

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. С. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 624 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 радарного сканирования и связи, а также сетей наземного и аэрокосмического базирования. 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

Copyright © Cambridge University Press, 2021. This translation of title is published by arrangement with Cambridge University Press.

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

Вступление от издательства.....	14
Авторы	15
Предисловие	17
Словарь сокращений	19
Часть I. Вступление	29
Глава 1. Мобильная связь до 2030 года и далее.....	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
Часть II. Сценарии использования и целевые KPI.....	69
Введение в часть II	70
Глава 2. Максимально достоверный эффект погружения	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
Глава 3. Сканирование, локализация и визуализация.....	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
Глава 4. Полнофункциональная индустрия 4.0 и выше	106
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
Глава 5. Умный город и умная жизнь.....	114
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
Глава 6. Глобальное покрытие сети мобильного доступа	122
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
Глава 7. Подключенное машинное обучение и сетевой ИИ	130
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
Резюме части II.....	138

Часть III. Теоретические основы	139
Введение в часть III	140
Глава 8. Теоретические основы искусственного интеллекта и машинного обучения	142
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
Глава 9. Теоретические основы беспроводных сетей большой емкости ...	165
9.1. Теория электромагнитной информации.....	165
9.1.1. Физический канал распространения	167
9.1.2. Диаграммы направленности антенных решеток и эффект взаимного влияния	168
9.1.3. Электромагнитные физические характеристики.....	169
9.2. Теория крупномасштабной коммуникации.....	171
9.3. Источники	177
Глава 10. Теоретические основы беспроводных сетей большой емкости	183
10.1. Теория семантической коммуникации	183
10.2. Теория сверхвысокого разрешения	188
10.3. Источники.....	193
Глава 11. Теоретические основы энергоэффективных систем	194
11.1. Энергоэффективные коммуникации и теория вычислений	194
11.2. Теория зеленого ИИ	197
11.3. Источники.....	200
Резюме части III.....	202
Часть IV. Новые элементы	205
Введение в часть IV	206
Глава 12. Новый спектр.....	207
12.1. Глобальное распределение спектра 5G до 2020 года	208
12.2. Требования к спектру 6G	210
12.3. Средние диапазоны – наиболее экономичный способ 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
Глава 13. Новые каналы.....	223
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
Глава 14. Новые материалы.....	235
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
Глава 15. Новые антенны.....	246
15.1. Антенна с фотопроводящей линзой	247
15.2. Отражающие и передающие решетки.....	248
15.3. Метаповерхности	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
Глава 16. Современные технологии ТГц-диапазона.....	257
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
Глава 17. Вычислительная техника после закона Мура	280
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
Глава 18. Новые устройства	290
18.1. Мобильные устройства будущего	290
18.2. Интерфейс мозга и устройств будущего	297
18.3. Новые носимые устройства.....	300
18.4. Источники.....	301
Резюме части IV.....	304

Часть V. Технологии-кандидаты для применения в радиointерфейсе 6G	305
Введение в часть V	306
Глава 19. Структура интеллектуального радиointерфейса	312
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
Глава 20. Интеграция наземной и неназемной связи	334
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
Глава 21. Интеграция сканирования и связи	351
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
Глава 22. Новые формы сигналов и схемы модуляции	374
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

Глава 23. Новое канальное кодирование	399
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
Глава 24. Новый множественный доступ.....	427
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
Глава 25. Ультрамассивный MIMO.....	451
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
Глава 26. Интеграция каналов доступа и прямых каналов связи	489
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
Резюме части V	499
Часть VI. Новые подходы к проектированию сетевой архитектуры 6G.....	501
Введение в часть VI	502
Глава 27. Технологии для сетевой архитектуры искусственного интеллекта	508
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
Глава 28. Архитектура, ориентированная на пользователя	524
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
Глава 29. Механизмы обеспечения благонадежности	541
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
Глава 30. Архитектура управления данными в сети 6G	559
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
Глава 31. Архитектура многосторонней экосистемы.....	570
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
Глава 32. Интегрированная архитектура неназемных сетей	587
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

Резюме части VI.....	608
Часть VII. Подведение итогов и планы на будущее	609
Глава 33. Экосистема 6G и дорожная карта развития.....	610
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
Предметный указатель	621