

**УДК 654**  
**ББК 32.88**  
**В29**

**В29** Вэнь Тонг, Пейин Чжу (редакторы)

Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту. / пер. с англ. В. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 632 с.: ил.

**ISBN 978-5-97060-995-8**

Это первая книга о беспроводной связи 6G, которая подготавливает читателя к грядущему технологическому прорыву – в этой новой картине мира центральное место займут интеллектуальные устройства, входящие в единую сеть.

В книге рассматриваются новые радиоинтерфейсы и сетевые технологии, интеграция услуг сканирования и связи, а также наземных и неназемных сетей. Обсуждаются новые сетевые архитектуры, обеспечивающие функционирование ИИ, и нативная защита данных.

Издание адресовано исследователям, инженерам, разработчикам, менеджерам, работающим в области беспроводной связи, и всем, кто интересуется технологиями будущего.

УДК 654  
ББК 32.88

Original English language edition published by Cambridge University Press. Copyright © Cambridge University Press, 2021. All rights reserved. Russian-language edition copyright © 2021 by DMK Press. All rights reserved.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-1-10898981-7 (англ.)  
ISBN 978-5-97060-995-8 (рус.)

© Cambridge University Press, 2021  
© Оформление, перевод на русский язык, издание,  
ДМК Пресс, 2022

# Оглавление

<b>Вступление от издательства.....</b>	<b>14</b>
<b>Авторы .....</b>	<b>15</b>
<b>Предисловие.....</b>	<b>19</b>
<b>Словарь сокращений .....</b>	<b>21</b>
<b>Часть I. Вступление .....</b>	<b>35</b>
<b>Глава 1. Мобильная связь до 2030 года и далее.....</b>	<b>36</b>
1.1. Эволюция систем мобильной связи .....	36
1.2. Ключевые факторы потребности в 6G.....	39
1.3. Общая концепция .....	47
1.3.1. Ключевые технологические тенденции .....	54
1.3.2. Типичные варианты использования.....	63
1.3.3. Ключевые показатели эффективности .....	67
1.4. Структура книги.....	71
1.5. Источники .....	73
<b>Часть II. Сценарии использования и целевые KPI.....</b>	<b>75</b>
<b>Введение в часть II .....</b>	<b>76</b>
<b>Глава 2. Максимально достоверный эффект погружения .....</b>	<b>77</b>
2.1. Облачная VR высокой степени достоверности .....	78
2.1.1. Требования к задержке передачи.....	79
2.1.2. Требования к пропускной способности .....	82
2.1.3. Обзор основных требований для полной VR .....	84
2.2. Тактильное и мультисенсорное общение .....	85
2.2.1. Дистанционная работа в высокодинамичных средах.....	86
2.2.2. Основные требования к телеуправлению в высокодинамичных средах .....	88
2.3. Дисплеи 3D без стекла и голографические дисплеи .....	89
2.3.1. Глубина восприятия и 3D-дисплеи без стекла.....	89
2.3.2. Методы реконструкции трехмерных изображений без использования стекла .....	90
2.3.3. Требования к разрешению и задержке .....	91
2.3.4. Основные требования к 3D-дисплеям без стекла .....	92
2.4. Источники .....	92
<b>Глава 3. Сканирование, локализация и визуализация.....</b>	<b>94</b>
3.1. Высокоточная локализация.....	95
3.1.1. Абсолютная локализация.....	96
3.1.2. Относительная локализация.....	97
3.1.3. Семантическая локализация .....	98

3.2. Визуализация, картирование и локализация в реальном времени .....	99
3.2.1. Одновременная локализация и картирование.....	100
3.2.2. Визуализация и картирование внутри помещений.....	101
3.2.3. Визуализация и картирование на открытом воздухе .....	102
3.3. Расширенное человеческое восприятие .....	103
3.3.1. За пределами возможностей глаза – сверхвысокое разрешение .....	104
3.3.2. За пределами возможностей глаза – сделать невидимое видимым.....	105
3.3.3. За пределами возможностей глаза – спектральное распознавание .....	106
3.4. Распознавание жестов и действий .....	107
3.4.1. Бесконтактное управление на макроуровне .....	108
3.4.2. Бесконтактное управление на микроуровне .....	110
3.5. Источники .....	111
<b>Глава 4. Полнофункциональная индустрия 4.0 и выше .....</b>	<b>112</b>
4.1. Фабрика будущего.....	114
4.2. Управление движением.....	116
4.3. Совместная деятельность роботов в группе .....	117
4.4. От интеллектуальных коботов к киборгам .....	118
4.5. Источники .....	119
<b>Глава 5. Умный город и умная жизнь.....</b>	<b>121</b>
5.1. Умный транспорт .....	121
5.2. Умное здание.....	123
5.3. Умное здравоохранение .....	125
5.4. Интеллектуальные сервисы на базе БПЛА .....	126
5.5. Источники .....	128
<b>Глава 6. Глобальное покрытие сети мобильного доступа .....</b>	<b>129</b>
6.1. Широкополосный беспроводной доступ для всех .....	130
6.1.1. Мобильная широкополосная связь в любом месте .....	130
6.1.2. Широкополосное соединение в движении .....	131
6.1.3. Связь служб быстрого реагирования и помощь при стихийных бедствиях .....	132
6.2. Широкий спектр услуг интернета вещей в труднодоступных местах...	133
6.3. Высокоточное позиционирование и навигация.....	134
6.4. Мониторинг земной поверхности в реальном времени.....	135
6.5. Источники .....	136
<b>Глава 7. Подключенное машинное обучение и сетевой ИИ .....</b>	<b>137</b>
7.1. Услуги и операции 6G, дополненные искусственным интеллектом.....	138
7.1.1. Качество услуг сети 6G, дополненной искусственным интеллектом .....	139
7.1.2. Управление сетью, дополненной ИИ.....	140
7.2. Сервисы искусственного интеллекта с поддержкой 6G.....	141
7.2.1. Совместный анализ и управление в реальном времени.....	141
7.2.2. 6G для крупномасштабного интеллекта .....	143
7.3. Источники.....	144
<b>Резюме части II.....</b>	<b>145</b>

<b>Часть III. Теоретические основы .....</b>	<b>147</b>
<b>Введение в часть III .....</b>	<b>148</b>
<b>Глава 8. Теоретические основы искусственного интеллекта и машинного обучения .....</b>	<b>150</b>
8.1. Фундаментальная теория искусственного интеллекта .....	150
8.1.1. Определения .....	150
8.1.2. Таксономия машинного обучения .....	153
8.1.3. Теоретико-информационный принцип DNN .....	156
8.1.4. Реализации DNN .....	158
8.2. Теория распределенного ИИ .....	159
8.3. Теория динамической байесовской сети.....	164
8.4. Источники .....	170
<b>Глава 9. Теоретические основы беспроводных сетей большой емкости ...</b>	<b>173</b>
9.1. Теория электромагнитной информации.....	173
9.1.1. Физический канал распространения .....	175
9.1.2. Диаграммы направленности антенных решеток и эффект взаимного влияния .....	176
9.1.3. Электромагнитные физические характеристики.....	177
9.2. Теория крупномасштабной коммункации.....	179
9.3. Источники .....	185
<b>Глава 10. Теоретические основы беспроводных сетей большой емкости .....</b>	<b>191</b>
10.1. Теория семантической коммуникации .....	191
10.2. Теория сверхвысокого разрешения .....	196
10.3. Источники.....	201
<b>Глава 11. Теоретические основы энергоэффективных систем .....</b>	<b>202</b>
11.1. Энергоэффективные коммуникации и теория вычислений .....	202
11.2. Теория зеленого ИИ .....	205
11.3. Источники.....	208
<b>Резюме части III.....</b>	<b>210</b>
<b>Часть IV. Новые элементы .....</b>	<b>213</b>
<b>Введение в часть IV .....</b>	<b>214</b>
<b>Глава 12. Новый спектр.....</b>	<b>215</b>
12.1. Глобальное распределение спектра 5G до 2020 года .....	216
12.2. Требования к спектру 6G .....	218
12.3. Средние диапазоны – наиболее экономичный способ широкого охвата.....	220
12.4. Полосы миллиметрового диапазона в эпоху 6G.....	223
12.5. Новые возможности для сканирования и связи в ТГц-диапазоне .....	226
12.6. Источники.....	229

<b>Глава 13. Новые каналы.....</b>	<b>231</b>
13.1. Новые требования к моделированию канала 6G .....	232
13.2. Канальные измерения в 6G .....	236
13.2.1. Канальные измерения в новом спектре.....	236
13.2.2. Канальные измерения в новых сценариях .....	239
13.3. Источники.....	241
<b>Глава 14. Новые материалы.....</b>	<b>243</b>
14.1. Развитие кремниевой платформы .....	243
14.2. Гетерогенная платформа на материалах типа III–V.....	245
14.3. Реконфигурируемый материал.....	245
14.4. Фотонный кристалл .....	247
14.5. Фотоэлектрические материалы и фотодетектор .....	248
14.6. Плазмонный материал .....	248
14.7. Источники.....	250
<b>Глава 15. Новые антенны.....</b>	<b>254</b>
15.1. Антенна с фотопроводящей линзой .....	255
15.2. Отражающие и передающие решетки.....	256
15.3. Метаповерхности .....	257
15.4. Нанопотодетекторы .....	259
15.5. Антенна на кристалле и антенна в корпусе .....	260
15.6. Орбитальный угловой момент .....	261
15.7. Источники.....	262
<b>Глава 16. Современные технологии ТГц-диапазона.....</b>	<b>265</b>
16.1. Компоненты ТГц-систем .....	266
16.1.1. Электронный подход .....	266
16.1.2. Гибридный и фотонный подходы.....	272
16.2. Системы ТГц-диапазона .....	274
16.2.1. Терагерцовые системы связи.....	274
16.2.2. ТГц-визуализация и сенсорные системы.....	276
16.3. Проблемы.....	278
16.4. Источники.....	280
<b>Глава 17. Вычислительная техника после закона Мура .....</b>	<b>288</b>
17.1. Постмуровская эра .....	288
17.2. Нейроморфные вычисления.....	290
17.3. Квантовые вычисления.....	292
17.4. Новые вычислительные архитектуры.....	294
17.5. Источники.....	296
<b>Глава 18. Новые устройства .....</b>	<b>298</b>
18.1. Мобильные устройства будущего .....	298
18.2. Интерфейс мозга и устройств будущего .....	305
18.3. Новые носимые устройства.....	308
18.4. Источники.....	309
<b>Резюме части IV.....</b>	<b>312</b>

<b>Часть V. Технологии-кандидаты для применения в радиointерфейсе 6G.....</b>	<b>313</b>
<b>Введение в часть V.....</b>	<b>314</b>
<b>Глава 19. Структура интеллектуального радиointерфейса.....</b>	<b>320</b>
19.1. Почему нужен новый радиointерфейс.....	320
19.2. Обзор существующих технологий.....	321
19.2.1. Использование спектра и энергоэффективность в NR.....	322
19.2.2. ИИ и машинное обучение на физическом уровне.....	323
19.2.3. Машинное обучение на уровне доступа к среде (MAC).....	325
19.3. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований.....	326
19.3.1. Персонализированный радиointерфейс с поддержкой ИИ.....	327
19.3.2. Организация сквозного канала на основе ИИ и нерешенные проблемы.....	337
19.4. Источники.....	338
<b>Глава 20. Интеграция наземной и неназемной связи.....</b>	<b>342</b>
20.1. Почему нужна интеграция наземной и неназемной связи.....	342
20.2. Обзор существующих решений.....	344
20.3. Ожидания от новой системы и потенциальные направления исследований.....	349
20.3.1. Интегрированная многоуровневая сеть.....	349
20.3.2. Улучшенная неназемная связь.....	353
20.4. Источники.....	358
<b>Глава 21. Интеграция сканирования и связи.....</b>	<b>359</b>
21.1. Почему нужна интеграция сканирования и связи.....	359
21.2. Обзор существующих решений.....	361
21.3. Ожидания от новой сети и потенциальные направления исследований.....	365
21.3.1. Аспекты проектирования интегрированной системы сканирования/связи.....	366
21.3.2. Конструкция и алгоритмы оборудования радиочастотного сканирования.....	374
21.4. Источники.....	379
<b>Глава 22. Новые формы сигналов и схемы модуляции.....</b>	<b>382</b>
22.1. Почему нужны новые формы сигнала и схемы модуляции.....	382
22.2. Обзор существующих решений.....	384
22.2.1. Сигналы с несколькими несущими.....	385
22.2.2. Формы сигналов с одной несущей.....	392
22.2.3. Схемы модуляции.....	394
22.2.4. Формы сканирующих сигналов.....	396
22.3. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований.....	398
22.4. Источники.....	402

