объемах данных для эффективной работы, что создает сложности с точки зрения конфиденциальности и управления данными.

Совместимость оборудования. Различные производители разрабатывают свои аппаратные решения, что может затруднить интеграцию Open-RAN в существующие сети.

Помимо этих вызовов, существует нехватка систематических исследований, посвященных интеллектуальным решениям в Open-RAN. Хотя были проведены отдельные работы по применению ИИ и МО в RIC, комплексные обзоры, рассматривающие преимущества и потенциальные сценарии использования, остаются редкостью.

#### Перспективы развития

Дальнейшее развитие интеллектуальных сетей и Open-RAN будет направлено на улучшение существующих решений и устранение текущих ограничений. Некоторые ключевые направления исследований включают:

Развитие автономных сетей. Создание полностью самоуправляемых сетей, которые могут адаптироваться к изменяющимся условиям без вмешательства оператора.

Глубокая интеграция с 6G. Будущие сети шестого поколения потребуют еще большей адаптивности и гибкости, что делает Open-RAN идеальной платформой для их развертывания.

Повышение безопасности. Разработка защищенных механизмов управления данными и обмена информацией между различными компонентами сети.

Эффективное использование вычислительных ресурсов. Интеграция методов распределенных вычислений для оптимизации нагрузки на серверы обработки данных.

В долгосрочной перспективе интеллектуальные сети на основе Open-RAN могут стать стандартом для мобильной связи, обеспечивая высокую производительность, надежность и адаптивность.

В отличие от традиционной технологии RAN, Open RAN разделяет аппаратные и программные связи в фирменном оборудовании RAN. Эта функция обеспечивает большую гибкость для операторов мобильной связи при развертывании и модернизации своего сегмента RAN.

Рисунок 40 иллюстрирует основные различия между традиционной и открытой архитектурой RAN.

Архитектура Open RAN предлагается для достижения трех основных целей, а именно:

- **Облакообразование:** цель состоит в поддержке облачных функций RAN с помощью disaggregated аппаратных и программных компонентов.
- **Интеллект и автоматизация:** цель – использовать расширенные возможности AI/ML для обеспечения автоматизированного управления и оркестровки в RAN
- **Открытые внутренние интерфейсы RAN:** цель – поддерживать различные интерфейсы Open RAN, включая интерфейсы, определенные 3GPP.

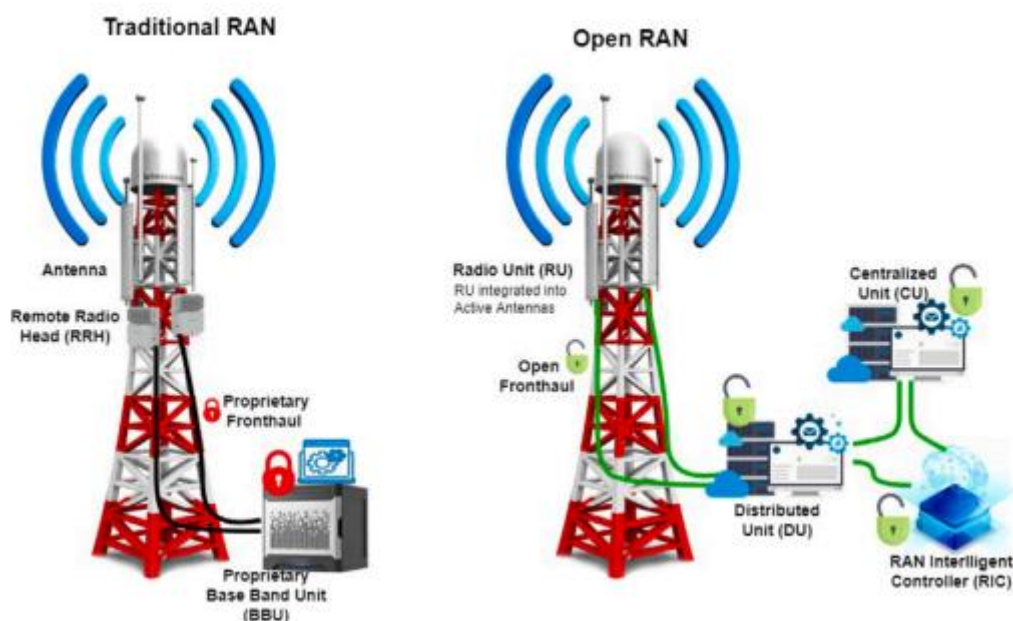


Рисунок 40 – Высокоуровневое сравнение Open RAN с традиционной RAN

Как показано на рисунке 40, RAN в архитектуре Open RAN разделена на четыре основных строительных блока, а именно: радиоблок (RU), распределенный блок (DU), централизованный блок (CU) и контроллер интеллекта RAN (RIC). RU расположен с антеннами и отвечает за передачу, прием, усиление и оцифровку радиочастотных сигналов. Бывший BBU (Based Band Unit) теперь разделен на DU и CU. Они являются вычислительными частями базовой станции. Здесь DU физически расположен ближе к RU, в то время как CU может быть расположен ближе к ядру. RIC возможен для принятия интеллектуальных и автоматизированных решений, связанных с RAN. Устройство O-RAN предложило более подробную архитектуру для Open RAN, представленную на рис. 2. Основные элементы архитектуры Open RAN включают управление и оркестровку служб (SMO), управление разведывательной информацией RAN (RIC), O-Cloud, центральный блок Open RAN (O CU), распределенный блок Open RAN (O-DU) и радиоблок Open RAN (O-RU).

- Управление и оркестровка служб (SMO): структура SMO является основным компонентом архитектуры Open RAN, основная обязанность которого заключается в управлении доменом RAN, например, предоставление интерфейсов с сетевыми функциями, RIC в режиме, близком к реальному времени, для оптимизации RAN и вычислительных ресурсов и рабочей нагрузки O-Cloud. Эти службы SMO могут быть выполнены через четыре интерфейса, включая A1, O1, O2 и открытую фронтальную M-плоскость.

- Управление интеллектом RAN (RIC): эта логическая функция позволяет Open RAN выполнять оптимизацию функций и ресурсов в реальном времени с помощью данных, собранных из сети и конечных пользователей. Это ключевой элемент в Open RAN, который помогает реализовать стратегию деагрегации, привнося в RAN мультивендорную совместимость, интеллект, гибкость и программируемость. RIC делится на компоненты не в реальном времени RIC (Non-RT RIC) и RIC в близком к реальному времени (Near-RT

RIC). Non-RT RIC интегрирован с Open RAN SMO Framework. Он обрабатывает запросы на управление и ресурсы RAN во втором диапазоне. Для этой задачи Non-RT RIC использует специализированные приложения, называемые rApps. Non-RT RIC также может собирать показатели производительности сети и данные абонентов, чтобы предлагать рекомендации по оптимизации сети на основе ИИ и руководству политикой для Near-RT RIC. Near-RT RIC находится на периферийных серверах или в региональных облаках, поскольку отвечает за выполнение действий по оптимизации сети в диапазоне миллисекунд. Near RT RIC использует различные xApps для поддержки этих задач.

- O-Cloud: это физическая вычислительная платформа. Она создает и размещает различные функции виртуальной сети (VNF) и функции облачной сети (CNF), которые используются RIC в режиме, близком к реальному времени, плоскостью управления O-CU, плоскостью пользователя O-CU и O-DU.

- O-DU: этот логический узел имеет функциональные возможности физического и MAC-уровней. Этот элемент завершает E2 с интерфейсами F1.

- O-CU: это логический узел в архитектуре Open RAN, размещающий все функции как плоскости управления, так и плоскости данных. Эти две плоскости O-CU подключаются к логическому узлу O-DU через интерфейс F1-с и интерфейс F1-и соответственно.

- O-RU: этот логический узел имеет возможности физического уровня и обработки радиосигналов для подключения к инфраструктуре SMO через открытый интерфейс Fronthaul M-plane и подключается к конечным пользователям через радиointерфейсы.

## 5.2 Стандарты и требования к внедрению Open-RAN

Open-RAN (Open Radio Access Network) представляет собой инновационную концепцию, направленную на создание открытой и стандартизированной архитектуры сетей радиодоступа. Ее цель – обеспечить



совместимость оборудования и программного обеспечения различных производителей, что способствует повышению гибкости, снижению затрат и ускорению внедрения новых технологий в телекоммуникационной отрасли.

3GPP впервые начал разработку различных вариантов функционального разделения в рамках Release-14, т. е. до 5G-релиза.

Введенные функциональные разделения были направлены на введение понятия disaggregation стандартного стека протоколов, например, для отделения обработки определенного уровня стека протоколов от вычислительной сущности. Такое движение 3GPP считается начальным семенем для настоящего сотового интерфейса и открытости обработки и стало ключевым драйвером для последующих спецификаций O-RAN. Кроме того, по мере продвижения 3GPP release-18 появляются новые критические варианты использования, такие как расширенная реальность (XR). Эти новые классы услуг требуют обширных вычислительных мощностей (которые обычно делегируются на периферию сети, т. е. периферийные вычисления), высокой пропускной способности и радиоканалов с малой задержкой соответственно. Соответственно, эффективная поддержка этих строгих услуг является весьма сложной задачей. Поэтому предполагается, что будущие архитектуры O-RAN могут улучшить возможности сотовых систем для эффективной поддержки этих будущих вариантов использования, благодаря, в отличие от собственных систем 3GPP, их уникальным вычислительным возможностям пула и максимальной гибкости интерфейса [319].

Поскольку компании, занимающиеся оборудованием, программным обеспечением и телекоммуникациями, работают вместе над созданием открытой виртуализированной облачной сети, стандартизация имеет решающее значение. В движении Open RAN есть несколько преобладающих организаций по стандартизации.

Однако только две из них привлекли внимание мировых СМИ и промышленности больше, чем другие: O-RAN Alliance, созданный в начале 2018 года, всемирная инициатива операторов, направленная на определение

новых архитектур радиосвязи, и Telecom Infra Project (TIP), запущенный Facebook (– Meta) в 2016 году. В этой статье мы обсудили все архитектуры Open RAN, интерфейсы и варианты использования на основе стандартов O-RAN Alliance. Основная цель O-RAN Alliance – внести вклад в создание цепочки поставок, которая открывает рынок RAN для новых поставщиков. Прогресс в стандартизации O-RAN всегда включает работу над сетевыми контроллерами, фреймворком управления и оркестровки, а также интерфейсами, которые соединяют все компоненты телекоммуникационных сетей в инфраструктуре RAN. Определяя новые стандартизированные интерфейсы, можно достичь автоматизации замкнутого цикла, оптимизированной для ИИ, и открыть новую эру сетевых операций [320]. На сегодняшний день работа по спецификации альянса O-RAN разделена на технические рабочие группы (РП), все из которых находятся под надзором Технического руководящего комитета (TSC). Как показано в Таблице 4, каждая из РП охватывает часть архитектуры системы O-RAN:

Таблица 4 – Основные направления альянса O-RAN

Техническая рабочая группа (РГ)		Основные направления
РП 1	Варианты использования и общая архитектура	Определение ключевых вариантов использования оптимизации и управления O-RAN, сценариев развертывания и общей архитектуры
РП 2	Интерфейс Non-RTRIC и A1	Оптимизация и автоматизация управления радиоресурсами RAN (RRM), оптимизация процедур более высокого уровня с использованием
РП 3	Интерфейс Near-RT RIC и E2	

		интеллектуального контроллера RAN (RIC). Также предоставление моделей AI/ML для функций RAN
РП 4	Открытые интерфейсы Fronthaul	Разработка открытых интерфейсов для эффективного обеспечения взаимодействия между различными поставщиками оборудования и программного обеспечения RAN
РП 5	Интерфейс OpenF1/W1/E1/X2/Xn	
РП 6	Облакообразование и оркестровка	
РП 7	Аппаратное обеспечение White-box	Виртуализация и модуляризация многовендорного оборудования и программного обеспечения RAN
РП 8	Дизайн стека ссылок	
РП 9	OpenX-haul Transport	Проектирование новой открытой транспортной сети на основе новых архитектур и требований к обслуживанию конечных пользователей для fronthaul, mid-haul и backhaul
РП 10	OAM для O-RAN	Изучение спецификаций O1 Operational and Management (OAM) интерфейса и обеспечение скоординированного определения и сбора ключевых

		показателей эффективности (KPI) O1 во всех рабочих группах
РП 11	Рабочая группа по безопасности	Разработка аспектов безопасности открытой экосистемы RAN

По сравнению со стандартными интерфейсами и архитектурой 3GPP, альянс O-RAN фокусируется на деагрегированной и полностью совместимой архитектуре RAN. Что касается стандартизации интерфейса RAN, 3GPP в основном разрабатывает интерфейс между UE и сетевым узлом, который является eNodeB в долгосрочной эволюции (LTE) или gNodeB в технологии 3GPP New Radio (NR) и межузловыми интерфейсами.

Сетевой узел, eNodeB или gNodeB, имеет несколько уровней стеков протоколов 3GPP; Однако он рассматривается как монолитная сетевая сущность, предоставляющая все услуги радиодоступа.

Существует несколько отраслевых инициатив открытого RAN, которые стремятся объединить экосистему партнеров по цепочке поставок и продвигать открытый RAN посредством определения, разработки и тестирования стандартов и эталонных архитектур.

Основные стандарты и организации:

- O-RAN ALLIANCE: Международная организация, объединяющая операторов связи, производителей оборудования и исследовательские институты. Ее задача – разработка и продвижение открытых стандартов для сетей радиодоступа, обеспечивающих совместимость и интероперабельность компонентов от разных поставщиков.

- 3GPP (3rd Generation Partnership Project): Глобальная организация, занимающаяся разработкой стандартов для мобильных телекоммуникаций, включая спецификации для сетей 4G и 5G.

Ключевые требования для внедрения Open-RAN:

- Открытые интерфейсы: Стандартизация интерфейсов между различными компонентами сети, такими как распределенный блок (DU) и радиоблок (RU), что позволяет интегрировать решения от разных производителей.

- Функциональная совместимость: Обеспечение беспрепятственной работы оборудования и программного обеспечения различных поставщиков в единой сети. Это достигается посредством сертификации и тщательного тестирования на соответствие установленным стандартам.

- Безопасность: Внедрение механизмов защиты, учитывающих расширенную поверхность потенциальных атак в открытых и деагрегированных сетях. Это включает регулярную оценку рисков и реализацию соответствующих мер безопасности.

- Виртуализация и облачные технологии: Использование виртуализированных сетевых функций (VNF) и облачных платформ для повышения гибкости и масштабируемости сети. Это позволяет операторам быстро адаптироваться к изменяющимся требованиям и эффективно управлять ресурсами.

- Интеллектуальное управление: Применение технологий искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML) для автоматизации управления сетью и оптимизации использования радиоресурсов. Это способствует повышению эффективности и снижению операционных затрат.

#### Преимущества внедрения Open-RAN:

- Снижение зависимости от одного поставщика: Операторы получают возможность выбирать оборудование и программное обеспечение от различных производителей, что способствует повышению конкуренции и снижению цен.

- Ускорение инноваций: Открытая архитектура позволяет быстрее внедрять новые технологии и сервисы, адаптируясь к потребностям рынка.

- Экономическая эффективность: Использование стандартного оборудования и программного обеспечения снижает капитальные и операционные затраты.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение Open-RAN сталкивается с рядом вызовов:

- Совместимость и интеграция: Обеспечение корректной работы компонентов от разных производителей требует тщательного тестирования и сертификации.

- Безопасность: Открытая архитектура может увеличивать поверхность атаки, что требует дополнительных мер по обеспечению кибербезопасности.

- Затраты на переход: Миграция от традиционных решений к Open-RAN может потребовать значительных первоначальных инвестиций и ресурсов.

Однако, несмотря на эти вызовы, многие страны и компании активно инвестируют в развитие и внедрение Open-RAN. Например, в России разработаны национальные стандарты Open-RAN, что способствует развитию отечественного производства оборудования для сетей 5G и обеспечивает технологическую независимость страны. Казахстан также рассматривает Open-RAN как ключевой элемент стратегии импортозамещения в ИТ-сфере, что позволит обеспечить технологическую независимость и национальную безопасность.

Внедрение Open-RAN требует комплексного подхода, включающего стандартизацию, обеспечение безопасности, обучение персонала и тесное сотрудничество между операторами, производителями и регуляторами. Только совместными усилиями можно преодолеть существующие барьеры и реализовать потенциал открытых сетей радиодоступа.

### 5.3. Возможности интеграции Open-RAN с искусственным интеллектом

## Интеграция ИИ и МО в 5G: роль 3GPP и Open-RAN

### Совместные усилия 3GPP и Open-RAN

Две ведущие организации в области телекоммуникаций — Программа партнерства третьего поколения (3GPP) и Альянс Open-RAN (Open-RAN) — активно работают над внедрением технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в архитектуру 5G [321]. Эти технологии призваны повысить интеллектуальность сетей, автоматизировать управление ресурсами и минимизировать необходимость человеческого вмешательства.

3GPP представила Функцию сетевой аналитики данных (NWDAF) как средство внедрения интеллектуальных возможностей в ядро сети. Также был разработан общий фреймворк для интеграции интеллектуальности в радиодоступную сеть (RAN). Основное внимание уделяется трем ключевым случаям использования:

Управление лучами (BM): Улучшение направленности сигналов для снижения интерференции;

Усовершенствование обратной связи по информации о состоянии канала (CSI): Использование МО для сжатия и прогнозирования состояния канала;

Повышение точности позиционирования: Применение ИИ/МО для более точного определения местоположения пользовательского оборудования (UE), особенно в условиях NLOS.

С другой стороны, Open-RAN предоставляет более детализированные спецификации, определяя архитектуру Интеллектуального контроллера RAN (RIC). Он включает два ключевых компонента:

Non-real Time RIC: Обеспечивает долгосрочную оптимизацию и стратегическое планирование сети.

Near-real Time RIC: Отвечает за адаптивное управление в пределах нескольких миллисекунд.

В сочетании с программно-определяемыми сетями (SDN) и виртуализацией сетевых функций (NFV), RIC позволяет автоматизировать

управление RAN, обеспечивая настройку параметров и исключая необходимость ручного вмешательства.

Распределение задач между NWDAF, Non-real Time RIC и Near-real Time RIC зависит от требуемой задержки замкнутого цикла, то есть времени от ввода данных до принятия решения и его реализации. Например, для снижения энергопотребления в активных антенных блоках (AAU) RAN могут использоваться различные меры, такие как отключение ячеек, каналов, кадров или слотов. В этом случае:

NWDAF управляет отключением ячеек,

Non-real Time RIC отвечает за отключение каналов,

Near-real Time RIC регулирует отключение кадров и слотов.

Перспективы стандартизации 6G

Ожидается, что к 2025 году в рамках 3GPP начнется процесс стандартизации 6G. Разработка новых стандартов затронет несколько ключевых направлений.

#### 1. Ядро 5G (5GC)

Группа технических спецификаций 3GPP (TSG SA2) отвечает за разработку интеллектуальных механизмов для ядра сети 5G (5GC). 5GC играет центральную роль в экосистеме 5G (5GS), поддерживая архитектуру, основанную на сервисах (SBA), которая обеспечивает гибкость за счет модульного подхода к сетевым функциям (NF).

Функция пользовательской плоскости (UPF) в 5GC соединяет радиодоступную сеть (RAN) с внешними сетями, управляя маршрутизацией пакетов, контролем качества обслуживания (QoS) и измерением трафика. Плоскость управления включает различные сетевые функции, каждая из которых выполняет специализированные задачи.

В релизе 16 NWDAF (Функция сетевой аналитики данных) впервые использует ИИ/МО для сбора и анализа данных из компонентов 5GC.



В релизе 17 внедрены новые модули: Analytics Logical Function (AnLF) для обработки выводов и Model Training Logical Function (MTLF) для обучения МО-моделей.

В релизе 18 исследуются дальнейшие усовершенствования UPF, сетевой автоматизации и применения ИИ/МО для сервисов 5G.

## 2. Радиодоступная сеть (RAN) и Open-RAN

Архитектура Open-RAN предполагает разделение аппаратного и программного обеспечения с использованием открытых интерфейсов. Это дает множество преимуществ:

Гибкость и адаптивность сети,

Возможность использования решений от разных поставщиков,

Интеграция SDN и снижение затрат,

Оптимизация распределения ресурсов.

Совместные исследования 3GPP и Open-RAN направлены на автоматизацию и внедрение ИИ/МО в управление RAN, что позволит:

Снизить затраты на эксплуатацию,

Повысить эффективность использования спектра,

Минимизировать необходимость вмешательства оператора.

## 3. Воздушный интерфейс

Группа TSG RAN1 3GPP занимается исследованиями возможностей внедрения интеллектуальности в воздушный интерфейс 5G и будущего 6G. В рамках релиза 18 рассматриваются три ключевых направления:

Управление лучами (BM): Использование ИИ/МО для повышения мощности сигнала и снижения интерференции.

