



国家重点图书出版规划项目

全面的5G技术概述  
力主创造“万物互联”的新世界

CAMBRIDGE

5G丛书

# 5G系统关键技术详解

【加】文森特·黄 (Vincent W. S. Wong) 【加】罗伯特·施韦尔 (Robert Schober) 【澳】德里克·吴 (Derrick Wing Kwan Ng) 王蕊君 (Li-Chun Wang) 主编  
张鸿涛 译

Key Technologies  
for 5G Wireless Systems



中国工信出版集团



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



“十三五”

国家重点图书出版规划项目

全面的5G技术概述  
力主创造“万物互联”的新世界

CAMBRIDGE

5G丛书

# 5G系统关键技术详解

【加】文森特·黄 (Vincent W. S. Wong) 【加】罗伯特·施韦尔 (Robert Schober) 【澳】德里克·吴 (Derrick Wing Kwan Ng) 王蕊君 (Li-Chun Wang) 主编  
张鸿涛 译

Key Technologies  
for 5G Wireless Systems

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

5G系统关键技术详解 / (加) 文森特·黄  
(Vincent W. S. Wong) 等主编 ; 张鸿涛译. -- 北京 :  
人民邮电出版社, 2018. 9  
(5G丛书)  
ISBN 978-7-115-49277-7

I. ①5… II. ①文… ②张… III. ①无线电通信—移  
动通信—通信技术 IV. ①TN929. 5

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第203689号

## 版 权 声 明

This is a translation of the following title published by Cambridge University Press:  
Key Technologies for 5G Wireless Systems, Edited by Vincent W. S. Wong, Robert Schober, Derrick Wing Kwan  
Ng, Li-Chun Wang, first published by Cambridge University Press 2016.  
ISBN: 978-1-107-17241-8

This simplified Chinese translation for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is  
published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and Posts & Telecom Press.

This translation is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan)  
only. Unauthorised export of this translation is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be  
reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written  
permission of Cambridge University Press and Posts & Telecom Press.

本书中文简体字版由剑桥大学出版社授权人民邮电出版社出版, 专有版权属于人民邮电出版社, 未经授权严禁  
出版。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾省)销售。

---

◆ 主 编 [加]文森特·黄 (Vincent W. S. Wong)  
[加] 罗伯特·施韦尔 (Robert Schober)  
[澳]德里克·吴 (Derrick Wing Kwan Ng) 王蒞君 (Li-Chun Wang)

译 张鸿涛

责任编辑 李 强

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京市艺辉印刷有限公司印刷

◆ 开本: 800×1000 1/16

印张: 35.25

2018年9月第1版

字数: 639千字

2018年9月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 第 01-2018-3265 号

定价: 188.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

# 内容提要

本书深入介绍了 5G 无线网络的协议、网络架构和技术，包括无线接入网络、移动边缘计算、全双工、大规模 MIMO、毫米波、NOMA、物联网、M2M 通信、D2D 通信、移动数据分流、干扰抑制技术、无线资源管理、可见光通信和智能数据定价等关键主题。

本书适合从事无线通信和网络研究的技术人员、工程师和研究生参考阅读。

## 译者序

国际电信联盟 (ITU) 2015 年 6 月在加州圣迭戈举行了工作会议, 公布了 5G 技术标准化的时间表, 2017 年 12 月确定了 5G 非独立组网标准, 2018 年 6 月确定了 5G 独立组网标准, 完成了 5G 第一阶段标准化相关工作。

国际电信联盟无线电通信局 (ITU-R) 定义了 5G 的 3 类典型业务场景: 增强型移动宽带 (eMBB, enhanced Mobile Broadband)、大规模机器类通信 (mMTC, massive Machine Type Communication)、超可靠低时延通信 (uRLLC, ultra-Reliable Low-Latency Communications)。目前, eMBB 相对明确, 且 3GPP R15 标准在 2018 年 6 月已冻结, mMTC 和 uRLLC 对网络能力要求较高, 应用需求和商业模式仍存在不确定性, 主要特性将在 3GPP R16 版本进行标准化。

第五代移动通信 (5G) 技术致力于应对未来爆炸性的移动数据流量增长、海量设备连接、不断涌现的各类新业务和应用场景, 同时与行业深度融合, 满足垂直行业终端互联的多样化需求, 力主创建“万物互联”的新世界。