<b>Глава 23. Новое канальное кодирование .....</b>	<b>407</b>
23.1. Почему нужно новое кодирование .....	407
23.2. Схемы канального кодирования .....	409
23.2.1. История вопроса .....	409
23.2.2. Целевые KPI канального кодирования 6G .....	410
23.2.3. Принципы проектирования канального кодирования 6G.....	412
23.3. Совместное кодирование источника и канала .....	418
23.3.1. Предыстория исследований.....	418
23.3.2. JSCC на основе машинного обучения.....	420
23.3.3. Принципы проектирования JSCC для 6G.....	422
23.4. Сетевое кодирование на физическом уровне .....	423
23.4.1. Основы.....	423
23.4.2. Принципы проектирования сетевого кодирования 6G .....	426
23.5. Источники.....	428
<b>Глава 24. Новый множественный доступ.....</b>	<b>435</b>
24.1. Почему нужен новый множественный доступ .....	435
24.2. Обзор существующих решений .....	437
24.2.1. Ортогональный множественный доступ .....	437
24.2.2. Неортогональный множественный доступ.....	439
24.2.3. Безгрантовый множественный доступ .....	447
24.3. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований .....	451
24.3.1. Множественный доступ для услуг URLLC большой емкости .....	451
24.3.2. Множественный доступ для дешевых и маломощных устройств.....	452
24.3.3. Множественный доступ и сверхмассивное подключение .....	453
24.3.4. Множественный доступ и надежное формирование луча.....	454
24.3.5. Множественный доступ с поддержкой ИИ .....	454
24.4. Источники.....	455
<b>Глава 25. Ультрамассивный MIMO.....</b>	<b>459</b>
25.1. Почему нужен ультрамассивный MIMO .....	459
25.2. Обзор существующих решений .....	460
25.2.1. Технологии MIMO для FR1 .....	460
25.2.2. Технологии MIMO для FR2 .....	462
25.2.3. Совместный MIMO.....	463
25.3. Новые технологии MIMO .....	466
25.3.2. Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности .....	469
25.3.3. Антенные решетки со сверхбольшой апертурой.....	471
25.3.4. MIMO с искусственным интеллектом.....	472
25.3.5. Другие потенциальные технологии MIMO .....	474
25.4. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований .....	479
25.4.1. MIMO со сканированием.....	480
25.4.2. Управляемый радиоканал и топология сети.....	482
25.4.3. MIMO на FR2 и терагерцовые частоты .....	483
25.4.4. Антенные решетки со сверхбольшой апертурой.....	485

25.4.5. MIMO с поддержкой ИИ .....	486
25.5. Источники.....	489
<b>Глава 26. Интеграция каналов доступа и прямых каналов связи .....</b>	<b>497</b>
26.1. Почему нужна интеграция каналов .....	497
26.2. Обзор существующих решений .....	500
26.3. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований .....	502
26.3.1. Ключевые технологии суперканалов.....	502
26.3.2. Интеграция суперканалов с каналами доступа как единая конструкция .....	503
26.4. Источники.....	505
<b>Резюме части V.....</b>	<b>507</b>
<b>Часть VI. Новые подходы к проектированию сетевой архитектуры 6G.....</b>	<b>509</b>
<b>Введение в часть VI .....</b>	<b>510</b>
<b>Глава 27. Технологии для сетевой архитектуры искусственного интеллекта .....</b>	<b>516</b>
27.1. История вопроса.....	516
27.2. Соображения и принципы проектирования .....	518
27.2.1. Основные требования.....	518
27.2.2. Ключевое различие между 5G и 6G.....	519
27.3. Особенности архитектуры .....	520
27.3.1. Общий обзор.....	520
27.3.2. Связь, ориентированная на задачи .....	523
27.3.3. Глубококонвергентные вычисления и граничные коммуникации .....	526
27.3.4. Эксплуатация и управление службами искусственного интеллекта.....	529
27.4. Источники .....	531
<b>Глава 28. Архитектура, ориентированная на пользователя .....</b>	<b>532</b>
28.1. Обзор технологии UCN .....	532
28.2. Соображения и принципы проектирования UCN.....	533
28.2.1. Уроки, извлеченные из существующих сетей.....	533
28.2.2. Основные требования .....	536
28.3. Особенности архитектуры.....	541
28.3.1. Децентрализованная архитектура, ориентированная на пользователя.....	541
28.3.2. Слияние физического и кибернетического миров.....	544
28.3.3. Управление цифровыми активами.....	547
28.4. Источники.....	548
<b>Глава 29. Механизмы обеспечения благонадежности .....</b>	<b>549</b>
29.1. Понятие благонадежности системы .....	549
29.1.1. От философии к обществу.....	549
29.1.2. От общества к промышленности.....	550
29.2. Благонадежность сложных систем связи .....	551



29.3. Правила достижения благонадежности.....	554
29.3.1. Основные принципы .....	554
29.3.2. Цели .....	555
29.4. Технологии благонадежности .....	557
29.4.1. Модель многостороннего доверия .....	558
29.4.2. Технология распределенного реестра .....	560
29.4.3. Постквантовая криптография.....	562
29.4.4. Автономная безопасность.....	563
29.5. Источники.....	564
<b>Глава 30. Архитектура управления данными в сети 6G .....</b>	<b>567</b>
30.1. Почему необходимо управление данными .....	567
30.2. Идеи и принципы проектирования системы управления данными... ..	568
30.3. Особенности архитектуры управления данными .....	570
30.3.1. Независимый уровень данных .....	570
30.3.2. Многопользовательские роли в управлении данными.....	572
30.3.3. Ресурс данных .....	572
30.3.4. Сбор данных .....	574
30.3.5. Аналитика данных.....	574
30.3.6. Десенсибилизация данных .....	576
30.4. Источники.....	577
<b>Глава 31. Архитектура многосторонней экосистемы.....</b>	<b>578</b>
31.1. Почему нужна новая архитектура экосистемы.....	578
31.2. Идеи и принципы проектирования.....	580
31.3. Детали многосторонней архитектуры.....	581
31.3.1. Технология распределенного реестра .....	582
31.3.2. Платформа многостороннего пользования .....	585
31.3.3. Управление идентификацией.....	586
31.3.4. Управление данными .....	587
31.3.5. Сетевое управление .....	589
31.3.6. Поддержка операционной деятельности и бизнеса.....	592
31.4. Источники.....	593
<b>Глава 32. Интегрированная архитектура неназемных сетей .....</b>	<b>595</b>
32.1. Предпосылки к интеграции сетей .....	595
32.2. Идеи и принципы проектирования.....	598
32.2.1. Спутниковая группировка .....	599
32.2.2. Низкая задержка в глобальном масштабе .....	601
32.2.3. Обеспечение подключения .....	601
32.2.4. Мультисервисное обслуживание .....	602
32.3. Особенности архитектуры.....	602
32.3.1. Задержка.....	602
32.3.2. Модели подключения .....	610
32.3.3. Маршрутизация в космосе .....	612
32.3.4. Эксплуатация, администрирование и обслуживание .....	614
32.4. Источники.....	615

---

<b>Резюме части VI.....</b>	<b>616</b>
<b>Часть VII. Подведение итогов и планы на будущее .....</b>	<b>617</b>
<b>Глава 33. Экосистема 6G и дорожная карта развития.....</b>	<b>618</b>
33.1. Инициативы и экосистема 6G.....	618
33.1.1. Инициативы ITU-R .....	618
33.1.2. Региональные мероприятия .....	619
32.1.3. Мнения промышленности и научных кругов.....	621
33.2. Дорожная карта до 2030 года и далее .....	624
32.3. Источники.....	626
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>629</b>

# Предисловие

Беспроводные революции, безусловно, невозможны без разработки передовых технологий и революционных применений для них. Когда эти две силы встречаются, возникает новое поколение беспроводных технологий. Именно это случилось, когда произошла конвергенция мобильной голосовой и цифровой радиосвязи и когда мобильный интернет объединился с радиочастотной технологией повышенной пропускной способности, адаптированной к протоколу IP. Новая сеть 5G призвана сделать беспроводными все каналы связи – как высоконагруженные, так и сверхвысоконадежные, в конечном итоге соединяя все, чем мы пользуемся, и ускоряя цифровую трансформацию каждого бизнеса. Опираясь на фундамент 5G, беспроводная сеть 6G поставила своей целью повсеместную интеллектуальную революцию. Фактически 6G будет служить нейронной сетью в масштабе человечества и связующим звеном между двумя мирами, физическим и цифровым. Искусственный интеллект (ИИ), основанный на машинном обучении, станет основой 6G, и в этой сфере наше общество полностью перейдет от подключенных людей и подключенных вещей к *подключенному интеллекту* (connected intelligence). Иначе говоря, беспроводная сеть 6G нацелена на предоставление услуги ИИ каждому человеку, дому и бизнесу, что, в свою очередь, приведет к появлению *всеобщего интеллекта* (intelligence of everything). С точки зрения беспроводных технологий, нам впервые предоставляется возможность *ощущать* окружающую среду и предметы, используя радиоволны беспроводной связи. Таким образом, помимо передачи битов данных, беспроводная сеть 6G может служить в качестве *сетевых органов чувств* – сенсоров, извлекающих знания и большие данные из физического мира в реальном времени. Эта извлеченная информация не только будет иметь большое значение для улучшения передачи данных, но также будет способствовать машинному обучению для служб ИИ. Еще один новый аспект, о котором определенно стоит упомянуть, – это расширение группировок *сверхнизкоорбитальных спутников* (VLEO, very low Earth orbit), которые вращаются вокруг Земли на очень малой высоте в очень больших количествах, в конечном итоге образуя «небесные» беспроводные сети 6G. Благодаря им беспроводные услуги и приложения, доступные в любой точке нашей планеты, станут обыденным явлением. Разумеется, это видение будущего чрезвычайно амбициозно, а его реализация существенно повлияет как на наше общество, так и на экономику. Вдобавок ко всему беспроводную сеть 6G не получится создать без применения революционных

технологических инноваций в области связи, вычислений, материалов и алгоритмов. Это одна из причин, по которой наше путешествие в мир будущего растянется на десять лет.

В этой книге мы даем полное представление о беспроводной сети 6G через призму технологий. Наша цель – познакомить заинтересованных читателей с первыми результатами исследований и размышлений о беспроводной сети 6G. Мы не ограничиваемся описанием перспективных беспроводных услуг и технологий; мы также исследуем требования, возможности и практические применения этой сети, уделяя особое внимание новому радиointерфейсу и сетевой архитектуре. Эта книга является результатом коллективных усилий нашей исследовательской группы по выработке концепции 6G. Инновации никогда не прекращаются, поэтому нашу работу следует рассматривать только в качестве отправной точки. Траектория развития 6G в конечном итоге будет формироваться экспертами по всему миру, поскольку мы твердо убеждены в том, что открытые инновации и единый глобальный унифицированный стандарт являются фундаментом, на котором будет построен успех 6G. Как и в случае с ее предшественниками, успех беспроводной сети 6G приведет к успеху открытой и глобальной экосистемы.

Наконец, беспроводная революция, которую мы наблюдаем сегодня, продолжается уже более четырех десятилетий, но ее влияние на общество и технологии по-прежнему превосходит все ожидания. Поэтому мы уверены, что потенциал беспроводного будущего невозможно недооценить или переоценить. В связи с этим уместно вспомнить слова Гульельмо Маркони, который заявил в 1932 году, что «вводить ограничения на беспроводную связь опасно».

# Глава 1

---

## Мобильная связь до 2030 года и далее

Сегодня мы находимся на гребне огромной цифровой волны, за которой следует непрерывный поток инноваций и новых возможностей. Перемены затронут буквально все – каждого человека, его семью, автомобиль, изменят целые отрасли промышленности во многих странах, переопределят то, как мы живем, работаем, учимся и бережем здоровье. Сегодня, когда глобальное развертывание сетей 5G набирает ход и открывает невообразимые возможности, мы наблюдаем, как 5G меняет все аспекты нашей жизни, отрасли и общества. Давайте вместе заглянем в будущее до 2030 года и далее и попробуем представить, чего мы можем ожидать от следующего поколения мобильной связи.

### 1.1. Эволюция систем мобильной связи

Системы мобильной связи претерпели значительные изменения с 1980-х годов, при этом новое поколение появляется приблизительно каждые 10 лет. В то же время на достижение зрелости основных услуг, предоставляемых сетями мобильной связи, и полноценного ввода в эксплуатацию новых частотных диапазонов обычно уходят два поколения – или 20 лет. Как показано на рис. 1.1, каждое новое поколение обеспечивает значительный рост возможностей по сравнению с предыдущим поколением за счет внедрения новых технологий, новых принципов проектирования и новых архитектур в сетях радиодоступа и базовых сетях.

Для сетей 2G и 3G основной движущей силой роста были мобильные подписки, в первую очередь ориентированные на услуги голосовой связи. Когда уровень проникновения мобильных телефонов и использования голосовых услуг достиг точки насыщения, бизнес-модель, основанная на подписке, начала выходить на плато.

В промежутке между поколениями 3G и 4G быстро рос объем услуг передачи данных, и доминирующей услугой для 4G стала мобильная широкополосная связь. За последние 10 лет значительные достижения в области мобильной передачи данных радикально изменили образ жизни общества. Например, смартфоны со всевозможными приложениями глубоко проникли в каждый аспект жизни многих людей. Поэтому операторы сетей 4G в основном полагаются на объем трафика, а не на подписки – рост потребления трафика на душу населения способствует росту бизнеса.

Сеть 4G оказала огромное влияние на нашу жизнь – технологические возможности, которые она принесла, привели к революционным переменам в нашей повседневной жизни. Одним из показательных примеров этого в Китае является массовый переход от наличных денег к онлайн-платежам. Сегодня и молодые, и пожилые люди предпочитают использовать такие способы оплаты, как AliPay и WeChat Pay, считая, что им удобнее оплачивать что угодно, от покупки продуктов до парковки, при помощи смартфона, не имея в кармане наличных. Другой пример – рост социальных сетей. Теперь любой может делиться фотографиями и видео со смартфона в режиме реального времени, с кем угодно и где угодно, фактически становясь ведущим персональной службы новостей, что ускоряет распространение информации.

