

# Оглавление

|  |    |
|--|----|
| <b>Вступление от издательства</b> .....  | 14 |
| <b>Авторы</b> .....  | 15 |
| <b>Предисловие</b> .....   | 17 |
| <b>Словарь сокращений</b> .....  | 19 |
| <b>Часть I. Вступление</b> .....   | 29 |
| <b>Глава 1. Мобильная связь до 2030 года и далее</b> .....                       | 30 |
| 1.1. Эволюция систем мобильной связи .....                                       | 30 |
| 1.2. Ключевые факторы потребности в 6G.....                                      | 33 |
| 1.3. Общая концепция .....   | 41 |
| 1.3.1. Ключевые технологические тенденции .....                                  | 48 |
| 1.3.2. Типичные варианты использования.....                                      | 57 |
| 1.3.3. Ключевые показатели эффективности .....                                   | 61 |
| 1.4. Структура книги.....  | 65 |
| 1.5. Источники .....   | 67 |
| <b>Часть II. Сценарии использования и целевые KPI</b> .....                      | 69 |
| <b>Введение в часть II</b> .....   | 70 |
| <b>Глава 2. Максимально достоверный эффект погружения</b> .....                  | 71 |
| 2.1. Облачная VR высокой степени достоверности .....                             | 72 |
| 2.1.1. Требования к задержке передачи.....                                       | 73 |
| 2.1.2. Требования к пропускной способности .....                                 | 76 |
| 2.1.3. Обзор основных требований для полной VR .....                             | 78 |
| 2.2. Тактильное и мультисенсорное общение .....                                  | 79 |
| 2.2.1. Дистанционная работа в высокодинамичных средах.....                       | 80 |
| 2.2.2. Основные требования к телеуправлению в высокодинамичных средах .....      | 82 |
| 2.3. Дисплеи 3D без стекла и голографические дисплеи .....                       | 83 |
| 2.3.1. Глубина восприятия и 3D-дисплеи без стекла.....                           | 83 |
| 2.3.2. Методы реконструкции трехмерных изображений без использования стекла..... | 84 |
| 2.3.3. Требования к разрешению и задержке .....                                  | 85 |
| 2.3.4. Основные требования к 3D-дисплеям без стекла .....                        | 86 |
| 2.4. Источники .....   | 86 |
| <b>Глава 3. Сканирование, локализация и визуализация</b> .....                   | 88 |
| 3.1. Высокоточная локализация.....   | 89 |
| 3.1.1. Абсолютная локализация.....   | 90 |
| 3.1.2. Относительная локализация.....  | 91 |
| 3.1.3. Семантическая локализация .....   | 92 |
| 3.2. Визуализация, картирование и локализация в реальном времени .....           | 93 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.2.1. Одновременная локализация и картирование.....                           | 94         |
| 3.2.2. Визуализация и картирование внутри помещений.....                       | 95         |
| 3.2.3. Визуализация и картирование на открытом воздухе.....                    | 96         |
| 3.3. Расширенное человеческое восприятие.....                                  | 97         |
| 3.3.1. За пределами возможностей глаза – сверхвысокое разрешение.....          | 98         |
| 3.3.2. За пределами возможностей глаза – сделать невидимое видимым.....        | 99         |
| 3.3.3. За пределами возможностей глаза – спектральное распознавание.....       | 100        |
| 3.4. Распознавание жестов и действий.....                                      | 101        |
| 3.4.1. Бесконтактное управление на макроуровне.....                            | 102        |
| 3.4.2. Бесконтактное управление на микроуровне.....                            | 104        |
| 3.5. Источники.....  | 105        |
| <b>Глава 4. Полнофункциональная индустрия 4.0 и выше.....</b>                  | <b>106</b> |
| 4.1. Фабрика будущего.....   | 108        |
| 4.2. Управление движением.....   | 110        |
| 4.3. Совместная деятельность роботов в группе.....                             | 111        |
| 4.4. От интеллектуальных коботов к киборгам.....                               | 112        |
| 4.5. Источники.....  | 113        |
| <b>Глава 5. Умный город и умная жизнь.....</b>                                 | <b>114</b> |
| 5.1. Умный транспорт.....  | 114        |
| 5.2. Умное здание.....   | 116        |
| 5.3. Умное здравоохранение.....  | 118        |
| 5.4. Интеллектуальные сервисы на базе БПЛА.....                                | 119        |