Улучшение CSI: МО-прогнозирование состояния канала для повышения точности обратной связи.

Повышение точности позиционирования: Применение ИИ/МО для улучшенного определения местоположения UE.

## 4. Будущие направления исследований

Будущие стандарты ИИ/МО будут опираться на несколько ключевых подходов:

Federated Learning (FL): Обучение ИИ-моделей с распределенной обработкой данных, не нарушая их конфиденциальность.

End-to-End Learning (E2E): Применение глубоких нейронных сетей для реализации радиопrotocolов.

Explainable AI (XAI): Разработка интерпретируемых ИИ-моделей, которые могут объяснять свои решения.

Несмотря на достигнутый прогресс, все еще остаются вызовы, включая:

Проблему адаптации ИИ к реальным условиям,

Улучшение объясняемости решений ИИ,

Оптимизацию вычислительных затрат.

#### 5. Анализ существующих исследований

В таблице 3 представлены четыре исследования, посвященные Open-RAN с акцентом на интеллектуальные технологии. Однако ни одно из них не содержит комплексного систематического обзора всех существующих работ.

Количество рассмотренных исследований варьируется от 2 до 34,

Некоторые работы не указаны явно,

Методологии и сценарии использования существенно различаются.

Это подчеркивает необходимость комплексного систематического анализа.

Вклад данной работы

Настоящее исследование охватывает все ключевые аспекты интеллектуальных Open-RAN:

Методологии и интеллектуальные подходы,

Спецификации и стандарты,

Сценарии использования,

Реальные примеры и их влияние.

Рассматриваемые сценарии использования включают:

Оптимизацию и автоматизацию сети,

Сетевую сегментацию (slicing) и распределение ресурсов,  
 Управление трафиком и передачу соединения (handover),  
 Обнаружение аномалий,  
 Совместное использование спектра и когнитивные радиосети (CRN),  
 Massive MIMO.

Примечательно, что ни одно из существующих исследований не охватывает все указанные методологии и сценарии в полном объеме.

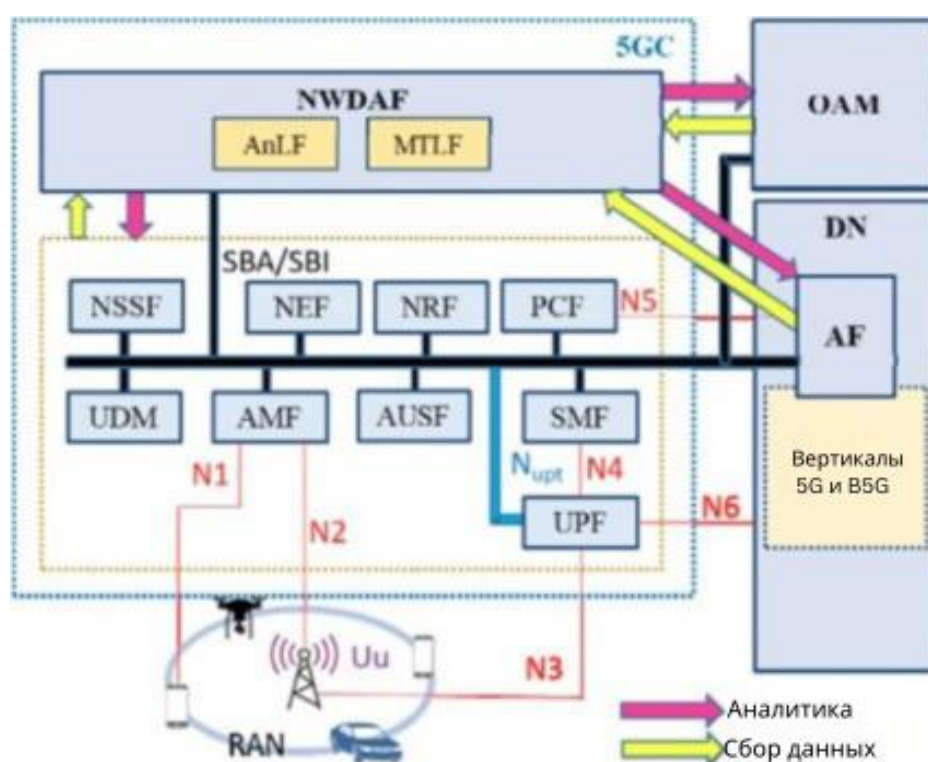


Рисунок 41 – Сбор данных и генерация аналитики с использованием NWDAF [321]

#### 5.4 Open RAN и интеллектуальные технологии в сетях 6G

Архитектура 6G на основе O-RAN поддерживает сетевое разделение, что позволяет использовать несколько виртуальных сетей в одной физической инфраструктуре. Каждый срез можно настроить с определенными

параметрами производительности и безопасности для поддержки различных требований к обслуживанию, включая сверхнадежную связь с малой задержкой, улучшенную мобильную широкополосную связь и массовую связь машинного типа [322]. Предполагается, что будущие сети 6G будут управляться данными и быть автономными, используя ИИ для оптимизации программируемых стеков протоколов и управления виртуализированными сетевыми функциями. Ожидается, что эти передовые сети будут включать облачные стратегии безопасности и устойчивости с нулевым доверием, подчеркивая разделение компонентов RAN [323]. Ожидается, что управление сетями 6G будет автоматизировано и доверено ИИ, а будущая архитектура RAN готова превзойти существующие сети LTE и 5G благодаря своей интеллектуальной конструкции на основе ИИ. Улучшения в спектральной эффективности, доступе к спектру и ключевых показателях производительности направлены на повышение энергоэффективности и оптимизацию развертывания и эксплуатации сети. Достижение повсеместного покрытия и повышение устойчивости сетевой инфраструктуры являются важнейшими целями беспроводных систем следующего поколения, что требует комплексной переоценки сотовой архитектуры и операций.

O-RAN стремится создать открытые и стандартизированные интерфейсы в архитектуре RAN для поощрения инноваций, снижения сетевых затрат и обеспечения большей гибкости и маневренности. O-RAN стремится повысить производительность сотовых сетей за счет использования алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения. Несмотря на такие проблемы, как совместимость и производительность сети, интеграция O-RAN считается важной для архитектуры 6G из-за ее фокуса на совместимости, разнообразии поставщиков, гибкости и инновациях. Она способствует совместимости оборудования от разных поставщиков с помощью стандартизированных интерфейсов и открытых протоколов, уменьшая привязку к поставщику и способствуя развитию конкурентоспособной экосистемы инноваций и снижения затрат.

В архитектуре O-RAN 6G на основе ИИ открытые интерфейсы имеют решающее значение для повышения производительности сети и показателей качества обслуживания. Эти интерфейсы играют важную роль в преобразовании традиционных RAN в модули O-RAN на основе ИИ в будущих беспроводных сетях. Ниже приведены некоторые ключевые открытые интерфейсы, которые вносят значительный вклад в это преобразование:

Открытый интерфейс Fronthaul: Интерфейс O-RAN Fronthaul подключает распределительный блок к одному или нескольким радиоблокам в пределах одного gNB. Он обеспечивает распределение функций физического уровня между радио и распределенными блоками, при этом распределенный блок контролирует работу радиоблоков. Интерфейс разработан для надежной связи с малой задержкой и поддерживает потоки URLLC с минимальными искажениями. Он состоит из пользовательских и контрольных плоскостей для команд управления данными и RHY-уровнем, плоскости синхронизации для управления синхронизацией и плоскости управления для настройки функций радиоблоков из распределенного блока [324].

Интерфейс E2: Интерфейс E2 имеет решающее значение в архитектуре O-RAN, позволяя интеллектуальному контроллеру RAN (RIC) контролировать радиоресурсы, сбор измерений и процедуры управления. Он управляет процессами мобильности UE, а сообщения E2 запускают действия управления между узлами E2 и xApps, при этом RIC реагирует соответствующим образом [325].

Интерфейс A1: Интерфейс A1 соединяет RIC в режиме, близком к реальному времени, обеспечивая руководство на основе политик, управление моделями машинного обучения и передачу обогащенной информации для улучшения принятия решений в реальном времени, которое опирается на протокол приложения A1.

Интерфейс O1: Интерфейс O1 соединяет компоненты, специфичные для O-RAN, с узлами RAN, поддерживая службы управления путем объединения

архитектуры репрезентативного состояния с использованием API HTTPS и протокола конфигурации сети для предоставления служб предоставления, уведомлений об ошибках, потоковой передачи данных о производительности в реальном времени и управления файлами [326].

Влияние Open RAN на развертывание сети 6G:

Операторы связи сталкиваются со значительными расходами, связанными с потреблением энергии, что составляет до 60% их эксплуатационных расходов. Индустрия информационных и вычислительных технологий вносит около 2–3% от общего объема выбросов парниковых газов [327]. Повышение энергоэффективности при проектировании сетей 6G имеет решающее значение, что приводит к улучшению радиокомпонентов, протоколов, эффективности и использования. Модернизация сотовых сетей между поколениями является сложной, дорогостоящей и трудоемкой. Операции требуют тщательного планирования и контроля с участием человека, что приводит к увеличению расходов и ограничению возможностей оптимизации для выбранных параметров и услуг. Будущим беспроводным системам потребуются более оптимизированные и автоматизированные процессы развертывания сети и эксплуатации.

Развертывание высокочастотных сетей 5G в первую очередь сосредоточено на густонаселенных городских районах, поскольку текущее использование в пригородных и сельских районах не оправдывает высоких затрат на развертывание. В результате сотовые сети развиваются в двух различных направлениях, оставляя малонаселенные районы недостаточно обслуживаемыми. Достижение широкого покрытия для беспроводных систем следующего поколения имеет решающее значение, при этом исследования изучают неземные системы и способы снижения затрат на развертывание. Повышение устойчивости сети к различным инцидентам имеет решающее значение, поскольку сотовая связь становится все более распространенной.

## **6. БЕЗОПАСНОСТЬ И КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТЬ В СЕТЯХ 5G И 6G**

### **6.1 Анализ угроз и защитных механизмов в сетях 5G и 6G**

Безопасность и конфиденциальность для 6G все еще находятся в зачаточном состоянии своего цикла разработки, как и связанные с ними вопросы. Существующие исследования по вопросам безопасности и конфиденциальности [328-330] можно разделить на три группы: (1) безопасность и сохранение конфиденциальности для сетей IoT и их дочерних сетей, например, беспроводных сенсорных сетей, транспортных сетей, (2) проблемы безопасности и конфиденциальности для существующих сотовых сетей 4G/5G и (3) безопасность и конфиденциальность в 6G путем анализа проблем вокруг определенных ключевых технологий, таких как машинное обучение. Безопасность и конфиденциальность IoT – не новая тема. Несколько технологий безопасности и конфиденциальности IoT могут частично внести вклад в область 6G. Например, авторы [331] представляют проблемы, связанные с безопасностью, и источники угроз в IoT, выделяя различные перспективные технологии для 6G, такие как блокчейн. Более узкий подход заключается в рассмотрении безопасности в определенных типах сетей, которые могут стать реальностью в 6G, таких как транспортные сети [19] и сети IoT с поддержкой 6G [332].

Однако обсуждение конкретных атак в сетях 6G в зеркале безопасности IoT несколько ограничено. Более того, учитывая слабое видение концепций 6G во время исследований [333], многие прогнозы по вопросам безопасности для сетей следующего поколения отдают предпочтение ссылкам на обычные угрозы, такие как атаки по сторонним каналам и атаки типа «распределенный отказ в обслуживании» (DDoS). Несколько полевых исследований, таких как безопасность в гетерогенных транспортных сетях 6G [334], тактильный Интернет [335], безопасность в сетях IoT с поддержкой периферийных вычислений [336], показывают, что сверхвысокая надежность и защита в

реальном времени будут ключевыми требованиями многих приложений в будущих сетях.

Однако модели связи 6G и архитектура безопасности явно не включены в обсуждения опросов. Темы безопасности и конфиденциальности для сотовых сетей привлекли большое внимание из-за популярности мобильных устройств в нашей повседневной жизни. Большинство текущих обзоров безопасности и конфиденциальности сотовых сетей относятся к 5G. Например, авторы [337] представляют различные аспекты стандартов архитектуры безопасности 5G [338], имеющие отношение к таким сетям, как основные/транспортные сети. Ограничения и проблемы безопасности конкретных технологий, таких как SDN [339], программируемая сеть и виртуализация сетевых функций (NFV), особенно для сетей радиодоступа (RAN) [340] и многодоступных периферийных вычислений (MEC) [341], которые обещают играть ключевую роль в 6G, являются горячими темами и были частично рассмотрены.

Открытые обсуждения и технические материалы из этих обзоров безопасности и конфиденциальности 5G и конкретных технологий [342] являются важными источниками для нашего обзора устаревших технологий, которые влияют на безопасность и конфиденциальность 6G.

Изучение новых технологий для безопасности и конфиденциальности 6G начало набирать обороты в последнее время. Тесно связанные с нашей работой, Ван и др. [343] набросали краткий обзор видения безопасности и конфиденциальности 6G через зеркало новых приложений, например, беспроводного взаимодействия мозга и компьютера и многосенсорных приложений XR. Однако в этом исследовании отсутствует соответствующее техническое обсуждение того, как будет развиваться такая архитектура безопасности, или какие-либо подробности прогресса ИИ в повышении безопасности. Ylianttila et al. [344] выделяют несколько ключевых технологий безопасности и конфиденциальности 6G вместе с их остающимися



проблемами, но не обсуждают безопасность на уровне соединения и обслуживания. С другой стороны, многие авторы проводили опросы по более узким вопросам, таким как безопасность физического уровня, квантово-безопасные технологии безопасности, безопасность на основе ИИ, доверенные сети, которые, как предполагается, являются главными приоритетами в 6G. Недавно авторы в [346] выделяют возможные проблемы безопасности и конфиденциальности в различных технологиях и приложениях 6G. Однако нет всеобъемлющего опроса, который бы предоставил целостное представление о проблемах безопасности и конфиденциальности 6G в контексте общей архитектуры безопасности, защитных решений в основных коммуникационных технологиях или о том, как они развиваются из устаревших сетей для удовлетворения новых требований в приложениях 6G. Знания о переходе в сфере безопасности и осуществимости перспективных технологий могут пролить свет на лучший план для операторов/поставщиков услуг/разработчиков по обновлению инфраструктуры безопасности/систем защиты в нужное время.

Предпочтительный способ всесторонне понять безопасность и конфиденциальность 6G – это рассмотреть уроки, извлеченные из возможных провалов текущих архитектур безопасности и устаревших технологий, если они применяются для удовлетворения требований 6G. В этом разделе представлена наша оценка атак на безопасность и проблем конфиденциальности для различных поколений сотовых сетей. Затем мы выделяем уроки, извлеченные из предыдущих переходов безопасности, чтобы предусмотреть потенциальные изменения и улучшения для функций сохранения безопасности и конфиденциальности в 6G. А. 1G, 2G, 3G — проблемы безопасности в поэтапно выведенных и поэтапно выведенных из эксплуатации сетях. Существует много памятных вех с развитием первых трех поколений мобильных сетей, особенно в области безопасности. Первое поколение (1G) мобильных сетей не обеспечивало ни безопасности, ни

конфиденциальности. Запущенные в 1980-х и 1990-х годах, соответственно, второе поколение (2G) и третье поколение (3G) сыграли решающую роль в полной трансформации эпохи аналоговых телефонных услуг (1G) в IP-сети (3G). Хотя многие операторы по всему миру, особенно в развивающихся странах, по-прежнему предлагают услуги 2G и 3G, обе сети должны быть полностью отключены в течение следующих пяти лет. 2G и 3G дали много ценных уроков о том, как проблемы безопасности могут быть использованы злоумышленниками.

Например, самой печально известной атакой на 2G и 3G был International Mobile Subscriber Identity (IMSI)-catcher [347], где злоумышленник использовал незашифрованную идентификационную информацию во время процедур аутентификации и пейджинга для отслеживания мобильных абонентов. Многие правоохранительные и разведывательные службы в некоторых странах по-прежнему используют отслеживание на основе IMSI для отслеживания преступлений. С другой стороны, отсутствие сквозного шифрования в коммуникациях было основной причиной многих атак подслушивания, таких как «человек посередине», телефонное мошенничество и перехват SMS [348].

Атаки понижения рейтинга [347], [349] также были головной болью в двухсетевой инфраструктуре 2G и 3G. В такой атаке злоумышленник заставлял жертву подключаться к сетям 2G, которые не требуют взаимной аутентификации. После успешного понижения рейтинга злоумышленник мог запустить еще одну атаку «человек посередине» (MITM) [350] и свободно собирать IMSI UE для дальнейшего отслеживания местоположения. Многие атаки безопасности, которые впервые появились в 2G и 3G, такие как DoS-атаки сигнализации [351] и атаки истощения энергии [352], до сих пор не были устранены. В 4G, 5G — проблемы безопасности и улучшение работы сетей в течение следующих пяти лет Запущенный в 2009 году стандарт Long-term Evolution (LTE)- Advanced (официальная технология 4G в требованиях МСЭ

[353]) значительно развился за эти годы, что привело к наиболее широко развернутой сети [354]. По сравнению с 3G, безопасность 4G была значительно улучшена. Например, 4G/LTE [355] Evolved Packet System-Authentication and Key Agreement (EPS-AKA) включала ряд улучшений безопасности для взаимодействия между сетями 3GPP и не-3GPP. Также был введен новый механизм проверки шифрования и целостности для защиты данных сигнализации между UE и базовой сетью. С использованием криптографического ключа, связанного с EPS, UE может проверить идентификацию обслуживающей сети (SN).

Туннельное шифрование было впервые предложено с поддержкой IPSec. Несмотря на множество обновлений функций безопасности, архитектура безопасности 4G/LTE имеет несколько слабых мест. Во-первых, 4G не защищен от DDoS-атак, которые могут быть запущены вредоносными мобильными приложениями для перегрузки серверов Home Subscriber Server (HSS) и Mobility Management Entity (MME) многочисленными запросами аутентификации. Такая перегрузка потенциально блокирует доступ законных абонентов к сети [356]. Хотя IMSI/Global Unique Temporary Identifier (GUTI), временный идентификатор, используется для сокрытия долгосрочной личности абонента, исследователи обнаружили, что частота распределения TMSI/GUTI предсказуема [357] и может использоваться для отслеживания местоположения любого абонента.

Модель принятия решения об аутентификации домашней сети для консультации с обслуживающей сетью во время аутентификации UE в 4G также имеет много недостатков безопасности. Поскольку решение принимается исключительно обслуживающей сетью, хорошо организованный злоумышленник может создать поддельные обслуживающие сети для отслеживания абонентов [358], [359]. Другая большая уязвимость заключается в службе Voice over LTE (VoLTE) [360], [361], которая использует пакетные сети LTE и протокол IP для установления голосовых и мультимедийных

вызовов. Авторы [362] обнаружили проблему повторного использования потока ключей в VoLTE — пакеты первого вызова зашифрованы тем же потоком ключей, что и пакеты второго вызова, — что используется для расшифровки и доступа к содержимому записанного целевого вызова. Преступники используют VoLTE для подделки звонящего, запуска атак типа «отказ в обслуживании», подавления голосовых вызовов и снятия денег с мобильного счета жертвы.

Представленные обновления в безопасности 5G: 5G был значительно модернизирован с точки зрения как архитектуры безопасности, так и протоколов аутентификации для соответствия модели сети, ориентированной на услуги, а также устранения многих уязвимостей в 4G. Согласно последним спецификациям, помимо пяти функций безопасности в сетях 4G, 5G добавляет новый домен: безопасность на основе архитектуры услуг (SBA). 5G также является первым стандартом, имеющим свою архитектуру аутентификации в качестве унифицированной структуры. Эта платформа поддерживает как сети доступа 3GPP, так и не-3GPP, например, Wi-Fi и кабельные сети.

Благодаря унифицированной платформе 5G обеспечивает одно выполнение аутентификации, при котором UE может быть аутентифицировано в сети доступа 3GPP, а затем перейти в другую сеть не-3GPP без необходимости повторной аутентификации. 5G защищает идентификационные данные UE лучше, чем 4G. 5G специально разрабатывает скрытый идентификатор подписки (SUCI), зашифрованную форму постоянного идентификатора подписки (SUPI), чтобы скрыть реальную информацию абонента на этапе аутентификации. Благодаря усовершенствованию постоянный идентификатор UE, например IMSI, не будет отправляться по сетям 5G в открытом виде. Эта функция является серьезным обновлением безопасности по сравнению с предыдущими поколениями сетей. 5G также сделала свою первую попытку поддержать законные перехваты.

