

5G丛书

5G移动通信系统：从演进到革命

刘光毅 方敏 关皓 李云岗 孙程君 编著

5G Mobile Communication System:
from Evolution to Revolution

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

5G丛书

5G移动通信系统：从演进到革命

刘光毅 方敏 关皓 李云岗 孙程君 编著

5G Mobile Communication System:
from Evolution to Revolution
藏书

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

5G移动通信系统：从演进到革命 / 刘光毅等编著

— 北京：人民邮电出版社，2016.11

(5G丛书)

ISBN 978-7-115-43151-6

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(2016)第190047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、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。

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、科研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 吴娜达
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>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本：800×1000 1/16
印张：18 2016年11月第1版
字数：337千字 2016年11月北京第1次印刷
-

定价：69.00元

读者服务热线：(010)81055488 印装质量热线：(010)81055316
反盗版热线：(010)81055315

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。随着消费电子类产品的技术突破，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、覆盖能力上面，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，更是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 每平方千米的流量密度、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，并计划从 2016 年 6 月开始正式的标准制定，2018 年 6 月完成第一个版本的标准制定，2019 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。韩国政府宣布将于 2018 年平昌冬季奥运会提供 5G 业务体验，日本政府宣布将于 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，并宣布将在 2017 年部署 5G。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，共同探讨未来 5G 发展的全貌，并共同编写了这本书。本书的作者全部来自于国内外领先的 5G 研发机构，是业界权威的技术专家，他们经历了整个 4G 的研发、标准化和产业化的过程，在 5G 方面更是有很深的造诣。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。

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

由于笔者水平所限，难免有疏漏和不足的地方，欢迎广大读者批评指正。

编者

2016 年 6 月于北京

目 录

第 1 章 5G 需求与愿景	1
1.1 5G 总体愿景	2
1.2 驱动力和市场趋势	3
1.3 典型业务、场景与性能挑战	4
1.4 可持续发展与效率需求	7
1.5 5G 关键能力	8
1.6 小结	9
参考文献	10
第 2 章 候选频率与传播特征	11
2.1 候选频谱	12
2.1.1 需求	12
2.1.2 候选频谱	14
2.2 传播特性	22
2.2.1 对系统设计的影响	22
2.2.2 传播特性分类	23
2.2.3 5G 信道传播特性研究思路	26
2.2.4 测量与建模结果	28
2.3 小结	33

参考文献	33
第3章 标准化展望	35
3.1 5G 标准化组织概述	36
3.1.1 ITU	36
3.1.2 3GPP	38
3.1.3 NGMN	38
3.1.4 IMT-2020 推进组	39
3.2 5G 的标准化进展	40
3.2.1 ITU 的 5G 标准化进展	41
3.2.2 NGMN 的 5G 进展	44
3.2.3 中国 IMT-2020 推进组的 5G 进展	45
3.2.4 3GPP 的 5G 进展	47
3.3 小结	48
参考文献	49
第4章 多天线技术的演进：3D-MIMO	51
4.1 技术原理	52
4.2 典型应用场景	53
4.3 3D-MIMO 中波束成形传输方案	54
4.3.1 单用户波束成形传输方案	55
4.3.2 多用户波束成形和联合调度	56
4.4 3D-MIMO 中的信道反馈方案	62
4.5 3D-MIMO 性能评估	65
4.5.1 仿真假设	65
4.5.2 3D-MIMO 与 2D-MIMO 的系统性能对比	67
4.5.3 不同配对用户数对 3D-MIMO 的影响	69
4.5.4 不同天线形态的 3D-MIMO 性能对比	70
4.5.5 SRS 误差对 3D-MIMO 性能的影响	71
4.6 3D-MIMO 样机测试验证	73