| 5.5. Источники.....  | 121        |
| <b>Глава 6. Глобальное покрытие сети мобильного доступа.....</b>               | <b>122</b> |
| 6.1. Широкополосный беспроводной доступ для всех.....                          | 123        |
| 6.1.1. Мобильная широкополосная связь в любом месте.....                       | 123        |
| 6.1.2. Широкополосное соединение в движении.....                               | 124        |
| 6.1.3. Связь служб быстрого реагирования и помощь при стихийных бедствиях..... | 125        |
| 6.2. Широкий спектр услуг интернета вещей в труднодоступных местах.....        | 126        |
| 6.3. Высокоточное позиционирование и навигация.....                            | 127        |
| 6.4. Мониторинг земной поверхности в реальном времени.....                     | 128        |
| 6.5. Источники.....  | 129        |
| <b>Глава 7. Подключенное машинное обучение и сетевой ИИ.....</b>               | <b>130</b> |
| 7.1. Услуги и операции 6G, дополненные искусственным интеллектом.....          | 131        |
| 7.1.1. Качество услуг сети 6G, дополненной искусственным интеллектом.....      | 132        |
| 7.1.2. Управление сетью, дополненной ИИ.....                                   | 133        |
| 7.2. Сервисы искусственного интеллекта с поддержкой 6G.....                    | 134        |
| 7.2.1. Совместный анализ и управление в реальном времени.....                  | 134        |
| 7.2.2. 6G для крупномасштабного интеллекта.....                                | 136        |
| 7.3. Источники.....  | 137        |
| <b>Резюме части II.....</b>  | <b>138</b> |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Часть III. Теоретические основы .....</b>  | <b>139</b> |
| <b>Введение в часть III .....</b>   | <b>140</b> |
| <b>Глава 8. Теоретические основы искусственного интеллекта<br/>и машинного обучения .....</b> | <b>142</b> |
| 8.1. Фундаментальная теория искусственного интеллекта .....                                   | 142        |
| 8.1.1. Определения .....  | 142        |
| 8.1.2. Таксономия машинного обучения .....  | 145        |
| 8.1.3. Теоретико-информационный принцип DNN .....   | 148        |
| 8.1.4. Реализации DNN .....   | 150        |
| 8.2. Теория распределенного ИИ .....  | 151        |
| 8.3. Теория динамической байесовской сети.....  | 156        |
| 8.4. Источники .....  | 162        |
| <b>Глава 9. Теоретические основы беспроводных сетей большой емкости... ..</b>                 | <b>165</b> |
| 9.1. Теория электромагнитной информации.....  | 165        |
| 9.1.1. Физический канал распространения .....   | 167        |
| 9.1.2. Диаграммы направленности антенных решеток и эффект<br>взаимного влияния .....          | 168        |
| 9.1.3. Электромагнитные физические характеристики.....  | 169        |
| 9.2. Теория крупномасштабной коммуникации.....  | 171        |
| 9.3. Источники .....  | 177        |
| <b>Глава 10. Теоретические основы беспроводных сетей большой емкости....</b>                  | <b>183</b> |
| 10.1. Теория семантической коммуникации .....   | 183        |
| 10.2. Теория сверхвысокого разрешения .....   | 188        |
| 10.3. Источники.....  | 193        |
| <b>Глава 11. Теоретические основы энергоэффективных систем .....</b>                          | <b>194</b> |
| 11.1. Энергоэффективные коммуникации и теория вычислений .....                                | 194        |
| 11.2. Теория зеленого ИИ .....  | 197        |
| 11.3. Источники.....  | 200        |
| <b>Резюме части III.....</b>  | <b>202</b> |
| <b>Часть IV. Новые элементы .....</b>   | <b>205</b> |
| <b>Введение в часть IV .....</b>  | <b>206</b> |
| <b>Глава 12. Новый спектр.....</b>  | <b>207</b> |
| 12.1. Глобальное распределение спектра 5G до 2020 года .....                                  | 208        |
| 12.2. Требования к спектру 6G .....   | 210        |
| 12.3. Средние диапазоны – наиболее экономичный способ<br>широкого охвата.....                 | 212        |
| 12.4. Полосы миллиметрового диапазона в эпоху 6G.....   | 215        |
| 12.5. Новые возможности для сканирования и связи в ТГц-диапазоне .....                        | 218        |
| 12.6. Источники.....  | 221        |
| <b>Глава 13. Новые каналы.....</b>  | <b>223</b> |
| 13.1. Новые требования к моделированию канала 6G .....  | 224        |