Например, в некоторых особых случаях, например, когда суд выдает повестку для расследования преступления, операторы могут предоставлять законные услуги перехвата уполномоченным сотрудникам правоохранительных органов. 5G обеспечивает два новых дополнительных метода аутентификации: EAP-AKA' и EAP-TLS. EAP-AKA' имеет ту же миссию и возможности безопасности, что и 5G-AKA, но отличается форматом сообщения и ролью сущностей. EAP-TLS, как определено в RFC 5216, предназначен для аутентификации абонентов в IoT или частных сетях. Многие потенциальные не-USIM-устройства, такие как ноутбуки или IoT-устройства, теперь могут подписываться и получать доступ к ядру 5G с помощью EAP-TLS, что было невозможно в предыдущих поколениях.

Уязвимости безопасности 5G: Из-за своей сложности 5G имеет слабые стороны безопасности. Во-первых, протокол 5G-AKA не достигает нескольких целей, которые от него ожидаются. Например, соглашение между абонентами и обслуживающими сетями слабо из-за отсутствия обязательного предположения о канале между обслуживающей сетью и домашней сетью. Эта уязвимость может позволить злоумышленнику передать сетевой счет кому-то другому за его доступ в обслуживающей сети. Хотя 5G-AKA может противостоять атакам IMSI-catcher, исследователи обнаружили, что отслеживание пользователей все еще возможно в 5G путем наблюдения за сообщениями об ошибках синхронизации с течением времени. В другой работе [363] авторы предполагают, что кажущаяся безобидной услуга, такая как пейджинг, может быть использована для обнаружения пользователя с менее чем 10 вызовами. Наконец, проблема использования мошеннической базовой станции для обмана UE с целью раскрытия его SUPI, например, путем использования поддельного сообщения предварительной аутентификации, еще не была устранена в 5G.

Из-за стоимости операторы могут выбрать одну из двух стратегий развертывания: автономную (SA) или неавтономную (NSA). NSA

обеспечивает контрольную сигнализацию нового стандарта для базовых станций старых стандартов, тогда как в SA базовые станции нового стандарта напрямую подключены к основной сети без промежуточного переноса старой инфраструктуры. Развертывание в стратегии NSA имеет два преимущества: (1) гораздо более низкая стоимость, чем SA, и (2) повторное использование существующих объектов.

Напротив, развертывание стратегии SA требует высоких CAPEX, но может предоставлять услуги с полной емкостью нового стандарта. Большинство операторов могут отдать приоритет развертыванию NSA, чтобы быстро вывести новую технологию на рынок и постепенно монетизировать свои инвестиции, а не переходить на все сразу. С точки зрения безопасности выбор любой из стратегий развертывания имеет особые последствия. В отличие от сетей, развернутых SA, с полными преимуществами собственной безопасности в новом стандарте, операторам необходимо поддерживать процедуру перехода, которая может представлять потенциальный риск для безопасности.

Для поддержки NSA в 5G операторы должны развернуть EUTRA-NR Dual Connectivity, где 4G-LTE является основной технологией радиодоступа, а 5G-NR служит вторичной технологией радиодоступа с UE, подключенными к обоим радиоустройствам. Однако использование защиты конфиденциальности является необязательным в двойной аутентификации и может открыть дверь для потенциальной эксплуатации, если она не настроена правильно.

У каждого поколения сетей есть свои недостатки. Хотя было разработано много методов для смягчения эксплуатации, несколько уязвимостей остаются из-за сложности замены основных протоколов.

Атаки классифицируются по принципам безопасности (конфиденциальность, целостность, доступность). После резюме, сигнализация DoS, DDoS против серверов аутентификации, атаки истощения

энергии и отслеживание пользователей являются четырьмя из многих атак, которые будут по-прежнему головной болью для архитектуры безопасности 6G и приложений. Это связано с тем, что недостатки в базовых конструкциях протоколов (например, слабая аутентификация) и ограничения радиоресурсов являются общими проблемами всех поколений сетей, и их идеальное исправление является проблемой. Подводя итог, можно выделить следующие выводы:

1) Новые приложения часто являются источниками угроз безопасности, которые, в свою очередь, требуют улучшения безопасности. Новые приложения предлагают фирменные функции, которые подчеркивают усовершенствования новых сетевых стандартов по сравнению с более ранними поколениями. Однако они потенциально приводят к новым уязвимостям. Например, протокол VoLTE содержит проблему безопасности повторного использования потока ключей в двух последующих вызовах. Используя эту уязвимость, злоумышленник может расшифровать содержимое зашифрованного вызова VoLTE и подслушать телефонные звонки. Многие исследования прогнозируют, что 6G будет поддерживать волну новых приложений, таких как смешанная реальность и автономное вождение, которые, вероятно, также будут подвержены подделке и DoS-атакам. Таким образом, повышение возможностей безопасности технологий до их ввода в эксплуатацию является важным вопросом.

2) Поддержка устаревшего протокола в развертывании нового протокола может раскрыть старые уязвимости. Корневыми причинами являются проблема защиты устройств на старых сетевых частях со слабыми возможностями безопасности и несовместимость основных функций безопасности двух разных сетевых стандартов. Чтобы устранить несовместимость, новый стандарт должен часто переключаться, чтобы просить старую архитектуру аутентифицировать старые устройства. Эта модель контроля доступа потенциально раскрывает старые уязвимости в более

раннем стандарте. Например, злоумышленник может запустить атаку понижения версии [364], чтобы заставить устройства 4G-LTE подключиться к сетям 2G/3G. Затем, эксплуатируя уязвимости отсутствия взаимной проверки между UE и серверами аутентификации в стандартах 2G/3G, злоумышленник может свободно собирать IMSI UE и отслеживать местоположение UE. Если 6G поддерживает устаревшие устройства 4G/5G, следует серьезно рассмотреть вопросы безопасности, гарантирующие совместимость с двойной аутентификацией доступа к сети и управлением идентификацией.

3) Меньше изменений в конструкциях протоколов, но больше изменений в реализациях протоколов — это хорошо для введения меньшего количества новых уязвимостей, но более быстрого устранения большего количества существующих уязвимостей. Это начинается с того факта, что исправление архитектуры безопасности и недостатков протокола, таких как АКА и управление идентификацией абонентов, часто требует масштабных обновлений основного оборудования, даже для устройств конечных пользователей. Изменение может привести к бремени в финансах, которое многие операторы и абоненты могут быть не готовы принять. Новая архитектура и конструкция протокола также требуют значительного времени для проверки своих возможностей безопасности, чтобы избежать новых уязвимостей, введенных в реальной среде. Работоспособный график заключается в том, чтобы отдать приоритет исправлениям безопасности для внедрения протокола или обновлениям для систем предотвращения вторжений на конечных точках, которые могут смягчить влияние существующих уязвимостей. Однако, в долгосрочной перспективе, обновление дизайна, которое полностью устраняет недостатки и слабые стороны старой архитектуры, все еще имеет решающее значение.

4) Взаимная аутентификация и сквозное шифрование все еще являются проблемой и требуют прорыва. Отсутствие этих двух функций является основным источником многих известных атак, таких как поддельные



операторы, прослушивание и атаки с отслеживаемостью. Даже 5G, скорее всего, не сможет достичь этих целей безопасности, поскольку реализация этих двух функций сталкивается с проблемами высокой вычислительной и коммуникационной перегрузки. Без прорыва в мощностях обработки и моделях управления, требование сильного сквозного шифрования и взаимной аутентификации в 6G может повлиять на многие чувствительные к задержке сервисы. Любая задержка с внедрением таких функций в 6G может практически потопить надежду на полное устранение существующих проблем безопасности.

## 6. 2 Исследование технологий защиты и конфиденциальности

Каждое новое поколение сотовых сетей всегда пытается определить или обновить по крайней мере один из компонентов архитектуры безопасности, например, новую аутентификацию и управление ключами, чтобы решать проблемы, возникающие из-за новых приложений и бизнес-моделей. В этом разделе дается обзор дорожной карты 6G и новых изменений технологий поддержки 6G на трех уровнях (физический уровень, уровень подключения/сети, уровень услуг/приложений) на основе текущих исследований и последних технических документов 6G. С помощью изменений этих компонентов мы описываем требования безопасности и потенциальные решения, особенно в архитектуре безопасности.

### Приложения 6G, сетевое видение и потенциальная безопасность

Угрозы, которые влияют на безопасность и конфиденциальность 6G 6G начинает колесо своего типичного 10-летнего цикла эволюции. Основываясь на исследованиях в литературе, мы суммируем дорожную карту предполагаемого развития 6G, ключевые показатели эффективности (KPI) и использование спектра в сравнении с предыдущими поколениями на рисунке 3. В частности, 6G обеспечит сетевые скорости более 1 Тбит/с, задержку менее 1 мс и энергоэффективность в 10-100 раз лучше, чем 5G. 6G также

устанавливается с учетом долгосрочных целей для устойчивого и углеродно-нейтрального мира в Целях устойчивого развития Организации Объединенных Наций (ЦУР ООН) на 2030-е годы или Интернета чувств [365]. Чтобы достичь требований KPI, 6G нацелен на три существенных изменения на уровне радиоинтерфейса: (1) перемещение коммуникаций в более высокие диапазоны частот, (2) создание интеллектуальных радиосред с помощью реконфигурируемых поверхностей и (3) удаление традиционных структур ячеек, таких как бессвязный множественный вход и множественный выход (MIMO)).

Учитывая, что спектр на более низких частотах в более ранних поколениях сетей больше не применяется/не используется, помимо использования совместимых частот (6G mmWave), 6G будет исследовать новый высокочастотный спектр и фотонные сигналы (300 ГГц-3 ТГц) для собственных коммуникаций 6G (6G THz). Кроме того, многопользовательский MIMO, голографическое формирование радиолуча, орбитальный угловой момент и VLC являются важными технологиями для улучшения коммуникаций 6G.

На уровне соединения (сети) архитектура сети 6G будет иметь несколько существенных изменений по сравнению с 5G. Во-первых, 6G может реализовать концепцию сети как услуги (NaaS) и автоматизацию сети. NaaS позволяет пользователям/предприятиям персонализировать сети в соответствии со своими потребностями. Эта модель на основе пользователя требует нового дизайна сети. Сетевое взаимодействие на основе намерений, сквозное программное обеспечение, облачность и глубокая нарезка/виртуализация функций являются ключевыми технологиями для достижения цели. Во-вторых, быстрый сдвиг развертываний инфраструктуры 5G в сторону облачных сетей и открытого исходного кода, особенно для компонентов сети ядра/RAN, сигнализирует об эпохе «полной открытости» 6G.

Модель разработки может раскрыть потенциал 6G [366], поскольку функции и улучшения могут быть внесены в масштабе. Эта тенденция в первую очередь обусловлена ведущими поставщиками (например, AT&T), чтобы избежать полной зависимости от конкретных производителей оборудования. 6G может стать первой по-настоящему беспроводной сотовой сетью с поддержкой ИИ. Это видение перенесет концепцию «подключенных вещей» в 5G в «подключенный интеллект» в 6G, где большинство сетевых функций и узлов, скорее всего, будут контролироваться ИИ. Согласно, детерминированная сеть (DetNet) или чувствительная ко времени сеть (TSN), которая направлена на обеспечение гарантированной задержки и нулевой потери данных, может стать важным обновлением в 6G для удовлетворения требований сверхнадежной и малозадерживаемой связи 6G (uRLLC).

В частности, в 6G должны появиться новые приложения, включая расширенную реальность/цифровой двойник, тактильный/тактильный Интернет, умного медицинского наноробота, полностью автоматизированное вождение и голографическое телеприсутствие. Расширенная реальность (XR) относится к комбинации виртуальной реальности (VR), дополненной реальности (AR) и смешанной реальности (MR), чтобы обеспечить реально-виртуальные комбинированные среды и человеко-машинное взаимодействие в реальном времени. В 6G XR станет ключевой технологией для многих футуристических отраслей, таких как производство, образование и обучение, включая практику для опасных сред, которые слишком рискованны или дороги для выполнения в полевых условиях. Аналогично, цифровой двойник расширяет комбинацию технологий виртуальной реальности (VR/AR/MR) для имитации реального аналога (копии физических объектов и их поведения в реальном времени), например, моделирования городской среды для практики планирования. Тактильный/осязательный Интернет обозначает сеть Интернета со сверхнизкой задержкой, чрезвычайно высокой доступностью,

надежностью и безопасностью, которая может позволить людям и машинам взаимодействовать друг с другом в реальном времени.

Наконец, автономное вождение и голографическое телеприсутствие являются перспективными технологиями в 6G, которые также требуют сверхнизкой задержкой и чрезвычайно высокой надежности. Для поддержки этих чувствительных ко времени приложений больше вычислительной мощности будет размещаться не только на периферии, но и на каждом этапе связи 6G. Ожидается, что технологии ИИ будут играть ключевую роль в повышении интеллекта и автономных возможностей в таких вычислительных узлах.

Интегрированные сети «космос-воздух-земля-море» в 6G: Предпосылка для конвергенции гетерогенных сетей 3GPP инициировала первые обсуждения по интеграции неземных сетей с мобильными наземными системами, которые, вероятно, будут готовы к использованию в начале 2030-х годов [367], в эпоху 6G. По сути, модель интегрированных сетей «космос-воздух-земля-море» может обеспечить высокоскоростную, надежную передачу и чрезвычайно более широкое покрытие, чем четыре отдельных сегмента сети.

Сети будут использовать высотные платформы (например, плавучие станции), низкоорбитальные спутники, наземные базовые станции и бортовые суда для ретрансляции сигналов между конечными устройствами в зоне покрытия. С расширением покрытия, 6G обеспечит широкополосную передачу для морской связи, что принесет значительную пользу пользователям на морских судах и островах. Преимущества могут выходить за рамки гражданских приложений информационно-развлекательной деятельности или дистанционного обучения, например, усиление усилий по спасению людей и судов, терпящих бедствие. Однако еще предстоит преодолеть многие проблемы, такие как проекты оптимизации протоколов для уменьшения задержки распространения, использования различных возможностей RAN и поддержания непрерывности обслуживания (между мобильными наземными

системами и наземными сетями). Сотрудничество для совместного использования инфраструктуры между различными операторами также имеет решающее значение, поскольку спутниковые системы доступа и наземные станции могут быть расположены в разных регионах.

С точки зрения безопасности, неземные сети также уязвимы для атак на безопасность, направленных на беспроводные сети, таких как глушение и DoS-атаки сигнализации [368]. Ухудшение сигналов из-за таких атак может прерывать связь и задерживать доставку сообщений в критически важных приложениях. Более того, с учетом важной роли высотных платформ, маскировка базовых станций становится реальной угрозой во враждебных зонах. С учетом высокой неоднородности структуры сети, появление новых приложений 6G и поддерживающих технологий создает новые проблемы для безопасности и сохранения конфиденциальности.

Примечательно, что помимо улучшения большинства принципов безопасности 5G, защита в реальном времени и полная автоматизация безопасности станут двумя ключевыми функциями, которые появятся в 6G, учитывая рост множества чувствительных ко времени приложений и сложность интегрированных сетей. Многие считают, что передовой ИИ и высокопроизводительные вычисления будут ключевыми факторами для достижения целей. В этом видении 6G продолжит траекторию миграции корпоративных служб безопасности в периферийные узлы и облака в 5G, одновременно продвигая повсеместное использование разведки данных для повышения возможностей защиты. Наконец, архитектура Zero Trust и Zero Touch, в которой система защиты не должна доверять ничему и продолжать проверять каждую сущность перед предоставлением им доступа или, как ожидается, устранением проблем с паролями, скорее всего, является основным направлением систем безопасности 6G для предотвращения утечек данных.

### 6.3 Конфиденциальность и будущее защиты данных

Обзор нескольких проблем безопасности и конфиденциальности в типичных приложениях 6G: поиск источника проблем Таблица IV суммирует проблемы безопасности и конфиденциальности в приложениях, требования безопасности, потенциальные решения и оставшиеся проблемы. В целом, разные приложения имеют различные требования с точки зрения безопасности. Аналогично, атаки различаются в зависимости от приложения. Однако несколько атак могут воздействовать на несколько приложений. Например, злоумышленник может запустить сигнальные DoS-атаки, чтобы перегрузить и ухудшить производительность почти всех служб (например, XR, тактильный Интернет, автономное вождение). С другой стороны, подслушивание, глушение или уязвимости API распространены в автономных вождениях и сетях «космос-воздух-море». Из-за влияния атаки на несколько приложений в следующих разделах мы принимаем трехслойную архитектуру для классификации атак и соответствующих защитных решений для технологий, позволяющих 6G, вместо того, чтобы сосредоточиться только на нескольких приложениях. Этот подход к обзору на основе уровней может принести значительную пользу операторам и разработчикам, заинтересованным в предотвращении конкретных атак, которые представляют высокий риск для многих приложений, не ограничиваясь шестью типичными, перечисленными в этом подразделе. Недостатки связанных протоколов и оставшиеся проблемы технологий являются отправными точками для дальнейших улучшений.

Ожидается, что 6G станет мобильной сетью поколения для гетерогенных технологий. Согласно [369], взаимодействие человека с машиной и машины с машиной обещает стать более распространенным для поддержки беспроводных приложений «мозг-компьютер», интеллектуальных имплантатов, текстильных интегрированных тканей и автономного здоровья в предстоящие десятилетия. В этом видении 6G расширит взаимосвязь за пределы вещей для мира Интернета всего (IoE), где сосуществуют многие

беспроводные технологии. 6G IoE расширит общие применения приложений IoT и предложит их для каждой отрасли. В связи со значительным расширением покрытия сети, многие самоорганизующиеся сети (SON) будут предложены и будут эксплуатироваться на практике, где автоматизированные системы управления на основе ИИ могут помочь в упрощении планирования, настройки, управления, оптимизации и восстановления сетей мобильного радиодоступа и за его пределами. В 6G SON может быть улучшен до самоподдерживающихся сетей (SSN), чтобы устранить необходимость в отдельной зарядке разнородных устройств, например, путем объединения энергоэффективной связи, методов сбора энергии/передачи мощности и разгрузки энергоемкой обработки с устройств на вычислительные узлы-серверы, расположенные на периферии или плавучих станциях.

С трансформацией сетевых технологий и приложений в сторону автономных функций и гетерогенной связности, вопросы безопасности и конфиденциальности 6G будут значительно отличаться от обычных IoT и компьютерной безопасности. Во-первых, современная ИТ-безопасность не предназначена для обслуживания огромного количества подключенных и высокомобильных гетерогенных устройств. Эти крупномасштабные устройства IoT, которые не оснащены надежными схемами криптографии или взаимной аутентификацией из-за ограничений по ресурсам/энергии, могут вызвать огромные опасения относительно слабых звеньев для вторжения.

Во-вторых, аспекты безопасности новых протоколов в коммуникациях 6G IoE, таких как взаимодействие мозга и компьютера и молекулярные коммуникации, потребуют особых требований к защите безопасности (например, надежные коммуникации или реагирование в реальном времени) из-за прямых рисков для человеческой жизни. Однако 6G все еще может унаследовать несколько угроз безопасности от устаревших сетей и сред IoT/IT из-за использования одних и тех же основных протоколов, например, TCP/IP. Некоторые примеры атак — DoS, подслушивание, эксплуатация уязвимостей

и спуфинг. С учетом высокой сложности гетерогенных сетей 6G нуждается в новых подходах к безопасности и сохранению конфиденциальности, например, в большей автоматизации и поддержке взаимодействия. В следующем подразделе мы рассматриваем общую архитектуру безопасности 6G и намечаем потенциальные изменения, которые затем подробно описаны в следующих разделах.

Видение архитектуры безопасности 6G и потенциальные изменения 6G, безусловно, потребует корректировки своей архитектуры безопасности для удовлетворения новых приложений и расширения интегрированной сетевой модели космос-воздух-земля-море (как представлено выше). Рисунок 6 представляет собой абстрактную архитектуру безопасности 6G с несколькими ключевыми потенциальными изменениями в основных компонентах текущей архитектуры безопасности 3GPP.

В цепочке операторы сетей предоставляют сетевое подключение для абонентов и, вероятно, выделенную инфраструктуру Интернета для поставщиков услуг, тенантов и разработчиков. Поэтому операторы сетей будут основными заинтересованными сторонами для модернизации инфраструктуры безопасности сетевого доступа и домена сети. Поставщики услуг предлагают абонентам услуги с добавленной стоимостью (информационно-развлекательные, веб) и, вероятно, платформы для разработчиков/арендаторов (облачное хранилище, аналитика данных). В этом аспекте поставщики услуг будут учитывать модернизацию домена приложений и архитектуры безопасности на основе услуг.

Поскольку разработчики разрабатывают и поддерживают облачные/периферийные приложения (игра XR/AR), потенциальные обновления повышения безопасности для разработки приложений или поддержка нового API безопасности (в соответствии с услугами, предоставляемыми сторонними поставщиками) будут их задачами. В 6G операторы сетей могут играть роль поставщика услуг, например, мобильного



хранилища. В результате они также могут участвовать во многих частях улучшения безопасности услуг.

