

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
Введение	12
Глава 1. Архитектура, услуги и основные понятия сетей связи 5G/6G	19
1.1. Сотовые сети 5G	19
1.1.1. Общая характеристика сетей 5G	19
1.1.2. Требования к характеристикам обслуживания	20
1.1.3. Процесс стандартизации сетей радиодоступа	21
1.1.4. Базовые услуги сетей 5G.....	24
1.1.5. Спектр частот для сетей радиодоступа.....	25
1.2. Технология радиодоступа 5G NR.....	26
1.2.1. Организация беспроводного интерфейса NR.....	27
1.2.2. Дуплексная передача.....	29
1.2.3. Канальное кодирование.....	30
1.2.4. Планирование передач и каналы управления.....	30
1.2.5. Формирование луча.....	31
1.2.6. Доступ к сети.....	32
1.3. Сети доступа 5G NR в миллиметровом диапазоне частот.....	33
1.3.1. Потери распространения.....	33
1.3.2. Влияние погодных условий.....	34
1.3.3. Динамическая блокировка.....	35
1.4. Программируемость и виртуализация сетевых функций.....	36
1.4.1. Программируемая архитектура 3GPP 5G.....	38
1.4.2. Модульность и принципы использования.....	40
1.5. Сетевой слайсинг.....	42
1.6. Интернет вещей.....	45
1.7. Технологии прямого взаимодействия устройств.....	46
1.8. Гетерогенные сети доступа.....	47
1.9. Терагерцовый интерфейс сетей 6G.....	49
1.9.1. Приложения и сценарии использования.....	51

1.9.2. Физический уровень IEEE 802.15 3D.....	54
1.9.3. Канальный уровень IEEE 802.15 3D.....	57

ЧАСТЬ I. МОДЕЛИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА РАДИОКАНАЛА СЕТЕЙ 5G/6G

ГЛАВА 2. МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ СЕТЕЙ 5G/6G.....	60
2.1. Модели распространения.....	60
2.1.1. Моделирование лучей.....	61
2.1.2. Эмпирические модели распространения.....	62
2.1.3. Кластерная модель распространения.....	63
2.2. Модели фазированных антенных решеток.....	64
2.2.1. Трехмерная модель.....	64
2.2.2. Упрощенная двухмерная модель.....	66
2.2.3. Связь с параметрами антенных решеток.....	67
2.2.4. Применение моделей антенн.....	69
2.3. Модели блокировки.....	70
2.3.1. Статический случай.....	71
2.3.2. Подвижность пользователя.....	72
2.3.3. Движущиеся блокаторы.....	75
2.4. Модели параметров канала связи.....	77
2.4.1. Блокировки в моделях распространения.....	78
2.4.2. Область покрытия точкой доступа.....	79
2.4.3. Распределение требований к ресурсам.....	80
2.4.4. Интенсивность прерываний.....	82
2.4.5. Упрощенная модель прерываний.....	84
ГЛАВА 3. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК СЕТЕЙ РАДИОДОСТУПА 5G/6G.....	85
3.1. Показатели эффективности сетей радиодоступа.....	85
3.2. Стохастическая геометрия и ее применение к анализу сетей радиодоступа 5G/6G.....	86
3.2.1. Базовая модель взаимодействия устройств.....	87
3.2.2. Применение теоремы Кэмпбелла.....	93
3.2.3. Оценка распределения скорости передачи.....	95