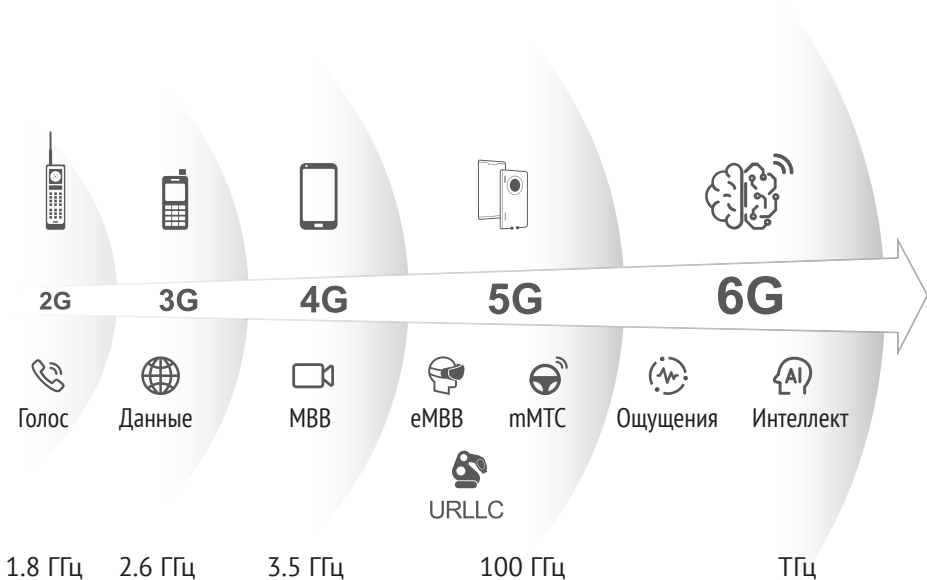


Рис. 1.1. Эволюция мобильных сетей

Эта тенденция сохраняется в 5G, поскольку появляются все больше и больше приложений, критически зависимых от высокой пропускной способности. К таким приложениям относятся видео высокой четкости и мультимедийные приложения с эффектом присутствия, такие как *дополненная реальность (AR)*, *виртуальная реальность (VR)* и *смешанная реальность (MR)*. В настоящее время в мире используется около 3,8 млрд смартфонов. Мы ожидаем, что к 2025 году это число достигнет 8 млрд, и к этому времени будет более 6,5 млрд пользователей мобильного интернета, 80% из которых будут иметь мобильный широкополосный доступ. Вдобавок к этому будет 440 млн пользователей AR/VR, и 40% автомобилей будут подключены к сети.

По мере стандартизации *узкополосного интернета вещей (NB-IoT)*, промышленного интернета вещей и *полностью подключенных транспортных средств (vehicle to everything, V2X)* мобильные сети сместили акцент с подключения людей с помощью *расширенной мобильной широкополосной связи (enhanced mobile broadband, eMBB)* к подключению вещей с помощью *сверхнадежных систем связи с малой задержкой (ultra-reliable low-latency communication, URLLC)* и *поточковой межмашинной связи (massive machine type of communication, mMTC)*. Это, в свою очередь, должно послужить фундаментом цифровизации бизнеса, без которой невозможна следующая волна экономического роста. Коммерческое развертывание 5G первоначально было сосредоточено на потребительских услугах, но более поздние версии стандарта 3GPP 5G (например, версии 16 и 17) были направлены на стимулирование развития вертикальных приложений, таких как V2X и промышленный IoT. С целью обеспечения реализации всех уровней технологии беспилотного управления автомобилями и индустрии 4.0 для широкого круга предприятий и отраслей мобильная индустрия тесно сотрудничает с такими консорциумами, как 5G-ACIA [1] и 5GAA [2]. Ожидается, что автономное вождение 4-го уровня<sup>1</sup> будет реализовано примерно в 2024 году, и многие ждут повышения эффективности грузоперевозок в связи с распространением технологии V2X. Оптимизированные бизнес-процессы и эффективность производства станут ключевыми стимулами будущего роста валового внутреннего продукта (ВВП).

В то время как 5G открывает двери для *всеобъемлющего интернета (Internet of everything, IoE)*, мы прогнозируем, что сеть 6G – наследник 5G – станет платформой для *подключенного интеллекта*, где мобильная сеть соединяет огромное количество *интеллектуальных устройств* – и соединяет их интеллектуально. Ожидается, что следующая волна цифровизации создаст больше инноваций, направленных на

<sup>1</sup> Уровень автономности, при котором наличие водителя в кабине не является обязательным, однако в некоторых случаях он может присутствовать в ней и брать управление на себя. – Прим. перев.

удовлетворение всех аспектов наших потребностей, какие мы только можем представить. С помощью *искусственного интеллекта* (ИИ) и *машинного обучения* (machine learning, ML) мы сможем установить связь между физическим и цифровым мирами в реальном времени, что позволит нам собирать, извлекать и получать доступ к большим объемам информации и знаний в режиме реального времени и таким образом превратить подключенный мир вещей в подключенный интеллект. Кроме того, сенсорное сканирование и распределенные вычисления вместе с передовыми интегрированными *неназемными сетями* (non-terrestrial network, NTN) и технологиями беспроводной связи на короткие расстояния заложат основу для построения интеллектуальных сетей мобильной связи в будущем.

## 1.2. Ключевые факторы потребности в 6G

Мы выделяем три ключевых фактора, определяющих потребность в новом поколении подключенного интеллекта (рис. 1.2). Давайте рассмотрим эти факторы подробнее.



### Фактор 1:

Новые применения  
и бизнесы

### Фактор 2:

Распространение  
интеллекта

### Фактор 3:

Социальная ответственность  
и устойчивость

Рис. 1.2. Ключевые факторы потребности в 6G – поколении подключенного интеллекта

### Фактор 1: новые применения и бизнесы

Сегодня доход бизнеса зависит от роста потребления трафика на одну подписку<sup>2</sup>. На рис. 1.3 показан ожидаемый рост среднего глобального мобильного трафика на подписку в месяц (сплошные линии) и количества подписок (столбцы) с 2020 по 2030 год для *межмашинных коммуникаций* (machine-to-machine, M2M) и устройств, не поддерживающих M2M. Данные, использованные на рисунке, были взяты из отчета ITU-R M.2370 [3]. Из рисунка видно, что рост подписок на смартфоны до-

<sup>2</sup> Под подпиской (subscription) здесь подразумевается абонентский договор с оператором мобильной связи. – Прим. перев.



стиг насыщения в 2020 году; *совокупный годовой темп роста* (compound annual growth rate, CAGR) с 2020 по 2030 год составит около 6%. Кроме того, Ассоциация глобальной системы мобильной связи (Global System for Mobile Communications Association, GSMA) ожидает, что уровень проникновения уникальных мобильных абонентов увеличится всего на три процентных пункта, то есть с 67 % до 70 %, с 2019 по 2025 год [4]. Тем не менее, несмотря на это, ожидается, что трафик мобильных данных на подписку MBW вырастет в 50 раз за 10-летний период, с 5,3 ГБ в месяц в 2020 году до 257 ГБ в месяц в 2030 году.

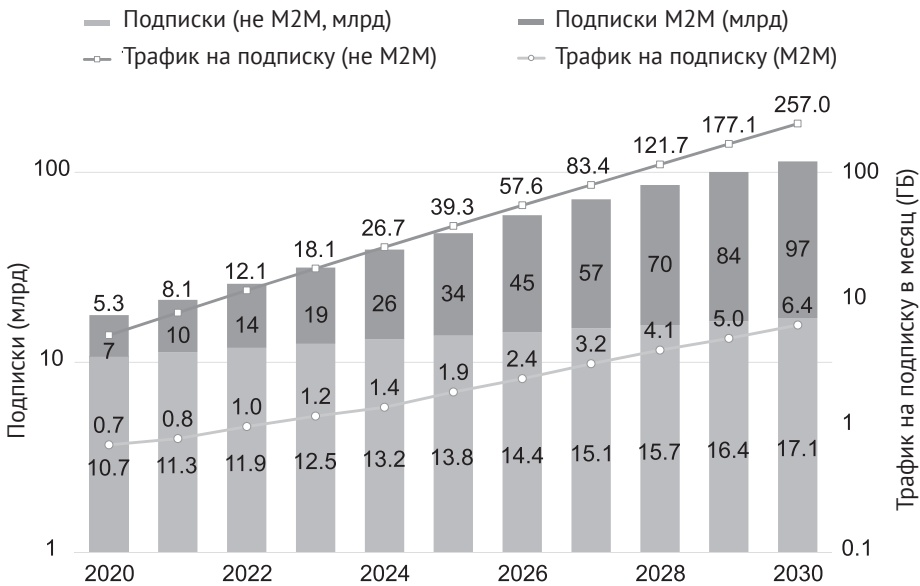


Рис. 1.3. Прогноз роста подписок и мобильного трафика с 2020 по 2030 год

Платформа 5G поддерживает широкий спектр приложений, требующих высокой пропускной способности, что увеличило объем трафика и повысило спрос на пропускную способность сети. В эпоху 6G появятся еще больше приложений, и облачные сервисы *расширенной реальности* (extended reality, XR) вместе с тактильной обратной связью и голографическим дисплеем, вероятно, станут основными приложениями для демонстрации VR-фильмов с круговым обзором, удаленных сервисов с поддержкой AR, виртуальных учебных курсов в 3D, передачи тактильных ощущений, телемедицины и удаленных телеопераций. В отчете Huawei о глобальном видении отрасли [5] прогнозируется, что к 2025 году наголовными устройствами VR/AR будут пользоваться более 337 млн пользователей, в то время как более 10% предприятий будут использовать

технологии AR/VR для бизнес-операций, и эти показатели обязательно увеличатся к 2030 году. По мере увеличения количества и популярности облачных XR-приложений, а также увеличения разрешения, размера и частоты кадров требования к пропускной способности и задержке могут превзойти возможности сетей 5G даже с учетом их эволюции. Экспоненциальный рост потребности в трафике в пересчете на одно устройство вместе с высокими требованиями к задержке и надежности станет серьезной проблемой при проектировании сети 6G с точки зрения необходимой огромной ресурсоемкости. Кроме того, безлимитные тарифные планы на передачу данных, которые предлагают многие операторы, стали ключевой бизнес-моделью и тоже будут способствовать потенциальному росту потребления данных.

По рис. 1.3 также видно, что в 2030 году устройств M2M будет примерно в 13 раз больше, чем в 2020 году, и количество подключений к интернету вещей как для предприятий, так и для потребителей будет увеличиваться. В своем отчете по мобильной экономике за 2020 год [4] GSMA прогнозирует, что к 2024 году корпоративный интернет вещей обгонит потребительский. Как следствие ИИ станет движущей силой для всех видов автоматизации и будет потреблять большие объемы данных для преобразования ситуационной осведомленности в реальном времени в принимаемые решения (также в режиме реального времени). Огромное количество широкополосных датчиков будет задействовано в таких сценариях применения, как умный дом, умное здоровье, умный автомобиль, умный город, умное здание и умная фабрика, чтобы получить огромный объем данных, необходимых для обучения и работы ИИ. Большие данные являются основой успеха машинного обучения, и они становятся основной причиной увеличения пропускной способности сети 6G на порядок. Кроме того, новые технологические решения, такие как *сети как сенсоры* (networks-as-sensors) и неназемная связь, станут неотъемлемой частью мобильных систем 6G, что позволит осуществлять мониторинг окружающей среды и съемку на больших территориях в режиме реального времени с помощью еще большего количества сенсоров.

В дополнение к этому высокопроизводительные промышленные приложения интернета вещей предъявляют высокие требования к пропускной способности беспроводной сети с точки зрения детерминированной задержки и джиттера и требуют наличия гарантированного доступа и надежности. Например, высокая пропускная способность необходима для оперативного управления и контроля, а также для координации движений и совместной работы нескольких роботов. Такие варианты использования можно рассматривать как факторы развития экстремального быстрого действия, которым должны обладать сети 6G.

## Фактор 2: расширение искусственного интеллекта

В ближайшие десятилетия цифровая экономика по-прежнему будет основной движущей силой экономического роста во всем мире и продолжит расти намного быстрее, чем мировая экономика в целом. В 2019 году цифровая экономика росла в 3,5 раза быстрее, чем мировая, и достигла 15,60 трлн долларов США, что составляет 19,7% мировой экономики. Ожидается, что к 2025 году этот показатель достигнет 24,3%. С точки зрения инвестиционного плеча, анализ показывает, что за последние 30 лет увеличение цифровых инвестиций на 1 доллар приводит к увеличению ВВП на 20 долларов по сравнению со средним показателем 1:3 для нецифровых инвестиций [6].

Являясь одним из наиболее динамичных секторов индустрии информационных и коммуникационных технологий (information and communications technology, ICT), мобильная связь оказала глубокое влияние на жизнь людей, помогла уменьшить цифровой разрыв и внесла значительный вклад в общую продуктивность общества и экономический рост. Ожидается, что к 2024 году мобильные технологии и услуги будут генерировать 4,9% мирового ВВП (приближаясь к 5 трлн долларов США), при этом большее количество отраслей получают выгоду от повышения производительности и эффективности, вызванного более широким внедрением мобильных услуг [4].

Мы полагаем, что эта тенденция сохранится до 2030 года и далее. В частности, по мере того как всеобъемлющий интеллект станет ключевым фактором, способствующим развитию бизнес-моделей и экономических моделей в будущем, изменения парадигмы в радиотехнологиях и сетевой архитектуре будут определяться четырьмя критическими факторами, как показано на рис. 1.4.