Иллюстрация семи изменений компонентов безопасности 6G и потенциальное воздействие на соответствующие заинтересованные стороны: оператора, абонента и поставщика услуг/разработчика. влияние от обновлений, например, путем замены нового устройства или регистрации SIM-карты. 6G требует новой модели аутентификации и криптографических схем для безопасности связи. 6G-AKA, квантово-безопасные криптографические схемы и безопасность физического уровня являются главными кандидатами.

Изменения в дизайне сети 6G в сторону облачных и открытых программируемых сетевых платформ требуют реформы архитектуры аутентификации. 6G, скорее всего, унаследует некоторые модели безопасности от 5G, такие как унифицированная платформа аутентификации как для открытых, так и для независимых сетей доступа. Однако необходимо добавить много новых функций, чтобы дополнить их. Например, протокол 6G-AKA должен сертифицировать четкие роли компонента, функции сервера аутентификации (AUSF) или функции привязки безопасности (SEAF), которые будут определять аутентификацию в межсоединительных коммуникациях. 6G-AKA должен иметь возможность проверять заявленную идентификацию конечной точки в глубокосоединенной и открытой программируемой сетевой платформе. Помимо улучшения контроля доступа к сети, безопасность физического уровня может стать решающим фактором для защиты сетей 6G IoT от обычных угроз, таких как атаки подмены.

Квантово-безопасные криптографические схемы [370] являются перспективными технологиями для безопасной связи в 6G, особенно для высокочувствительных и стратегических секторов, таких как банковское дело или оборона. Эти технологии являются заметным улучшением в 6G. В свою очередь, криптосистемы, такие как эллиптическая кривая криптография

(ЕСС), могут не исчезнуть в ближайшее время, по крайней мере, пока их замена квантовой технологией не станет технически осуществимой.

Новая модель управления идентификацией пользователя станет основным изменением управления абонентами 6G по сравнению с 5G. Несмотря на множество улучшений в плане безопасности и удобства, SIM-карты и модель управления идентификацией не претерпели существенных изменений с 2G. Требование подключения к устройствам практически ограничивает многие приложения IoT. Использование eSIM (SIM-карта, встроенная в мобильное устройство) или модели без SIM-карты может устранить барьеры для имплантируемых устройств 6G. Этот сдвиг потребует фундаментального изменения в хранении или выпуске идентификационных данных, например, SIM-карта может быть частью системы на кристалле (nuSIM) [371]. Децентрализованная модель подписки может стать еще одним значительным обновлением централизованной парадигмы аутентификации и авторизации 5G.

В настоящее время посещаемая сеть не может ни аутентифицировать UE в 5G, ни продавать какие-либо услуги (например, контент VR/AR) абонентам. Необходимо заключить соглашение о роуминге для подключения к домашней сети UE, которая взимает плату за все услуги. Такая модель защитит доход домашних операторов, который, по крайней мере, поставляется с соглашением о разделении доходов с гостевыми сетями. Из-за враждебности операторов эта модель роуминга еще не была изменена с 2G. С точки зрения пользователя, такой роуминг довольно неудобен, особенно если пользователь покидает зону действия домашней сети. Это будет значительным обновлением в 6G, если гостевая сеть сможет аутентифицировать UE для услуг, которые она предоставляет UE, и как это делает домашняя сеть.

Однако неясно, как можно сбалансировать права операторов при использовании децентрализованной подписки. Пока не появится новая бизнес-модель, удовлетворяющая операторов (например, монетизация за счет

дополнительных услуг приложений) или протокол взаимного доверия между операторами, централизованная модель подписки и аутентификация для роуминговых соединений между домашней сетью и обслуживающей сетью потребуют улучшений в ближайшие годы. Учитывая неизбежный переход от традиционных телефонных услуг к VoIP и интернет-услугам, падение доходов роумингового подразделения может мотивировать операторов принять модель продажи-доступа-как-услуги. Таким образом, текущая модель аутентификации может иметь больше пространства для упрощения в 6G.

Новые открытые протоколы аутентификации необходимы из-за расширения 6G на неземные сети, такие как спутниковая и морская связь, необходимы новые открытые протоколы аутентификации. 6G может открыть больше интерфейсов для гетерогенных приложений, таких как сети «космос-воздух-земля-море».

Однако, по сравнению с традиционными наземными или спутниковыми сетями, интегрированная сеть будет подвержена влиянию ограниченных и несбалансированных сетевых ресурсов [372]. Поддержка открытых протоколов аутентификации для интегрированной сети настоятельно рекомендуется и является предметом многих текущих усилий, например, в [373].

Взаимная аутентификация имеет решающее значение для целей сетей доверия 6G. В 5G взаимная аутентификация по-прежнему основана на традиционной модели симметричного ключа. Однако блокчейн и технологии распределенного реестра (DLT) могут быть перспективными решениями для изменения способа защиты конфиденциальности и целостности в 6G. Блокчейн и DLT гарантируют взаимное доверие, высокую сохранность конфиденциальности и предотвращение сбоев при единичном отказе. Они также могут повысить надежность связи ключевых объектов 6G, таких как серверы аутентификации или между обслуживающей сетью и домашней сетью. Однако блокчейн и DLT находятся на очень ранней стадии, поскольку

многие из их фундаментальных компонентов все еще находятся в стадии активной разработки. Хранение и обработка крупномасштабных записей/блоков на узлах во времени требуют дальнейших прорывов в ближайшие годы, поскольку операции современных решений блокчейна требуют огромной памяти и ресурсов (для майнинга мощности работы). Такая вычислительная нагрузка может значительно повлиять на производительность сети и энергопотребление устройства, ограничивая многие потенциальные приложения.

Биометрическая аутентификация или модель управления доступом к сервису без пароля — долгожданная функция безопасности в приложениях 6G. Модели защиты на основе паролей были необходимы для защиты многих приложений на протяжении десятилетий. Однако у них есть много недостатков. Некоторые из них легко поддаются взлому, требуют больших затрат на хранение и их трудно запомнить. Будущие технологии, такие как аутентификация на основе мозговых волн/сердцебиения, могут обеспечить большую устойчивость к кражам и улучшить пользовательский опыт: граждане могут использовать свою биоидентификацию для доступа к сети и услугам в любом месте, не отслеживая множество паролей. Эта аутентификация без пароля станет огромным шагом вперед для безопасности 6G.

Улучшенные HTTPS TLS и гомоморфные шифрования являются будущими технологиями для повышения безопасности сервисов и данных в приложениях 6G. Примечательно, что как улучшенное HTTPS TLS и гомоморфное шифрование будут оснащены квантово-устойчивыми алгоритмами для противостояния квантовым атакам (например, AES-256 или ECC P-384). Кроме того, гомоморфное шифрование позволяет выполнять операции, такие как поиск и запрос, на зашифрованных данных напрямую без расшифровки. Поэтому абоненты могут отправлять свои данные третьим

лицам (например, операторам, облачным провайдерам) для хранения или обработки.

Архитектура безопасности на основе услуг в 5G модернизирована до архитектуры безопасности на основе сквозных услуг и политик в 6G. Безопасность домена архитектуры на основе услуг является основой архитектуры безопасности 5G. 6G выведет эту функцию на новый уровень, архитектуру на основе сквозных услуг или даже безопасность домена архитектуры на основе политик, чтобы удовлетворить гибкость персонализации и микроразвертывания. Более того, такие приложения, как смешанная реальность, могут перемещаться ближе к UE, т. е. на периферийные узлы. Для целей оптимизации модель защиты для связи между UE и такими приложениями может работать на основе потоков или гибкого управления политиками из блока плоскости управления обслуживающей сети.

Многие функции 5G не исчезнут, а будут полностью поддерживаться с дальнейшим улучшением безопасности для использования 6G. Единая структура аутентификации и изоляция безопасности в технологиях 5G будут продолжать играть центральную роль в 6G для объединения функций аутентификации для сетей множественного доступа. Однако, учитывая расширение сетевого покрытия до интегрированной среды космос-воздух-земля-море, возможности безопасности структуры 5G-AKA будут целью дальнейших улучшений.

Развертывание управления идентификацией без SIM-карты станет огромным шагом для безопасности 6G. Эта амбициозная цель заключается в реформировании текущего управления идентификацией на основе SIM-карты для использования не-SIM-карты и децентрализованной модели подписки. Достижение этой цели станет важным шагом к устранению барьеров для имплантируемых устройств и пользовательского опыта в 6G. Однако неясно, поддержат ли операторы такие смелые изменения. Улучшение технологий

eSIM может быть разумным подходом для подготовки к будущему скачку перехода.

Единая структура аутентификации, беспарольная аутентификация и открытая модель безопасности являются будущим безопасности 6G, но в соответствующем контексте. Единая структура аутентификации и открытая модель интерфейса могут обеспечить упрощение архитектуры контроля доступа и безопасности для интегрированных сетей «космос-воздух-земля» — ключевой цели 6G. Между тем, за счет снижения сложности запоминания и хранения информации для входа, как в обычных моделях на основе паролей, беспарольная аутентификация является долгожданной функцией, которая улучшит пользовательский опыт и конвергенцию контроля доступа, которую ожидают многие службы 6G. Однако создание комплексной архитектуры для поддержки функций для всех приложений 6G потребует долгосрочных усилий. Внедрение функций для приложений, которым они нужны в первую очередь, а затем расширение реализации на всю сеть — когда инфраструктура будет готова — вероятно, является наилучшим подходом.

Поскольку физический уровень является краеугольным камнем беспроводной связи, защита информации на физическом уровне может предотвратить многие обычные атаки на радиосигналы, такие как подслушивание и глушение, которые влияют почти на каждое приложение 6G. Предпосылка безопасности на физическом уровне заключается в использовании характеристик беспроводных каналов (например, затухание, шум) для повышения конфиденциальности и выполнения облегченной аутентификации. Низкая сложность безопасности на физическом уровне особенно принесет пользу недорогим устройствам IoT 6G, которым часто не хватает энергии и вычислительной мощности для запуска расширенных механизмов аутентификации. Кроме того, опираясь на физические законы, безопасность на физическом уровне устойчива к криптоанализу, который был главной проблемой традиционных криптографических алгоритмов.

Безопасность на физическом уровне может быть реализована на базовых станциях/шлюзах IoT операторов или в алгоритмах модуляции сигнала. В следующих подразделах рассматриваются ключевые проблемы безопасности и несколько важных подходов к защите для внедрения технологий в 6G. А.

**Безопасность в коммуникациях 6G mmWave** Как мы отметили в предыдущем разделе, когда сети 6G начнут разворачиваться, значительное количество устройств 5G все еще будет включено. Поэтому mmWave и massive MIMO по-прежнему являются важными технологиями физического уровня в 6G-совместимых (неавтономных) сетях. На рисунке 8 показаны три распространенные атаки в сетях MIMO mmWave: подслушивание, глушение, атаки с заражением пилота (РСА). Подслушивание осуществляется путем вывода и прослушивания (сниффинга) открытых (незащищенных) беспроводных коммуникаций. В сетях MIMO mmWave 6G технология формирования луча может повысить безопасность для прослушивания канала. Подслушивателем может быть законное лицо (внутреннее) сети (например, сотрудник) или кто-то внешний (внешний). На основе информации о сигналах передачи (например, частота  $f_2$ ) между передатчиком (Алисой) и приемником (Бобом) подслушиватель может выполнить две другие атаки. Одна из них — атака глушения (рисунок 8.с), где глушитель может вводить радиосигналы (той же частоты, что и  $f_2$  Боба), чтобы занять общий беспроводной канал. Такая агрессивная инъекция не позволяет законным пользователям (например, Бобу) использовать беспроводной канал для связи, своего рода DoS. Другая — РСА, где злоумышленник намеренно передает идентичные пилотные сигналы (подделывая сигналы восходящей линии связи на шаге 2 рисунка 8.d), чтобы засорить фазу обнаружения пользователя и оценки канала передатчика (Алисы). В худшем случае передатчик направит частичный луч в сторону злоумышленника в манипулируемом направлении нисходящей линии связи (шаг 3 на рисунке 8.d), что фактически ухудшает передачу законного пользователя или вызывает утечку сигнала. Сверхмассивный MIMO и многопользовательский MIMO восприимчивы к РСА [374]. Кроме того,

система массивного MIMO без ячеек может подвергать себя риску из-за открытого расположения радиополос [29], т. е. плотные антенны легче доступны для физических атак.

Предотвращение трех вышеупомянутых типов атак в последнее время привлекло большое внимание. По сути, увеличение мощности сигнала между легитимными UE по каналам подслушивателя, т. е. максимизация уровня секретности, является фундаментальным подходом к предотвращению подслушивания и PCA. Ключевые методы подходов, основанных на мощности сигнала, заключаются в обеспечении максимизации емкости секретности в процессе предварительного кодирования, где передатчик будет распространять информационные сигналы приемникам, чтобы получить предварительные знания о канале связи (т. е. информацию о состоянии канала).. Идея заключается в том, чтобы ввести дополнительную случайность в модуляцию, которая направлена на то, чтобы помешать подслушивателю предсказать следующую последовательность сигнала/частоту, которую будет использовать передатчик. Многие недавние исследования полагаются на этот метод. Например, Чжан и др. [375] предлагают метод, при котором отправитель будет создавать несколько случайных сдвигов частоты в общедоступной пилотной последовательности или переключение частоты, чтобы избежать подслушивания. Другой появляющийся метод заключается в использовании скрытой связи с искусственным шумом или дружественным глушением, когда искусственные сигналы помех будут добавлены в нуль-пространство законного канала пользователя, чтобы сбить подслушивателя с толку на реальном канале передачи [376]. Другой подход заключается в использовании физической генерации ключей, т. е. в использовании энтропии случайности в каналах передачи-приема, таких как информация о состоянии канала (CSI), для генерации секретных ключей для связи. Авторы [107] предлагают физический обмен ключами между передатчиком и законными пользователями для проверки передачи от ненадежных партнеров. Однако интеграция процесса



шифрования/дешифрования в предварительное кодирование может повлиять на производительность переполненной передачи, не говоря уже об угрозах внутренних атак (т. е. подслушиватель является одним из законных пользователей). Новый подход заключается в использовании методов AI/ML для улучшения знаний CSI и применения надлежащих стратегий защиты, таких как переключение каналов, хотя большинство методов по-прежнему страдают от высокого потребления энергии. Обратите внимание, что максимизация уровня секретности может также значительно смягчить атаки с использованием помех. Без получения информации о конкретных сигналах связи между передатчиком и законным приемником (через подслушивание) злоумышленнику сложно эффективно заглушить канал связи, учитывая чрезвычайно высокую стоимость подавления всех частот в современных широкополосных беспроводных каналах. Из-за частых изменений частоты передачи (переключение частот) атака на фиксированной частоте также мало влияет на общую производительность приемника/передатчика. Более подробную информацию об атаках с глушением и соответствующих методах защиты от помех можно найти в обзорах [377]. Остающиеся проблемы: Основной проблемой для каналов MIMO является предположение об эффективном процессе предварительного кодирования. Однако на практике предварительное кодирование сильно зависит от влияния затухания и частичной/несовершенной CSI. Большинство существующих подходов к защите, которые в значительной степени опирались на предположение о совершенном знании полной или частичной информации CSI подслушивателей, скорее всего, не справятся со своей задачей в суровых условиях. Использование каналов секретности с плохим знанием CSI подслушивателя является центром многих текущих усилий. Раннее исследование по этому вопросу предполагает, что потенциальным решением является преобразование неопределенных ограничений CSI в детерминированные путем разделения законной вероятности сбоя передачи и вероятности сбоя секретности. Другой открытой проблемой является

обнаружение кооперативных подслушивателей, когда несколько подслушивателей сотрудничают для прослушивания беспроводного канала или выполнения активных атак (РСА) против базовых станций [378]. Наконец, помимо помощи в уклонении от атак, злоумышленник может использовать скрытые каналы для создания бэкдора для утечки данных или проникновения в систему. Обычные методы защиты — обнаружение опасных открытых портов, сигналов аномалий или блокировка трафика уязвимых протоколов на верхних уровнях (например, ICMP). Более подробную информацию о контрмерах по скрытым каналам можно найти в [379].

Большая интеллектуальная поверхность (LIS), другое название интеллектуальной отражающей поверхности (IRS), является революционной технологией для 5G и далее и 6G, которая использует планарный массив недорогих отражающих элементов для динамической настройки сдвига фазы сигнала передачи для повышения производительности связи. LIS поддерживает программируемое пространство через контроллер LIS, что называется интеллектуальным управлением. Многие считают, что LIS/IRS станет критической технологией для 6G плотных сетей THz, поскольку развертывание такого количества радиоустройств 6G для преодоления ограниченного покрытия THz-связи (представлено ниже) является чрезвычайно дорогим. Напротив, расширение использования недорогих устройств LIS/IRS (изготовленных из металлических или диэлектрических заплат с маломощными и несложными электронными схемами) для замены нескольких радиоустройств 6G может достичь той же производительности с гораздо меньшими затратами. Модель LIS/IRS значительно повышает безопасность. Эта отражающая модель чрезвычайно полезна, если качество прямой связи (между Алисой и Бобом) ухудшается из-за большого расстояния или препятствий. Авторы [117] указывают, что оптимизация мощностей передачи и фазового сдвига в каждом элементе LIS/IRS может максимизировать уровень суммарной секретности, например, путем

разрушения мощности отраженного сигнала для подслушивателя или предоставления различных каналов связи для приемников. Технически, идея использования IRS в качестве источника передачи данных для повышения безопасности аналогична идее использования многолучевых каналов распространения для предоставления различных безопасных каналов связи законным пользователям [380]. С. Безопасность в NOMA для массового подключения 6G Помимо MIMO, IRS и формирования луча, неортогональный множественный доступ (NOMA) является еще одной важной технологией 5G, которая также может использоваться для поддержки массового подключения 6G. Распределяя ресурсы канала для приемников справедливо путем назначения большей мощности для пользователей со «слабым сигналом» и вычитания мощности пользователей с сильным сигналом [381], передатчики с поддержкой NOMA позволяют большему количеству пользователей получить канал, что фактически увеличивает количество одновременно обслуживаемых пользователей. NOMA поддерживает как многоадресную передачу (пользователям кластера), так и одноадресную передачу (конкретному пользователю). Однако NOMA по-прежнему страдает от многочисленных угроз безопасности.

Упомянутые методы максимизации скорости секретности передачи в mmWave могут применяться для сетей с поддержкой NOMA для смягчения атак. Более того, оценки состояния канала (слабый/сильный) законных пользователей из процесса последовательного подавления помех (SIC) NOMA могут принести пользу стратегиям защиты на основе знаний CSI [382]. Однако в крайнем случае несколько подслушивателей могут сотрудничать, мешая нормальной работе NOMA, например, отправляя большое количество идентичных пилот-сигналов на передатчик с поддержкой NOMA на этапе вещания «наложенных сообщений». В результате передатчик может тратить много энергии на выделение этим злонамеренным пользователям. В этом случае сотрудничество систем NOMA или систем NOMA с другими

партнерами (например, IRS) может повысить безопасность систем, т. е. использование многолучевых каналов для предоставления различных каналов связи законным пользователям. Действительно, повышение безопасности физического уровня для сетей с поддержкой NOMA (т. е., где NOMA интегрирована с другими технологиями, такими как связь с использованием видимого света [383] и ТГц) стало горячей темой в последнее время..

Ожидается, что терагерцовый диапазон станет центральной технологией связи в 6G. Технически, ТГц может обеспечить сверхвысокую скорость передачи данных (до терабит в секунду) для многих приложений 6G, таких как тактильный Интернет и услуги XR/AR, которые технологии 5G, такие как mmWave, не смогут поддерживать. Однако на технологию ТГц сильно влияют окружающие атмосферные условия, т. е. спектр поглощается молекулами воды и рассеиваются потери. ТГц также имеет низкую проникающую способность против определенных препятствий (например, толстых стен). Из-за высокого резонанса поглощения покрытие связи ТГц относительно невелико, в пределах десятков метров. С низкой зоной покрытия и высоким резонансом поглощения 6G, вероятно, включает в себя плотные сети устройств с поддержкой ТГц для эффективной связи. Для повышения производительности передачи антеннам ТГц необходимо идеально выровнять сигнальные лучи, чтобы уменьшить угловое расхождение передаваемых сигналов. Ограниченное покрытие передачи и высокая направленность теоретически делают ТГц гораздо более безопасным и устойчивым к атакам, например, глушению и подслушиванию [384]. Чтобы добиться успеха, антенна подслушивателя должна быть расположена в области луча передаваемых сигналов, которая даже меньше, чем у антенны ММО миллиметрового диапазона, чтобы подключиться к ТГц-линии. В результате подслушивателю будет гораздо сложнее разместить приемник и перехватывать сигналы, не блокируя передачу приемника и, таким образом, потенциально раскрывая свои намерения атаки. Выполнение успешного глушения в сетях ТГц для прерывания передачи также непросто.