|   |            |
|---|------------|
| 13.2. Канальные измерения в 6G .....                            | 228        |
| 13.2.1. Канальные измерения в новом спектре.....                | 228        |
| 13.2.2. Канальные измерения в новых сценариях .....             | 231        |
| 13.3. Источники.....  | 233        |
| <b>Глава 14. Новые материалы.....</b>                           | <b>235</b> |
| 14.1. Развитие кремниевой платформы .....                       | 235        |
| 14.2. Гетерогенная платформа на материалах типа III–V.....      | 237        |
| 14.3. Реконфигурируемый материал.....                           | 237        |
| 14.4. Фотонный кристалл .....                                   | 239        |
| 14.5. Фотоэлектрические материалы и фотодетектор .....          | 240        |
| 14.6. Плазмонный материал .....                                 | 240        |
| 14.7. Источники.....  | 242        |
| <b>Глава 15. Новые антенны.....</b>                             | <b>246</b> |
| 15.1. Антенна с фотопроводящей линзой .....                     | 247        |
| 15.2. Отражающие и передающие решетки.....                      | 248        |
| 15.3. Металповерхности .....                                    | 249        |
| 15.4. Нанопотодетекторы .....                                   | 251        |
| 15.5. Антенна на кристалле и антенна в корпусе .....            | 252        |
| 15.6. Орбитальный угловой момент .....                          | 253        |
| 15.7. Источники.....  | 254        |
| <b>Глава 16. Современные технологии ТГц-диапазона.....</b>      | <b>257</b> |
| 16.1. Компоненты ТГц-систем .....                               | 258        |
| 16.1.1. Электронный подход .....                                | 258        |
| 16.1.2. Гибридный и фотонный подходы.....                       | 264        |
| 16.2. Системы ТГц-диапазона .....                               | 266        |
| 16.2.1. Терагерцовые системы связи.....                         | 266        |
| 16.2.2. ТГц-визуализация и сенсорные системы.....               | 268        |
| 16.3. Проблемы.....   | 270        |
| 16.4. Источники.....  | 272        |
| <b>Глава 17. Вычислительная техника после закона Мура .....</b> | <b>280</b> |
| 17.1. Постмуровская эра .....                                   | 280        |
| 17.2. Нейроморфные вычисления.....                              | 282        |
| 17.3. Квантовые вычисления.....                                 | 284        |
| 17.4. Новые вычислительные архитектуры.....                     | 286        |
| 17.5. Источники.....  | 288        |
| <b>Глава 18. Новые устройства .....</b>                         | <b>290</b> |
| 18.1. Мобильные устройства будущего .....                       | 290        |
| 18.2. Интерфейс мозга и устройств будущего .....                | 297        |
| 18.3. Новые носимые устройства.....                             | 300        |
| 18.4. Источники.....  | 301        |
| <b>Резюме части IV.....</b>                                     | <b>304</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Часть V. Технологии-кандидаты для применения в радиointерфейсе 6G</b>         | <b>305</b> |
| <b>Введение в часть V</b> .....  | <b>306</b> |
| <b>Глава 19. Структура интеллектуального радиointерфейса</b> .....               | <b>312</b> |
| 19.1. Почему нужен новый радиointерфейс.....                                     | 312        |
| 19.2. Обзор существующих технологий.....   | 313        |
| 19.2.1. Использование спектра и энергоэффективность в NR.....                    | 314        |
| 19.2.2. ИИ и машинное обучение на физическом уровне.....                         | 315        |
| 19.2.3. Машинное обучение на уровне доступа к среде (MAC).....                   | 317        |
| 19.3. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований..... | 318        |
| 19.3.1. Персонализированный радиointерфейс с поддержкой ИИ.....                  | 319        |
| 19.3.2. Организация сквозного канала на основе ИИ и нерешенные проблемы.....     | 329        |
| 19.4. Источники.....   | 330        |
| <b>Глава 20. Интеграция наземной и неназемной связи</b> .....                    | <b>334</b> |
| 20.1. Почему нужна интеграция наземной и неназемной связи.....                   | 334        |
| 20.2. Обзор существующих решений.....  | 336        |
| 20.3. Ожидания от новой системы и потенциальные направления исследований.....    | 341        |
| 20.3.1. Интегрированная многоуровневая сеть.....                                 | 341        |
| 20.3.2. Улучшенная неназемная связь.....   | 345        |
| 20.4. Источники.....   | 350        |
| <b>Глава 21. Интеграция сканирования и связи</b> .....                           | <b>351</b> |
| 21.1. Почему нужна интеграция сканирования и связи.....                          | 351        |
| 21.2. Обзор существующих решений.....  | 353        |
| 21.3. Ожидания от новой сети и потенциальные направления исследований.....       | 357        |
| 21.3.1. Аспекты проектирования интегрированной системы сканирования/связи.....   | 358        |
| 21.3.2. Конструкция и алгоритмы оборудования радиочастотного сканирования.....   | 366        |
| 21.4. Источники.....   | 371        |
| <b>Глава 22. Новые формы сигналов и схемы модуляции</b> .....                    | <b>374</b> |
| 22.1. Почему нужны новые формы сигнала и схемы модуляции.....                    | 374        |
| 22.2. Обзор существующих решений.....  | 376        |
| 22.2.1. Сигналы с несколькими несущими.....                                      | 377        |
| 22.2.2. Формы сигналов с одной несущей.....                                      | 384        |
| 22.2.3. Схемы модуляции.....   | 386        |
| 22.2.4. Формы сканирующих сигналов.....  | 388        |
| 22.3. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований..... | 390        |
| 22.4. Источники.....   | 394        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Глава 23. Новое канальное кодирование .....</b>                                | <b>399</b> |
| 23.1. Почему нужно новое кодирование .....  | 399        |
| 23.2. Схемы канального кодирования .....  | 401        |
| 23.2.1. История вопроса .....   | 401        |
| 23.2.2. Целевые KPI канального кодирования 6G .....                               | 402        |
| 23.2.3. Принципы проектирования канального кодирования 6G.....                    | 404        |
| 23.3. Совместное кодирование источника и канала .....                             | 410        |
| 23.3.1. Предыстория исследований.....   | 410        |
| 23.3.2. JSCC на основе машинного обучения.....                                    | 412        |
| 23.3.3. Принципы проектирования JSCC для 6G .....                                 | 414        |
| 23.4. Сетевое кодирование на физическом уровне .....                              | 415        |
| 23.4.1. Основы.....   | 415        |
| 23.4.2. Принципы проектирования сетевого кодирования 6G .....                     | 418        |
| 23.5. Источники.....  | 420        |
| <b>Глава 24. Новый множественный доступ.....</b>                                  | <b>427</b> |
| 24.1. Почему нужен новый множественный доступ .....                               | 427        |
| 24.2. Обзор существующих решений .....  | 429        |
| 24.2.1. Ортогональный множественный доступ .....                                  | 429        |
| 24.2.2. Неортогональный множественный доступ.....                                 | 431        |
| 24.2.3. Безгрантовый множественный доступ .....                                   | 439        |
| 24.3. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований ..... | 443        |
| 24.3.1. Множественный доступ для услуг URLLC большой емкости .....                | 443        |
| 24.3.2. Множественный доступ для дешевых и маломощных устройств.....              | 444        |
| 24.3.3. Множественный доступ и сверхмассивное подключение .....                   | 445        |
| 24.3.4. Множественный доступ и надежное формирование луча.....                    | 446        |
| 24.3.5. Множественный доступ с поддержкой ИИ .....                                | 446        |
| 24.4. Источники.....  | 447        |
| <b>Глава 25. Ультрамассивный MIMO.....</b>  | <b>451</b> |
| 25.1. Почему нужен ультрамассивный MIMO .....                                     | 451        |
| 25.2. Обзор существующих решений .....  | 452        |
| 25.2.1. Технологии MIMO для FR1 .....   | 452        |
| 25.2.2. Технологии MIMO для FR2 .....   | 454        |
| 25.2.3. Совместный MIMO.....  | 455        |
| 25.3. Новые технологии MIMO .....   | 458        |
| 25.3.2. Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности .....                      | 461        |
| 25.3.3. Антенные решетки со сверхбольшой апертурой.....                           | 463        |
| 25.3.4. MIMO с искусственным интеллектом.....                                     | 464        |
| 25.3.5. Другие потенциальные технологии MIMO .....                                | 466        |
| 25.4. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований ..... | 471        |
| 25.4.1. MIMO со сканированием.....  | 472        |
| 25.4.2. Управляемый радиоканал и топология сети.....                              | 474        |
| 25.4.3. MIMO на FR2 и терагерцовые частоты .....                                  | 475        |
| 25.4.4. Антенные решетки со сверхбольшой апертурой.....                           | 477        |

