



国家重点图书出版规划项目



国之重器出版工程

网络强国建设

5G 丛书

5G Mobile Communication:
A Fully Connected World

5G 移动通信： 面向全连接的世界

刘光毅 方敏 关皓 李云岗 孙程君 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家重点图书出版规划项目



国之重器出版工程
网络强国建设

5G 丛书

5G 移动通信： 面向全连接的世界

5G Mobile Communication:
A Fully Connected World

刘光毅 方敏 关皓 李云岗 孙程君



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

5G移动通信 : 面向全连接的世界 / 刘光毅等编著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2019.3

(国之重器出版工程·5G丛书)

ISBN 978-7-115-50792-1

I. ①5… II. ①刘… 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(2019)第022546号

内 容 提 要

本书从5G需求与愿景出发,深入揭示了5G产生的背景、频率需求、候选频率及其无线传播特性,围绕5G相关的主要标准化组织及其研究的最新进展对5G标准的未来进行了展望;围绕5G的关键技术,分别从多天线的演进、非正交与多址、全双工、编码与链路自适应、网络架构、用户无感知的移动性管理、以用户为中心的自治网络、毫米波系统设计、超密集网络及小区虚拟化以及物联网的优化等方面详细介绍了5G的关键技术,最后对3.5 GHz 5G样机的设计与外场试验情况进行了介绍,并展望了5G应用与部署。

本书全方位地系统阐述5G的来龙去脉以及未来主要发展方向,是5G研发、无线通信技术教学以及工程实施人员有益的参考书。

◆ 编 著 刘光毅 方 敏 关 皓 李云岗 孙程君

责任编辑 李彩珊

责任印制 杨林杰

◆ 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>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 710×1000 1/16

印张: 27.5

字数: 509千字

2019年3月第1版

2019年3月河北第1次印刷



定价: 169.00 元

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

反盗版热线: (010)81055315

《国之重器出版工程》

编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	李 东	高延敏	何 琼	刁石京
谢少锋	闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生
赵永红	韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波
卢 山	徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁
张 炜	聂 宏	付梦印	季仲华	



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- 于 全 中国工程院院士
- 王少萍 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 王建民 清华大学软件学院院长
- 王哲荣 中国工程院院士
- 王 越 中国科学院院士、中国工程院院士
- 尤肖虎 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 邓宗全 中国工程院院士
- 甘晓华 中国工程院院士
- 叶培建 中国科学院院士
- 朱英富 中国工程院院士
- 朵英贤 中国工程院院士
- 邬贺铨 中国工程院院士
- 刘大响 中国工程院院士
- 刘怡昕 中国工程院院士
- 刘韵洁 中国工程院院士
- 孙逢春 中国工程院院士
- 苏彦庆 “长江学者奖励计划”特聘教授



- 苏哲子 中国工程院院士
- 李伯虎 中国工程院院士
- 李应红 中国科学院院士
- 李新亚 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨德森 中国工程院院士
- 张宏科 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆建勋 中国工程院院士
- 陆燕荪 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、原
机械工业部副部长
- 陈一坚 中国工程院院士
- 陈懋章 中国工程院院士
- 金东寒 中国工程院院士
- 周立伟 中国工程院院士
- 郑纬民 中国计算机学会原理事长
- 郑建华 中国科学院院士

- 
- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 “长江学者奖励计划”特聘教授，中国科协书记处书记，北京理工大学党委副书记、副校长
- 柳百成 中国工程院院士
- 闻雪友 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士、西北工业大学常务副校长
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授



前言

4G 为宽带移动通信打开了一扇门,在给人们带来生活与工作便利的同时,也深刻地改变着整个社会运行的模式和效率。4G 的普及应用,进一步刺激了用户对移动数据的消费,同时也刺激了人们对未来数字化生活的渴望与追求。

有人说,4G 是移动通信的终极时代,不会再有新的移动通信系统出现,因为没有新的技术能够支撑新一代移动通信系统的产生。在现实生活中,人们却发现,越来越多的新业务、新应用场景对移动通信网络的能力提出了新的要求。随着消费电子产品类的技术突破,AR 和 VR、更高清的 4K/8K 屏显示、裸眼 3D 等都会真真切切地走入人们的生活,这些都对移动通信系统的速率和容量提出了更高的要求;同时,工业互联网和自动驾驶等也对通信的时延提出了更高的要求。