Согласно [384], учитывая большую полосу пропускания, ТГц может обеспечить скачкообразную перестройку частоты по большому количеству подканалов. Скачкообразная перестройка частоты в широком диапазоне может снизить вероятность обнаружения и вмешательства противника в определенный сигнал. Более того, для успешного глушения канала, Подслушиватель (Ева) может сидеть за зданием, чтобы собирать рассеянные сигналы от отражателей или самосоздаваемого газообразного облака. злоумышленник должен генерировать высокую пропускную способность мощности, чтобы подавить приемник, сохраняя при этом небольшое расстояние, например, несколько метров от приемника. Высокая стоимость и, вероятно, осведомленность пользователей делают подслушивание и глушение менее привлекательными. Несмотря на высокую устойчивость к глушению и подслушиванию, каналы ТГц все еще могут быть атакованы в особых условиях.

Авторы [385] обнаружили, что прослушивание каналов ТГц все еще возможно при передачах в пределах прямой видимости (LOS). Как показано на рисунке 11, подслушиватель (Ева) может поместить отражатель в область луча LOS отправителя (Боба), чтобы рассеивать излучение в направлении антенн приемника злоумышленника (Евы), расположенных за зданием. С другой стороны, злоумышленник может использовать условия высокой влажности из-за дождя/снега или самостоятельно создаваемого газового облака для сбора сигналов рассеяния ТГц-каналов в области. Чтобы предотвратить этот тип атаки, авторы [386] предполагают, что несколько обычных методов, таких как случайно изменяющиеся пределы мощности, скачок частоты и стратегическое размещение точек доступа, могут сделать связь скрытой и значительно затруднить успешные атаки. Ма и др. [387] предложили совместно использовать передачу данных по нескольким путям для улучшения скрытой связи. Порамбадж и др. [388] также намекают, что многопутевой подход может работать с физическим обменом ключами для поддержки передачи

конфиденциальных данных. Цзяо и Алуини [389] указывают, что LIS/IRS также может помочь в управлении мощностью сигнала для желаемого пользователя по нескольким путям и уменьшить утечку информации в терагерцовых системах. Если многопутевое распространение невозможно, можно использовать легкое шифрование, шифрование луча и пространственное моделирование [390].

Несмотря на множество методов защиты, глушение и подслушивание все еще остаются открытыми проблемами. В крайнем случае, сотрудничество нескольких противников для сбора рассеянных сигналов все еще гораздо сложнее предотвратить с помощью упомянутых методов, учитывая сложность проверки атаки во время передачи устройств. Вопросы конфиденциальности также особенно актуальны в 6G.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании проведён комплексный анализ современных тенденций развития сетей 5G и 6G, рассмотрены ключевые архитектурные принципы, выявлены проблемы и предложены перспективные решения, направленные на повышение надежности и пропускной способности телекоммуникационных систем. Особое внимание уделено вопросам функционирования сетей в условиях плотной городской застройки, а также применению передовых технологий, таких как искусственный интеллект, машинное обучение, интеллектуальные отражающие поверхности и концепция Open-RAN.

Полученные результаты этого исследования подтверждают, что для дальнейшего развития сетей связи нового поколения необходимо не только совершенствование существующих методов передачи данных, но и интеграция новых технологических решений, способных обеспечить гибкость, масштабируемость и эффективность сетей. В частности, использование Open-RAN открывает новые возможности для децентрализованного управления сетью, улучшения качества обслуживания и снижения эксплуатационных затрат за счёт открытых интерфейсов и программно-определяемых функций.

С практической точки зрения это исследование демонстрирует, что применение методов искусственного интеллекта для управления мобильностью, балансировки нагрузки и оптимизации хэндовера может значительно повысить устойчивость сетей 5G и 6G, особенно в условиях высокой плотности пользователей и сложных городских ландшафтов.

Практические рекомендации, основанные на результатах анализа, включают внедрение адаптивных алгоритмов маршрутизации и интеллектуальных механизмов интерференционного управления, что позволит повысить надёжность связи и минимизировать задержки при передаче данных.

Таким образом, это исследование вносит вклад в развитие области беспроводных коммуникаций, предлагая новые подходы к оптимизации сетевой инфраструктуры. Однако, как и любое научное исследование, оно имеет свои ограничения. Во-первых, моделирование и имитация сетевых процессов, проведённые в данной работе, не охватывают все возможные сценарии эксплуатации сетей 5G и 6G. Во-вторых, предложенные алгоритмы требуют дальнейшей валидации на реальных аппаратных платформах, что представляет собой важное направление для будущих исследований.

Рекомендации для будущих исследований включают несколько ключевых аспектов. В частности, будущие исследования могут изучить следующие направления:

- Разработка более точных моделей управления интерференцией в сверхплотных сетях.
- Дальнейшее исследование квантовых коммуникаций и их интеграции в архитектуру 6G.
- Оптимизация энергетической эффективности сетей за счёт адаптивного управления ресурсами.
- Внедрение новых стандартов безопасности, учитывающих риски атак на уровне Open-RAN.

Результаты настоящего исследования имеют важное значение не только для научного сообщества, но и для инженерных специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией современных телекоммуникационных систем. Они могут быть использованы для создания новых решений в области сетевой инфраструктуры, разработки эффективных алгоритмов управления сетью и повышения качества обслуживания пользователей.

В заключение это исследование подчеркивает необходимость дальнейшего изучения методов адаптивного управления сетью, внедрения интеллектуальных решений на основе AI и расширения возможностей Open-RAN в сетях 5G и 6G. Только комплексный подход, сочетающий теоретические и практические исследования, позволит добиться значительных



улучшений в области мобильных коммуникаций и создать основу для внедрения передовых технологий в глобальную телекоммуникационную экосистему.

## Список использованной литературы

1. Gupta A., Jha R. K. A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies //IEEE access. – 2015. – Т. 3. – С. 1206-1232.
2. Recommendation M.2083-0 (09/2015)
3. Kazmi S. H. A. et al. Survey on joint paradigm of 5G and SDN emerging mobile technologies: Architecture, security, challenges and research directions //Wireless Personal Communications. – 2023. – Т. 130. – №. 4. – С. 2753-2800.
4. 23.501 System architecture for the 5G System (5GS)
5. 23.503 Policy and charging control framework for the 5G System (5GS); Stage
6. Shayea, I.; Azmi, M.H.; Rahman, T.A.; Ergen, M.; Han, C.T.; Arsal, A. Spectrum Gap Analysis with Practical Solutions for Future Mobile Data Traffic Growth in Malaysia. IEEE Access 2019, 7, 24910–24933
7. David, K.; Berndt, H. 6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G? IEEE Veh. Technol. Mag. 2018, 13, 72–80.
8. Yang, P.; Xiao, Y.; Xiao, M.; Li, S. 6G wireless communications: Vision and potential techniques. IEEE Netw. 2019, 33, 70–75
9. Benn, H. Hyper Connectivity with 6G; TelecomTV, 2020. Available online: <https://www.telecomtv.com/content/what-next-for-wireless-infrastructure-summit/hyper-connectivity-with-6g-40147/>
10. Andrews, J.G.; Buzzi, S.; Choi, W.; Hanly, S.V.; Lozano, A.; Soong, A.C.; Zhang, J.C. What will 5G be? IEEE J. Sel. Areas Commun. 2014, 32, 1065–1082
11. 3GPP. Release 16. Available online: <https://www.3gpp.org/release-16> (accessed on 19 December 2021).
12. 3GPP. Release 17. Available online: <https://www.3gpp.org/release-17> (accessed on 19 December 2021).
13. 3GPP. Release 18. Available online: <https://www.3gpp.org/release18> (accessed on 19 December 2021)
14. Frost & Sullivan. The Visionary Innovation Group. Available online: <https://www.frost.com/research/visionary-innovation/>
15. Surrey, U.O. 6G Wireless: A New Strategic Vision. 2021. Available online: <https://www.surrey.ac.uk/sites/default/files/2020-11/6g-wireless-a-new-strategic-vision-paper.pdf>
16. Redshaw, T. The Significance of 5G for Special Operations of the Future; Strategic Latency Unleashed: Livermore, CA, USA, 2021; p. 293.
17. Redshaw, T. Reigniting Value through Frontier Technologies; TelecomTV, 2020. Available online: <https://www.telecomtv.com/content/what-next-for-wireless-infrastructure-summit/reigniting-value-through-frontier-technologies-40133>
17. Zong, B.; Fan, C.; Wang, X.; Duan, X.; Wang, B.; Wang, J. 6G technologies: Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies. IEEE Veh. Technol. Mag. 2019, 14, 18–27

18. Saarnisaari, H.; Dixit, S.; Alouini, M.-S.; Chaoub, A.; Giordani, M.; Kliks, A.; Martinmikko-Blue, M.; Zhang, N.; Agrawal, A.; Andersson, M. A 6G white paper on connectivity for remote areas. *arXiv* 2020, arXiv:2004.14699.
19. Behjati, M.; Mazlan, M.H.; Ramly, A.M.; Nordin, R.; Ismail, M. What is the value of limited feedback for next generation of cellular systems? *Wirel. Pers. Commun.* 2020, 110, 1127–1142.
20. Huawei. 5G Power: Creating a Green Grid That Slashes Costs, Emissions & Energy Use. Available online: <https://www.huawei.com/en/technology-insights/publications/huawei-tech/89/5g-power-green-grid-slashes-costs-emissions-energy-use>
21. Zhang, Z.; Xiao, Y.; Ma, Z.; Xiao, M.; Ding, Z.; Lei, X.; Karagiannidis, G.K.; Fan, P. 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2019, 14, 28–41
22. Banafaa M. et al. 6G mobile communication technology: Requirements, targets, applications, challenges, advantages, and opportunities // *Alexandria Engineering Journal*. – 2023. – T. 64. – C. 245-274.
23. S.P. Ali Hassan Sodhro, L. Zongwei, K. Muhammad, N. Zahid, Toward 6G architecture for energy-efficient communication in IoT-enabled smart automation systems, *IEEE Internet of Things J.* 8 (2020.8.) 5141–5148.
24. I.F. Akyildiz, A. Kak, S. Nie, 6G and beyond: the future of wireless communications systems, *IEEE Access* 8 (2020) 133995–134030
25. A. Kak, I.F. Akyildiz, Large-scale constellation design for the Internet of space Things/CubeSats, *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* 2019 (2019) 1–6.
26. R.C. Moioli, P. H. Nardelli, M.T. Barros, W. Saad, A. Hekmatmanesh, P. Go'ria, et al., Neurosciences and 6G: Lessons from and needs of communicative brains, *arXiv preprint arXiv:2004.01834*, 2020.
27. T.S. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, et al, Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond, *IEEE Access* 7 (2019) 78729–78757.
28. S. Ali, N. Rajatheva, W. Saad, Fast uplink grant for machine type communications: challenges and opportunities, *IEEE Commun. Mag.* 57 (2019) 97–103.
29. A.T.Z. Kasgari, W. Saad, M. Debbah, Human-in-the-loop wireless communications: machine learning and brain-aware resource management, *IEEE Trans. Commun.* 67 (2019) 7727–7743
30. L. Bariah, L. Mohjazi, S. Muhaidat, P.C. Sofotasios, G.K. Kurt, H. Yanikomeroğlu, O.A. Dobre, A prospective look: key enabling technologies, applications and open research topics in 6G networks, *IEEE Access* 8 (2020) 174792–174820.
31. W.K. Saad, I. Shaye, B.J. Hamza, H. Mohamad, Y.I. Daradkeh, W.A. Jabbar, Handover parameters optimisation techniques in 5G networks, *Sensors* 21 (2021) 5202.

32. I. Shayea, M. Ergen, A. Azizan, M. Ismail, Y.I. Daradkeh, Individualistic dynamic handover parameter self-optimization algorithm for 5G networks based on automatic weight function, *IEEE Access* (2020).
33. J. Angjo, I. Shayea, M. Ergen, H. Mohamad, A. Alhammadi, Y.I. Daradkeh, Handover management of drones in future mobile networks: 6G technologies, *IEEE Access* 9 (2021) 12803–12823.
34. A. Alhammadi, M. Roslee, M.Y. Alias, I. Shayea, A. Alquhali, Velocity-aware handover self-optimization management for next generation networks, *Appl. Sci.* 10 (2020) 1354.
35. A. Alhammadi, M. Roslee, M.Y. Alias, I. Shayea, S. Alraih, K. S. Mohamed, Auto tuning self-optimization algorithm for mobility management in LTE-A and 5G HetNets, *IEEE Access* 8 (2019) 294–304.
36. A. Alhammadi, M. Roslee, M.Y. Alias, I. Shayea, S. Alriah, A. B. Abas, Advanced Handover Self-optimization Approach for 4G/5G HetNets Using Weighted Fuzzy Logic Control, in: 2019 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL), 2019, pp. 1–6.
37. I. Shayea, M. Ismail, R. Nordin, H. Mohamad, T. Abd Rahman, N.F. Abdullah, Novel handover optimization with a coordinated contiguous carrier aggregation deployment scenario in LTE-advanced systems, *Mobile Information Syst.* 2016 (2016).
38. M. Mozaffari, X. Lin, S. Hayes, Towards 6G with Connected Sky: UAVs and Beyond, *arXiv preprint arXiv:2103.01143*, 2021.
39. S. Nayak, R. Patgiri, 6G communication technology: a vision on intelligent healthcare, *IEEE Internet of Things* 00 (April 2020) 16.
40. M.S. Mostafa Zaman Chowdhury, S. Ahmed, Y.M. Jang, 6G Wireless communication systems: applications, requirements, technologies, challenges, and research directions, *IEEE Open J. Commun. Soc.* 1 (2020) 957–975.
41. S. Nayak, R. Patgiri, 6G communication technology: a vision on intelligent healthcare, *IEEE Internet of Things* 00 (April 2020) 16.
42. R. Gupta, D. Reebadiya, S. Tanwar, 6G-enabled edge intelligence for ultra-reliable low latency applications: vision and mission, *Computer Standards Interfaces* 77 (2021).
43. X.C. Qiao Qi, C. Zhong, Z. Zhang, Integration of energy, computation and communication in 6G cellular Internet of Things, *IEEE Commun. Lett.* 24 (2020).
44. W. Saad, M. Bennis, M. Chen, A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems, *IEEE Netw.* 34 (2019) 134–142.
45. Mina Malekzadeh. Performance prediction and enhancement of 5G networks based on linear regression machine learning, (2023)
46. Fatima Salahdine, Tao Han & Ning Zhang. 5G, 6G, and Beyond: Recent advances and future challenges, (2023)

47. Eduardo Mucelli Rezende Oliveira; Aline Carneiro Viana; K. P. Naveen; Carlos Sarraute. Measurement-driven mobile data traffic modeling in a large metropolitan area, (2015)
48. Miguel Báguena Albaladejo; Douglas J. Leith; Pietro Manzoni. Measurement-based modelling of LTE performance in Dublin city, 2016
49. Qianfeng Zhang; Kang An; Xiaojuan Yan; Tao Liang. Ka-Band Linear to Circular Polarization Converter Based on Multilayer Slab With Broadband Performance, 2017
50. Q. Zhang, K. An, X. Yan and T. Liang. Coexistence and Performance Limits for the Cognitive Broadband Satellite System and mmWave Cellular Network , 2020
51. Can-Yu Wang; Jian-Gang Liang; Tong Cai; Hai-Peng Li; Wen-Ye Ji; Qing Zhang. High-Performance and Ultra-Broadband Metamaterial Absorber Based on Mixed Absorption Mechanisms, 2020
52. Ibraheem Shayea; Marwan Hadri Azmi; Mustafa Ergen; Ayman A. El-Saleh. Performance Analysis of Mobile Broadband Networks With 5G Trends and Beyond: Urban Areas Scope in Malaysia, 2021
53. Nouf Mahmood. Enabling Technologies for Ultra-Low Latency and High Connectivity in 5G/6G, 2024
54. Connection Density Issues and Solutions in 5G, 2020
55. Y. Ran, T. Cai, L. Shi, J. Wang, J. Liang, S. Wu, et al., "High-performance transmissive broadband vortex beam generator based on Pancharatnam–Berry metasurface, 2020
56. I. Shayea, M. Ergen, M. H. Azmi, S. A. Çolak, R. Nordin and Y. I. Daradkeh, "Mobility management in 5G networks: A survey on key challenges drivers and solutions", 2020
57. I. Shayea, T. A. Rahman, M. H. Azmi, C. T. Han and A. Arsad, "Indoor network signal coverage of mobile telecommunication networks in west malaysia: Selangor and johor bahru, 2017
58. A. Alhammadi, M. Roslee, M. Y. Alias, I. Shayea, S. Alraih and K. S. Mohamed, "Auto tuning self-optimization algorithm for mobility management in LTE–A and 5G HetNets, 2020
59. J. Zhao, Y. Nie, S. Ni and X. Sun, "Traffic data imputation and prediction: An efficient realization of deep learning", 2020
60. T. M. Goncalves, X. Zhong, Y. Y. Ziggah and B. Y. Dwamena, "Simulating urban growth using cellular automata approach (SLEUTH)—A case study of Praia city Cabo verde", 2019
61. I. Shayea, L. A. Nissirat, M. A. Nisirat, A. Alsamawi, T. A. Rahman, M. H. Azmi, et al., "Rain attenuation and worst month statistics verification and modeling for 5G radio link system at 26 GHz in Malaysia", 2019
62. A. M. Al-Samman, T. A. Rahman, M. H. Azmi and I. Shayea, "Path loss model and channel capacity for UWB-MIMO channel in outdoor environment", 2019

- 63.H. Zhou, X. Chen, S. He, J. Chen and J. Wu, "DRAIM: A novel delay-constraint and reverse auction-based incentive mechanism for WiFi offloading, 2020
- 64.M. Hammes, LTE Signal Quality Parameters, Oct. 2020, [online]
- 65.C. Jiang, H. Zhang, Y. Ren, Z. Han, K.-C. Chen, and L. Hanzo, "Machine Learning Paradigms for Next-Generation Wireless Networks," IEEE Wireless Commun. Mag., vol. 24, no. 2, pp. 98-105, Apr. 2017.
- 66.M. Chen, U. Challita, W. Saad, C. Yin, and M. Debbah, "Machine Learning for Wireless Networks with Artificial Intelligence: A Tutorial on Neural Networks," [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1710.02913.pdf>, accessed on Feb 1, 2018
67. K. Kotobi, S.G. Bilen, Secure blockchains for dynamic spectrum access: a decentralized database in moving cognitive radio networks enhances security and user access, IEEE Veh. Technol. Mag. 13 (2018) 32–39.
- 68.E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, T.L. Marzetta, Massive MIMO is a reality—What is next?: Five promising research directions for antenna arrays, Digital Signal Process. 94 (2019) 3–20.
- 69.Y. Ren, L. Li, G. Xie, Y. Yan, Y. Cao, H. Huang, et al, Line-of-sight millimeter-wave communications using orbital angular momentum multiplexing combined with conventional spatial multiplexing, IEEE Trans. Wireless Commun. 16 (2017) 3151–3161.
- 70.P. Botsinis, D. Alanis, Z. Babar, H.V. Nguyen, D. Chandra, S. X. Ng, et al, Quantum search algorithms for wireless communications, IEEE Commun. Surv. Tutorials 21 (2018) 1209–1242.
- 71.R. Shafin, L. Liu, V. Chandrasekhar, H. Chen, J. Reed, J.C. Zhang, Artificial intelligence-enabled cellular networks: a critical path to beyond-5G and 6G, IEEE Wirel. Commun. 27 (2020) 212–217
- 72.Shi Y. et al. Machine learning for large-scale optimization in 6g wireless networks //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – T. 25. – №. 4. – C. 2088-2132.
- 73.Jiang W. et al. Terahertz communications and sensing for 6G and beyond: A comprehensive review //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024.
- 74.Zuo Y. et al. A survey of blockchain and artificial intelligence for 6G wireless communications //IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – T. 25. – №. 4. – C. 2494-2528.
- 75.Bouchmal O. et al. From classical to quantum machine learning: Survey on routing optimization in 6G software defined networking //Frontiers in Communications and Networks. – 2023. – T. 4. – C. 220-227.
- 76.Parra-Ullauri J. M. et al. Federated analytics for 6G networks: Applications, challenges, and opportunities //IEEE Network. – 2024. – T. 38. – №. 2. – C. 9-17.
- 77.Qiao L. et al. A survey on 5G/6G, AI, and Robotics //Computers and Electrical Engineering. – 2021. – T. 95. – C. 107372.