|   |            |
|---|------------|
| 25.4.5. MIMO с поддержкой ИИ .....  | 478        |
| 25.5. Источники.....  | 481        |
| <b>Глава 26. Интеграция каналов доступа и прямых каналов связи .....</b>            | <b>489</b> |
| 26.1. Почему нужна интеграция каналов .....   | 489        |
| 26.2. Обзор существующих решений .....  | 492        |
| 26.3. Ожидания от новых разработок и потенциальные направления исследований .....   | 494        |
| 26.3.1. Ключевые технологии суперканалов.....                                       | 494        |
| 26.3.2. Интеграция суперканалов с каналами доступа как единая конструкция.....      | 495        |
| 26.4. Источники.....  | 497        |
| <b>Резюме части V .....</b>   | <b>499</b> |
| <b>Часть VI. Новые подходы к проектированию сетевой архитектуры 6G.....</b>         | <b>501</b> |
| <b>Введение в часть VI .....</b>  | <b>502</b> |
| <b>Глава 27. Технологии для сетевой архитектуры искусственного интеллекта .....</b> | <b>508</b> |
| 27.1. История вопроса.....  | 508        |
| 27.2. Соображения и принципы проектирования .....                                   | 510        |
| 27.2.1. Основные требования.....  | 510        |
| 27.2.2. Ключевое различие между 5G и 6G.....  | 511        |
| 27.3. Особенности архитектуры .....   | 512        |
| 27.3.1. Общий обзор.....  | 512        |
| 27.3.2. Связь, ориентированная на задачи .....                                      | 515        |
| 27.3.3. Глубококонвергентные вычисления и граничные коммуникации .....              | 518        |
| 27.3.4. Эксплуатация и управление службами искусственного интеллекта.....           | 521        |
| 27.4. Источники.....  | 523        |
| <b>Глава 28. Архитектура, ориентированная на пользователя .....</b>                 | <b>524</b> |
| 28.1. Обзор технологии UCN .....  | 524        |
| 28.2. Соображения и принципы проектирования UCN.....                                | 525        |
| 28.2.1. Уроки, извлеченные из существующих сетей.....                               | 525        |
| 28.2.2. Основные требования .....   | 528        |
| 28.3. Особенности архитектуры.....  | 533        |
| 28.3.1. Децентрализованная архитектура, ориентированная на пользователя.....        | 533        |
| 28.3.2. Слияние физического и кибернетического миров.....                           | 536        |
| 28.3.3. Управление цифровыми активами.....  | 539        |
| 28.4. Источники.....  | 540        |
| <b>Глава 29. Механизмы обеспечения благонадежности .....</b>                        | <b>541</b> |
| 29.1. Понятие благонадежности системы .....   | 541        |
| 29.1.1. От философии к обществу.....  | 541        |
| 29.1.2. От общества к промышленности.....   | 542        |
| 29.2. Благонадежность сложных систем связи .....                                    | 543        |