3.3. Ресурсные системы массового обслуживания и их применение к анализу сетей 5G/6G.....	96
3.3.1. Построение моделей ресурсных систем массового обслуживания.....	96
3.3.2. Базовая ресурсная система массового обслуживания.....	98
3.4. Пример построения модели стохастической геометрии прямого взаимодействия устройств.....	101
ГЛАВА 4. ПОМЕХА И ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ–ШУМ В СЕТЯХ 5G/6G С НАПРАВЛЕННЫМИ АНТЕННАМИ И БЛОКИРОВКОЙ	106
4.1. Помехи в сетях с направленными антенными решетками	106
4.1.1. Двухмерный сценарий развертывания.....	106
4.1.2. Трехмерный сценарий развертывания.....	112
4.1.3. Численные примеры.....	118
4.2. Отношение сигнал–шум в сетях с направленными антенными решетками	121
4.2.1. Двухмерный сценарий развертывания.....	122
4.2.2. Трехмерный сценарий развертывания.....	125
4.2.3. Численные примеры.....	127
 ЧАСТЬ II. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ АБОНЕНТОВ В СЕТЯХ 5G/6G 	
ГЛАВА 5. МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ АБОНЕНТОВ СЕТЕЙ 5G/6G – МУЛЬТИСВЯЗНОСТЬ И РЕЗЕРВИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ.....	132
5.1. Базовая ресурсная модель.....	133
5.1.1. Агрегирование потоков.....	134
5.1.2. Рекуррентный алгоритм.....	136
5.2. Ресурсная модель с сигналами.....	136
5.2.1. Стационарное распределение.....	137
5.2.2. Показатели эффективности	140
5.3. Резервирование ресурсов.....	141
5.3.1. Построение модели.....	141
5.3.2. Система уравнений равновесия.....	142

5.4. Мультисвязность и резервирование ресурсов.....	143
5.4.1. Построение модели мультисвязности.....	144
5.4.2. Модель отдельного узла сети.....	146
5.4.3. Итерационный алгоритм.....	151
5.5. Численный анализ.....	153
5.5.1. Модель резервирования ресурсов.....	153
5.5.2. Модель мультисвязности.....	157
5.5.3. Совместное применение резервирования и мультисвязности.....	159
 ГЛАВА 6. МНОГОАДРЕСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ	
В СЕТЯХ ДОСТУПА 5G/6G.....	162
6.1. Проблемы применения многоадресных соединений в сетях 5G/6G.....	162
6.2. Системная модель.....	165
6.3. Мультисервисная модель с одноадресными и многоадресными соединениями.....	168
6.4. Численный анализ.....	171
6.4.1. Оценка точности модели.....	173
6.4.2. Эффекты обслуживания многоадресных и одноадресных сессий.....	174
6.4.3. Оптимальное расстояние между базовыми станциями.....	178
6.4.4. Использование одноадресных сессий для многоадресной передачи.....	183
 ГЛАВА 7. УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕГРУЗКАМИ В СЕТЯХ 5G/6G	
СРЕДСТВАМИ БПЛА.....	187
7.1. Причины возникновения перегрузок.....	187
7.2. Стандартизация применения БПЛА.....	189
7.2.1. Интеграция БПЛА в беспроводную сеть.....	189
7.2.2. Архитектурное решение IAB.....	190
7.2.3. Ретрансляция для поддержки IAB.....	192
7.3. Оценка производительности сетей 5G/6G на основе БПЛА.....	192
7.3.1. Системная модель.....	193
7.3.2. Численный анализ.....	194

7.4. Совместная оптимизация участков доступа и транзита.....	198
7.4.1. Системная модель.....	198
7.4.2. Метод совместной оптимизации доступа и транзита.....	201
7.4.3. Численный анализ	201
7.5. Обслуживание на абонентском участке.....	206
7.5.1. Системная модель.....	206
7.5.2. Анализ модели.....	208
7.5.3. Численный анализ.....	214
7.6. Использование многошаговой ретрансляции.....	218
7.6.1. Концепция БПЛА-мостов.....	218
7.6.2. Системная модель.....	219
7.6.3. Анализ модели.....	223
7.6.4. Численный анализ.....	230