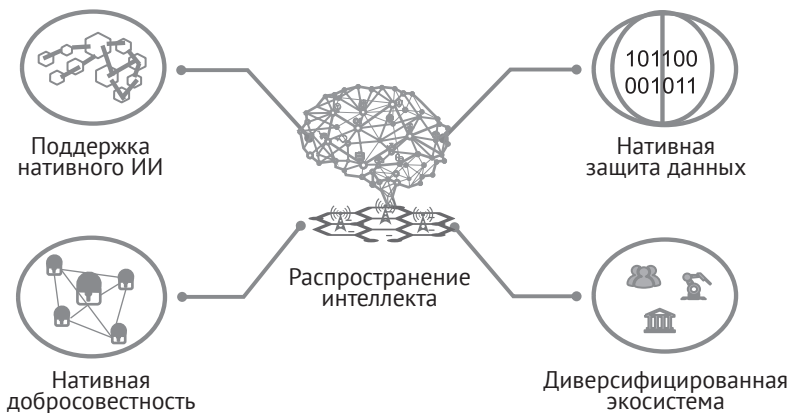


Рис. 1.4. Бизнес-факторы, порождаемые всеобъемлющим интеллектом и большими данными

- **Нативный<sup>5</sup> искусственный интеллект:** хотя конструкция базовой сети 5G поддерживает интеллектуальные функции, ввода новый тип сетевых функций (например, аналитику сетевых данных), возможности использования ИИ в сетевых операциях и управлении ограничены. Вместо этого 5G предоставляет ИИ как услугу *сверхвысокого уровня* (ОТТ). И наоборот, когда речь идет о 6G, системы мобильной связи спроектированы с нативной поддержкой ИИ и машинного обучения – не только в качестве базовой функциональности, но и для обеспечения оптимальной эффективности. С точки зрения архитектуры, запуск распределенного ИИ на периферии может обеспечить максимальную производительность, одновременно решая проблемы владения данными отдельных лиц и предприятий, а также соблюдая региональные и национальные нормативные ограничения. Встроенная поддержка ИИ в 6G направлена на предоставление услуг ИИ в любом месте и в любое время и будет постоянно улучшать производительность системы и удобство работы пользователей за счет постоянной оптимизации. Следовательно, по-настоящему всеобъемлющий интеллект в сочетании с глубоко конвергентными системами ИСТ, обеспечивающими разнообразные возможности подключения, вычислений и ресурсов периферийного хранения данных, станет естественным свойством сети 6G. Соответствующие возможности (такие как алгоритмы, нейронные сети, базы данных и API) должны быть интегрированы в систему 6G как часть реализации сети. Сетевая архитектура 6G с нативной поддержкой ИИ принесет «сетевой ИИ», отойдя от сегодняшнего централизованного «облачного ИИ».
- **Нативная защита данных:** в дополнение к средствам безопасности, разработанным в 5G и более ранних поколениях, соблюдение конфиденциальности будет критическим требованием и принципом проектирования сетей 6G. Защита конфиденциальности во всех аспектах работы сети и использования данных 6G будет иметь исключительное значение. С одной стороны, ключевым требованием к сети является владение данными и право на доступ к данным, и возникает вопрос, как сетевая архитектура может обеспечить защиту конфиденциальности. С другой стороны, встроенный ИИ нуждается в возможности обрабатывать данные и получать доступ к ним распределенным образом. Вместо того чтобы полагаться на поставщиков сетевых и прикладных услуг для обеспечения защиты данных, мы ожидаем, что поль-

<sup>5</sup> Нативный (native) с технической точки зрения – изначально заложенный на уровне конструкции и реализации и являющийся неотъемлемым, «врожденным» конструктивным элементом или функцией системы. – *Прим. перев.*

зователи – которые могут быть как людьми, так и машинами – будут наделены полномочиями субъектов данных с правами управления и использования. В устройстве системы следующего поколения гарантия конфиденциальности данных должна быть главным приоритетом, а не дополнительной функцией. Подобная система должна обеспечивать надлежащие права субъектов данных, обеспечивать контроль и обработку данных и включать поддержку таких политик, как *Общий регламент по защите данных* (GDPR), тем самым определяя фундаментальные руководящие принципы для разработки и использования технологий в будущем.

- **Нативная добросовестность:** для соответствия разнообразным вариантам использования и рынкам важно иметь настраиваемую, поддающуюся проверке и измеряемую *добросовестность* (trustworthiness). Владение и функционирование основанное на законах, характерное для текущего и предыдущих поколений сетей, будет перерастать в многостороннее доверие со стороны партнеров, участников и действующих лиц. Этот бизнес-фактор будет способствовать созданию новой архитектуры добросовестности, включающей в себя множество факторов. Инклюзивная модель многостороннего доверия будет более насыщенной, чем модель одиночного доверия. Помимо ориентации на будущее, архитектура многостороннего доверия должна включать защиту, конфиденциальность, отказоустойчивость, безопасность и надежность.
- **Диверсифицированная экосистема:** три основных элемента ИИ – это данные, алгоритмы и вычисления. Однако отдельные компании могут не обладать полными возможностями для достижения цифровой трансформации с помощью всеобъемлющего интеллекта и быстрых технологических инноваций. Следовательно, для достижения успеха в бизнесе важно создать открытую, устойчивую и многостороннюю экосистему для совместной работы.

Кроме того, ожидается, что по мере постепенного расширения возможностей 5G в 2020-х годах вертикальный рынок беспроводной связи будет расти. Игроки в секторах ИСТ и *операционных технологий* (operational technology, OT) ищут новые способы сотрудничества, чтобы генерировать новые источники дохода. По мере приближения к эре 6G было бы полезно обзавестись универсальным решением ИСТ, способным предложить всеобъемлющую перспективу для всех отраслей и тем самым ускорить сотрудничество и конвергенцию секторов ИСТ и OT.

Первая волна коммерческого использования 6G, вероятно, приведет к росту как потребительского, так и вертикального рынков.

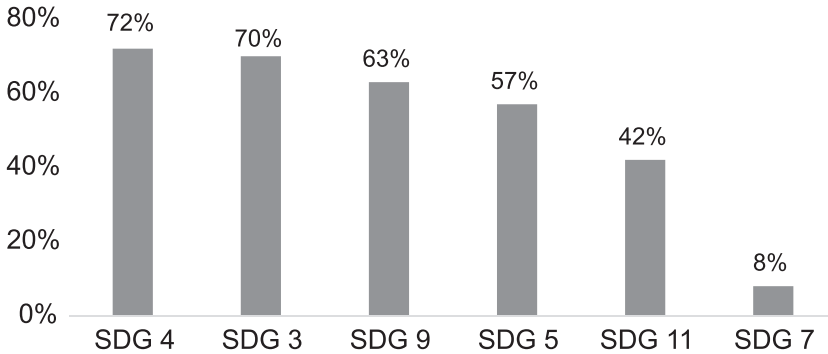
### **Фактор 3: социальная ответственность и устойчивость**

С точки зрения социальной ответственности и устойчивости возьмем в качестве примера пандемию COVID-19. Этот глобальный кризис затронул почти всех во всем мире, за это время индустрия ИКТ активизировалась и сыграла значительную роль в спасении человеческих жизней. Технологии беспроводной связи и определения местоположения использовались для отслеживания инфицированных пациентов и распространения заболевания, а необходимость минимизации воздействия на медицинский персонал привела к значительным инновациям в 5G для автоматизации здравоохранения. Чтобы ограничить скопление людей и одновременно сохранить экономическую активность, многие страны использовали различные приложения для работы по беспроводным сетям, включая такие приложения, как телемедицина, телеобразование, удаленный офис, промышленная автоматизация и электронная коммерция. Поскольку мобильная индустрия поддерживала различные секторы мировой экономики и общества во время этой пандемии, найденные в результате варианты использования внесли свой вклад в будущую технологическую эволюцию мобильной индустрии.

Мобильные сети способны изменить бизнес, образование, государственное управление, здравоохранение, сельское хозяйство, производство и окружающую среду, а также наши способы взаимодействия с другими людьми. Они стали одной из ключевых движущих сил социальной эволюции и могут изменить само наше существование. Согласно GSMA [4], мобильная связь занимает центральное место в достижении целей устойчивого развития (sustainable development goals, SDG), установленных Организацией Объединенных Наций в 2015 году для преобразования нашего мира, и является мощным инструментом для достижения этих целей. Индустрия мобильной связи оказала значительное влияние на все 17 SDG – влияние, которое продолжает расти, обеспечивая прочную основу для цифровой экономики и выступая в качестве катализатора для разнообразного и инновационного спектра услуг.

Huawei и ООН совместно работали над контрольным показателем SDG в области ИКТ [7], чтобы количественно измерить степень, в которой развитие ИКТ способствует прогрессу в достижении целей устойчивого развития. Оценка 2019 года показала сильную корреляцию между зрелостью ИКТ и прогрессом в достижении SDG, достигнув  $R^2 = 0,86$ . Среди них, как показано на рис. 1.5, SDG 3 (хорошее здоровье и благополучие) и SDG 4 (качественное образование) показали самую сильную

корреляцию с ICT, что указывает на области, в которых цифровые технологии обладают наибольшим потенциалом для ускорения развития экономики страны.



**Рис. 1.5.** Основные корреляции между отдельными целями устойчивого развития и уровнем ICT. Из совместного отчета Huawei и ООН [7].

SDG 4: качественное образование;

SDG 3: хорошее здоровье и благополучие;

SDG 9: промышленность, инновации и инфраструктура;

SDG 5: гендерное равенство; SDG 11: устойчивые города и сообщества;

SDG 7: доступная и чистая энергия

Что касается экологической устойчивости, развитие ICT имеет решающее значение для достижения целей SDG 7 (доступная и чистая энергия) и SDG 11 (устойчивые города и сообщества). Мир становится все более урбанизированным, и прогнозы показывают, что к 2030 году 5 млрд человек будут жить в городах, занимая всего 3% пригодной для проживания земли, при этом на их долю будет приходиться 60–80% мирового потребления энергии [8]. По мере достижения все более высокой энергоэффективности на бит ICT станут приближаться к нулевому балансу выбросов углерода, а решения на базе ICT (например, интеллектуальные сети, интеллектуальная логистика и интеллектуальная промышленность) помогут преобразовать мир в направлении более устойчивого и энергоэффективного будущего [9].

По состоянию на 2020 год около 90% людей во всем мире имеют доступ к сетям 3G или 4G. Что касается оставшихся 10%, то и 5G, и 6G будут стремиться подключить их с помощью таких технологий, как спутниковая связь. Например, 5G уже пыталась интегрировать технологии неназемного доступа в 5G New Radio (NR), в то время как амбициозные планы по созданию группировки на сверхнизкой околоземной орбите (very low earth orbit, VLEO) – созвездия из десятков тысяч спутников VLEO – могут быть реализованы в эпоху 6G. Услуги, приложения и контент, предоставляемые мобильными сетями, помогают расширить финансовую

и социальную интеграцию, в то время как новые технологии, такие как интернет вещей, большие данные, искусственный интеллект и машинное обучение, интегрируются в сетевую инфраструктуру, демонстрируя свой потенциал революционного преобразования общества и среды. Сильная корреляция между ICT и SDG означает, что мы должны учитывать все аспекты SDG при проектировании систем и сетей связи 6G.

### 1.3. Общая концепция

Мобильная связь за 40 лет полностью изменила мир. Сегодня мы сильно зависим от беспроводной связи как в работе, так и в жизни; она стала ключевым фактором цифровой трансформации каждого бизнеса. По мере распространения 5G – современного поколения беспроводной связи – к сети будет подключено все, включая отдельных людей; с помощью этой гиперкоммуникации мы сможем автоматизировать все аспекты жизни общества. Более того, стремление к инновациям в беспроводной связи набирает обороты. Как было сказано в [10], «Наука не имеет границ, беспроводная связь по-настоящему безгранична».

Инновации беспроводных технологий, несомненно, продолжатся в течение ближайших 10 лет, и двумя основными катализаторами новых технологических прорывов станут рост ИИ, основанного на машинном обучении, и создание *цифровых двойников* (то есть проекций объектов физического мира на кибернетический). Возникшая в результате этого прогресса сеть 6G изменит правила игры как с точки зрения экономики, так и с точки зрения общества – она заложит прочную основу для будущего всеобъемлющего интеллекта.

Сеть 6G станет следующим поколением беспроводной связи, перейдя от эпохи подключенных людей и подключенных вещей к эпохе подключенного интеллекта. По мере того как общество движется ко всеобъемлющему интеллекту, 6G станет ключевой технологией распространения ИИ, соединяя с распределенным интеллектом каждого человека, дом, автомобиль и бизнес.

Функционируя как распределенная нейронная сеть с каналами связи, 6G объединит физический и кибернетический миры. Это будет не просто канал для перекачки битов, а сеть, вобравшая в себя все сенсоры, все подключения и весь ИИ. Иными словами, 6G будет представлять из себя машинообучаемую сеть сенсоров, где центры обработки данных станут нейронными центрами с машинным обучением, распространяющимся по всей сети. Примерно так будет выглядеть кибермир для будущего всеобъемлющего интеллекта.