4.6.1	3D-MIMO 硬件架构	74
4.6.2	3D-MIMO 天线暗室测试	76
4.6.3	城区宏覆盖场景下的外场测试	77
4.6.4	高覆盖场景下的外场测试	80
	参考文献	84
第 5 章	非正交与多址	87
5.1	5G 新型多址技术面临的挑战与设计框架	88
5.2	5G 与非正交多址	90
5.2.1	正交多址与非正交多址	90
5.2.2	5G 与非正交多址	91
5.3	非正交容量界分析	92
5.3.1	下行正交/非正交容量界分析	92
5.3.2	上行非正交容量界分析	94
5.3.3	非正交容量界给 5G 多址方案的启示	96
5.4	MUSA	97
5.4.1	MUSA 下行设计及和其他方案比较	97
5.4.2	MUSA 上行设计及和其他方案比较	100
5.4.3	MUSA 应用场景与性能优势	104
5.5	SCMA	104
5.5.1	SCMA 基本概念	104
5.5.2	SCMA 码本设计	107
5.5.3	SCMA 低复杂度接收机设计	109
5.5.4	SCMA 应用场景与性能优势	109
5.5.5	SCMA 未来研究方向	112
5.6	小结	112
	参考文献	113
第 6 章	全双工	117
6.1	无线全双工简介	118

6.2	全双工自干扰抑制	119
6.2.1	全双工自干扰抑制原理	119
6.2.2	基于数字参考重建的自干扰抵消	121
6.2.3	基于模拟参考重建的自干扰抵消	122
6.2.4	天线域自干扰抑制	124
6.2.5	全双工自干扰抵消的实测性能	126
6.3	全双工在蜂窝系统中面临的挑战	128
6.4	小结	129
	参考文献	130
第 7 章	编码与链路自适应	131
7.1	5G 链路自适应的新需求和新趋势	132
7.2	小数据分组编码	133
7.2.1	低码率的 TBCC	134
7.2.2	结合码空间检测的差错校验方法	135
7.3	分组编码技术	136
7.3.1	技术方案	137
7.3.2	复杂度分析	138
7.3.3	仿真分析	139
7.4	软 HARQ 技术	140
7.4.1	软 HARQ 方案	141
7.4.2	基于分组编码的软 HARQ 方案	144
7.5	小结	146
	参考文献	146
第 8 章	网络架构	149
8.1	5G 网络架构需求	150
8.2	现有网络存在的问题	151
8.2.1	网络架构发展历程与内在逻辑	151
8.2.2	现网架构导致的现实挑战	152

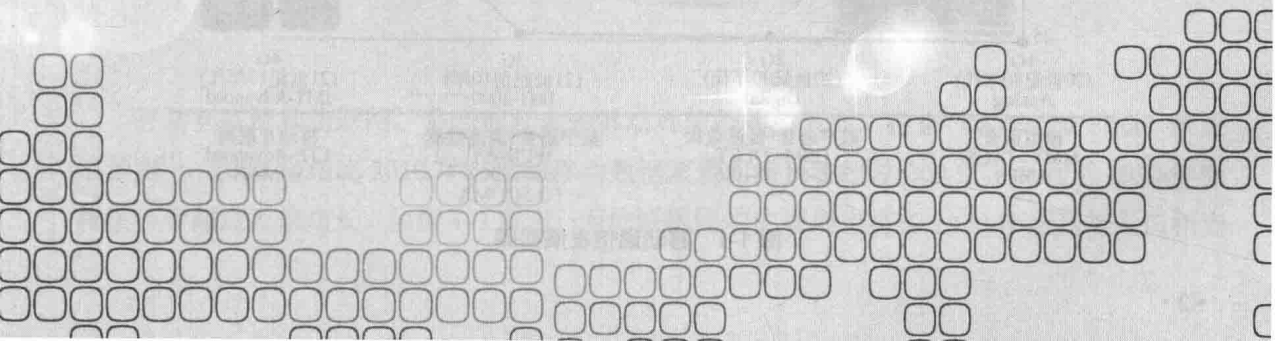
8.3	5G 网络架构特征	153
8.3.1	5G 网络架构设计原则	153
8.3.2	5G 网络架构设计目标	154
8.3.3	5G 网络架构设计	154
8.4	NFV 与 SDN	157
8.4.1	NFV 技术介绍	157
8.4.2	SDN 技术介绍	165
8.4.3	SDN 在 5G 移动网络中的作用	168
8.4.4	NFV 和 SDN 的关系	173
8.4.5	基于 NFV 和 SDN 的 5G 网络架构展望	174
8.5	小结	177
	参考文献	177
第 9 章	用户无感知的移动性管理	179
9.1	5G 移动性的特点和需求	180
9.2	5G 网络中移动性的场景分析	182
9.3	移动性解决方案	184
9.3.1	备选的移动性方案	184
9.3.2	移动性的关键指标	186
9.3.3	影响移动性的关键技术	186
9.3.4	观察和分析	193
9.4	小结	194
第 10 章	用户为中心的自治网络	195
10.1	用户为中心的自治网络需求	196
10.2	潜在技术方向	197
10.2.1	基于大数据的用户行为感知与优化	197
10.2.2	多维度 QCI 设计	201
10.2.3	用户和业务的智能感知与优化	202
10.2.4	特殊场景的性能保障与提升	203