- 78.Rekkas V. P. et al. Machine learning in beyond 5G/6G networks—State-of-the-art and future trends //Electronics. – 2021. – T. 10. – №. 22. – C. 2786.
- 79.Mahmood M. R. et al. A comprehensive review on artificial intelligence/machine learning algorithms for empowering the future IoT toward 6G era //IEEE Access. – 2022. – T. 10. – C. 87535-87562.
- 80.Noman H. M. F. et al. Machine learning empowered emerging wireless networks in 6G: Recent advancements, challenges and future trends //IEEE Access. – 2023. – T. 11. – C. 83017-83051.
- 81.ITU-T Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience (2017)
- 82.A. Sillanpaa, D. Soldani Qos in 3gpp releases 97/98, 99, 5, 6 and 7 QoS and QoE Management in UMTS Cellular Systems (2006), p. 41
- 83.B.J. Lobo, M.R. Alam, B.E. Whitacre Broadband speed and unemployment rates: data and measurement issues Telecommun. Policy, 44 (1) (2020), Article 101829
- 84.Ibraheem Shayea, Mohamed Elamine Benlakehal, Marwan Hadri Azmi, Chua Tien Han, Arsany Arsad, Tharek Abd Rahman, Outdoor mobile broadband performance analysis in Malaysia, Singapore, and Thailand, Results in Engineering, Volume 23, 2024, 102691, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102691>.
- 85.El-Saleh, A.A.; Alhammadi, A.; Shayea, I.; Alsharif, N.; Alzahrani, N.M.; Khalaf, O.I.; Aldhyani, T.H.H. Measuring and Assessing Performance of Mobile Broadband Networks and Future 5G Trends. Sustainability 2022, 14, 829. <https://doi.org/10.3390/su14020829>
- 86.S.A. Busari, S. Mumtaz, S. Al-Rubaye, J. Rodriguez 5g millimeter-wave mobile broadband: performance and challenges IEEE Commun. Mag., 56 (6) (2018), pp. 137-143
87. I. Shayea et al., "Performance Analysis of Mobile Broadband Networks With 5G Trends and Beyond: Urban Areas Scope in Malaysia," in IEEE Access, vol. 9, pp. 90767-90794, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3085782
- 88.I. Shayea, M. Ergen, M.H. Azmi, D. Nandi, A.A. El-Salah, A. Zahedi Performance analysis of mobile broadband networks with 5G trends and beyond: Rural areas scope in Malaysia IEEE Access, 8 (2020), pp. 65211-65229
89. I. Shayea, T. A. Rahman, M. H. Azmi, C. T. Han and A. Arsad, "Indoor network signal coverage of mobile telecommunication networks in West Malaysia: Selangor and Johor Bahru," 2017 IEEE 13th Malaysia International Conference on Communications (MICC), Johor Bahru, Malaysia, 2017, pp. 288-293, doi: 10.1109/MICC.2017.8311774
- 90.Ayman A. El-Saleh, Abdulraqueeb Alhammadi, Ibraheem Shayea, Wan Haslina Hassan, Mohamed Shaik Honnurvali, Yousef Ibrahim Daradkeh, Measurement analysis and performance evaluation of mobile broadband cellular networks in a populated city, Alexandria Engineering Journal, Volume 66, 2023, Pages 927-946, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.10.052>.

91. N. Edwards, "Building dependable distributed systems", ANSA, Feb., 1994, APM Ltd., Cambridge, U.K.
92. A. Avizienis, J.-C. Laprie, and B. Randell, "Fundamental concepts of dependability", Research Report No. 1145, LAAS-CNRS, Apr. 2001.
93. A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, and C. Landwehr, "Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing", IEEE Trans. Dependable and Secure Computing (TDSC), vol. 1, no. 1, Jan.-Mar. 2004, pp. 11-33.
94. B. Melhart, and S. White, "Issues in defining, analyzing, refining, and specifying system dependability requirements", Proc. 7th IEEE International Conference and Workshop on the Engineering of Computer Based Systems (ECBS 2000), Edinburgh, Scotland, UK., Apr. 3-7, 2000, pp. 334-311.
95. D. Pradhan, Fault-Tolerant Computer System Design, 1st Ed, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, 1996, pp. 5-14.
96. D. Siewiorek, R. Chillarege, and Z. Kalbarczyk, "Reflections on industry trends and experimental research in dependability", IEEE Trans. Dependable and Secure Computing (TDSC), vol. 1, no. 2, Apr.-Jun. 2004, pp. 109-127.
97. W.S. Harrison, A.W. Krings, N. Hanebutte, and M. McQueen, "On the performance of a survivability architecture for networked computing systems", Proc. 35th Hawaii International Conference on System Sciences, Jan. 2002.
98. A. Zolfaghari and F.J. Kaudel, "Framework for network survivability performance", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 12, no. 1, Jan. 1994, pp. 46-51.
99. K. Kyamakya, K. Jobmann, and M. Meincke, "Security and survivability of distributed systems: an overview", Proc. 21st Century Military Communications Conference (MILCOM 2000), vol. 1, Oct. 2000, pp. 449-454.
100. R. Ellison, D. Fisher, R. Linger, H. Lipson, T. Longstaff, and N. Mead, "Survivability: protecting your critical systems", IEEE Internet Computing Mag., vol. 3, no. 6, Nov.-Dec. 1999, pp. 55-63.
101. H. Frank, and I. T. Frisch, "Analysis and design of survivable networks", IEEE Trans. Commun. Technol., vol. 18, no. 5, Oct. 1970, pp. 501-519.
102. P. Tarvainen, "Survey of the survivability of IT systems", Proc. 9th Nordic Workshop on Secure IT Systems (NORDSEC 2004), Nov. 4-5, 2004, pp. 15-22.
103. Object Services and Consultant, Inc. Quality of Service (QoS), DARPA Contract DAAL01-95-C-01121997, Jan. 1997; [http://www.objs.com/Survivability/QoS and Survivability.htm](http://www.objs.com/Survivability/QoS%20and%20Survivability.htm)
104. F. Halsall, Data Communications, Computer Networks and Open Systems, 4th Ed, Addison-Wesley Publishing Company, NY, 1996, pp. 13-18.
105. M. Liotine, Mission-Critical Network Planning, Artech House Publishing, Inc., Norwood, MA., 2003, pp. 31-59.
106. J. Kurose and K. Ross, Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet, 3rd Edition, Addison-Wesley, 2005.
107. M. Rudack, K. Jobmann, A. Pajares, and M. Esteve, "Policy-Based Quality of Service Mapping in Distributed Systems", Proc. IEEE/IFIP Network



- Operations and Management Symposium (NOMS2002), Apr. 15-19, 2002, pp. 947- 949.
108. L. DaSilva, "QoS Mapping along the Protocol Stack: Discussion and Preliminary Results", Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC'00), vol. 2, Jun. 18-22, 2000, pp. 713-717.
  109. J.-F. Huard, and A. A. Lazar, "On QOS Mapping in Multimedia Networks", Proc. The Twenty-First Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC '97), Aug. 13-15, 1997, pp. 312- 317.
  110. N. K. and J. Smith, "The QoS Broker", IEEE Multimedia, vol. 2, no. 1, 1995, pp. 53-67. [21] J. Jingwen, and K. Nahrstedt, "QoS Specification Languages for Distributed Multimedia Applications: A Survey and Taxonomy", IEEE Multimedia, vol. 11, no. 3, July-Sept. 2004, pp. 74- 87.
  111. T. R. Peltier, Information Security Risk Analysis, Auerbach Publications, CRC Press LLC, FL, 2001, pp.1-21.
  112. K. S. Trivedi, Probability and Statistics with Reliability, Queuing and Computer Science Application, 2nd Ed, Wiley-Interscience Publications, John Wiley and Sons, Inc., NY, 2002, pp. 1-4.
  113. D. Nicol, W. Sanders, and K. Trivedi, "Model-based evaluation: from dependability to security", IEEE Trans. Dependable and Secure Computing (TDSC), vol. 1, no. 1, Jan.-Mar., 2004, pp. 48-65.
  114. D. Parker, Fighting Computer Crime: A New Framework for Protecting Information, Wiley Computer Publishing, John Wiley and Sons, Inc., NY, 1998, pp. 364-370.
  115. J. Lala, "DARPA's path to self-regenerative systems", Proc. 42nd IFIP WGMeeting, Workshop on Dependability and Survivability, Hilton Head Island, SC, Jun. 27-July 1, 2002.
  116. E. Orlandi, "Computer security: a consequence of information technology quality", Proc. 1990 IEEE Int. Carnahan Conference on Crime Countermeasures, Security Technology, Oct. 1990, pp.109-112.
  117. National Institute of Standards and Technology, Special Publication 800-37, Guide for Security Certification and Accreditation of Federal Information Systems, May 2004.
  118. Syntegra, The Common Criteria: An Introduction, Jan. 2004.
  119. M. J. Attallah, E. D. Bryant, and M. R. Stytyz, "A survey of anti-tamper technologies", CrossTalk- Journal of Defense Software Engineering, vol. 17, no.11, Nov. 2004, pp. 12-16.
  120. G. B. White, E. A. Fisch, and U. W. Pooch, Computer System and Network Security, Boca Raton, FL, CRC Press, 1996.
  121. M. Bishop, Computer Security: Art and Science, Addison Wesley, Pearson Education, Inc., 2003, pp. 95-184.
  122. J.-C. Fabre, Y. Deswarte, and B. Randell, "Designing Secure and Reliable Applications Using Fragmentation-Redundancy-Scattering: An Object-Oriented Approach", Proc. 1st European Dependable Computing Conf. (EDCC-1), Berlin, Germany, Oct. 1994, Springer-Verlag, LNCS 852, pp.21-38.

123. A. Avizienis, "Toward Systematic Design of Fault-Tolerant Systems", *IEEE Computer*, vol. 30, no. 4, 1997, pp.51-58.
124. D. López-Pérez, M. Ding, H. Claussen, and A. H. Jafari, "Towards 1 Gbps/UE in cellular systems: Understanding ultra-dense small cell deployments," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2078–2101, 4th Quart., 2015.
125. S. M. Yu and S.-L. Kim, "Downlink capacity and base station density in cellular networks," in *Proc. 11th Int. Symp. Model. Optim. Mobile Ad Hoc Wireless Netw. (WiOpt)*, Tsukuba, Japan, May 2013, pp. 119–124.
126. S. Stefanatos and A. Alexiou, "Access point density and bandwidth partitioning in ultra dense wireless networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 9, pp. 3376–3384, Sep. 2014.
127. S. Lee and K. Huang, "Coverage and economy of cellular networks with many base stations," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 7, pp. 1038–1040, Jul. 2012.
128. J. Park, S.-L. Kim, and J. Zander, "Asymptotic behavior of ultra dense cellular networks and its economic impact," in *Proc. IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Austin, TX, USA, 2014, pp. 4941–4946.
129. M. Ding, D. López-Pérez, G. Mao, P. Wang, and Z. Lin, "Will the area spectral efficiency monotonically grow as small cells go dense?" in *Proc. IEEE Glob. Commun. Conf. (GLOBECOM)*, San Diego, CA, USA, Dec. 2015, pp. 1–7.
130. J. Deissner and G. P. Fettweis, "A study on hierarchical cellular structures with inter-layer reuse in an enhanced GSM radio network," in *Proc. IEEE Int. Workshop Mobile Multimedia Commun. (MoMuC)*, San Diego, CA, USA, 1999, pp. 243–251.
131. J. Boccuzzi and M. Ruggiero, *Femtocells: Design and Applications*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
132. J. G. Andrews, H. Claussen, M. Dohler, S. Rangan, and M. C. Reed, "Femtocells: Past, present, and future," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 3, pp. 497–508, Apr. 2012.
133. A. Damnjanovic et al., "A survey on 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 10–21, Jun. 2011.
134. D. López-Pérez et al., "Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 22–30, Jun. 2011.
135. M. Peng, Y. Li, Z. Zhao, and C. Wang, "System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks," *IEEE Netw.*, vol. 29, no. 2, pp. 6–14, Mar./Apr. 2015.
136. J. G. Andrews, "Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 3, pp. 136–144, Mar. 2013.
137. M. Haenggi, *Stochastic Geometry for Wireless Networks*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2012.

138. K. Leyton-Brown and Y. Shoham, *Essentials of Game Theory*. San Rafael, CA, USA: Morgan and Claypool, 2008.
139. H. ElSawy, E. Hossain, and M. Haenggi, "Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wire less networks: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 3, pp. 996–1019, 3rd Quart., 2013.
140. D. Stoyan, W. Kendall, and J. Mecke, *Stochastic Geometry and Its Applications*. New York, NY, USA: Wiley, 1995.
141. J. G. Andrews, F. Baccelli, and R. K. Ganti, "A tractable approach to coverage and rate in cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 11, pp. 3122–3134, Nov. 2011.
142. H. S. Dhillon, R. K. Ganti, F. Baccelli, and J. G. Andrews, "Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 3, pp. 550–560, Apr. 2012.
143. H. S. Dhillon, M. Kountouris, and J. G. Andrews, "Downlink MIMO HetNets: Modeling, ordering results and performance analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 10, pp. 5208–5222, Oct. 2013.
144. C. Li, J. Zhang, J. G. Andrews, and K. B. Letaief, "Success probability and area spectral efficiency in multiuser MIMO HetNets," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 4, pp. 1544–1556, Apr. 2016.
145. S. Singh and J. G. Andrews, "Joint resource partitioning and offloading in heterogeneous cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 888–901, Feb. 2014.
146. S. Singh, F. Baccelli, and J. G. Andrews, "On association cells in random heterogeneous networks," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 70–73, Feb. 2014.
147. S. Singh, H. S. Dhillon, and J. G. Andrews, "Offloading in heteroge neous networks: Modeling, analysis, and design insights," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2484–2497, May 2013.
148. S. Singh, X. Zhang, and J. G. Andrews, "Joint rate and SINR coverage analysis for decoupled uplink-downlink biased cell associ ations in HetNets," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 10, pp. 5360–5373, Oct. 2015.
149. K. Akkarajitsakul, E. Hossain, D. Niyato, and D. I. Kim, "Game the oretic approaches for multiple access in wireless networks: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 13, no. 3, pp. 372–395, 3rd Quart., 2011.
150. A. B. MacKenzie and L. A. DaSilva, "Game theory for wireless engineers," *Synth. Lectures Commun.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–86, 2006.
151. A. B. MacKenzie and L. A. DaSilva, "Game theory for wireless engineers," *Synth. Lectures Commun.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–86, 2006.
152. W. Saad, Z. Han, M. Debbah, A. Hjørungnes, and T. Basar, "Coalitional game theory for communication networks," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 26, no. 5, pp. 77–97, Sep. 2009.

153. E. Altman, T. Boulogne, R. El-Azouzi, T. Jiménez, and L. Wynter, "A survey on networking games in telecommunications," *Comput. Oper. Res.*, vol. 33, no. 2, pp. 286–311, 2006.
154. M. Simon and M. Alouini, *Digital communication over fading channels*. Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing, 2005.
155. T. Ojanpera and R. Prasad, "An overview of air interface multiple access for IMT-2000/UMTS," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 9, pp. 82–86, Sep. 1998.
156. A. Goldsmith, *Wireless communications*. Cambridge University Press, 2005.
157. A. Duel-Hallen, J. Holtzman, and Z. Zvonar, "Multiuser detection for CDMA systems," *IEEE Personal Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 46–58, Apr. 1995.
158. B. Farhang-Boroujeny and H. Moradi, "OFDM inspired waveforms for 5G," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2474–2492, Apr. 2016.
159. C. Cox, *An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons, 2012.
160. A. Sahin, I. Guvenc, and H. Arslan, "A survey on multicarrier communications: Prototype filters, lattice structures, and implementation aspects," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1312–1338, Mar. 2014.
161. A. Georgiadis, "Gain, phase imbalance, and phase noise effects on error vector magnitude," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 443–449, Mar. 2004.
162. Jungwon Lee, Hui-Ling Lou, D. Toumpakaris, and J. M. Cioffi, "Effect of carrier frequency offset on ofdm systems for multipath fading channels," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, vol. 6, no. 1, Jan. 2004, pp. 3721–3725.
163. L. Liu, Y. L. Guan, G. Bi, and D. Shao, "Effect of carrier frequency offset on single-carrier CDMA with frequency-domain equalization," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 174–184, Oct. 2011.
164. G. Liu, D. Jiang, *5G: vision and requirements for mobile communication system towards year 2020*. *Chin. J. Eng.* 2016(2016), 8 (2016)
165. M. Series, *IMT vision–framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. Recommendation ITU 2083 (2015)
166. 3GPP: 5g security assurance specification (scas); access and mobility management function (amf). Technical Specification (TS) 33.512, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2019). Version 16.2.0
167. 3GPP: Study on enhancing topology of the service management function (smf) and the user plane function (UPF) in 5G networks. Technical Specification (TS) 23.726, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (December 2018). Version 16.0.0

168. 3GPP: Nr; nr and ng-ran overall description; stage-2. Technical specification (TS) 38.300, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (January 2021). Version 16.4.0
169. M. Polese, M. Giordani, M. Mezzavilla, S. Rangan, M. Zorzi, Improved handover through dual connectivity in 5G mmwave mobile networks. *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 35(9), 2069–2084 (2017)
170. 3GPP: Nr; radio resource control (rrc); protocol specification. Technical Report 38.331, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2020). Version 16.0.0
171. X. Gelabert, G. Zhou, P. Legg, Mobility performance and suitability of macro cell power-off in lte dense small cell hetnets. In: 2013 IEEE 18th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), pp. 99–103 (2013). IEEE
172. 3GPP: Telecommunication management; key performance indicators (kpi) for the evolved packet core (epc); definitions. Technical Specification (TS) 32.455, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (2020). Version 16.0.0
173. M. Tayyab, G.P. Koudouridis, X. Gelabert, A simulation study on lte handover and the impact of cell size. In: International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, pp. 398–408 (2018). Springer
174. A. Ulvan, R. Bestak, M. Ulvan, The study of handover procedure in lte-based femtocell network. In: WMNC2010, pp. 1–6 (2010). IEEE
175. 3GPP: Procedures for the 5g system (5gs). Technical Specification (TS) 23.502, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (March 2019). Version 16.0.0
176. 3GPP: Nr; physical layer measurements. Technical specification (TS) 38.215, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (July 2020). Version 15.7.0
177. 3GPP: Release 15 description; summary of rel-15 work items. Technical report (TR) 21.915, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) (October 2019). Version 15.0.0
32. H.-C. Jang, K.-S. Chang, A study on handover mechanism in 5g non-standalone network. In: 2020 International Computer Symposium (ICS), pp. 7–12 (2020). IEEE
178. S. M.A.Zaidi, M. Manalastas, H. Farooq, and A. Imran, “Mobility management in emerging ultra-dense cellular networks: A survey, outlook, and future research directions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183505–183533, 2020.
179. E.Gures, I.Shayea, A.Alhammadi, M.Ergen and H.Mohamad, “A comprehensive survey on mobility management in 5G heterogeneous networks: Architectures, challenges and solutions,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 195883–195913, 2020.
180. R. Ahmad, E. A. Sundararajan, and A. Khalifeh, “A survey on femtocell handover management in dense heterogeneous 5G networks,” *Telecommun. Syst.*, vol. 75, no. 4, pp. 481–507, Dec. 2020.
181. A. Jain, E. Lopez-Aguilera, and I. Demirkol, “Are mobility management solutions ready for 5G and beyond?” *Comput. Commun.*, vol. 161, pp. 50–75, Sep. 2020.