Сеть 6G станет ключевым фактором в достижении полномасштабной цифровой трансформации всех вертикальных предприятий. Обладая исключительными характеристиками, такими как скорость передачи



данных в несколько Тбит/с, задержка менее миллисекунды и надежность в семь девяток (99,99999 %), 6G обеспечит значительные улучшения с точки зрения ключевых показателей производительности (key performance indicators, KPI) – в некоторых случаях рост более чем на порядок – по сравнению с 5G. Она обеспечит универсальную высокопроизводительную связь, сопоставимую с оптоволоконными кабелями по скорости и надежности, за исключением того, что это будет беспроводная связь. Свободная от функциональных ограничений и ограничений производительности, 6G будет универсальной платформой, которая поддерживает создание любой службы и любого приложения.

Основное отличие 6G от предыдущих поколений заключается в сочетании прорывных технологий и инноваций. Далее мы рассмотрим лишь некоторые из ключевых особенностей 6G, которые окажут огромное влияние на технологии и общество в течение ближайших десятилетий:

- сеть 6G изначально подразумевает наличие собственного распределенного искусственного интеллекта, а сетевая архитектура будет включать возможности машинного обучения, в частности распределенное машинное обучение. Проще говоря, 6G – это сеть, предназначенная для поддержки ИИ, или сеть, включающая ИИ, в которой многие элементы сети будут выполнять функции ИИ и машинного обучения;
- *беспроводное сканирование*<sup>4</sup> (wireless sensing), основанное на естественных механизмах распространения радиоволн, станет ключевой прорывной технологией в 6G, использующей радиоволны и эхо для сканирования (или *ощущения*) физического мира. Предыдущие поколения беспроводных систем использовали радиоволны в основном для передачи информации. Однако для поддержки ИИ и машинного обучения нам необходимо собирать чрезвычайно большие объемы данных из физического мира; базовые станции 6G могут работать для этой цели как сенсоры. В частности, за счет использования более высоких частот, таких как миллиметровые волны и терагерцовый (ТГц) спектр, 6G обеспечит сканирование с высоким разрешением;
- важной отличительной чертой 6G станет интеграция спутниковых группировок VLEO с наземными сетями. Плотное разме-

<sup>4</sup> В русском языке нет устоявшегося и полностью адекватного перевода термина *sensing*, который часто употребляется в зарубежных публикациях про беспилотные автомобили и сети 6G. В том и другом случаях речь идет о «прошупывании» окружающей среды электронными устройствами, поэтому мы решили, что наиболее подходящим переводом в этом контексте будет сканирование. Применяемый в роботехнике перевод «ощущение» имеет несколько иное и более общее значение, а перевод «зондирование» означает измерение параметров канала связи 5G и в нашем случае будет вносить путаницу. – Прим. перев.

щенные небольшие спутники позволят создать «беспроводную сеть в небе» для покрытия всей земной поверхности. Это стало экономически выгодным благодаря достижениям Space-X в передовых технологиях запуска спутников, что значительно снизило стоимость создания массивных спутниковых группировок. Эта новая неназемная беспроводная инфраструктура будет полностью интегрирована с существующей наземной системой мобильной связи, что станет еще одним ключевым фактором 6G;

- сетевая архитектура 6G будет значительно отличаться от предыдущих поколений. В основе 6G лежат данные, а также полученные на их основе сведения и знания. Сетевая архитектура будет спроектирована таким образом, чтобы обеспечить надежность с учетом достижений в области технологий безопасности, сохранения конфиденциальности и управления данными. Фактически архитектуру сети 6G нужно разработать заново, чтобы в ней нашлось место для всеобщего интеллекта. Кроме того, 6G будет использовать новые права собственности на данные, модели доверия и конструкции безопасности, устойчивые к атакам на основе квантовых вычислений;
- устойчивость является центральной темой для 6G, особенно с точки зрения энергопотребления всей сети и связанной с ней инфраструктуры и устройств ICT. Устройство сети 6G должно соответствовать строгим требованиям в этом отношении. В частности, общее энергопотребление инфраструктуры 6G должно быть намного ниже, чем у предыдущих поколений, и в приоритете должна быть реализация архитектуры E2E, которая является одновременно устойчивой и энергоэффективной. Как глобальная инфраструктура ICT, сеть 6G будет ориентирована на достижение социальной, экологической и экономической устойчивости. Будущее интеллекта должно соответствовать нашей общей цели – сделать нашу планету лучше для жизни.

Таким образом, *главный смысл создания 6G заключается в переходе от подключенных людей и подключенных вещей к подключенному интеллекту.* Этот руководящий принцип заложен в основу сценариев использования, схем и технологий сетей 6G. Искусственный интеллект, слияние физического и кибернетического миров, а также приоритет связности (connectivity supremacy) – это новые столпы, на которых мы стремимся построить общество с распределенным всеобъемлющим интеллектом.

Мы предполагаем, что технологии 6G предложат следующие шесть новых возможностей для решения потенциальных проблем, с которыми столкнется эра 6G:

**6G достигнет предельного уровня приоритета связности; будут задействованы все радиочастоты до терагерцового диапазона или даже видимого света.**

Традиционно инфраструктура сотовой сети отдавала предпочтение более низкочастотному спектру из доступных радиодостижения максимального покрытия. С другой стороны, рост трафика обычно вызывает потребность в выделении новых участков спектра. По мере развития нескольких поколений мобильной связи для модернизации сетей выделялось все большее количество участков спектра. В дополнение к миллиметровому диапазону 6G впервые будет использовать терагерцовый (ТГц) диапазон или даже видимый свет, а это означает, что для достижения максимальной возможности подключения будут задействованы все потенциально доступные участки спектра. Инновационные решения для обеспечения покрытия, такие как рой спутников VLEO, образующих новую инфраструктуру покрытия, и работающие по запросу станции на высотных платформах (high-altitude platform stations, HAPS), которые обеспечивают временную инфраструктуру покрытия, требуют инновационных подходов для агрегирования доступных спектров, чтобы реализовать необходимую пропускную способность 6G и сетевых решений. Сюда входят определение моделей владения и использования спектра, таких как совместное использование, гибкое распределение спектра и дуплексирование. Благодаря этому сеть 6G будет обладать почти бесконечной пропускной способностью с беспрецедентной скоростью беспроводного соединения. Новый радиointерфейс 6G может объединить технологии физического уровня eMBB, URLLC и mMTC, поскольку пропускная способность и задержка больше не будут узкими местами, препятствующими разработке подлинно *настраиваемого беспроводного соединения* для каждого пользователя, службы, приложения и сценария использования;

**6G будет нативно поддерживать ИИ, соединяя интеллектуальные объекты и интеллектуально соединяя объекты.**

Одна из основных задач 6G – поддержка повсеместного ИИ, где 6G будет транспортной системой E2E, предназначенной для поддержки сервисов и приложений на основе ИИ. Что принципиально важно, эта функциональность не является ни дополнением, ни надстройкой над сетью; вместо этого сама система 6G должна быть самой эффективной платформой для ИИ. Однако это создает новые проблемы с точки зрения реализации минимальных затрат как на коммуникацию, так и на вычисления, каждая из которых является отдельным ключевым показателем эффективнос-

ти и нуждается в дальнейшем исследовании. Для минимальных затрат на связь необходимо разработать систему 6G, способную передавать огромные объемы больших данных для обучения ИИ с минимальными энергозатратами. С точки зрения минимизации затрат на вычисления необходимо оптимально распределять вычислительные ресурсы по сетям в стратегических местах, где мы можем наилучшим образом использовать мобильные *граничные вычисления* (edge computing). Для поддержки машинного обучения и создания кибернетического мира 6G необходимо будет обеспечить сбор массивных данных из физического мира. Это значительное увеличение объемов данных, что создает серьезную проблему для 6G. Новой и важной областью исследований будет достижение эффективного сжатия обучающих данных на основе теорий информации и обучения. Еще одна проблема – снижение вычислительной нагрузки, связанной с обучением ИИ, за счет совместного обучения. На сетевом уровне разделение данных и разделение моделей будет включено в архитектуру 6G, где распределенное и федеративное обучение будет использоваться не только для оптимизации вычислительных ресурсов, локального и глобального обучения, но и для соответствия новым требованиям к локальному хранению данных. Что касается сетевой архитектуры, основные сетевые функции будут переведены в *глубокую периферийную сеть* (deep-edge network), в то время как облачное программное обеспечение сместится в сторону машинного обучения. Кроме того, 6G RAN перейдет от радиодоступа, ориентированного на нисходящий канал, к радиодоступу, ориентированному на восходящий канал, потому что массивные обучающие данные, используемые в машинном обучении, требуют значительно более высокой пропускной способности в восходящем канале. Более того, радиointерфейс 6G может быть разработан с использованием новых возможностей машинного обучения для реализации интеллектуальной связи.

**Фактически сеть 6G станет сетевым ИИ, в корне меняющим определение сетей и вычислений.**

Искусственный интеллект будет изначально встроен в структуру 6G и приведет к появлению новых сетевых и вычислительных архитектур. Например, используемые сегодня облачные центры обработки данных превратятся в сетевые нейронные центры искусственного интеллекта. Это приведет к переходу от вычислений на базе обычных процессоров (central processing unit, CPU) к вычислениям на базе графических процессоров (graphical processing unit, GPU). В большинстве случаев вычислительное оборудование,

предназначенное для ИИ, должно быть спроектировано и оптимизировано под использование алгоритмами ИИ. Однако развитие ИИ создает серьезные проблемы с точки зрения вычислений. В среднем человеческий мозг достигает скорости передачи данных 20000 Тбит/с и может хранить 200 ТБ информации, потребляя при этом всего 20 Вт. Сегодня вычислительная мощность ИИ удваивается каждые два месяца, что намного превышает закон Мура. В момент времени, близкий к концу закона Мура, чтобы достичь тех же возможностей, что и человеческий мозг, нейронный центр будет потреблять в 1000 раз больше энергии. Чтобы нейронные центры могли заменить центры обработки данных и полностью реализовали потенциал ИИ, необходимо использовать передовые технологии машинного обучения, которые способствуют устойчивому развитию 6G на основе ИИ [11]. Стандартизованный подход к реализации вычислительной архитектуры нейронного центра и согласования программного обеспечения является ключевым условием, от которого зависит открытость платформы и экосистемы 6G;

**6G будет функционировать как сетевой датчик, позволяющий объединить кибернетический, физический и биологический миры.**

Сканирование – новая и важнейшая функция 6G – это новый канал, с помощью которого мы можем связать физический и биологический миры с кибермиром. Чтобы создать параллельную кибервселенную, которая является точной копией физической, в частности создать цифрового двойника, нам необходимо сканирование в реальном времени. Радиоволна 6G будет играть роль органа чувств на всех узлах и устройствах радиодоступа, включая базовые станции и мобильные устройства. Данные сканирования, собранные сетью и устройствами, могут использоваться для двух целей: для улучшения связи, особенно для миллиметрового и ТГц-диапазонов, и для нужд машинного обучения и искусственного интеллекта. В обоих случаях данные сканирования содержат информацию в реальном времени и знания о физическом и биологическом мирах. Таким образом, мы можем рассматривать сеть 6G как распределенный сетевой сенсор, кибернетический орган чувств, который радикально отличается от беспроводных систем предыдущих поколений, просто передающих информацию. Сканирование на основе сети и устройств может обеспечивать глобальное и локальное сканирование соответственно. Благодаря такой функциональности 6G выведет ИИ и машинное обучение в реальном времени на новый уровень;

**6G с интегрированными наземными и неназемными сетями обеспечит полное покрытие всей земной поверхности, устраняя цифровой разрыв.**

Интеграция неназемных сетей, особенно спутниковых мегасозвездий (роев) VLEO, в 6G является очень привлекательной перспективой. Спутниковая система VLEO, помимо обеспечения покрытия всей земной поверхности, предлагает ряд новых возможностей и преимуществ. Например, она устраняет проблему с задержкой связи, присущую традиционным спутниковым системам на геостационарной околоземной орбите (geostationary Earth orbit, GEO) и средней околоземной орбите (middle-earth orbit, MEO). Она также может обеспечивать покрытие зон, не охваченных наземными сетями, предлагая дополнительный радиодоступ. Одно из уникальных преимуществ спутниковой системы VLEO заключается в том, что она обеспечивает глобальный канал связи с малой задержкой, что очень важно для критически важных приложений, таких как алгоритмический частотный трейдинг. Спутниковые системы VLEO также могут обеспечивать более точное позиционирование, что имеет решающее значение для автономного вождения и важно для сканирования Земли и получения изображений земной поверхности. Помимо спутниковой связи, радиоузлы нового типа, такие как малогабаритные дроны, беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и платформы HAPS, станут неотъемлемой частью 6G, функционируя либо как мобильные оконечные устройства, либо как временные узлы инфраструктуры;

**6G будет поддерживать сетевую архитектуру, ориентированную на потребителей, а не на операторов, охватывая инклюзивную открытую экосистему.**

Сеть 6G приведет к смене парадигмы участия, поскольку она стимулирует экономические и социальные изменения на основе достижений в области виртуализации и искусственного интеллекта. Наличие встроенного в сеть 6G интеллекта позволит реализовать подход к созданию сетей и предоставлению услуг на основе долевого вклада. Произойдет переопределение интеллектуальной инфраструктуры подключения как динамического пула, состоящего из ресурсов всех участвующих пользователей. Это радикальный сдвиг парадигмы от традиционной схемы, ориентированной на оператора, к всеобъемлющей схеме, ориентированной на *просьюмеров*<sup>5</sup>. Благодаря совместной модели, объединяющей множество

<sup>5</sup> Просьюмер (prosumer) – это тот, кто одновременно и производит (produce), и потребляет (consume) некоторый продукт. – *Прим. перев.*

сетей, ключевые аспекты, такие как многостороннее владение, владение данными и конфиденциальность, а также модели доверия вовлеченных игроков, могут (и должны) быть разработаны как нативные, а не дополнительные функции. Кроме того, для обеспечения локального управления данными и сетевого суверенитета 6G будет применять новую модель доверия и технологии безопасности.