此外,随着人与人之间通信市场的饱和,移动通信产业开始把注意力转向如何为其他行业提供更加有效的通信工具和能力,开始构想“万物互联”的美好愿景。面向物与物的无线通信,与传统的人与人的通信方式有着较大的区别,在设备成本、体积、功耗、连接数量、覆盖能力上,都提出了更高的要求,特别是面向远程医疗、工业控制和智能电网等应用,对传输的时延和可靠性提出了更苛刻的要求。4G 在全球范围内的大规模部署也给未来网络的发展带来了新的启示,业务需要尽可能地靠近用户、新业务的部署需要实现快速和低成本、针对不同应用场景的网络部署需要灵活和可配等。所有这些,在已有的 4G 及其演进系统上都难以完全满足,新的需求呼唤和驱动着新一代移动通信系统的诞生。

随着 5G 研究的深入,移动通信产业对 5G 需要重点关注的 3 个主要应用场景形成了共识,包括增强的移动宽带、低功耗大连接的物联网、低时延和高可靠网络,并针对 5G 应用的主要场景制定了详细的技术需求,如 20 Gbit/s 的峰值速率、0.5 ms 的空口时延、3~5 倍频谱效率的提升、百万级的连接数密度、10 Tbit/(s·km²) 的流量密度、能耗效率的



100 倍提升等。为了实现可持续的产业发展，业界还对未来的移动通信网络成本提出了更高的期望，即千倍以上的每比特成本的降低。围绕 5G 的需求，3GPP RAN 开始了面向 5G 新空口的可行性技术研究，并从 2016 年 6 月开始正式标准的制定，2018 年 6 月完成第一个版本的标准制定，2019 年年底完成第二个标准版本的制定，并形成最终的 5G 候选技术提案，正式提交 ITU-R。此外，3GPP SA2 也先于 3GPP RAN 开始了下一代网络架构的研究，并计划与 3GPP RAN 同期完成相关标准的制定。

随着标准化的启动，中、韩、日、美等国开始争夺 5G 产业发展的主导权。韩国政府已在 2018 年平昌冬季奥运会上展示了 5G 业务体验，并将在 2019 年上半年推出 5G 商用部署；日本政府宣布将在 2020 年夏季奥运会商用 5G；中国政府也宣布将在 2020 年实现 5G 商用；而美国政府则宣布将主导 5G 未来的产业发展，并为 5G 分配了 11 GHz 的 6 GHz 以上的频谱，同时，美国运营商 Verizon Wireless 则更激进地发布了面向 28 GHz 的 5G 标准。全球其他运营商也纷纷宣布开始启动 5G 的试验。5G，正朝着 2020 年商用的目标稳步迈进。

感谢人民邮电出版社的组织和邀请，使得活跃于 5G 研发第一线的专家们有机会聚集在一起，探讨未来 5G 发展的全貌，并共同撰写了这本书。希望通过我们的工作，给读者呈现出 5G 的来龙去脉以及未来发展的方向，为 5G 的发展做出微薄的贡献。

本书第 1 章由姜大洁、刘光毅撰写，第 2 章由刘亮、刘婧迪、郑毅、李男、刘光毅撰写，第 3 章由刘光毅撰写，第 4 章由王飞、侯雪颖、金婧、王启星、童辉、刘光毅撰写，第 5 章由袁志峰、陈燕、方敏、李云岗撰写，第 6 章由刘胜、李云岗撰写，第 7 章由徐俊、许进、方敏撰写，第 8 章由吴瑟、宗在峰、强宇红、谢振华、陶崧珺、方敏撰写，第 9 章由赵竹岩、杜蕾、关皓撰写，第 10 章由刘云璐、陈卓、马慧、李男、刘光毅撰写，第 11 章由俞斌、孙程君撰写，第 12 章由郝鹏、方敏撰写，第 13 章由赵竹岩、杜蕾、关皓撰写，第 14~16 章由刘光毅等撰写。

另外，本书的所有内容仅代表作者的个人学术观点，不代表任何公司的观点和立场，特此申明。由于作者水平所限，难免有疏漏和不足的地方，欢迎广大读者批评指正。

作者

2018 年 10 月于北京



目 录

第 1 章 5G 需求与愿景	001
1.1 5G 总体愿景	002
1.2 驱动力和市场趋势	004
1.3 典型业务、场景与性能挑战	005
1.4 可持续发展与效率需求	006
1.5 5G 关键能力	007
1.6 小结	009
参考文献	009
第 2 章 候选频率与传播特征	011
2.1 候选频谱	012
2.1.1 需求	013
2.1.2 候选频谱	014
2.1.3 国内 5G 频率分配方案	023
2.2 传播特性	024
2.2.1 对系统设计的影响	024
2.2.2 传播特性分类	025
2.2.3 5G 信道传播特性研究思路	028
2.2.4 测量与建模结果	030
2.3 5G 信道模型	034
2.3.1 主模块	035
2.3.2 6 GHz 以下频段的扩展模块	036
2.3.3 基于地图的混合信道模块	037
2.3.4 路径损耗与阴影模型	037
2.3.5 穿透损耗	041
2.3.6 LOS 概率	042
2.3.7 快衰模型	043
2.4 小结	044
参考文献	044