|   |            |
|---|------------|
| 29.3. Правила достижения благонадежности.....                         | 546        |
| 29.3.1. Основные принципы .....                                       | 546        |
| 29.3.2. Цели .....  | 547        |
| 29.4. Технологии благонадежности .....                                | 549        |
| 29.4.1. Модель многостороннего доверия .....                          | 550        |
| 29.4.2. Технология распределенного реестра .....                      | 552        |
| 29.4.3. Постквантовая криптография.....                               | 554        |
| 29.4.4. Автономная безопасность.....                                  | 555        |
| 29.5. Источники.....  | 556        |
| <b>Глава 30. Архитектура управления данными в сети 6G .....</b>       | <b>559</b> |
| 30.1. Почему необходимо управление данными .....                      | 559        |
| 30.2. Идеи и принципы проектирования системы управления данными... .. | 560        |
| 30.3. Особенности архитектуры управления данными .....                | 562        |
| 30.3.1. Независимый уровень данных .....                              | 562        |
| 30.3.2. Многопользовательские роли в управлении данными.....          | 564        |
| 30.3.3. Ресурс данных .....   | 564        |
| 30.3.4. Сбор данных .....   | 566        |
| 30.3.5. Аналитика данных .....  | 566        |
| 30.3.6. Десенсибилизация данных .....                                 | 568        |
| 30.4. Источники.....  | 569        |
| <b>Глава 31. Архитектура многосторонней экосистемы.....</b>           | <b>570</b> |
| 31.1. Почему нужна новая архитектура экосистемы.....                  | 570        |
| 31.2. Идеи и принципы проектирования.....                             | 572        |
| 31.3. Детали многосторонней архитектуры.....                          | 573        |
| 31.3.1. Технология распределенного реестра .....                      | 574        |
| 31.3.2. Платформа многостороннего пользования .....                   | 577        |
| 31.3.3. Управление идентификацией.....                                | 578        |
| 31.3.4. Управление данными .....                                      | 579        |
| 31.3.5. Сетевое управление .....                                      | 581        |
| 31.3.6. Поддержка операционной деятельности и бизнеса.....            | 584        |
| 31.4. Источники.....  | 585        |
| <b>Глава 32. Интегрированная архитектура неназемных сетей .....</b>   | <b>587</b> |
| 32.1. Предпосылки к интеграции сетей .....                            | 587        |
| 32.2. Идеи и принципы проектирования.....                             | 590        |
| 32.2.1. Спутниковая группировка .....                                 | 591        |
| 32.2.2. Низкая задержка в глобальном масштабе .....                   | 593        |
| 32.2.3. Обеспечение подключения .....                                 | 593        |
| 32.2.4. Мультисервисное обслуживание .....                            | 594        |
| 32.3. Особенности архитектуры.....                                    | 594        |
| 32.3.1. Задержка.....   | 594        |
| 32.3.2. Модели подключения .....                                      | 602        |
| 32.3.3. Маршрутизация в космосе .....                                 | 604        |
| 32.3.4. Эксплуатация, администрирование и обслуживание .....          | 606        |
| 32.4. Источники.....  | 607        |