В инклюзивной модели, ориентированной на потребителей, каждый участник системы может как поставлять, так и потреблять ресурсы и услуги. Благодаря использованию технологии ИИ и машинного обучения сети 6G будут полностью автономными, не требующими ручного вмешательства. В этом смысле сети 6G будут скорее индивидуально подстраиваемыми, чем проприетарными, что приведет к появлению концепции «моя сеть».

### 1.3.1. Ключевые технологические тенденции

Основываясь на концепциях 6G, рассмотренных в предыдущем разделе, мы можем сделать следующие выводы:

- 6G расширит возможности человеческого общения, обеспечивая максимальное погружение с достоверными ощущениями в произвольном месте;
- 6G станет новой формой межмашинного взаимодействия, предоставляя интеллектуальную связь для эффективного машинно ориентированного доступа. 6G будет полностью включать в себя как машинное обучение, так и ИИ;
- 6G выйдет за рамки простого средства коммуникации. Сеть будет включать в себя новые функции, такие как сканирование и вычисления, предоставлять новые услуги и использовать расширенные знания о среде для машинного обучения;
- 6G откроет новое и уникальное поколение беспроводных сетей с поддержкой всеобщего интеллекта. Наличие искусственного интеллекта, надежность и энергоэффективность будут нативными свойствами 6G.

Ниже мы обсудим шесть основных технологических тенденций.

**Тенденция 1: новый спектр в ТГц-диапазоне и оптическая беспроводная связь для чрезвычайно высоких скоростей передачи данных.**

Для поддержки новых приложений, таких как AR/VR/MR и голографическая связь, необходимы сверхвысокие скорости передачи

данных до десятков Тбит/с. Субтерагерцовый и миллиметровый диапазоны будут базовыми спектрами в сотовых сетях 6G, в то время как полоса нижнего ТГц-диапазона (0,3–1,0 ТГц) будет основным кандидатом для передачи данных на короткие расстояния, например для использования внутри помещений или в каналах устройство–устройство (D2D). ТГц-диапазон обеспечивает сверхширокую полосу пропускания, превышающую десятки ГГц. ТГц диапазон позволит использовать широкий спектр приложений, требовательных к данным и чувствительных к задержкам; в дополнение к этому ТГц-диапазон можно использовать для беспроводного сканирования.

*Терагерцовая связь* – это новая беспроводная технология, внедрение которой сопряжено со множеством проблем. В настоящее время проводятся исследования по разработке усилителей, новых материалов для антенн, силовых радиочастотных транзисторов, архитектуры ТГц-трансивера на кристалле, моделирования каналов и обработки массивов сигналов. Будет ли терагерцовая технология успешно применена в 6G, зависит от технических достижений в конструировании и производстве таких компонентов, связанных с ТГц-диапазоном, как электронные, фотонные и гибридные приемопередатчики и антенные решетки на кристалле.

*Связь в диапазоне видимого света* (visible light communication, VLC) – это технология передачи за пределами радиочастотного диапазона, которая позволяет минимизировать воздействие электромагнитного поля на окружающие объекты. Однако для достижения скоростей передачи данных, приближающихся к десяткам Тбит/с для связи на короткие расстояния с низким энергопотреблением, малым форм-фактором и недорогим оборудованием потребуются разработать технологию изготовления и использования *микросветодиодных массивов* (micro-LED array). Кроме того, связь в видимом свете позволяет использовать нелицензируемую часть спектра, но возможность успешного использования VLC в 6G зависит от нескольких проблем, связанных с передачей по восходящей линии связи, управлением переподключением и высокоэффективными приемопередатчиками.

### **Тенденция 2: интегрированное сканирование и связь (ISAC) для новых услуг и улучшенной беспроводной связи.**

Традиционно сканирование окружающей среды является отдельной функцией, требующей наличия специализированных устройств и оборудования, таких как радар, лидар, компьютер-



ный томограф (КТ) и магнитно-резонансный томограф (МРТ). Позиционирование мобильного телефона в мобильных системах с помощью сигналов радиointерфейса и измерений на основе устройств отчасти напоминает технологию сканирования. Однако за счет использования миллиметрового и ТГц-диапазонов, которые предлагают более широкую полосу пропускания и меньшую длину волны, 6G позволит интегрировать функцию сканирования в систему связи. В полной системе ISAC функции сканирования и связи будут дополнять друг друга, предлагая следующие ключевые преимущества:

- **сотовая связь как датчик:** сигналы связи будут использоваться для новых применений сканирования, таких как высокоточная локализация, распознавание жестов и движений, обнаружение и отслеживание объектов, съемка и реконструкция объектов окружающей среды;
- **улучшение связи с помощью сканирования:** сканирование помогает улучшить качество обслуживания (QoS) и эффективность связи, в том числе за счет выбора пути, прогнозирования канала и выравнивание луча.

Интегрированное сканирование и связь позволяют услугам сканирования в 6G выйти далеко за рамки простого позиционирования. Ему на смену придут новые сервисы, включая дополнительные функции сканирования с повышенной точностью (которые описывают разницу между измеренными и реальными значениями диапазона, угла, скорости и т. д.) и разрешением сканирования (которое описывает возможность различать несколько объектов по диапазону, углу, скорости и т. д.). Этот вопрос более детально рассмотрен в главе 3.

По сравнению с традиционной технологией радиолокации, сканирование 6G, использующее широкополосный спектр и большие антенные решетки, обеспечит технологические инновации, такие как крупномасштабное взаимодействие между базовыми станциями и пользовательскими устройствами, общую конструкцию устройств связи и сканирования, передовые методы подавления помех и использование данных сканирования для содействия ИИ. Сканирование потенциально станет одной из самых революционных инноваций 6G, на базе которой могут быть созданы многочисленные приложения для машинного обучения и искусственного интеллекта в реальном времени.

Благодаря сверхширокой полосе пропускания при измерении в ТГц-диапазоне можно достичь гораздо более высокой точности

и разрешения. Благодаря эффекту терагерциндуцированной вибрации молекул при помощи терагерцового сканирования можно снимать вторичную спектрограмму для определения компонентов продуктов питания, лекарств и загрязнителей воздуха. Благодаря компактному форм-фактору и отсутствию ионизирующего излучения устройства для ТГц-сканирования могут быть интегрированы в мобильные устройства и даже элементы одежды для определения количества калорий в пище и обнаружения скрытых объектов. Чувствительные устройства 6G откроют перспективы для реализации многочисленных инновационных приложений искусственного интеллекта.

### **Тенденция 3: ИИ как услуга и функция в системе связи 6G для интеллектуального подключения «умных» устройств.**

Ключевой задачей проектирования в 6G является конвергенция беспроводных технологий и технологий искусственного интеллекта с самого начала, а не разработка сначала беспроводной системы, а затем добавление искусственного интеллекта. Использование искусственного интеллекта для улучшения беспроводной системы 6G создает возможности для развития постшенноновской теории связи и инноваций в беспроводных технологиях.

В 6G будут реализованы две концепции: (1) *ИИ для сети* использует приложения ИИ в качестве инструментов для оптимизации сети; (2) *сеть для ИИ* подстраивает сеть для поддержки и оптимизации приложений ИИ. Сеть также помогает предоставлять функциональные возможности ИИ или даже выполнять такие функции самостоятельно; например, сеть может обрабатывать логические выводы и машинные вычисления. Конечно, ИИ можно применять в качестве универсального инструмента для функциональной оптимизации, как в случае с сетью 5G и продуктами ее эволюции.

Ниже представлены более подробные описания этих концепций.

- **ИИ для сети:** технологии искусственного интеллекта, которые по своей сути управляются данными, могут быть интегрированы в классическую структуру систем связи на основе моделей, чтобы справиться с ситуациями, когда система на основе модели является слишком сложной или не может обеспечить достаточно высокую точность. Используя ИИ для сети, можно создать интеллектуальную линию связи, которая адаптируется к динамической среде сквозной передачи (end-to-end, E2E). Кроме того, полностью интегрируя обработку сигналов и анализ данных, мы можем упростить и унифицировать архитектуру вычислений и логического вывода, а также преоб-

разовать сеть из архитектуры, основанной на динамической обработке и отклике, в сеть, в которой возможно упреждающее прогнозирование и принятие решений. Хотя это многообещающая область, она также создает множество проблем. Например, проектирование таких систем затруднено из-за отсутствия надежных аналитических инструментов и универсальной архитектуры нейронной сети, что затрудняет поиск оптимального баланса между параметрами системы. Следовательно, достижение глубокого теоретического понимания ИИ – важное направление для дальнейших исследований. Чтобы добиться максимальной поддержки искусственного интеллекта в сетях 6G, может потребоваться более революционный подход – возможно, нам придется пересмотреть фундаментальное понимание того, как система связи передает информацию. Для более глубокого понимания постшеннонских коммуникаций потребуются обширные теоретические исследования, которые еще предстоит выполнить.

- **Сеть для ИИ:** сеть 6G будет развиваться в направлении более распределенной архитектуры со встроенными возможностями MEC для локального сбора данных, обучения, рассуждений и логических выводов вместе с глобальным обучением и логическими выводами для надежной защиты конфиденциальности, снижения задержки и снижения потребления полосы пропускания. Одной из возможных технологий, которые позволят реализовать такие функции, является *федеративное обучение*. На начальном этапе проектирования радиоинтерфейсов 6G и сетевой архитектуры важно заложить распределенное обучение и логический вывод ИИ, чтобы итеративно реализовать эффективный крупномасштабный интеллект. Более радикальный подход – изучение теории узких мест информационных потоков в контексте ИИ – представляет собой новое направление исследований 6G. Это поможет нам сжать огромные объемы обучающих данных, отправляемых по сети, с использованием минимальных ресурсов, таких как пропускная способность и память.

#### **Тенденция 4: надежность 6G, основанная на многосторонней модели доверия и новых криптографических технологиях.**

В 6G мобильные устройства станут порталом в кибермир, который является точной копией физического мира. Поскольку наша зависимость от 6G и предлагаемых им услуг будет только расти, надежность сети и услуг будет иметь решающее значение. Входя-

щая в состав сетевой архитектуры надежная система безопасности послужит основой для установления доверительных отношений между различными объектами в сети. Функции безопасности должны разрабатываться совместно с функциями ядра сети и удовлетворять требованиям к услугам как индивидуальных пользователей, так и бизнес-клиентов. Ниже обсуждаются два аспекта надежной доверенной системы 6G:

- **многосторонняя модель доверия:** любая архитектура безопасности, независимо от того, централизованная она или децентрализованная, имеет как преимущества, так и недостатки. Централизованная архитектура использует набор очень сильных механизмов безопасности, которые используют строгие политики безопасности, но с точки зрения диалога безопасности это связано с более высокой сложностью во время операций роуминга, передачи обслуживания или повторного входа в систему, выполняемых в сети. Следовательно, вероятность атаки выше, потому что чем больше интерфейсов, тем более уязвимой становится система. Децентрализованная архитектура с гибкими и настраиваемыми механизмами поддерживает различные требования и может ограничиваться близлежащими сервисами. В случае атаки вредоносное воздействие ограничится пределами небольшой локализованной области. В случаях, когда не все заинтересованные стороны являются доверенными, для реализации устойчивости может использоваться многосторонняя модель доверия, чтобы другие заинтересованные стороны оставались доверенными. По сравнению с централизованной архитектурой в распределенной архитектуре отсутствует эффективная синхронизация унифицированных политик безопасности. Следовательно, необходима унифицированная архитектура безопасности с несколькими атрибутами безопасности, применимая как к централизованной, так и к децентрализованной архитектуре.

Более инклюзивная многосторонняя модель доверия послужит основой будущих систем безопасности. Эта модель поможет создать устойчивую и естественную архитектуру надежности, охватывающую весь жизненный цикл 6G. Она также будет гибко реализовывать централизованные политики безопасности, распределенные механизмы на основе консенсуса, а также проверенные сторонние ссылки и верификацию;

- **новые криптографические алгоритмы:** по мере развития квантовых вычислений возникают проблемы, связанные с классической криптографией, которая основана на матема-

тических задачах, таких как факторизация большого числа простых чисел и дискретные алгоритмы. Алгоритмы генерации и обмена ключами – два незаменимых элемента криптографии. В 6G для защиты от атак, основанных на квантовых вычислениях в полнодуплексной двунаправленной связи на физическом уровне, может использоваться шифрование с одноразовым блокнотом (one-time pad, OTP). Одним из важных аспектов криптографии является то, что 6G требует, чтобы криптографические алгоритмы выполняли операции в течение микросекунд, дабы обеспечить сверхнизкую задержку. Когда квантовые вычисления станут реальностью, ожидается, что технологии квантовой связи станут более безопасными из-за квантовой запутанности. Кроме того, облегченные криптографические алгоритмы и алгоритмы соблюдения конфиденциальности – это лишь некоторые из возможностей, которые заслуживают дальнейшего исследования в 6G.

Некоторые из ключевых вопросов, связанных с реализацией предшествующих собственных механизмов надежного доверия, заключаются в следующем:

- (1) Как новые технологии будут интегрированы с традиционными механизмами безопасности?
- (2) Как децентрализованные технологии будут интегрированы с архитектурой беспроводной сети?
- (3) Как будут реализованы открытые и прозрачные стандарты безопасности и защиты данных?