(1) 虚拟现实、增强现实、超高清视频等大流量移动宽带业务对应着 eMBB 场景, 5G 在这方面带来的改进是在保证广覆盖和移动性的前提下为用户提供更快的数据速率, 峰值速率可以从 4G 的 1Gbit/s 提高到 10Gbit/s;

(2) 智能家居、智慧城市等这一类的大规模物联网应用是 mMTC 的主要场景, 在该场景下, 成本敏感、传输速率较低、时延容忍度高和待机时间超长的海量设备类通信将

非常便利；

(3) uRLLC 对应的场景包括工业自动化、无人驾驶等，用户层面的时延须控制在 1ms 之内才能满足这些特殊场景作业的需求。

为了满足以上 3 种场景需求，5G 无线系统需要对网络架构和协议栈的所有层面进行改革。

本书是专门介绍 5G 最新进展和关键技术的著作，并给出了应对 5G 无线系统设计带来的挑战的解决方案。书中深入地探讨了 5G 系统的各个方面，第 1 章对 5G 系统的各种技术进行总体概述，后续分为 3 个部分展开。第 1 部分（第 2~5 章）介绍 5G 系统通信网络架构；第 2 部分（第 6~14 章）介绍物理层通信技术；第 3 部分（第 15~22 章）介绍网络协议、算法及设计。

每章介绍一个具体的挑战与技术，章节之间可以独立阅读，按照 5G 关键技术与对应章节的划分如下：5G 云无线接入网络（第 2、3 章），5G 移动边缘计算（第 4、12 章），5G 资源管理（第 5、11 章），NOMA（第 6 章），灵活的物理层设计（第 7 章），5G Massive MIMO（第 8、15 章），5G 全双工通信（第 9 章），5G 毫米波通信（第 10、21 章），能量收集通信（第 13、19 章），5G 可见光通信（第 14 章），5G 数据分流及非授权频段（第 16、20 章），5G IoT、M2M、D2D（第 17~19 章），5G 智能数据定价（第 22 章）。本书的主要功能是引导读者理解 5G 无线通信系统的各部分组成以及关键技术的实现，通过详细探索每个主题，使读者获得对认知计算更加深入的认识。

本书译者长期从事未来无线移动通信系统及网络的研究工作，具有丰富的理论基础和实践经验。本书主要由北京邮电大学张鸿涛翻译，高晖、黄婉晴、戴凌成、郜崇、陈雨晴、陈子仪等参与了部分章节的翻译，全书由张鸿涛统稿和审校。最后，还要感谢人民邮电出版社的大力支持和高效工作，使本书能尽早与读者见面。

张鸿涛

于北京邮电大学

# 前 言

移动设备（例如智能手机和平板电脑）已经成为我们生活中司空见惯的日用品。虽然这些设备已经支持了多种不同的应用程序和服务，但是由于 Web 应用、实时和流媒体视频流量，以及与物联网（IoT, Internet of Things）相关的应用程序的存在，对移动数据流量的需求将会不断地增加。未来的第五代（5G, the Fifth Generation）无线蜂窝系统的目的不仅在于提供更高的总吞吐量，而且还支持具有高服务质量（QoS, Quality of Service）需求的应用程序，例如无缝移动性、超低延迟（如触觉互联网）和高可靠性（如车载通信）。进一步提高频谱效率、能源效率和单位比特代价也是 5G 网络中很重要的目标。为了满足这些要求，相比于第四代（4G, the Fourth Generation）无线系统，5G 需要在网络架构和协议栈的所有层面进行根本性改变。

本书旨在对正在进行的研究和最先进的技术进行全面的总结，以解决 5G 无线系统设计带来的挑战。本书由与该主题相关的专家撰写，共分为 22 章，涵盖了 5G 系统的各个方面，包括网络体系结构设计、物理层技术、算法和网络协议设计。第 1 章作为介绍性内容，概述了与 5G 系统相关的各种关键技术，其他各章都讨论了系统设计的具体挑战。各章可以独立阅读。

本书面向的主要读者是对研究先进通信和网络技术，以及对 5G 系统的最新研究成果感兴趣的研究人员和工程师。本书可以作为自学的资源，也可以作为参与无线通信系统设计的研究人员和工程师的参考书，同样也适用于对 5G 系统以及相关的通信和网络问题