---

|   |            |
|---|------------|
| <b>Резюме части VI.....</b>                                   | <b>608</b> |
| <b>Часть VII. Подведение итогов и планы на будущее .....</b>  | <b>609</b> |
| <b>Глава 33. Экосистема 6G и дорожная карта развития.....</b> | <b>610</b> |
| 33.1. Инициативы и экосистема 6G .....                        | 610        |
| 33.1.1. Инициативы ITU-R .....                                | 610        |
| 33.1.2. Региональные мероприятия .....                        | 611        |
| 33.1.3. Мнения промышленности и научных кругов.....           | 613        |
| 33.2. Дорожная карта до 2030 года и далее .....               | 616        |
| 33.3. Источники.....  | 618        |
| <b>Предметный указатель .....</b>                             | <b>621</b> |

# Вступление от издательства

## Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com), зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com); при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу [http://dmkpress.com/authors/publish\\_book/](http://dmkpress.com/authors/publish_book/) или напишите в издательство по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

## Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг – возможно, ошибку в основном тексте или программном коде, – мы будем очень благодарны, если вы сообщите нам о ней. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Если вы найдете какие-либо ошибки в коде, пожалуйста, сообщите о них главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com), и мы исправим это в следующих тиражах.

## Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательства «ДМК Пресс» и Cambridge University Press очень серьезно относятся к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

# Авторы

**Арашмид Ахаваин**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Сюэли Ан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Германия

**Хади Балих**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Алиреза Байесте**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Жан-Клод Бельфиоре**

Huawei Technologies Co., Ltd., Франция

**Сяоянь Би**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Ян Чен**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Веншуань Данг**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Меруан Дебба**

Huawei Technologies Co., Ltd., Франция

**Ицюнь Гэ**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Хуанхуань Гу**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Максим Гийо**

Huawei Technologies Co., Ltd., Франция

**Гаонинг Хэ**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Цзя Хэ**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Артур Хеккер**

Huawei Technologies Co., Ltd., Германия

**Хуан Хуанг**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Ронг Ли**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Сюй Ли**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Янчунь Ли**

Huawei Technologies Co., Ltd., Франция

**Чжунфэн Ли**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Хуэй Линь**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Инбэй Линь**

Huawei Technologies Co., Ltd., Германия

**Фэй Лю**

Huawei Technologies Co., Ltd., Сингапур

**Юн Лю**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Цзяньминь Лу**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Хэцзя Луо**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Цзяцзинь Ло**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Юнся Лу**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Цзянлей Ма**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Мэньяо Ма**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Амин Маарэф**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Майкл Майер**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Руи Ни**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Чэнхуэй Пэн**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Моррис Репета**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Сюэлян Ши**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Хуан Сунь**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Роб Сан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Дэнни Кай Пин Тан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Хао Тан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Вэй Тан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Вен Тонг**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Гуанцзянь Ван**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Цзянь Ван**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Цзюнь Ван**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Лэй Ван**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Дэвид Вессель**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Цзяньцзюнь Ву**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Сюнь Сяо**

Huawei Technologies Co., Ltd., Германия

**Сюцян Сюй**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Сюэцян Янь**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Ченчен Ян**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Сюнь Ян**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Ziming Yu**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Кун Цзэн**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Чунцин Чжан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Ханг Чжан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Хуази Чжан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Лицин Чжан**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

**Миньюй Чжао**

Huawei Technologies Co., Ltd., Китай

**Пэйин Чжу**

Huawei Technologies Co., Ltd., Канада

# 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».

# Словарь сокращений

|         |   |
|---------|---|
| 3GPP    | 3rd Generation Partnership Project / Партнерский проект третьего поколения                                |
| 5G      | 5th generation of mobile communication / 5-е поколение мобильной связи                                    |
| 5GAA    | 5G automotive association / Автомобильная ассоциация 5G   |
| 5G-ACIA | 5G alliance for connected industries and automation / Альянс 5G для подключенных отраслей и автоматизации |
| ACLR    | Adjacent channel leakage ratio / Коэффициент утечки по соседнему каналу                                   |
| ADC     | Analog-to-digital converter / Аналого-цифровой преобразователь  |
| AE      | Auto encoder / Автоматический кодировщик, автокодировщик  |
| AGV     | Automated guided vehicle / Автоматизированный управляемый автомобиль                                      |
| AI      | Artificial intelligence / Искусственный интеллект   |
| AIaaS   | AI as a service / ИИ как услуга   |
| AMC     | Adaptive modulation and coding / Адаптивная модуляция и кодирование                                       |
| AMI     | Antagonist myoneural interface / Мионевральный (нервно-мышечный) интерфейс антагониста                    |
| AMP     | Approximate message passing / Приближенная передача сообщения (алгоритм)                                  |
| ANC     | Analog network coding / Кодирование аналоговой сети   |
| ANN     | Artificial neural network / Искусственная нейронная сеть  |
| AoA     | Angle of arrival / Угол прихода волны (луча)  |
| AoD     | Angle of departure / Угол выхода волны (луча)   |
| AoSA    | Array of sub-arrays / Решетка из антенных подрешеток  |
| APSK    | Amplitude phase shift keying<br>Амплитудно-фазовая манипуляция  |
| AR      | Augmented reality / Дополненная реальность  |
| A-SIC   | Application-specific integrated circuits / Интегральные схемы для конкретных приложений                   |
| ATIS    | Alliance for telecommunications industry solutions / Альянс по решениям для телекоммуникационной отрасли  |
| AWGN    | Additive white Gaussian noise / Аддитивный белый гауссов шум  |
| B2B     | Business-to-business / Корпоративный сегмент, «бизнес для бизнеса»  |
| BCH     | Bose-Chaudhuri-Hocquenghem / Код Боуза–Чоудхури–Хоквингема (БЧХ)  |