ЧАСТЬ III. УСЛУГИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЕТЕЙ 5G/6G

ГЛАВА 8. УСЛУГИ СВЕРХНАДЕЖНОЙ ДОСТАВКИ С УЛЬТРАМАЛОЙ ЗАДЕРЖКОЙ.....	238
8.1. Концепция Индустрии 4.0.....	238
8.1.1. Сценарии использования беспроводной связи на производстве.....	240
8.1.2. Сети 5G/6G для индустрии будущего.....	242
8.2. Поддержка услуг URLLC.....	243
8.2.1. Системная модель.....	244
8.2.2. Анализ системы.....	246
8.2.3. Численный анализ.....	249
8.3. Системы с кэшированием.....	254
8.3.1. Прогнозируемый выбор режима с учетом мобильности	257
ГЛАВА 9. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В СЕТЯХ NB-IoT....	262
9.1. Технологии сотовой связи для IoT.....	262
9.2. Методы анализа NB-IoT.....	264
9.2.1. Модель соты LTE.....	266
9.2.2. Стратегии разделения ресурсов	266

9.3. Модель разделения ресурсов.....	268
9.3.1. Характеристики обслуживания.....	270
9.3.2. Численный анализ.....	271
9.3.3. Оценка производительности NB-IoT.....	274
9.4. Использование ретрансляции в NB-IoT.....	276
9.4.1. Системная модель.....	276
9.5. Аналитическая модель.....	280
9.5.1. Базовая модель.....	280
9.5.2. Расширенная система с ретрансляцией.....	287
9.6. Численный анализ.....	290
9.6.1. Базовый сценарий.....	291
9.6.2. Расширенная система с ретрансляцией.....	294
ГЛАВА 10. РАЗДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ D2D.....	299
10.1. Возможности D2D в сотовых сетях.....	299
10.2. Архитектурные аспекты построения D2D.....	302
10.3. Оценка возможностей архитектуры D2D.....	310
10.3.1. Методология оценки.....	310
10.3.2. Имитационное моделирование D2D.....	311
10.3.3. Сценарий применения гетерогенных сетей.....	315
10.4. Результаты имитационного моделирования.....	317
10.5. Аспекты практической реализации.....	322
10.5.1. Программная платформа.....	322
10.5.2. Результаты экспериментов.....	329
10.5.3. Перспективы внедрения.....	334
10.6. Дальнейшее развитие D2D.....	335
10.7. Mesh-сети с использованием технологии блокчейн..	336
10.7.1. Использование блокчейн в Mesh-сетях.....	337
10.7.2. Пример сценария стимулирования пользователей.....	339
10.7.3. Открытые исследовательские задачи.....	347
ГЛАВА 11. ЗАДАЧА СПРАВЕДЛИВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ РАДИОДОСТУПА.....	349
11.1. Архитектура гетерогенной сети доступа.....	349
11.2. Выбор критерия разделения ресурсов.....	353

11.3. Критерий для гетерогенной сети радиодоступа.....	357
11.4. Численный анализ.....	364
11.5. Гетерогенная облачная сеть радиодоступа H-CRAN..	372
11.6. Разделение ресурсов в H-CRAN.....	376
11.7. Численный анализ решения H-CRAN.....	379
11.8. Аспекты практической реализации	382

ЧАСТЬ IV. ТЕРАГЕРЦОВЫЕ СЕТИ ДОСТУПА СИСТЕМ СВЯЗИ 6G

Глава 12. Характеристики каналов связи	385
12.1. Особенности канала связи в терагерцовом диапазоне.....	386
12.2. Окна прозрачности и характеристики канала связи.....	390
12.3. Особенности устройств связи в терагерцовом диапазоне частот.....	400
Глава 13. Проблемы и решения для сетей связи 6G в терагерцовом диапазоне частот	405
13.1. Эффект микромобильности.....	405
13.2. Методы защиты от прослушивания на физическом уровне	421
13.3. Доступ на последнем метре.....	436
Глава 14. Приложения терагерцовых систем связи.....	447
14.1. Обзор приложений терагерцовых систем.....	447
14.2. Связь между компонентами вычислительных систем.....	453
14.3. Связь внутри вычислительных элементов.....	465
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	496
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	497
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	510