Все эти вопросы потребуют дальнейшего изучения.

### **Тенденция 5: интеграция наземных и неназемных сетей для повсеместного доступа на всей земной поверхности.**

Сегодня, даже в развитых странах, во многих сельских и отдаленных районах по-прежнему отсутствует высокоскоростное подключение к интернету. Ситуация в развивающихся странах еще хуже. Фактически более 3 миллиардов человек во всем мире все еще не имеют доступа к интернету, что создает серьезный цифровой разрыв между подключенными и неподключенными сегментами человечества [4].

В настоящее время основным препятствием для достижения бесшовного глобального покрытия являются экономические, а не технические факторы. Ожидается, что интеграция наземных и неназемных сетей станет экономически эффективным решением и позволит обеспечить беспрепятственное покрытие услугами

высокоскоростного мобильного интернета независимо от географических ограничений.

По мере снижения стоимости производства и запуска спутников реальностью станет огромный парк малых спутников на низкой околоземной орбите (low-earth-orbit, LEO) или VLEO. Кроме того, использование БПЛА и HAPS будет означать, что покрытие, обеспечиваемое будущей мобильной системой, больше не будет плоским (двухмерным). Вместо этого трехмерная гибридная сетевая архитектура, включающая несколько уровней и множество движущихся точек доступа, позволит предоставлять услуги связи и навигации в любом месте и в любое время. Это означает радикальное изменение протоколов связи в части планирования соединения, захвата и передачи абонентского соединения, а также *беспроводного обратного соединения базовой станции с центром управления сетью* (wireless backhaul).

В настоящее время БПЛА и HAPS проектируются и эксплуатируются отдельно, но ожидается, что в будущих сетях 6G их функции и операции, а также управление ресурсами и мобильностью будут тесно интегрированы. Такая интегрированная система будет идентифицировать каждое пользовательское устройство с помощью уникального идентификатора, унифицировать процессы выставления счетов и постоянно предоставлять высококачественные услуги через оптимальные точки доступа.

Чтобы легко интегрировать новый БПЛА или спутник LEO без необходимости ручной настройки, интегрированная сеть должна обладать функцией самоорганизации. Благодаря интеллектуальному устройству радиointерфейса добавление и удаление точки доступа будет прозрачным для пользовательских устройств с точки зрения процедур физического уровня (таких как формирование луча, измерение и обратная связь). Учитывая, что развертывание, обслуживание и энергоснабжение спутников полностью отличаются от наземных сетей, можно ожидать появления новых операционных и бизнес-моделей.

**Тенденция 6: экологичные и устойчивые сети с низкой совокупной стоимостью владения для устойчивого развития во всем мире.**

Увеличение числа подключенных устройств, базовых станций и сетевых узлов не только приведет к огромному всплеску трафика данных, но и к значительному увеличению энергопотребления во всех частях сети. Долгое время основной целью проектирования была энергоэффективность передачи данных, определяемая как

бит/джоуль. При проектировании сети 6G этот критерий станет еще более важным – высокая энергоэффективность больше не будет просто полезным свойством; скорее, это будет обязательным требованием для мобильных сетей 6G.

На сегодняшний день на ICT приходится около 2 % мировых выбросов парниковых газов (из которых на мобильные сети приходится около 0,2 %) [12]. Ожидается, в последующие годы этот процент будет неуклонно увеличиваться. Для 6G, помимо энергоэффективности, важно будет снизить энергопотребление сетей. Это необходимо не только для сокращения расходов на электроэнергию, но и для сокращения выбросов парниковых газов, что является важным социальным обязательством. В то же время необходимо будет учитывать как капитальные затраты (capital expenditure, CAPEX), так и операционные расходы (operational expenditure, OPEX). Хотя проектирование рентабельных и энергоэффективных сетей направляет отрасль ICT на путь устойчивого развития, ICT в целом может сыграть важную роль в сокращении глобальных выбросов CO<sub>2</sub> ради более чистой и здоровой среды обитания. Ожидается, что ICT могут сократить глобальные выбросы CO<sub>2</sub> на 20 % к 2030 году по сравнению с уровнями 2015 года [13]. В то же время система связи 6G должна поддерживать постоянное расширение перечня приложений и сценариев использования в бизнесе, чтобы облегчить работу в других отраслях, а также обеспечить устойчивое социальное развитие.

Так называемая *зеленая радиосеть* (green radio network) – обширная исследовательская дисциплина. Потенциальные энергоэффективные технологии охватывают архитектуры, материалы, аппаратные компоненты, алгоритмы, программное обеспечение и протоколы. Развертывание плотных сетей (ведущее к более короткому расстоянию распространения), централизованная архитектура RAN (приводящая к меньшему количеству сотовых узлов и повышению эффективности использования ресурсов), энергосберегающие протоколы и взаимодействие между пользователями и базовыми станциями – вот некоторые факторы, которые необходимо тщательно учитывать, создавая энергоэффективную систему связи 6G. Еще одна важная проблема – снижение эффективности выходного усилителя мощности по мере перехода к использованию все более высоких частот. Кроме того, не следует забывать про возобновляемые источники энергии и технологии сбора энергии в радиочастотном диапазоне.

С другой стороны, по мере распространения искусственного интеллекта в центрах обработки данных, граничных узлах и даже

на мобильных устройствах потребление энергии, связанное с обучением и обучением искусственному интеллекту, становится ключевой проблемой, которую необходимо решать уже сейчас. В [14] указывалось, что обучение одной модели ИИ выделяет столько же углерода, сколько пять автомобилей производят за все время своей эксплуатации. Одни только центры обработки данных потребляли более 2 % мировой электроэнергии в 2018 году, и ожидается, что их доля будет увеличиваться по мере того, как к 2030 году появится больше граничных узлов и устройств с поддержкой ИИ. Некоторые недавние исследования показывают, что обучение универсальной сети, которая поддерживает различные конфигурации архитектуры, значительно снизит выбросы CO<sub>2</sub> по сравнению с поиском специализированной нейронной сети и ее обучением с нуля для каждого варианта использования [15].

### 1.3.2. Типичные варианты использования

По мере внедрения новых технологий в системы беспроводной связи многие аспекты нашей повседневной жизни претерпят изменения за счет сверхвысокоскоростных беспроводных соединений, искусственного интеллекта и передовых сенсорных технологий. Проще говоря, изменятся и способы, и содержание нашего взаимодействия с технологиями.

В дополнение к широкополосной передаче данных сеть 5G стала шагом вперед к высоконадежному беспроводному доступу с малой задержкой, что позволило реализовать набор вертикальных приложений и приложений интернета вещей. ITU-R<sup>6</sup> определил три типа сценариев использования 5G (eMBB, URLLC и mMTC) в дорожной карте IMT-2020 [16]. По мере того как в 6G вводятся интеллектуальные и сенсорные функции, а покрытие выходит за пределы земной поверхности, сети следующего поколения будут создавать новые приложения и улучшать существующие. Некоторые из этих приложений, возможно, уже обсуждались в концепции 5G, даже если они не были включены в действующие сети 5G из-за технологических ограничений или незрелости рынка. Мы сосредоточимся на вариантах использования, которые сеть 5G не может поддерживать (например, сканирование), а также на сценариях, которые обсуждались, но не получили широкого распространения в 5G, таких как интеллект и улучшения трех применений 5G (eMBB +, URLLC +, и mMTC +). Мы выделяем шесть категорий потенциальных вариантов использования 6G, как показано на рис. 1.6.

<sup>6</sup> International Telecommunication Union – Radio, Международный союз электросвязи, МСЭ.



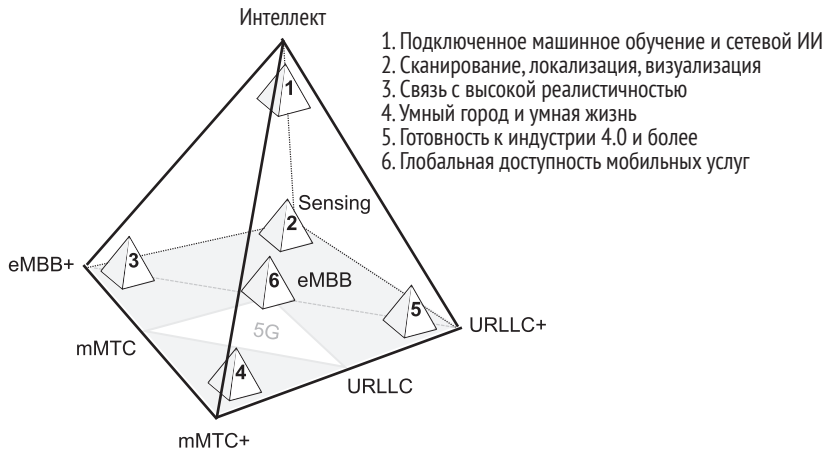


Рис. 1.6. Обзор сценариев использования 6G

- Связь с высокой реалистичностью:** постоянное стремление к улучшению пользовательского опыта коммуникаций. Чтобы обеспечить опыт удаленного присутствия с погружением и ориентированных на человека применений, таких как AR, VR и MR, а также голографической связи, нам необходимо стремиться повысить разрешение дисплеев до предела человеческого восприятия. Подобные дисплеи нуждаются в сверхвысоких скоростях передачи данных до Тбит/с, а сегодняшняя сеть 5G не способна этого достичь. Чтобы избежать укачивания (головокружение и усталость) и получать тактильную обратную связь в реальном времени при телеуправлении, требуется чрезвычайно низкая задержка сети E2E, максимально приближенная к пределам возможностей человеческих органов чувств и восприятия.
- Сканирование, локализация и съемка:** помимо связи, использование диапазонов более высоких частот (ТГц и миллиметровые волны) обеспечивает другие возможности, такие как сканирование, *визуализация*<sup>7</sup> (imaging) и локализация. В результате в обиход войдут различные инновационные приложения, такие как высокоточная навигация, распознавание жестов, отображение и реконструкция изображений. По сравнению со связью, для оценки качества сканирования, локализации и визуализации используют другие критерии, такие как разрешение сканирования и точность измерения диапазона, угла или скорости. Они также

<sup>7</sup> Под визуализацией мы здесь понимаем создание цифровых образов (image) объектов окружающей среды (зданий, помещений, предметов). Для визуализации может применяться ТГц-сканирование, а цифровой образ не обязательно визуально понятен человеку, т. к. чаще предназначен для ИИ. – *Прим. перев.*

включают новый набор показателей качества работы, таких как вероятность неправильного обнаружения и ложной тревоги.

- **Полнофункциональная индустрия 4.0 и выше:** отраслевые сценарии использования 5G достаточно хорошо изучены [1]. Хотя 5G был разработан с низкой задержкой и высокой надежностью, некоторые из этих сценариев предъявляют чрезвычайно высокие требования (например, точное управление движением), превышающие возможности 5G. В свою очередь, 6G позволит реализовать эти варианты использования за счет технологий, реализующих сверхвысокую надежность и чрезвычайно низкую задержку. Вместе с тем, по мере того как новые методы взаимодействия человека и машины на основе ИИ станут жизнеспособными, будущие автоматизированные производственные системы будут ориентированы на совместную работу роботов, коботов<sup>8</sup> или даже киборгов. Взаимодействие между роботами и людьми в режиме реального времени требует еще меньших задержек и более высокой надежности по сравнению с 5G.
- **Умный город и умная жизнь:** огромное количество датчиков будет развернуто для нужд умного транспорта, строительства, здравоохранения, автомобилей, заводов и городов. Эти датчики будут собирать большие данные для алгоритмов ИИ, которые затем используются для предоставления ИИ как услуги (AI as a service, AIaaS). Ожидается, что мы будем жить в мире, где физическая реальность отображается на цифровых двойниках в кибермире. Другими словами, автоматизация и интеллект будут созданы в кибермире и доставлены в физический мир через беспроводные сети 6G. Для реализации этой концепции крайне важно разработать новые средства – сенсоры, алгоритмы сканирования – для извлечения больших данных, востребованных при обучении глубоких нейронных сетей (deep neural network, DNN). Для этого, в свою очередь, тоже нужны беспроводные каналы с очень высокой пропускной способностью, позволяющие собирать данные сканирования в реальном времени. Следовательно, для умного города и умной жизни требуется огромное количество надежных и безопасных подключений.
- **Глобальное покрытие для мобильных услуг:** чтобы предоставлять бесперебойные и безразрывные мобильные услуги на всей земной поверхности, в сетях 6G предусмотрена интеграция

<sup>8</sup> Cobot (кобот), или collaborative robot (совместный робот) – это специальный робот, предназначенный для совместной работы рядом с людьми, в общем пространстве, в отличие от обычных промышленных роботов, которые изолированы от контакта с людьми. – *Прим. перев.*

наземной и наземной связи. В такой интегрированной системе мобильный пользователь с помощью одного устройства может получить доступ к услугам мобильного широкополосного доступа как в городских, так и в сельских районах или даже на движущихся самолетах<sup>9</sup> и кораблях. В этих сценариях постоянно происходит динамический выбор оптимальных каналов наземных и наземных сетей без прерывания текущих услуг. Беспилотные транспортные средства получают возможность использовать безразрывную высокоточную навигацию в любой точке планеты. К возможным вариантам использования глобального покрытия относятся также IoT-подключения для защиты окружающей среды в реальном времени и точного ведения сельского хозяйства.