感兴趣的研究生。本书可以作为电气工程、通信工程和网络专业的学生的研究生水平课程参考书。

我们要感谢所有作者的杰出贡献和及时完成各自的章节。此外，我们要感谢剑桥大学出版社的 Elizabeth Horne 和 Heather Brolly 在本书的编写过程中给予的宝贵意见。最后但同样重要的是，我们要感谢加拿大自然科学和工程研究委员会（NSERC, Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada）给予的财政支持。

Vincent W.S. Wong

Robert Schober

Derrick Wing Kwan Ng

Li-Chun Wang



# 目 录

第 1 章 5G 系统新技术的概况	1
1.1 引言	2
1.2 云无线接入网络	4
1.3 云计算和雾计算	5
1.4 非正交多址接入	5
1.5 灵活的物理层设计	7
1.6 大规模 MIMO	8
1.7 全双工通信	10
1.8 毫米波	12
1.9 移动数据分流、非授权频段 LTE 和智能数据定价	13
1.10 IoT、M2M 和 D2D	15
1.11 无线资源管理、干扰缓解和缓存	16
1.12 能量收集通信	17
1.13 可视化光通信	19

## 第1部分 5G 系统通信网络结构

第2章 5G 系统的云无线接入网络	23
2.1 重新思考 5G 的基础知识	24
2.2 用户为中心的网络	26
2.3 C-RAN 基础知识	26
2.4 下一代前传接口用于 5G C-RAN 的 FH 解决方案	28
2.5 虚拟化 C-RAN 的概念证明验证	32
2.5.1 数据分组	34
2.5.2 测试过程	34
2.5.3 测试结果	35
2.6 重新思考 C-RAN 的协议栈	36
2.6.1 动机	37
2.6.2 多级集中式和分布式协议栈	37
2.7 总结	41
第3章 云无线接入网络的前向回传感知设计	43
3.1 引言	44
3.2 前传感知的协作传输和接收	46
3.2.1 上行链路	47
3.2.2 下行链路	52
3.3 前传感知的数据链路层和物理层	57
3.3.1 上行链路	59
3.3.2 下行链路	64
3.4 总结	68
第4章 移动边缘计算	69
4.1 引言	70
4.2 移动边缘计算	71
4.3 参考体系结构	73
4.4 优势与应用场景	74

4.4.1	面向用户的用例	74
4.4.2	面向运营商的用例	75
4.5	研究挑战	76
4.5.1	计算分流	76
4.5.2	对计算资源的通信访问	77
4.5.3	多资源调度	78
4.5.4	移动性管理	78
4.5.5	资源分配和定价	79
4.5.6	网络功能虚拟化	79
4.5.7	安全与隐私	80
4.5.8	与新兴技术的集成	81
4.6	总结	82
<b>第 5 章</b>	<b>无线密集异构网络的分布式无线资源管理</b>	<b>83</b>
5.1	引言	84
5.2	系统模型	85
5.2.1	SINR 表达式	87
5.2.2	负载和成本函数表达式	87
5.3	联合 BSCSA/UECSA 开关切换策略	88
5.3.1	策略选择和信标传输	88
5.3.2	用户关联	89
5.3.3	信道分离算法	90
5.3.4	更新混合策略	92
5.4	计算机仿真	93
5.5	总结	96

## 第 2 部分 物理层通信技术

<b>第 6 章</b>	<b>适用于 5G 系统下的非正交多址 (NOMA)</b>	<b>99</b>
6.1	引言	101
6.2	单输入单输出 (SISO) 系统中的 NOMA	103