---

|       |   |
|-------|---|
| BCI   | Brain-computer interface / Интерфейс «мозг–компьютер»                                       |
| BER   | Bit error rate / Коэффициент битовых ошибок   |
| BICM  | Bit-interleaved coded modulation / Кодированная модуляция с чередованием битов              |
| BLAST | Bell Laboratories layered space time / Многослойное пространство-время Bell Laboratories    |
| BLER  | Block error rate / Коэффициент блочных ошибок   |
| BN    | Bayesian network / Байесовская сеть   |
| BP    | Belief propagation / Распространение доверия  |
| BPSK  | Binary phase shift keying / Двоичная фазовая манипуляция                                    |
| BSS   | Business supporting system / Система обеспечения бизнеса                                    |
| CA    | Carrier aggregation / Агрегация несущих частот  |
| CAGR  | Compound annual growth rate / Совокупные темпы годового роста                               |
| CAPEX | Capital expenditure / Капитальные затраты   |
| CAPL  | Concurrent passive and active localization / Одновременная пассивная и активная локализация |
| CC    | Component carrier / Компонентная несущая  |
| CCSA  | China communications standards association / Китайская ассоциация стандартов связи          |
| CDMA  | Code division multiple access / Множественный доступ с кодовым разделением каналов          |
| CEM   | Computational electromagnetics / Моделирование задач электромагнетизма                      |
| CJT   | Coherent joint transmission / Когерентная совместная передача                               |
| CN    | Core network / Базовая сеть, опорная сеть   |
| CNN   | Convolutional neural network / Сверточная нейронная сеть                                    |
| CNT   | Carbon nanotube / Карбоновые нанотрубки   |
| CoMP  | Coordinated multipoint transmission / Скоординированная многоточечная передача              |
| CP    | Cyclic prefix / Циклический префикс   |
| CRS   | Cell reference signal / Опорный сигнал соты   |
| CS    | Compressed sensing / Сжатая выборка   |
| CSI   | Channel state information / Информация о состоянии канала                                   |
| CT    | Computed tomography / Компьютерная томография   |
| CU    | Control unit / Блок управления  |
| CWS   | Continuous wave spectroscopy / Спектроскопия с непрерывным источником                       |
| D2D   | Device-to-device / Межприборное взаимодействие, связь устройство–устройство                 |
| DAC   | Digital-to-analog converter / Цифроаналоговый преобразователь                               |
| DBN   | Dynamic Bayesian network / Динамическая байесовская сеть                                    |



|        |  |
|--------|--|
| DC     | Dual connectivity / Двойное подключение  |
| DFT    | Discrete Fourier transform / Дискретное преобразование Фурье   |
| DL     | Downlink / Нисходящий канал  |
| DLT    | Distributed ledger technology / Технология распределенного реестра (блокчейн)  |
| DMRS   | Demodulation reference signals / Опорные сигналы демодуляции   |
| DNN    | Deep neural network / Глубокая нейросеть   |
| DoF    | Degrees of freedom / Число степеней свободы  |
| DoU    | Data of usage / Данные об использовании  |
| DPC    | Dirty paper coding / «Кодирование на грязной бумаге» (предварительное кодирование Коста)   |
| DRL    | Deep reinforcement learning / Глубокое обучение с подкреплением  |
| DRX    | Discontinuous reception / Прерывистый прием  |
| DSS    | Dynamic spectrum sharing / Динамическое совместное использование спектра   |
| E2E    | End-to-end / Сквозной  |
| EEG    | Electroencephalography / Электроэнцефалография   |
| EIT    | Electromagnetic information theory / Теория электромагнитной информации  |
| ELAA   | Extremely large aperture array / Антенная решетка с экстремально большой апертурой   |
| eMBB   | Enhanced mobile broadband / Улучшенный мобильный широкополосный доступ   |
| EMG    | Electromyography / Электромиография  |
| ESPRIT | Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques / Оценка параметров сигнала с помощью методов вращательной инвариантности |
| EVM    | Error vector magnitude / Амплитуда вектора ошибки  |
| FBMC   | Filter bank multi-carrier / Банк фильтров в системах со множественными несущими  |
| FDD    | Frequency division duplex / Дуплексная связь с частотным разделением каналов   |
| FDMA   | Frequency division multiple access / Множественный доступ с частотным разделением  |
| FEC    | Forward error correction / Прямая коррекция ошибок   |
| FFT    | Fast Fourier transform / Быстрое преобразование Фурье  |
| FinFET | Fin field-effect transistor / Многозатворный полевой транзистор (fin-транзистор)   |
| FMCW   | Frequency modulated continuous wave / Нерывное излучение с частотной модуляцией  |
| f-OFDM | Filtered OFDM / OFDM с фильтрованием   |
| FOV    | Field of view / Поле зрения  |

---

|           |   |
|-----------|---|
| FPGA      | Field programmable gate arrays / Программируемая вентиляционная матрица   |
| FPS       | Frames per second / Количество кадров в секунду   |
| GaAs      | Gallium arsenide / Арсенид галлия   |
| GAN       | Generative adversarial network / Генеративная состязательная сеть   |
| GB        | Grant-based / На основе грантов (схема доступа)   |
| GBSM      | Geometry-based stochastic model / Стохастическая модель на основе геометрии   |
| GDP       | Gross domestic product / Валовый внутренний продукт, ВВП  |
| GDPR      | General Data Protection Regulation / Общие правила защиты данных  |
| GEM       | General expectation maximization / Общая максимизация ожидания  |
| GEO       | Geostationary Earth orbit / Геостационарная околоземная орбита  |
| GF        | Grant-free / Безгрантовый (доступ)  |
| GFDM      | Generalized frequency-division multiplexing / Обобщенное мультиплексирование с частотным разделением каналов  |
| GNSS      | Global navigation satellite system / Глобальная навигационная спутниковая система   |
| GPS       | Global positioning system / Спутниковая навигационная система   |
| GPU       | Graphics processing unit / Графический процессор  |
| GQD-PD    | Graphene photodetector sensitized with semiconducting quantum dots photodetectors / Графеновый фотоприемник, сенсibilизированный полупроводниковыми фотоприемниками на квантовых точках |
| GSMA      | Global System for Mobile Communications Association / Ассоциация глобальной системы мобильной связи   |
| HAP       | High-altitude platform / Высотная платформа   |
| HAPsS     | High-altitude platform stations / Станции на высотных платформах  |
| HARQ      | Hybrid automatic repeat request / Гибридный автоматический повторный запрос   |
| HBC       | Human bond communication / Поддержка естественных человеческих связей   |
| HBT       | Heterojunction bipolar transistors / Биполярные транзисторы с гетеропереходом   |
| HEMT      | High electron mobility transistors / Транзисторы с высокой подвижностью электронов  |
| HMI       | Human-machine interface / Человеко-машинный интерфейс   |
| HMM       | Hidden Markov model / Скрытая марковская модель   |
| Holo-MIMO | Holographic MIMO / Голографический MIMO   |

