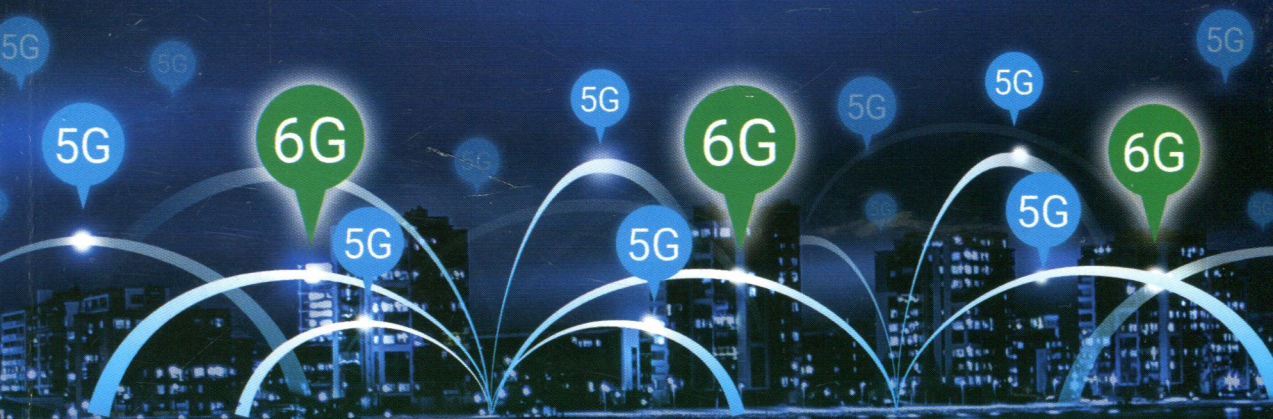


Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев,
К.Е. Самуйлов, Е.А. Кучерявый

СЕТИ 5G/6G:

АРХИТЕКТУРА, ТЕХНОЛОГИИ,
МЕТОДЫ АНАЛИЗА
И РАСЧЕТА



Москва
Российский университет дружбы народов
2022

**Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев,
К.Е. Самуйлов, Е.А. Кучерявый**

**СЕТИ 5G/6G:
АРХИТЕКТУРА, ТЕХНОЛОГИИ,
МЕТОДЫ АНАЛИЗА И РАСЧЕТА**

**Москва
Российский университет дружбы народов
2022**

УДК 004(035.3)
ББК 16.2
С33



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 21-17-00012, не подлежит продаже

Рецензенты:

заведующий кафедрой сетей связи и систем коммутации МТУСИ
доктор технических наук, профессор *С.Н. Степанов*;

профессор кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН
доктор физико-математических наук, профессор *Ю.В. Гайдамака*

Авторы:

Д.А. Молчанов, В.О. Бегишев, К.Е. Самуйлов, Е.А. Кучерявый

С33 Сети 5G/6G: архитектура, технологии, методы анализа и расчета : монография / Д. А. Молчанов, В. О. Бегишев, К. Е. Самуйлов, Е. А. Кучерявый. – Москва : РУДН, 2022. – 516 с. : ил.

Монография представляет собой, с одной стороны, доступное руководство по основным технологиям сетей 5G/6G, а с другой – последовательное изложение методов анализа и расчета показателей эффективности их характеристик в рамках конкретных сценариев и системных моделей. Показаны основные приемы и принципы применения теории стохастического моделирования беспроводных сетей. Рассмотрены общие вопросы архитектуры, основных услуг и понятия сетей 5G/6G, а также исследованы модели, характеристики, методы анализа радиоканалов и эффективности обслуживания абонентов сетей 5G/6G.

Издание предназначено для научных работников, специалистов в области анализа показателей эффективности функционирования систем и сетей телекоммуникаций, преподавателей профильных кафедр, аспирантов и студентов старших курсов естественно-научных и инженерно-технических специальностей.

This book serves two purposes. At one hand, it provides an easy-to-follow guide on the critical technologies comprising 5G/6G cellular systems, while, on the other hand, it presents detailed methods for performance evaluation and optimization of user- and system-centric metrics of interest for an extensive set of 5G/6G services, deployment scenarios, and use-cases. Specifically, we consider architectural aspects of 5G/6G systems, their future applications and services, and then proceed illustrating models, characteristics, methods for analyzing the efficiency of radio channels and service performance in these systems.

This book can be utilized by undergraduate and graduate students as well as professionals in the field of performance evaluation and optimization of wireless networking technologies.

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 блокираторы.....	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