182. M. S. Mollel, A. I. Abubakar, M. Ozturk, S. F. Kaijage, M. Kisangiri, S. Hussain, M. A. Imran, and Q. H. Abbasi, "A survey of machine learning applications to handover management in 5G and beyond," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 45770–45802, 2021.
183. J. Tanveer, A. Haider, R. Ali, and A. Kim, "An overview of reinforcement learning algorithms for handover management in 5G ultra-dense small cell networks," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 1, p. 426, Jan. 2022.
184. S. A. Khan, I. Shayea, M. Ergen, and H. Mohamad, "Handover management over dual connectivity in 5G technology with future ultra-dense mobile heterogeneous networks: A review," *Eng. Sci. Technol., Int. J.*, vol. 35, Nov. 2022, Art. no. 101172.
185. M. U. A. Siddiqui, F. Qamar, M. Tayyab, M. N. Hindia, Q. N. Nguyen, and R. Hassan, "Mobility management issues and solutions in 5G-and beyond networks: A comprehensive review," *Electronics*, vol. 11, no. 9, p. 1366, Apr. 2022.
186. Gupta S. et al. SEAI: Secrecy and efficiency aware inter-gNB handover authentication and key agreement protocol in 5G communication network // *Wireless Personal Communications*. – 2022. – T. 122. – №. 4. – C. 2925-2962.
187. Al-Quraan M. et al. Intelligent blockage prediction and proactive handover for seamless connectivity in vision-aided 5G/6G UDNs // *arXiv preprint arXiv:2203.16419*. – 2022.
188. Qian X. et al. Structured postoperative handover protocol improves efficiency and quality of interdisciplinary communication and nursing care in surgical intensive care unit: a randomized controlled trial // *Updates in Surgery*. – 2024. – T. 76. – №. 1. – C. 289-298.
189. Wang L. et al. Deep reinforcement learning-based adaptive handover mechanism for VLC in a hybrid 6G network architecture // *IEEE Access*. – 2021. – T. 9. – C. 87241-87250.
190. Shen J. et al. User-BS selection strategy optimization with RSSI-based reliability in 5G wireless networks // *Applied Sciences*. – 2022. – T. 12. – №. 12. – C. 6082.
191. Wisely D., Wang N., Tafazolli R. Capacity and costs for 5G networks in dense urban areas // *IET Communications*. – 2018. – T. 12. – №. 19. – C. 2502-2510.
192. Suryanto S., Ningsih Y. K. Overview of 5G services and spectrum deployment in urban regions // *TEKNOSAINS: Jurnal Sains, Teknologi dan Informatika*. – 2024. – T. 11. – №. 1. – C. 91-102.
193. Saha R. K. On maximizing energy and spectral efficiencies using small cells in 5G and beyond networks // *Sensors*. – 2020. – T. 20. – №. 6. – C. 1676.
194. Shaddad R. Q. et al. Hybrid traffic dispersion and network densification scheme for 5G millimeterwave wireless networks // *2019 First International Conference of Intelligent Computing and Engineering (ICOICE)*. – IEEE, 2019. – C. 1-6.

195. Hsiung T., Kanza Y. SimCT: Spatial simulation of urban evolution to test resilience of 5G cellular networks //Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoSpatial Simulation. – 2019. – C. 1-8.
196. Rastogi R. et al. Enhancement of Channel Capacity in 5G Ultra Dense Network-UDN //2023 2nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA). – IEEE, 2023. – C. 303-307.
197. Shayea I. et al. Key challenges, drivers and solutions for mobility management in 5G networks: A survey //IEEE access. – 2020. – T. 8. – C. 172534-172552
198. Pi Z., Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems //IEEE communications magazine. – 2011. – T. 49. – №. 6. – C. 101-107.
199. Zaidi S. M. A. et al. Mobility management in emerging ultra-dense cellular networks: A survey, outlook, and future research directions //IEEE Access. – 2020. – T. 8. – C. 183505-183533.
200. Gures E. et al. A comprehensive survey on mobility management in 5G heterogeneous networks: Architectures, challenges and solutions //IEEE Access. – 2020. – T. 8. – C. 195883-195913.
201. Jain A., Lopez-Aguilera E., Demirkol I. Are mobility management solutions ready for 5G and beyond? //Computer Communications. – 2020. – T. 161. – C. 50-75.
202. Telecommunication management; Self-Organizing Networks (SON) Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Information Service (IS), Standard TS 28.627 version 15.0.0 Release 15, 3GPP, 2018
203. Tashan W. et al. Mobility robustness optimization in future mobile heterogeneous networks: A survey //IEEE Access. – 2022. – T. 10. – C. 45522-45541
204. Li R. et al. Intelligent 5G: When cellular networks meet artificial intelligence //IEEE Wireless communications. – 2017. – T. 24. – №. 5. – C. 175-183.
205. Tashan W. et al. Mobility robustness optimization in future mobile heterogeneous networks: A survey //IEEE Access. – 2022. – T. 10. – C. 45522-45541,
206. Amiri R. et al. Reinforcement learning for self organization and power control of two-tier heterogeneous networks //IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2019. – T. 18. – №. 8. – C. 3933-3947,
207. Peng M. et al. Self-configuration and self-optimization in LTE-advanced heterogeneous networks //IEEE Communications Magazine. – 2013. – T. 51. – №. 5. – C. 36-45,
208. Zheng W. et al. Mobility robustness optimization in self-organizing LTE femtocell networks //EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2013. – T. 2013. – C. 1-10,

209. Shayea I. et al. Novel Handover Optimization with a Coordinated Contiguous Carrier Aggregation Deployment Scenario in LTE-Advanced Systems //Mobile Information Systems. – 2016. – T. 2016. – №. 1. – C. 4939872.
210. Qadir J. et al. IEEE access special section editorial: Artificial intelligence enabled networking //IEEE Access. – 2015. – T. 3. – P. 3079-3082,
211. Bogale TE, Wang X., Le LB Machine intelligence techniques for next-generation context-aware wireless networks //arXiv preprint arXiv:1801.04223. – 2018,
212. Yang H. et al. Artificial-intelligence-enabled intelligent 6G networks //IEEE network. – 2020. – T. 34. – No. 6. – pp. 272-280
213. Ashour A. F., Fouda M. M. AI-Based Approaches for Handover Optimization in 5G New Radio and 6G Wireless Networks //2023 International Conference on Computer Science,
214. Poolnisai P., Chumchu P. Seamless handover for high velocity mobile station in WiMAX //2013 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). – IEEE, 2013. – pp. 35-40
215. S. Zhao and H. Wang, “Enabling Data-Driven Condition Monitoring of Power Electronic Systems With Artificial Intelligence: Concepts, Tools, and Developments,” in IEEE Power Electronics Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 18-27, March 2021, doi: 10.1109/MPEL.2020.3047718
216. Tanveer J. et al. An overview of reinforcement learning algorithms for handover management in 5G ultra-dense small cell networks //Applied Sciences. – 2022. – T. 12. – No. 1. – P. 426.
217. Tkachenko V., Kuzior A., Kwilinski A. Introduction of artificial intelligence tools into the training methods of entrepreneurship activities //Journal of Entrepreneurship Education. – 2019. – T. 22. – No. 6. – P. 1-10.
218. Yang H. et al. Artificial-intelligence-enabled intelligent 6G networks //IEEE network. – 2020. – T. 34. – No. 6. – pp. 272-280,
219. Saad S.A., Shayea I., Ahmed NMOS Artificial intelligence linear regression model for mobility robustness optimization algorithm in 5G cellular networks //Alexandria Engineering Journal. – 2024. – T. 89. – P. 125-148.
220. Hoydis J., Aoudia F. A., Valcarce A., Viswanathan H. Toward a 6G AI-Native Air Interface // IEEE Communications Magazine. – 2021. – Vol. 59, No. 5. – P. 76–81. DOI: 10.1109/MCOM.001.2001187
221. Zhang S., Zhu D. Towards artificial intelligence enabled 6G: State of the art, challenges, and opportunities // Computer Networks. – 2020. – Vol. 183. – Article 107556. ISSN 1389-1286. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107556.
222. Fiandrino C., Zhang C., Patras P., Banchs A., Widmer J. A Machine-Learning-Based Framework for Optimizing the Operation of Future Networks // IEEE Communications Magazine. – 2020. – Vol. 58, No. 6. – P. 20–25. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900601.
223. Nguyen C. T. et al. A Comprehensive Survey of Enabling and Emerging Technologies for Social Distancing–Part I: Fundamentals and



- Enabling Technologies // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 153479–153507. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3018140.
224. Banafa M., Shayea I., Din J., Bin Azmi M., Ali A., Daradkeh M., Alhammadi A. 6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges, Advantages, and Opportunities // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Vol. 64. DOI: 10.1016/j.aej.2022.08.017.
225. Gures E., Shayea I., Ergen M., Azmi M. H., El-Saleh A. A. Machine Learning-Based Load Balancing Algorithms in Future Heterogeneous Networks: A Survey // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 37689–37717. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3161511
226. Gures E., Shayea I., Alhammadi A., Ergen M., Mohamad H. A comprehensive survey on mobility management in 5G heterogeneous networks: Architectures, challenges and solutions // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 195883–195913. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029873.
227. Siomina I., Yuan D. Load balancing in heterogeneous LTE: Range optimization via cell offset and load-coupling characterization // IEEE International Conference on Communications. – June 2012.
228. Andrews J. G., Singh S., Ye Q., Lin X., Dhillon H. S. An overview of load balancing in HetNets: Old myths and open problems // IEEE Wireless Communications. – 2014. – Vol. 21. – P. 18–25.
229. A.J. Fehske, I. Viering, J. Voigt, C. Sartori, S. Redana, G.P. Fettweis, "Small-cell self-organizing wireless networks," Proc. IEEE 102 (2014) 334–350.
230. W.K. Saad, W.A. Jabbar, B.J. Hamza, Adaptive modulation and superposition.
231. Imran A., Imran M. A., Abu-Dayya A., Tafazolli R. Self organization of tilts in relay enhanced networks: A distributed solution // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2014. – Vol. 13. – P. 764–779.
232. Jabbar W. A., Saad W. K., Ismail M. MEQSA-OLSRv2: A multicriteria-based hybrid multipath protocol for energy-efficient and QoS-aware data routing in MANET-WSN convergence scenarios of IoT // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 76546–76572. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2882907.
233. Ye Q., Rong B., Chen Y., Al-Shalash M., Caramanis C., Andrews J. G. User association for load balancing in heterogeneous cellular networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2013. – Vol. 12. – P. 2706–2716. DOI: 10.1109/TWC.2013.031813.121530.
234. Saad W. K., Shayea I., Hamza B. J., Mohamad H., Daradkeh Y. I., Jabbar W. A. Handover parameters optimization techniques in 5G networks // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – Article 5202. DOI: 10.3390/s21155202.
235. Mishra S., Mathur N. Load balancing optimization in LTE/LTE-A cellular networks: a review // arXiv preprint arXiv:1412.7273. – 2014.
236. Miyim A. M., Umar K., Kiyawa A. I. A Fuzzy-based AHP approach to handover decision for mobility management in the heterogeneous wireless network // SLU Journal of Science and Technology. – 2021. – Vol. 2. – P. 46–57.

236. Saad W. K., Shayea I., Alhammadi A., Sheikh M. M., El-Saleh A. A. Handover and load balancing self-optimization models in 5G mobile networks // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2023. – Vol. 42. – Article 101418. ISSN 2215-0986. DOI: 10.1016/j.jestch.2023.101418.
237. Chardy, M., Yahia, M. B., Bao, Y. 3G/4G load-balancing optimization for mobile network planning // Proceedings of the 17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks). IEEE, 2016. P. 7–12. DOI: 10.1109/NETWKS.2016.7751149.
238. Mohsin, M. J., Saad, W. K., Hamza, B. J., Jabbar, W. A. Performance analysis of image transmission with various channel conditions/modulation techniques // Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control). 2020. Vol. 18, No. 3. P. 1158–1168. DOI: 10.12928/telkomnika.v18i3.14782.
239. Ray, R. P., Tang, L. Hysteresis margin and load balancing for handover in heterogeneous network // International Journal of Future Computer and Communication. 2015. Vol. 4, No. 4. P. 231. DOI: 10.7763/IJFCC.2015.V4.400
240. Tashan I., Shayea I., Aldirmaz-Çolak S., Aziz O. A., Alhammadi A., Daradkeh Y. I. Advanced Mobility Robustness Optimization Models in Future Mobile Networks Based on Machine Learning Solutions // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 111134–111152. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215684.
241. Pourghebleh B., Hayyolalam V. A comprehensive and systematic review of the load balancing mechanisms in the Internet of Things // Cluster Computing. – 2019. – P. 1–21. DOI: 10.1007/s10586-019-02980-7.
242. Chandak A., Ray N. K. A review of load balancing in fog computing // Proceedings of the International Conference on Information Technology (ICIT). – December 2019. – P. 460–465. DOI: 10.1109/ICIT48102.2019.00091.
243. Kumar P., Kumar R. Issues and challenges of load balancing techniques in cloud computing: A survey // ACM Computing Surveys. – 2019. – Vol. 51, No. 6. – P. 1–35. DOI: 10.1145/3292431.
244. Shaq D. A., Jhanjhi N. Z., Abdullah A. Load balancing techniques in cloud computing environment: A review // Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. – March 2021. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.03.002.
245. Mehra M., Maurya S., Tiwari N. K. Network load balancing in software defined network: A survey // International Journal of Applied Engineering Research. – 2019. – Vol. 14, No. 2. – P. 245–253.
246. Belgaum M. R., Musa S., Alam M. M., Suud M. M. A systematic review of load balancing techniques in software-defined networking // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 98612–98636. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2996610.
247. Li J., Ma L., Fu Y., Ma D., Xiao A. Load balancing in heterogeneous network with SDN: A survey // Proceedings of the China Conference on Wireless Sensor Networks. – Springer, 2021. – P. 250–261. DOI: 10.1007/978-3-030-81492-3\_22.

248. Semong T., Maupong T., Anokye S., Kehulakae K., Dimakatso S., Boipelo G., Sarefo S. Intelligent load balancing techniques in software-defined networks: A survey // *Electronics*. – 2020. – Vol. 9, No. 7. – P. 1091. DOI: 10.3390/electronics9071091
249. [Kumar A., Anand D. Study, and analysis of various load balancing techniques for software-defined network (a systematic survey) // *Proceedings of the International Conference on Big Data, Machine Learning, and Their Applications*. – Springer, 2021. – P. 325–349. DOI: 10.1007/978-3-030-66665-2\_22.
250. Mohammadian V., Navimipour N. J., Hosseinzadeh M., Darwesh A. Fault-tolerant load balancing in cloud computing: A systematic literature review // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 12714–12731. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3146015.
251. Hamdan M., Hassan E., Abdelaziz A., Elhigazi A., Mohammed B., Khan S., Vasilakos A. V., Marsono M. N. A comprehensive survey of load balancing techniques in a software-defined network // *Journal of Network and Computer Applications*. – 2021. – Vol. 174. – January. – Article No. 102856. DOI: 10.1016/j.jnca.2020.102856.
252. Li J., Ma L., Fu Y., Ma D., Xiao A. Load balancing in heterogeneous network with SDN: A survey // *Proceedings of the China Conference on Wireless Sensor Networks*. – Springer, 2021. – P. 250–261. DOI: 10.1007/978-3-030-81492-3\_22.
253. [Shaq D. A., Jhanjhi N. Z., Abdullah A. Load balancing techniques in cloud computing environment: A review // *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. – March 2021. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.03.002.
254. Alkhatib A. A., Alsabbagh A., Maraqa R., Alzubi S. Load balancing techniques in cloud computing: Extensive review // *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. – 2021. – Vol. 6, No. 2. – P. 860–870. DOI: 10.25046/aj060298.
255. Gures E., Shayea I., Alhammadi A., Ergen M., Mohamad H. A Comprehensive Survey on Mobility Management in 5G Heterogeneous Networks: Architectures, Challenges and Solutions // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 195883–195913. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3030762.
256. Shayea I., Ergen M., Azmi M. H., Aldirmaz Çolak S., Nordin R., Daradkeh Y. I. Key Challenges, Drivers and Solutions for Mobility Management in 5G Networks: A Survey // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 172534–172552. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023802.
257. Loutfi S. I., Shayea I., Tureli U., El-Saleh A., Tashan W. An Overview of Mobility Awareness with Mobile Edge Computing over 6G Network: Challenges and Future Research Directions // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 23. – Article 102601. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102601.
258. Angjo J., Shayea I., Ergen M., Mohamad H., Alhammadi A., Daradkeh Y. I. Handover Management of Drones in Future Mobile Networks: 6G

- Technologies // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 12803–12823. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051097.
259. Addali K. M., Bani Melhem S. Y., Khamayseh Y., Zhang Z., Kadoch M. Dynamic Mobility Load Balancing for 5G Small-Cell Networks Based on Utility Functions // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 126998–127011. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939936.
260. Yazici İ., Shayea I., Din J. A survey of applications of artificial intelligence and machine learning in future mobile networks-enabled systems // Engineering Science and Technology. – 2023. – Vol. 44. – Article 101455. DOI: 10.1016/j.jestch.2023.101455.
261. Gures E. et al. Load balancing in 5G heterogeneous networks based on automatic weight function // ICT Express. – 2023. – Vol. 9. – P. 1019–1025. DOI: 10.1016/j.icte.2023.04.007.
262. Khan N. A., Schmid S. AI-RAN in 6G Networks: State-of-the-Art and Challenges // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2024. – Vol. 5. – P. 294–311. DOI: 10.1109/OJCOMS.2023.3343069.
263. Adedoyin M. A., Falowo O. E. Combination of Ultra-Dense Networks and Other 5G Enabling Technologies: A Survey // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 22893–22932. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2969980.
264. Saad W., Shayea I., Alhammadi A., Sheikh M., El-Saleh A. Handover and load balancing self-optimization models in 5G mobile networks // Engineering Science and Technology. – 2023. – Vol. 42. – Article 101418. DOI: 10.1016/j.jestch.2023.101418.
265. Yazici İ., Shayea I., Din J. A survey of applications of artificial intelligence and machine learning in future mobile networks-enabled systems // Engineering Science and Technology, an International Journal. Elsevier B.V., 2023. Vol. 44
266. Shubyn B. et al. Deep learning based adaptive handover optimization for ultra-dense 5G mobile networks //2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). – IEEE, 2020. – C. 869-872.
267. Masri A. et al. Machine-learning-based predictive handover //2021 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM). – IEEE, 2021. – C. 648-652.
268. Lima J. P. S. H. et al. Deep learning-based handover prediction for 5G and beyond networks //ICC 2023-IEEE International Conference on Communications. – IEEE, 2023. – C. 3468-3473.
269. Langolf A., Kühl S., Pachnicke S. Transfer Learning for Handover Prediction in 5G Maritime Vehicular Networks //2024 19th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). – IEEE, 2024. – C. 1-5
270. Wang R. et al. A novel handover scheme for millimeter wave network: An approach of integrating reinforcement learning and optimization //Digital Communications and Networks. – 2024. – T. 10. – №. 5. – C. 1493-1502.

271. Shao S. et al. Optimizing handover parameters by Q-learning for heterogeneous radio-optical networks //IEEE Photonics Journal. – 2019. – T. 12. – №. 1. – C. 1-15.
272. Alenezi A. M., Hamdi K. A. Reinforcement learning approach for hybrid WiFi-VLC networks //2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring). – IEEE, 2020. – C. 1-5
273. Brezáni A., Bencel R. Handover strategies simulations in IEEE 802.11 based on Artificial Intelligence //2022 20th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA). – IEEE, 2022. – C. 66-72.
274. Jang Y. et al. Proactive handover decision for UAVs with deep reinforcement learning //Sensors. – 2022. – T. 22. – №. 3. – C. 1200.
275. Jang Y. et al. UAVs handover decision using deep reinforcement learning //2022 16th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM). – IEEE, 2022. – C. 1-4.
276. Kim G. et al. Reinforcement Learning-Based UAV Handover Algorithm in Cellular Networks: A Survey //2024 Fifteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). – IEEE, 2024. – C. 58-60.
277. Wang L. et al. Deep reinforcement learning-based adaptive handover mechanism for VLC in a hybrid 6G network architecture //IEEE Access. – 2021. – T. 9. – C. 87241-87250
278. Verma S. et al. Double deep reinforcement learning assisted handovers in 5g and beyond cellular networks //2023 15th International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS). – IEEE, 2023. – C. 466-470.
279. Sung J. et al. A Novel Conditional Handover Scheme based on Deep Reinforcement Learning for mmWave Systems //2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). – IEEE, 2023. – C. 1-7.
280. Nayakwadi N., Fatima R. Machine learning based handover execution algorithm for heterogeneous wireless networks //2020 Fifth International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN). – IEEE, 2020. – C. 54-58.
281. Nayakwadi N., Fatima R. Mobility aware handover execution model for heterogeneous wireless networks //2021 International conference on smart generation computing, communication and networking (SMART GENCON). – IEEE, 2021. – C. 1-4.
282. Manalastas M. et al. Machine learning-based handover failure prediction model for handover success rate improvement in 5g //2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). – IEEE, 2023. – C. 684-685.