6.2.1	NOMA 的基础知识	104
6.2.2	用户配对对 NOMA 的影响	105
6.2.3	认知无线电对 NOMA 的启发	108
6.3	在 MIMO 系统中运用的 NOMA	112
6.3.1	MIMO-NOMA 方案中的系统模型	113
6.3.2	有限 CSIT 预编码矩阵的设计	115
6.3.3	理想 CSIT 预编码矩阵的设计	117
6.4	总结和未来的方向	121
<b>第 7 章</b>	<b>灵活的物理层设计</b>	<b>123</b>
7.1	引言	124
7.2	广义频分复用	126
7.3	软件定义波形	129
7.3.1	时域处理	129
7.3.2	实施架构	130
7.4	GFDM 接收机设计	132
7.4.1	同步单元	133
7.4.2	信道估计单元	135
7.4.3	多输入多输出广义频分复用检测单元	136
7.5	总结和展望	138
<b>第 8 章</b>	<b>分布式大规模 MIMO 在蜂窝网络中的应用</b>	<b>139</b>
8.1	引言	140
8.2	大规模 MIMO 基本原理	141
8.2.1	上行链路/下行链路信道模型	142
8.2.2	有利传播	143
8.3	线性接收机在大规模 MIMO 上行链路中的性能	144
8.4	线性预编码器在大规模 MIMO 下行链路中的性能	147
8.5	大规模 MIMO 系统中的信道估计	147
8.5.1	上行链路传输	148
8.5.2	下行链路传输	149
8.6	大规模 MIMO 技术的应用	150

8.6.1 全双工中继与大规模天线阵列	150
8.6.2 联合无线信息传输和能量传输的分布式大规模 MIMO	153
8.7 未来开放式的研究方向	156
8.8 总结	157
<b>第 9 章 5G 网络全双工协议设计</b>	<b>159</b>
9.1 引言	160
9.2 全双工系统的基础知识	161
9.2.1 带内全双工工作模式	161
9.2.2 自干扰和同信道干扰	162
9.2.3 通信链路中的全双工收发机	163
9.2.4 其他全双工收发机的应用	166
9.3 全双工协议设计	167
9.3.1 全双工运行中的挑战和机遇	167
9.3.2 5G 网络中的全双工通信场景	168
9.4 全双工协议分析	170
9.4.1 宽带衰落信道中的操作模式	170
9.4.2 宽带传输中的全双工与半双工	170
9.5 总结	172
9.5.1 未来的科学研究方向	172
9.5.2 商用 5G 网络中的全双工	172
<b>第 10 章 5G 网络的毫米波通信</b>	<b>175</b>
10.1 动机与机遇	176
10.2 毫米波的无线传输	177
10.2.1 无线衰减	177
10.2.2 自由空间路径损耗	179
10.2.3 严重的阴影衰落	180
10.2.4 毫米波信道模型	181
10.2.5 链路预算分析	182
10.3 波束赋形结构	184
10.3.1 模拟波束赋形方案	184

10.3.2	混合波束赋形解决方案	188
10.3.3	低分辨率接收机结构	189
10.4	信道采集技术	189
10.4.1	波束对齐的子空间采样	190
10.4.2	压缩信道估计技术	194
10.5	部署挑战和应用	195
10.5.1	毫米波频率下的 EM 接触	195
10.5.2	异构小区网络	195
<b>第 11 章</b>	<b>无线网络的干扰抑制技术</b>	<b>197</b>
11.1	引言	198
11.2	5G 场景下的干扰管理挑战	199
11.2.1	5G 的主要目标及其对干扰的影响	199
11.2.2	提高网络效率和干扰抑制的技术	200
11.3	改善边缘用户体验：多点协作	201
11.3.1	部署场景和网络架构	202
11.3.2	上行链路的 CoMP 技术	204
11.3.3	下行链路的 CoMP 技术	205
11.4	干扰对齐：利用信号空间维度	206
11.4.1	线性干扰对齐的概念	207
11.4.2	X 信道	208
11.4.3	K 用户干扰信道和蜂窝网络：渐近干扰对齐	209
11.4.4	干扰协作网络	210
11.4.5	从 IA 到无线网络容量限制	210
11.5	计算转发协议：上行链路接收方的合作	211
11.5.1	CoF 协议的编码和解码	211
11.5.2	可实现速率区域和整数方程选择	213
11.5.3	CoF 协议的优点和挑战	215
11.6	总结	216
<b>第 12 章</b>	<b>5G 系统下的有限回程 PHY 缓存</b>	<b>217</b>
12.1	引言	218