|         |   |
|---------|---|
| IaaS    | Infrastructure as a service / Инфраструктура как услуга   |
| IAB     | Integrated access and backhaul / Интегрированный доступ и обратная связь                        |
| IB      | Information bottleneck / Узкое место информационного потока                                     |
| ICI     | Inter-carrier interference / Помехи между несущими  |
| ICT     | Information and communications technology / Информационные и коммуникационные технологии        |
| IDFT    | Inverse discrete Fourier transform / Обратное дискретное преобразование Фурье                   |
| IDMA    | Interleave-division multiple access / Множественный доступ с чередованием и разделением каналов |
| IFFT    | Inverse fast Fourier transform / Обратное быстрое преобразование Фурье                          |
| IGMA    | Interleave-grid multiple access / Множественный доступ с чередованием сетки                     |
| IMT     | International mobile telecommunication / Международная мобильная связь                          |
| InH     | Indoor hotspot / Точка доступа в помещении  |
| InP     | Indium phosphide / Фосфид индия   |
| IoE     | Internet of everything / Интернет всего   |
| IRS     | Intelligent reflecting surface / Интеллектуальная отражающая поверхность                        |
| ISAC    | Integrated sensing and communication / Интегрированное сканирование и связь                     |
| JSCC    | Joint source and channel coding / Совместное кодирование источников и каналов                   |
| ISLR    | Integrated sidelobe ratio / Интегрированное отношение боковых лепестков                         |
| KPI     | Key performance indicator / Ключевой показатель эффективности                                   |
| LDPC    | Low-density parity-check code / Код низкой плотности с контролем четности                       |
| LED     | Light emitting diode / Светодиод  |
| LEO     | Low-earth-orbit / Низкая околоземная орбита   |
| LIDAR   | Light detection and ranging / Активный дальномер оптического диапазона, лидар                   |
| LIS     | Large intelligent surface / Большая интеллектуальная поверхность                                |
| LLR     | Log likelihood ratio / Логарифмическое отношение правдоподобия                                  |
| LNA     | Low-noise amplifier / Малошумящий усилитель   |
| Log-MAP | Logarithmic maximum a posteriori / Апостериорный логарифмический максимум                       |

---

|         |   |
|---------|---|
| LOS     | Line-of-sight / Прямая видимость  |
| LSTM    | Long short-term memory / Долгосрочная кратковременная память  |
| LTE     | Long-term evolution / Долгосрочная эволюция   |
| LTE-A   | LTE-advanced / LTE-расширенный  |
| LVDM    | Lagrange-Vandermonde division multiplexing / Мультиплексирование с разделением по Лагранжу–Вандермонду          |
| M2M     | Machine-to-machine / Межмашинное взаимодействие, межмашинные коммуникации                                       |
| MA      | Multiple access / Множественный доступ  |
| MAC     | Media access control / Управление доступом к среде  |
| MARL    | Multi-agent reinforcement learning / Многоагентное (распределенное) обучение с подкреплением                    |
| MCS     | Modulation and coding scheme / Схема модуляции и кодирования  |
| MDP     | Markov decision process / Марковский процесс принятия решений   |
| MEC     | Mobile edge computing / Мобильные граничные вычисления  |
| MEO     | Medium earth orbit / Средневысотная околоземная орбита  |
| MIMO    | Multiple input – multiple output / Многоканальный вход, многоканальный выход                                    |
| ML      | Machine learning / Машинное обучение  |
| MMSE    | Minimum mean square error / Минимальная среднеквадратическая ошибка   |
| mMTC    | Massive machine type of communication / Поточковая связь машинного типа   |
| mm Wave | Millimeter wave / Миллиметровые волны   |
| MNO     | Mobile network operator / Оператор мобильной сети   |
| MOSFET  | Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor / Полевой транзистор со структурой металл–оксид–полупроводник |
| MP      | Matching pursuit / Аппроксимация с преследованием   |
| MR      | Mixed reality / Смешанная реальность  |
| MRI     | Magnetic resonance imaging / Магнитно-резонансная визуализация (томография)                                     |
| MTP     | Motion-to-photon / «Инициация фотона движением» (инженерный жаргон)   |
| MUD     | Multi-user detection / Многопользовательское детектирование   |
| MUSA    | Multi-user shared access / Многопользовательский совместный доступ  |
| MUSIC   | Multiple signal classification / Классификация групповых сигналов   |
| MUST    | Multi-user superposition transmission / Многопользовательская передача с наложением                             |

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)