283. Wu X., O'Brien D. C. A novel machine learning-based handover scheme for hybrid LiFi and WiFi networks //2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps. – IEEE, 2020. – С. 1-5.
284. Elmahdy T., Bendary A. F. Novel technique in 4G Handover parameter tuning and prediction using statistical trend analysis and supervised machine learning //2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). – IEEE, 2021. – С. 1-5.
285. Zhohov R. et al. Reducing latency: Improving handover procedure using machine learning //2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring). – IEEE, 2021. – С. 1-5.
286. Khoder R. et al. Vertical Handover Decision using Machine Learning in Vehicular Platooning //2021 3rd IEEE Middle East and North Africa COMMunications Conference (MENACOMM). – IEEE, 2021. – С. 60-64.
287. К. И. Никишин Исследование и моделирование 5G сети и характеристик передачи в среде AnyLogic
288. Мовчан Андрей Кириллович, Рогожников Евгений Васильевич, Дмитриев Эдгар Михайлович, Новичков Серафим Алексеевич, Лаконцев Дмитрий Владимирович ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА БАЗОВОЙ СТАНЦИИ 5G // Доклады ТУСУР. 2020. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-peredayuschego-trakta-bazovoy-stantsii-5g> (дата обращения: 03.03.2025).
289. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАФИКА ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЛАЙСИНГА В УМНОЙ СИСТЕМЕ 5G НА ВОСХОДЯЩЕЙ ЛИНИИ СВЯЗИ
290. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ СВЯЗИ 5G
291. N. P. Tran, O. Delgado, B. Jaumard and F. Bishay, "ML KPI Prediction in 5G and B5G Networks," 2023 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit), Gothenburg, Sweden, 2023, pp. 502-507, doi: 10.1109/EuCNC/6GSummit58263.2023.10188363.
292. Shayea I. et al. Outdoor MBB performance analysis in Malaysia, Singapore, and Thailand //Results in Engineering. – 2024. – Т. 23. – С. 102691
293. Busari S.A. et al. 5G Millimeter-Wave Mobile Broadband: Performance and Challenges // IEEE Communications Magazine. – 2018. – Т. 56. – №. 6. – С. 137-143
294. El-Saleh A. et al. Measuring and Assessing Performance of Mobile Broadband Networks and Future 5G Trends // Sustainability. – 2022. – Т. 14. – С. 829
295. El-Saleh A. A. et al. Measurements and analyses of 4G/5G mobile broadband networks: an overview and a case study // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2023. – Т. 2023. – №. 1. – С. 6205689
296. Arshad T. et al. Performance Evaluation of Mobile Broadband Cellular Networks in Pakistan // IEEE LCN Workshops. – 2016. – Т. 41

297. Shayea I. et al. Performance Analysis of Mobile Broadband Networks With 5G Trends and Beyond: Urban Areas Scope in Malaysia // IEEE Access. – 2021. – T. 9. – C. 90767-90794
298. Shayea I. et al. Performance Analysis of Mobile Broadband Networks With 5G Trends and Beyond: Rural Areas Scope in Malaysia // IEEE Access. – 2020. – T. 8 – C. 65211-65229
299. El-Saleh A. et al. Measurement Analysis and Performance Evaluation of Mobile Broadband Cellular Networks in a Populated City // Alexandria Engineering Journal. – 2023. – T. 66 – C. 927-946
300. Young, W.R. Advanced mobile phone service: Introduction, background, and objectives. Bell Syst. Tech. J. 1979, 58, 1–14.
301. Donald, V.H.M. Advanced mobile phone service: The cellular concept. Bell Syst. Tech. J. 1979, 58, 15–41.
302. ITU. ITU-R Report M.2410-0 Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s); ITU: Geneva, Switzerland, 2017.
303. ITU. ITU-R Report M.2134 Requirements Related to Technical Performance for IMT-Advanced Radio Interface(s); ITU: Geneva, Switzerland, 2008.
304. 3GPP TR 38.801 Study on New Radio Access Technology: Radio Access Architecture and Interfaces, R14. 2017. Available online: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3056>
305. Ericsson Mobility Report, Sweden. 2021. Available online: <https://www.ericsson.com/4a03c2/assets/local/mobility-report/documents/2021/june-2021-ericsson-mobility-report.pdf>
306. Mobile Radio Access Networks and 5G Evolution, Ericsson. 2020. Available online: <https://www.ericsson.com/495922/assets/local/policy-makers-and-regulators/5-key-facts-about-5g-radio-access-networks.pdf>
307. Common Public Radio Interface, Specification Overview. Available online: <http://www.cpri.info/spec.html>
308. Kukushkin, A. Introduction to Mobile Network Engineering GM, 3G-WCDMA. In LTE and the Road to 5G; John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2018; pp. 367–375.
309. Evolving to an OpenC-RAN Architecture for 5G. Heavy Reading White Paper. 2017. Available online: <https://www.fujitsu.com/us/images/gig5/FNC-Fujitsu-Evolving-to-an-Open-C-RAN-Architecture-for-5G-White-Paper.pdf> (accessed on 9 November 2021).
310. Small Cell Forum Identifies Virtualization Opportunity for Small Cells. 2015. Available online: <https://www.smallcellforum.org/press-releases/small-cell-forum-identifies-virtualization-opportunity-small-cells> (accessed on 9 November 2021).
311. 5G End-to-End Architecture Framework, NGMN Alliance. 2019. Available online: <https://ngmn.org/wp-content/uploads/>

- Publications/2019/190916-NGMN\_E2EArchFramework\_v3.0.8.pdf (accessed on 9 November 2021).
312. Larsen, L.M.P.; Checko, A.; Christiansen, H.L. A survey of the functional splits proposed for 5G mobile crosshaul networks. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2019, 21, 146–172. [CrossRef]
  313. 3GPPTSGRANMeeting #80 RP-180684—Revised SID on CU-DU Lower Layer Split for New Radio. 2017. Available online: [https://www.3gpp.org/ftp/TSG\\_RAN/TSG\\_RAN/TSGR\\_80/Docs/RP-180684.zip](https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/TSG_RAN/TSGR_80/Docs/RP-180684.zip)
  314. Shi Y., Lian L., Shi Y., Wang Z., Zhou Y., Fu L., Bai L., Zhang J., Zhang W. Machine learning for large-scale optimization in 6G wireless networks // *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* – 2023
  315. Zhang X., Debroy S. Resource Management in Mobile Edge Computing: A Comprehensive Survey // *ACM Computing Surveys.* – 2023
  316. Banafaa M., Shayea I., Din J., Azmi M. H., Alashbi A., Daradkeh Y. I., Alhammadi A. 6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges, Advantages, and Opportunities // *Alexandria Engineering Journal.* – 2023. – Vol. 64. – P. 245–274. DOI: 10.1016/j.aej.2022.08.017.
  317. Polese M., Dohler M., Dressler F., Erol-Kantarci M., Jana R., Knopp R., Melodia T. Empowering the 6G Cellular Architecture with Open RAN // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications.* – 2023.
  318. Silva M., Santos J., Curado M. The Path Towards Virtualized Wireless Communications: A Survey and Research Challenges // *Journal of Network and Systems Management.* – 2024. – Vol. 32, No. 1. – Article 12. DOI: 10.1007/s10922-023-09788-3.
  319. Alavirad M. et al. O-RAN architecture, interfaces, and standardization: Study and application to user intelligent admission control // *Frontiers in Communications and Networks.* – 2023. – T. 4. – C. 1127039.
  320. Parallel Wireless (2020). Everything you need to know about Open RAN. Available at: [https://www.parallelwireless.com/wp-content/uploads/Parallel-Wireless-e-Book\\_Everything-You-Need-to-Know-about-Open-RAN.pdf](https://www.parallelwireless.com/wp-content/uploads/Parallel-Wireless-e-Book_Everything-You-Need-to-Know-about-Open-RAN.pdf)
  321. Yeh C., Choi Y.-S., Ko Y.-J., Kim I.-G. Standardization and Technology Trends of Artificial Intelligence for Mobile Systems // *Computer Communications.* – 2023. – Vol. 213. – P. 169–178. DOI: 10.1016/j.comcom.2023.11.004.
  322. N. A. Khan and S. Schmid, “AI-RAN in 6G networks state-of-the-art and challenges,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, Dec. 2023.
  323. S. Soltani, M. Shojafar, R. Taheri, and R. Tafazolli, “Can open and AI enabled 6G RAN be secured?,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 11, pp. 11–12, Sep. 2022.



324. A. S. Abdalla and V. Marojevic, "End-to-end O-RAN security architecture, threat surface, coverage, and the case of the open fronthaul," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 8, pp. 36–43, Mar. 2024.
325. M. Polese, L. Bonati, S. D'oro, S. Basagni, and T. Melodia, "Understanding O-RAN: Architecture, interfaces, algorithms, security, and research challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, pp. 1376–1411, Jan. 2023.
326. M. Abou Houran, M. Asad, G. Srivastava, J. Mirza, A. Ranjha, M. A. Javed, and X. Yang, "Intelligent reflecting surfaces assisted cellular V2X based open RAN communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Jan. 2024.
327. A. Masaracchia, V. Sharma, M. Fahim, O. A. Dobre, and T. Q. Duong, "Digital twin for open RAN: Towards intelligent and resilient 6G radio access networks," *IEEE Communications Magazine*, Jul. 2023.
328. M. A. Ferrag, L. Maglaras, and A. Derhab, "Authentication and authorization for mobile IoT devices using biofeatures: Recent advances and future trends," *Security Commun. Netw.*, vol. 2019, May 2019, Art. no. 5452870.
329. Technical Specification Group Services And System Aspects; Security Architecture and Procedures for 5G System, V16.4.0, 3GPP Standard TS 33.501, 2020.
330. M. Bartock, J. Cichonski, and M. Souppaya, *5G Cybersecurity—Preparing a Secure Evolution to 5G*, Nat. Inst. Stand. Technol., Gaithersburg, MD, USA, 2020.
331. I. Ahmad, S. Shahabuddin, T. Kumar, J. Okwuibe, A. Gurtov, and M. Ylianttila, "Security for 5G and beyond," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 4, pp. 3682–3722, 4th Quart., 2019.
332. G. Gui, M. Liu, F. Tang, N. Kato, and F. Adachi, "6G: Opening new horizons for integration of comfort, security and intelligence," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 126–132, Oct. 2020.
333. P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, "6G wireless communications: Vision and potential techniques," *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, Jul./Aug. 2019.
334. Verizon. Dynamic Spectrum Sharing. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.fiercewireless.com/operators/verizoncto-we-re-thrilled-dss-performance>
335. H.-N. Dai, Z. Zheng, and Y. Zhang, "Blockchain for Internet of Things: A survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 5, pp. 8076–8094, Oct. 2019.
336. F. Guo, F. R. Yu, H. Zhang, X. Li, H. Ji, and V. C. Leung, "Enabling massive IoT toward 6G: A comprehensive survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 15, pp. 11891–11915, Apr. 2021.
337. S. Ali et al. 6G White Paper on Machine Learning in Wireless Communication Networks. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2004.13875.pdf>.

338. I. Farris, T. Taleb, Y. Khettab, and J. Song, "A survey on emerging SDN and NFV security mechanisms for IoT systems," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 1, pp. 812–837, 1st Quart., 2019.
339. N. Neshenko, E. Bou-Harb, J. Crichigno, G. Kaddoum, and N. Ghani, "Demystifying IoT security: An exhaustive survey on IoT vulnerabilities and a first empirical look on Internet-scale IoT exploitations," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2702–2733, 3rd Quart., 2019.
340. M. Hasan, S. Mohan, T. Shimizu, and H. Lu, "Securing vehicle-to-everything (V2X) communication platforms," *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 5, no. 4, pp. 693–713, Dec. 2020.
341. N. Promwongsa et al., "A comprehensive survey of the tactile Internet: State-of-the-art and research directions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 1, pp. 472–523, 1st Quart., 2021.
342. T. M. Fernández-Caramés, "From pre-quantum to post-quantum IoT security: A survey on quantum-resistant cryptosystems for the Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 7, pp. 6457–6480, Jul. 2020.
343. J. Cao et al., "A survey on security aspects for 3GPP 5G networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 1, pp. 170–195, 1st Quart., 2020.
344. Y. Hui et al., "Secure and personalized edge computing services in 6G heterogeneous vehicular networks," *IEEE Internet Things J.*, early access, Mar. 15, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3065970.
345. A. Alwarafy, K. A. Al-Thelaya, M. Abdallah, J. Schneider, and M. Hamdi, "A survey on security and privacy issues in edge-computing assisted Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 6, pp. 4004–4022, Mar. 2021.
346. Y. Dai, D. Xu, S. Maharjan, Z. Chen, Q. He, and Y. Zhang, "Blockchain and deep reinforcement learning empowered intelligent 5G beyond," *IEEE Netw.*, vol. 33, no. 3, pp. 10–17, May/Jun. 2019.
347. J. C. C. Chica, J. C. Imbachi, and J. F. B. Vega, "Security in SDN: A comprehensive survey," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 159, Jun. 2020, Art. no. 102595.
348. P. Ranaweera, A. D. Jurcut, and M. Liyanage, "Survey on multi-access edge computing security and privacy," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, no. 2, pp. 1078–1124, 2nd Quart., 2021.
349. M. Wang, T. Zhu, T. Zhang, J. Zhang, S. Yu, and W. Zhou, "Security and privacy in 6G networks: New areas and new challenges," *Digit. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 3, pp. 281–291, 2020.
350. M. Ylianttila et al. 6G White Paper: Research Challenges for Trust, Security and Privacy. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2004.11665.pdf>.
351. R. Kantola, "Trust networking for beyond 5G and 6G," in *Proc. 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–6.

352. K. Sheth, K. Patel, H. Shah, S. Tanwar, R. Gupta, and N. Kumar, "A taxonomy of Ai techniques for 6G communication networks," *Comput. Commun.*, vol. 161, pp. 279–303, Sep. 2020.
353. H. H. H. Mahmoud, A. A. Amer, and T. Ismail, "6G: A comprehensive survey on technologies, applications, challenges, and research problems," *Wiley Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 32, no. 4, 2021, Art. no. e4233.
354. N. Xie, J. Chen, and L. Huang, "Physical-layer authentication using multiple channel-based features," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 16, pp. 2356–2366, Jan. 2021.
355. K. W. Huang and H. M. Wang, "Intelligent reflecting surface aided pilot contamination attack and its countermeasure," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 345–359, Jan. 2021.
356. S. Pirandola et al., "Advances in quantum cryptography," *Adv. Opt. Photon.*, vol. 12, no. 4, pp. 1012–1236, 2020. [Online]. Available: <http://aop.osa.org/abstract.cfm?URI=aop-12-4-1012>
357. W. Xu, C. Yuan, S. Xu, H. Q. Ngo, and W. Xiang, "On pilot spoofing attack in massive MIMO systems: Detection and countermeasure," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 16, pp. 1396–1409, Nov. 2021.
358. P. Porambage, G. Gür, D. P. M. Osorio, M. Liyanage, A. Gurtov, and M. Ylianttila, "The roadmap to 6G security and privacy," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 1094–1122, 2021.
359. Ericsson. 5G Security—Enabling a Trustworthy 5G System. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5gsecurity-enabling-a-trustworthy-5g-syste>
360. Huawei. 5G Security Assurance. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www-file.huawei.com/-/media/corporate/pdf/trustcenter/huawei-5g-security-white-paper-4th.pdf?la=en>
361. D. Rupperecht, A. Dabrowski, T. Holz, E. Weippl, and C. Pöpper, "On security research towards future mobile network generations," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 3, pp. 2518–2542, 3rd Quart., 2018.
362. Network Functions Virtualisation (NFV) Security, V3.1.1, ETSI Standard GS NFV-SEC 013, 2017.
363. I. Parvez, A. Rahmati, I. Guvenc, A. I. Sarwat, and H. Dai, "A survey on low latency towards 5G: RAN, core network and caching solutions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 4, pp. 3098–3130, 4th Quart., 2018.
364. J. M. Hamamreh, H. M. Furqan, and H. Arslan, "Classifications and applications of physical layer security techniques for confidentiality: A comprehensive survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 21, no. 2, pp. 1773–1828, 2nd Quart., 2019.
365. P. Wright et al., "5G network slicing with QKD and quantum-safe security," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 13, no. 3, pp. 33–40, Mar. 2021.

366. EMnify. Global 2G and 3G Phase Out/Sunset: What Do we Know so Far? Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.emnify.com/en/resources/global-2g-phase-out>
367. Wikipedia. IMSI-Catcher. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/IMSI-catcher>
368. GSA. LTE & 5G Market Statistics—December 2020. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://gsacom.com/paper/lte-5gmarket-statistics-december-2020/>
369. 3GPP System Architecture Evolution (SAE); Security Architecture, 3GPP TS Standard 33.401, 2015.
370. M. Paolini. Wireless Security in LTE Networks. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: [https://www.f5.com/content/dam/f5/corp/global/pdf/white-papers/SenzaFili\\_WirelessSecurity\\_F5\\_Oct-2012.pdf](https://www.f5.com/content/dam/f5/corp/global/pdf/white-papers/SenzaFili_WirelessSecurity_F5_Oct-2012.pdf)
371. B. Hong, S. Bae, and Y. Kim, “Guti reallocation demystified: Cellular location tracking with changing temporary identifier,” in Proc. Netw. Distrib. Syst. Security (NDSS) Symp., 2018, pp. 1–9.
372. S. R. Hussain, O. Chowdhury, S. Mehnaz, and E. Bertino, “LTEInspector: A systematic approach for adversarial testing of 4G LTE,” in Proc. Netw. Distrib. Syst. Security (NDSS) Symp., 2018, pp. 1–9.
373. S. R. Hussain, M. Echeverria, O. Chowdhury, N. Li, and E. Bertino, “Privacy attacks to the 4G and 5G cellular paging protocols using side channel information,” in Proc. Netw. Distrib. Syst. Security (NDSS) Symp., 2019.
374. C.-Y. Li et al., “Insecurity of voice solution volte in LTE mobile networks,” in Proc. 22nd ACM SIGSAC Conf. Comput. Commun. Security, 2015, pp. 316–327. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2810103.2813618>
375. H. Kim et al., “Breaking and fixing volte: Exploiting hidden data channels and mis-implementations,” in Proc. 22nd ACM SIGSAC Conf. Comput. Commun. Security (CCS), 2015, pp. 328–339. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2810103.2813718>
376. D. Rupprecht, K. Kohls, T. Holz, and C. Pöpper, “Call me maybe: Eavesdropping encrypted LTE calls with revolte,” in Proc. 29th USENIX Security Symp. (USENIX Security), 2020, pp. 73–88. [Online]. Available: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity20/presentation/rupprecht>
377. P. P. C. Lee, T. Bu, and T. Woo, “On the detection of signaling DoS attacks on 3G wireless networks,” in Proc. IEEE INFOCOM 26th Int. Conf. Comput. Commun., 2007, pp. 1289–1297.
378. N. Golde, K. Redon, and J.-P. Seifert, “Let me answer that for you: Exploiting broadcast information in cellular networks,” in Proc. 22nd USENIX Security Symp. (USENIX Security), 2013, pp. 33–48. [Online]. Available: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity13/technical-sessions/presentation/golde>
379. P. Traynor et al., “On cellular botnets: Measuring the impact of malicious devices on a cellular network core,” in Proc. 16th ACM Conf.

- Comput. Commun. Security, 2009, pp. 223–234. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1653662.1653690>
380. P. Traynor, W. Enck, P. McDaniel, and T. La Porta, “Mitigating attacks on open functionality in sms-capable cellular networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 17, no. 1, pp. 40–53, Feb. 2009.
  381. P. Chandra et al., *Wireless Security: Know It All*. London, U.K.: Newnes, 2008.
  382. K. Nohl, “Rooting sim cards,” in *Proc. Blackhat*, 2013, pp. 1–5. [69] J. R. Rao, P. Rohatgi, H. Scherzer, and S. Tinguely, “Partitioning attacks: Or how to rapidly clone some GSM cards,” in *Proc. IEEE Symp. Security Privacy*, 2002, pp. 31–41.
  383. D. Rupperecht, K. Kohls, T. Holz, and C. Popper, “IMP4GT: Impersonation attacks in 4G networks,” in *Proc. Netw. Distrib. Syst. Security (NDSS) Symp.*, 2020.
  384. A. Shaik, R. Borgaonkar, N. Asokan, V. Niemi, and J. Seifert, “Practical attacks against privacy and availability in 4G/LTE mobile communication systems,” in *Proc. Netw. Distrib. Syst. Security (NDSS) Symp.*, 2017.
  385. Verizon. 5G Privacy Preservation. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: [https://www.verizon.com/about/sites/default/files/2020-09/200574\\_Schulz\\_07242020.pdf](https://www.verizon.com/about/sites/default/files/2020-09/200574_Schulz_07242020.pdf)
  386. D. Basin, J. Dreier, L. Hirschi, S. Radomirovic, R. Sasse, and V. Stettler, “A formal analysis of 5G authentication,” in *Proc. ACM SIGSAC Conf. Comput. Commun. Security (CCS)*, 2018, pp. 1383–1396.
  387. R. P. Jover and V. Marojevic, “Security and protocol exploit analysis of the 5G specifications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24956–24963, 2019.
  388. M. Juntti et al., “Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence,” in *Proc. 6G First Summit*, 2019, pp. 1–19. [Online]. Available: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526223544.pdf>
  389. N. H. Mahmood et al., *White Paper on Critical and Massive Machine Type Communication Towards 6G*. Accessed: Aug. 10, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2004.14146>
  390. F. Dressler and F. Kargl, “Towards security in nano-communication: Challenges and opportunities,” *Nano Commun. Netw.*, vol. 3, no. 3, pp. 151–160, 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878778912000294>