12.2 什么是 PHY 缓存	220
12.2.1 典型物理层拓扑	220
12.2.2 PHY 缓存的基本组件	222
12.2.3 PHY 缓存的好处	223
12.2.4 PHY 缓存中的设计挑战与解决方案	225
12.3 用于缓存无线网络的 DoF 上界	227
12.3.1 缓存无线网络的架构	227
12.3.2 一般的缓存模型	228
12.3.3 缓存—辅助 PHY 传输模型	231
12.3.4 缓存无线网络的 DoF 总和的上界	233
12.4 MDS 编码的 PHY 缓存和可实现的 DoF	238
12.4.1 使用异步访问的 MDS 编码的 PHY 缓存	238
12.4.2 PHY 中缓存—辅助的 MIMO 协作	240
12.4.3 使用异步访问的 MDS 编码 PHY 缓存的 MIMO 合作概率	241
12.4.4 用于缓存无线网络的可实现 DoF	243
12.5 最大化 DoF 的缓存内容放置算法	244
12.6 封闭式 DoF 的分析和讨论	246
12.6.1 内容流行性模型和 DoF 增益的定义	247
12.6.2 渐进 DoF 增益与文件数量的关系	247
12.6.3 渐进 DoF 增益与用户数量的关系	249
12.7 总结和未来的工作	249
<b>第 13 章 基于智能电网与再生能源供能的成本感知型蜂窝网络</b>	<b>251</b>
13.1 引言	252
13.2 蜂窝网络中的供能和需求	254
13.3 能量协作	256
13.3.1 聚合器辅助下的能源交易	257
13.3.2 聚合器辅助下的能源共享	257
13.4 通信协作	258
13.4.1 自感知流量疏解	259
13.4.2 成本感知频谱共享	260

13.4.3	成本感知多点协同 (CoMP)	260
13.5	联合能源和通信协作	261
13.5.1	联合能源和频谱共享	261
13.5.2	联合能源协作和 CoMP 方案	262
13.5.3	研究实例	262
13.6	扩展和未来的方向	265
13.7	总结	266
<b>第 14 章</b>	<b>5G 中的可见光通信研究</b>	<b>267</b>
14.1	引言	268
14.2	光保真技术与可见光通信的差别	269
14.3	LiFi LED 技术	271
14.4	LiFi Attocell 网络	272
14.4.1	光 OFDM 传输	273
14.4.2	信道模型	275
14.4.3	光源输出功率	280
14.4.4	信号限幅	281
14.4.5	接收机噪声	282
14.4.6	多址接入和空间复用方案	283
14.5	LiFi 毫微小区网络的关键参数设置	283
14.5.1	共信道干扰最小化	284
14.5.2	最大化有用信号的强度	285
14.5.3	参数配置	286
14.6	LiFi 毫微小区网络中的信干噪比 (SINR)	287
14.6.1	系统模型设定	288
14.6.2	六边形小区部署	288
14.6.3	PPP 小区部署	291
14.6.4	SINR 的统计分析结果与讨论	295
14.7	小区数据率和中断概率	297
14.8	有限网络和多径效应下的网络性能	301
14.9	实际小区部署场景	303



14.9.1	方形网络	303
14.9.2	硬核点过程网络	304
14.9.3	性能对比	304
14.10	LiFi 毫微小区网络与微小区网络的对比	305
14.11	总结	307

### 第 3 部分 网络协议、算法和设计

<b>第 15 章</b>	<b>大规模 MIMO 调度协议</b>	<b>311</b>
15.1	引言	312
15.2	网络模型和问题的描述	314
15.2.1	时间尺度	314
15.2.2	请求队列和网络实用性最大化	315
15.3	动态调度策略	318
15.3.1	DPP 表达式	319
15.3.2	UE 侧的拥塞控制	320
15.3.3	UE 侧个体实用性的贪婪最大化	321
15.3.4	基站侧的物理速率调度	321
15.4	策略性能	322
15.5	大规模 MU-MIMO 下的无线系统模型	324
15.5.1	大规模 MIMO 基站的物理速率	324
15.5.2	大规模 MIMO 基站的传输调度	327
15.6	数值实验	328
15.7	总结	331
<b>第 16 章</b>	<b>异构无线网络的移动数据分流</b>	<b>333</b>
16.1	引言	334
16.2	目前的标准化工作	335
16.2.1	接入网发现和选择功能	335
16.2.2	热点 2.0	336
16.2.3	下一代热点	337