- **Подключенное машинное обучение и сетевой ИИ:** полноценное использование возможностей ИИ является фундаментальным принципом функционирования 6G. По сути, с одной стороны, возможности ИИ могут быть расширены и интегрированы в большинство функций и приложений 6G. С другой стороны, почти все приложения 6G будут основаны на ИИ, при этом ИИ также может расширять все предыдущие варианты использования беспроводных сетей, внося в них продвинутую автоматизацию. В то же время существуют проблемы и ограничения, связанные с предоставлением ИИ в качестве OTT-сервиса. Первая проблема заключается в том, что машинное обучение требует передачи огромных объемов данных в центры обработки данных, особенно для настраиваемых сервисов искусственного интеллекта. Вторая проблема напрямую связана с требованиями к территориальному управлению данными. В частности, в большинстве стран передача данных в зарубежные центры обработки данных не разрешена. Третья проблема связана со взаимодействием различных агентов ИИ (даже расположенных рядом) через сеть 6G. В качестве основного варианта рассматривается полное подключение распределенных агентов машинного обучения через сеть 6G для формирования сетевого интеллекта и лучшей защиты конфиденциальности данных. С этой точки зрения подключенное машинное обучение и сетевой ИИ, по существу, будут опираться на следующие аспекты: нацеленность 6G на максимальное увеличение возможностей машинного обучения; сетевая архитектура, поддерживающая распределенный

<sup>9</sup> Наличие мобильной связи на борту самолета можно отнести к покрытию земной поверхности, потому что даже низкоорбитальные спутники находятся значительно выше самолета. – Прим. перев.

характер ИИ и граничные вычисления для служб ИИ в реальном времени; высокая пропускная способность, низкая задержка и высоконадежный логический вывод ИИ. Кроме того, ИИ изначально будет встроенной функцией 6G, облегчая разработку будущих схем передачи, интеллектуального контроля и управления ресурсами, а также «самонастройку» сети.

### 1.3.3. Ключевые показатели эффективности

Чтобы обеспечить наилучший опыт пользователя во всех сферах применения, сеть 6G должна значительно улучшить ключевые показатели по сравнению с предшественниками. Исходя из опыта обновления предыдущих поколений мобильной связи, можно ожидать, что ключевые показатели 6G увеличатся в 10–100 раз по сравнению с 5G. Наши предположения схематически показаны на рис. 1.7 и подробно описаны ниже.



**Рис. 1.7.** Краткий перечень ключевых показателей эффективности для сетей радиодоступа

#### Очень высокая скорость передачи данных и эффективность использования спектра

Для реализации коммуникаций с опытом погружения потребуются очень высокая пропускная способность. Для передачи 360-градусной AR/VR- и голографической информации, в зависимости от таких факторов, как разрешение, размер и частота обновления изображений, может потребоваться скорость передачи данных от нескольких Гбит/с до нескольких Тбит/с.

В IMT-2020 (5G) минимальные требования ITU-R к пиковой и удобной для пользователя скорости передачи данных составляют 10–20 Гбит/с и 100 Мбит/с соответственно [17]. В 6G пиковая и удобная для пользователя скорость передачи данных должны составлять 1 Тбит/с и 10–100 Гбит/с соответственно. Кроме того, ожидается, что 6G будет и дальше развивать использование спектра, улучшая пиковую эффективность использования спектра в 5–10 раз по сравнению с 5G.

### **Очень большая емкость и сверхмассивная подключенность**

*Пропускная способность области* – это общая пропускная способность трафика для географической области. Это произведение *плотности подключения в области* (общее количество устройств на единицу площади) и средней скорости передачи данных для пользователей. В 5G минимальное требование ITU-R к плотности подключения составляет 1 000 000 устройств на км<sup>2</sup> [17]. В 6G, где мы должны поддерживать такие сценарии использования, как индустрия 4.0 с подключенным интеллектом и умный город, в ближайшие 10 лет и позже плотность подключения должна быть увеличена примерно в 10–100 раз, т. е. до 100 млн/км<sup>2</sup>. Такое огромное количество подключений должно быть способно поддерживать разнообразные типы услуг с разными характеристиками (например, с разной пропускной способностью, задержкой и QoS). В связи с этим пропускная способность системы 6G должна быть в 1000 раз больше, чем 5G, чтобы предоставлять качественные услуги для большого количества подключений.

### **Очень низкая задержка и джиттер, а также сверхвысокая надежность**

В некоторых сценариях использования интернета вещей, таких как беспилотные автомобили и промышленная автоматизация, критически важно, чтобы данные доставлялись вовремя (с низкой задержкой и джиттером). Радиointерфейсы 6G обеспечивают задержку 0,1 мс и джиттер  $\pm 0,1$  с. Исходя из требований к удаленным службам XR, общая задержка передачи E2E туда и обратно должна составлять 1–10 мс. Помимо низкой задержки, приложениям интернета вещей также требуется надежность (то есть правильная передача информации). ITU-R требует, чтобы надежность для услуг URLLC в 5G составляла 99,999 %. В 6G, где ожидается более широкое распространение различных вертикальных применений, необходимо многократное повышение надежности, достигающее 99,99999 %.

**Очень высокая локализация, точность сканирования и разрешение**

Сканирование, локализация и съемка – это новые функции в 6G, знаменующие значительный шаг вперед для подключенного интеллекта, о чем пойдет речь в главе 9. Ожидается, что благодаря расширенному до терагерц частотному диапазону и передовым технологиям сканирования 6G обеспечит сверхвысокую точность определения местоположения – 50 см для применений на открытом воздухе и 1 см внутри помещений. Для других сервисов сканирования, как будет описано в главе 5, максимальная точность и разрешение могут достигать 1 мм и 1 см соответственно.

**Очень широкое покрытие и очень высокая мобильность**

Для предоставления высококачественных услуг мобильного интернета с более широким покрытием *бюджет канала* (энергетический баланс) для радиоинтерфейсов 6G должен быть увеличен как минимум на 10 дБ по сравнению с 5G. Но покрытие 6G не должно определяться только бюджетом канала. Технология 6G должна обеспечить 100 % покрытие земной поверхности и охват населения путем интеграции как наземных, так и неназемных сетей.

Кроме того, 6G будет поддерживать покрытие для самолетов, движущихся со скоростью около 1000 км/ч, что намного выше, чем у 5G (500 км/ч, в основном для высокоскоростных поездов).

**Очень высокая энергоэффективность и экономичность**

Энергопотребление – один из самых сложных аспектов в системах 6G. С одной стороны, это связано с передачей в очень высокочастотных диапазонах, при очень большой полосе пропускания и очень большом количестве антенн. Более низкая эффективность усилителей мощности и увеличенное количество звеньев радиотракта – две ключевые проблемы, которые необходимо решить в ближайшее время. С другой стороны, по мере роста конвергенции связи и вычислений и поддержки собственного ИИ его обучение и логический вывод в сетях 6G будут потреблять больше энергии. Это означает, что для достижения сопоставимых уровней общего энергопотребления потребление энергии на бит в 6G должно быть как минимум в 100 раз ниже, чем в 5G. С точки зрения устройств с повышенными скоростями передачи данных, необходимо соответственно повысить энергоэффективность обработки сигналов. Кроме того, источники питания сенсоров для использования в умном городе, умном здании, умном доме и в сценариях умного здоровья должны служить до 20 лет.

## Нативный ИИ

Как говорилось в разделе 1.3.1, нативная поддержка ИИ в системах мобильной связи 6G включает два аспекта: ИИ для сети и сеть для ИИ.

- **ИИ для сети** образует интеллектуальный фреймворк для проектирования радиоинтерфейсов и сетевых функций, поддерживает динамическую передачу E2E, работу сети без вмешательства человека и автоматическое создание специализированных сетевых сегментов для различных услуг и предприятий;
- **сеть для ИИ** требует более распределенной архитектуры со встроенными возможностями мобильных граничных вычислений, чтобы сочетать локальный сбор данных, обучение и рассуждения/логические выводы с глобальным обучением и логическими выводами для лучшей защиты конфиденциальности и снижения задержки или потребления полосы пропускания.

## Нативная добросовестность

6G укрепит связь между физическим и цифровым мирами, став неотъемлемой частью нашей жизни. Понятие *добросовестности* (trustworthiness) в мобильной связи включает в себя защищенность, конфиденциальность, отказоустойчивость, безопасность и стабильность [18]:

- **защищенность** – это состояние, которое является результатом выполнения защитных мероприятий, позволяющих организации выполнять свою миссию или критические функции, несмотря на риски, связанные с угрозами использованию ею систем, как определено в [19]. Защитные меры могут включать сочетание сдерживания, предотвращения, обнаружения, восстановления и исправления, которые должны составлять часть подхода организации к управлению рисками;
- **конфиденциальность** – это свобода от вторжения в частную жизнь или дела человека, когда это вторжение является результатом ненадлежащего или незаконного сбора и использования данных об этом человеке, как определено в [20];
- **отказоустойчивость** – это способность быстро адаптироваться и восстанавливаться после любых известных или неизвестных изменений в окружающей среде посредством целостного внедрения управления рисками, непредвиденных обстоятельств и планирования непрерывности, как определено в [21];

- **безопасность** – это свобода от обстоятельств, которые могут привести к смерти, травмам, профессиональному заболеванию, повреждению или потере оборудования или собственности, или ущербу окружающей среде, как это определено в [22];
- **стабильность** – это способность системы или компонента функционировать в заданных условиях в течение определенного периода времени, как определено в [23].

## 1.4. Структура книги

Эта книга состоит из семи частей, посвященных конкретным темам, связанным с 6G. *Часть I*, состоящая из главы 1, описывает эволюцию мобильной связи от 2G к 6G и общую концепцию 6G, определяя шесть технологических тенденций, которые являются центральными для трех фундаментальных движущих сил будущего подключенного интеллекта.

В *части II* мы обсуждаем возможные варианты использования 6G и анализируем ключевые требования к производительности. Варианты использования варьируются от эволюции сетей 5G, которые приобретут популярность и станут более зрелыми на этапе 6G благодаря большей пропускной способности, меньшей задержке и более высокой надежности, до совершенно новых применений, ставших возможными благодаря новым функциям и возможностям, которые предлагает 6G. В *части II* типичные варианты использования разделены на шесть категорий, каждая из которых описана в отдельной главе. Они охватывают ориентированное на человека общение с эффектом полного погружения (глава 2); высокоточное сканирование, локализация и визуализация плюс расширение восприятия человека (глава 3); полнофункциональная индустрия 4.0 с подключенным интеллектом (глава 4); умный город и умная жизнь (глава 5); глобальное 3D-покрытие для мобильных услуг с интегрированной наземной и неназемной связью (глава 6) и нативная поддержка ИИ во всех случаях использования (глава 7).

В *части III* исследуются объем и пределы конструкторских разработок 6G, обсуждаются теоретические основы радиотехнологий 6G и сетевых технологий, а затем исследуется ряд эффективных технологий, обладающих потенциалом достижения заданных KPI. Представленный материал охватывает теоретические основы нативного ИИ и машинного обучения (глава 8), теоретические основы обеспечения всеобщей подключенности (глава 9), теоретические основы будущих межмашинных коммуникаций (глава 10), а также теоретические основы построения энергоэффективных систем (глава 11).

В *части IV* мы анализируем будущий спектр Международных мобильных телекоммуникаций (international mobile telecommunications,



ИМТ) с точки зрения связи и сканирования (глава 12), а также соответствующие методологии моделирования каналов и некоторые примеры канальных измерений (глава 13). Затем, чтобы обеспечить широкое и всестороннее понимание того, как 6G будет развиваться в течение следующих 10 лет, мы описываем перспективные новые материалы для производства оборудования (глава 14), новые антенные структуры для сверхмассивных систем со множеством входов и множеством выходов (multiple-input multiple-output, МИМО) (глава 15), новые радиочастотные компоненты для работы в ТГц-диапазоне (глава 16), эволюцию вычислений после выхода за рамки закона Мура (глава 17), а также новые требования к окончательным устройствам (глава 18).

*Часть V* фокусируется на общих принципах проектирования и перспективных технологиях для радиоинтерфейсов 6G. Во введении к этой части мы описываем сдвиги парадигмы в разработке радиоинтерфейсов по сравнению с 5G и более ранними поколениями, а затем обсуждаем ряд сопутствующих технологий. Эти перспективные технологии включают интеллектуальный радиоинтерфейс (глава 19), интеграцию наземной и неназемной связи (глава 20), интеграцию сканирования и связи (глава 21), новые типы волны и модуляции (глава 22), новое кодирование (глава 23), новую технологию множественного доступа (глава 24), сверхмассивные МИМО (глава 25) и связь на сверхмалых расстояниях (глава 26). Для каждой технологии мы описываем предпосылки и обоснование для ее использования, исследуем существующие решения, проясняем ожидания от новых конструктивных решений и выделяем потенциальные исследовательские проблемы и направления для будущих исследований.

Аналогично, в *части VI* основное внимание уделяется принципам проектирования и перспективным технологиям, позволяющим проектировать архитектуру сети 6G. Она также начинается с введения, посвященного смене парадигмы при проектировании сетевой архитектуры. После этого мы углубленно рассматриваем несколько новых основных функций и технологий, используемых в сетевых архитектурах 6G. Это архитектурные решения для сетевого ИИ (глава 27), ориентированная на пользователя сеть (глава 28), нативная надежность (глава 29), управление данными (глава 30), многопользовательские экосистемы (глава 31) и интегрированные неназемные сети (глава 32).

*Часть VII* (глава 33) завершает книгу описанием текущего состояния экосистемы 6G в мире, включая исследовательские проекты, платформы, семинары и документы по 6G, а затем предлагает наше видение дорожной карты до 2030 года.