第 3 章 5G 推进展望	047
3.1 5G 重要组织概述	048
3.1.1 ITU	048
3.1.2 3GPP	050
3.1.3 NGMN	051
3.1.4 IMT-2020 推进组	051
3.2 5G 的推进进展	052
3.2.1 ITU 的 5G 推进进展	053
3.2.2 NGMN 的 5G 进展	057
3.2.3 中国 IMT-2020 推进组的 5G 进展	060
3.2.4 3GPP 的 5G 进展	062
3.3 小结	063
参考文献	064
第 4 章 多天线技术的演进：3D-MIMO	065
4.1 技术原理	066
4.2 典型应用场景	067
4.3 3D-MIMO 中波束成形传输方案	068
4.3.1 单用户波束成形传输方案	069
4.3.2 多用户波束成形和联合调度	070
4.4 3D-MIMO 中的信道反馈方案	076
4.5 3D-MIMO 性能评估	079
4.5.1 仿真假设	079
4.5.2 3D-MIMO 与 2D-MIMO 的系统性能对比	082
4.5.3 不同配对用户数对 3D-MIMO 的影响	083
4.5.4 不同天线形态的 3D-MIMO 性能对比	084
4.5.5 SRS 误差对 3D-MIMO 性能的影响	085
4.6 3D-MIMO 样机测试验证	088
4.6.1 3D-MIMO 硬件架构	088
4.6.2 3D-MIMO 天线暗室测试	090
4.6.3 城区宏覆盖场景下的外场测试	090
4.6.4 高覆盖场景下的外场测试	094
参考文献	098



第 5 章 非正交与多址	101
5.1 5G 新型多址技术面临的挑战与设计框架	102
5.2 5G 与非正交多址	105
5.2.1 正交多址与非正交多址	105
5.2.2 5G 与非正交多址	106
5.3 非正交容量界分析	106
5.3.1 下行正交/非正交容量界分析	107
5.3.2 上行非正交容量界分析	109
5.3.3 非正交容量界给 5G 多址方案的启示	111
5.4 MUSA	112
5.4.1 MUSA 下行设计及和其他方案比较	112
5.4.2 MUSA 上行设计及和其他方案比较	115
5.4.3 MUSA 应用场景与性能优势	118
5.5 SCMA	119
5.5.1 SCMA 基本概念	119
5.5.2 SCMA 码本设计	121
5.5.3 SCMA 低复杂度接收机设计	124
5.5.4 SCMA 应用场景与性能优势	124
5.5.5 SCMA 未来研究方向	127
5.6 小结	127
参考文献	128
第 6 章 全双工	131
6.1 无线全双工简介	132
6.2 全双工自干扰抑制	133
6.2.1 全双工自干扰抑制原理	134
6.2.2 基于数字参考重建的自干扰抵消	136
6.2.3 基于模拟参考重建的自干扰抵消	137
6.2.4 天线域自干扰抑制	138
6.2.5 全双工自干扰抵消的实测性能	140
6.3 全双工在蜂窝系统中面临的挑战	142
6.4 小结	144
参考文献	144



第 7 章 编码与链路自适应	147
7.1 5G 链路自适应的新需求和新趋势	148
7.2 小数据分组编码	150
7.2.1 低码率的 TBCC	150
7.2.2 结合码空间检测的差错校验方法	151
7.3 分组编码技术	152
7.3.1 技术方案	153
7.3.2 复杂度分析	154
7.3.3 仿真分析	155
7.4 软 HARQ 技术	156
7.4.1 软 HARQ 方案	157
7.4.2 基于分组编码的软 HARQ 方案	161
7.5 小结	162
参考文献	163
第 8 章 网络架构	165
8.1 5G 网络架构需求	166
8.2 现有网络存在的问题	167
8.2.1 网络架构发展历程与内在逻辑	167
8.2.2 现网架构导致的现实挑战	168
8.3 5G 网络架构特征	170
8.3.1 5G 网络架构设计原则	170
8.3.2 5G 网络架构设计目标	170
8.3.3 5G 网络架构设计	171
8.4 NFV 与 SDN	173
8.4.1 NFV 技术介绍	173
8.4.2 SDN 技术介绍	181
8.4.3 SDN 在 5G 移动网络中的作用	185
8.4.4 NFV 和 SDN 的关系	190
8.4.5 基于 NFV 和 SDN 的 5G 网络架构展望	190
8.5 小结	193
参考文献	194



第 9 章 用户无感知的移动性管理	195
9.1 5G 移动性的特点和需求	196
9.2 5G 网络中移动性的场景分析	199
9.3 移动性解决方案	200
9.3.1 备选的移动性方案	201
9.3.2 移动性的关键指标	202
9.3.3 影响移动性的关键技术	203
9.3.4 观察和分析	210
9.4 小结	210
第 10 章 以用户为中心的自治网络	211
10.1 以用户为中心的自治网络需求	212
10.2 潜在技术方向	214
10.2.1 基于大数据的用户行为感知与优化	214
10.2.2 多维度 QCI 设计	217
10.2.3 用户和业务的智能感知与优化	219
10.2.4 特殊场景的性能保障与提升	220
10.3 小结	222
第 11 章 毫米波系统的设计与验证	223
11.1 毫米波信道传播特性：理论和实际测量结果	224
11.2 波束成形算法	226
11.3 毫米波波束成形原型系统	228
11.4 原型系统的试验结果	230
11.4.1 室外试验	230
11.4.2 室外对室内的穿透	232
11.4.3 室外移动	232
11.4.4 室内多用户	233
11.5 小结	233
参考文献	234
第 12 章 超密集网络及小区虚拟化	235
12.1 超密集网络概述	236



12.2	LTE 系统的小区结构及分析	241
12.3	UDN 虚拟化技术	245
12.3.1	虚拟化整体架构	247
12.3.2	小区虚拟化	248
12.3.3	终端虚拟化	255
12.4	5G 小区虚拟化的关键支撑技术	256
12.4.1	数据同步	256
12.4.2	无线自回传	257
12.5	小结	260
	参考文献	260
第 13 章	海量机器型通信	263
13.1	机器型通信市场前景和现有技术	264
13.1.1	机器间通信产业与市场	264
13.1.2	现有 M2M 技术	266
13.2	海量机器型通信技术需求	267
13.2.1	机器型通信多元化应用	268
13.2.2	机器型通信终端数量	268
13.2.3	机器型通信终端成本	269
13.2.4	电池寿命	269
13.2.5	覆盖范围	270
13.3	海量机器型通信的网络功能	270
13.3.1	终端的拥塞控制和过载控制	270
13.3.2	MTC 终端触发	270
13.3.3	MTC 终端分组	271
13.3.4	MTC 终端监控	271
13.3.5	其他方面的要求	271
13.4	海量机器型通信的无线技术	272
13.4.1	5G 机器型通信的无线连接方式	272
13.4.2	MTC 终端的接入和传输	273
13.4.3	MTC 终端的成本优化	275
13.4.4	覆盖增强	277
13.4.5	降低功耗	279
13.5	面向海量机器型通信的网络架构演进	281



13.5.1	5G 网络架构挑战	282
13.5.2	面向 5G 的 MTC 网络架构	283
13.5.3	M2M 网络技术	284
13.5.4	M2M 网络关注的领域	286
13.6	小结	290
	参考文献	290
第 14 章	5G 标准概览	293
14.1	5G R15 概览	294
14.1.1	5G 部署方式	295
14.1.2	5G 端到端网络架构与协议	297
14.1.3	5G 新空口的主要特征	301
14.1.4	5G 新核心网的主要特征	307
14.2	5G R16 标准概述	310
14.2.1	5G 新空口 R16 的新功能	310
14.2.2	5G 新核心网 R16 的新功能	332
14.3	小结	342
	参考文献	342
第 15 章	3.5 GHz 5G 样机设计与外场试验	345
15.1	5G 产业推进规划	346
15.2	5G 基站的样机规划和技术要求	351
15.3	5G 基站样机开发	364
15.3.1	RF 通道数的选择	365
15.3.2	CPRI/eCPRI 的选择	368
15.3.3	整机性能	370
15.4	5G 样机的外场试验	374
15.5	小结	380
	参考文献	380
第 16 章	5G 应用与部署展望	381
16.1	全球运营商 5G 部署规划	382
16.2	5G 应用展望	387
16.2.1	5G 的核心能力及其商业模式	388



16.2.2 5G 典型应用	392
16.3 5G 发展面临的挑战	394
16.4 小结	398
参考文献	399
附录一 Global Mobile Industry Ready to Start Full-Scale Development of 5G NR	401
附录二 5G 标准按时完成，产业携手加速商用步伐	411