10.3	小结	205
第 11 章	毫米波系统的设计与验证	207
11.1	毫米波信道传播特性：理论和实际测量结果	208
11.2	波束成形算法	210
11.3	毫米波波束成形原型系统	211
11.4	原型系统的试验结果	214
11.4.1	室外试验	214
11.4.2	室外对室内的穿透	215
11.4.3	室外移动	216
11.4.4	室内多用户	216
11.5	小结	217
	参考文献	218
第 12 章	超密集网络及小区虚拟化	221
12.1	超密集网络概述	222
12.2	LTE 系统的小区结构及分析	226
12.3	UDN 虚拟化技术	231
12.3.1	虚拟化整体架构	232
12.3.2	小区虚拟化	233
12.3.3	终端虚拟化	239
12.4	5G 小区虚拟化的关键支撑技术	241
12.4.1	数据同步	241
12.4.2	无线自回程	242
12.5	小结	244
	参考文献	244
第 13 章	海量机器类通信	247
13.1	机器类通信市场前景和现有技术	248
13.1.1	机器间通信产业与市场	248

13.1.2	现有 M2M 技术	250
13.2	海量机器类通信技术需求	251
13.2.1	机器类通信多元化应用	251
13.2.2	机器类通信终端数量	252
13.2.3	机器类通信终端成本	253
13.2.4	电池寿命	253
13.2.5	覆盖范围	253
13.3	海量机器类通信的网络功能	254
13.3.1	终端的拥塞控制和过载控制	254
13.3.2	MTC 终端触发	254
13.3.3	MTC 终端分组	255
13.3.4	MTC 终端监控	255
13.3.5	其他方面的要求	255
13.4	海量机器类通信的无线技术	256
13.4.1	5G 机器类通信的无线连接方式	256
13.4.2	MTC 终端的接入和传输	257
13.4.3	MTC 终端的成本优化	259
13.4.4	覆盖增强	261
13.4.5	降低功耗	262
13.5	面向海量机器类通信的网络架构演进	264
13.5.1	5G 网络架构挑战	266
13.5.2	面向 5G 的 MTC 网络架构	267
13.5.3	M2M 网络技术	268
13.5.4	M2M 网络关注的领域	270
13.6	小结	273
	参考文献	274

第 1 章

5G 需求与愿景



从 20 世纪 80 年代第一代（1G）移动通信的诞生开始，移动通信深刻改变了人们的沟通方式。面向 2020 年及未来，移动数据流量的爆炸式增长、设备连接数的海量增加、各类新业务和应用场景的不断涌现，将对现有网络产生非常严峻且无法满足的挑战，第五代（5G）移动通信系统应运而生。从 5G 网络的两大驱动力——移动互联网和物联网出发，通过预测未来 5G 典型应用场景和典型业务，同时结合 5G 网络运营面临的挑战，提出了 5G 应具备的关键能力，并给出了 5G 总体愿景。

1.1 5G 总体愿景

20 世纪 80 年代，第一代移动通信诞生，“大哥大”出现在了人们的视野中。从此，移动通信对人们日常工作和生活的影晌与日俱增。移动通信发展回顾如图 1-1 所示。1G，“大哥大”作为高高在上的身份象征；2G，手机通话和短信成为了人们日常沟通一种重要方式；3G，人们开始用手机上网、看新闻、发彩信；4G，手机上网已经成为了基本功能，拍照分享、在线观看视频等，已经成了手机上能做的再熟悉不过的事情。人们的沟通方式、了解世界的方式，已经因移动通信而改变。想要知道更多，想要更自由地获取更多信息的好奇心，不断驱动着人们对更高性能移动通信的追求。可以预见，未来的移动数据流量将爆炸式地增长、设备连接数将海量增加、各类新业务和应用场景将不断涌现。这些新的趋势，对于现有网络来说将会是不可完成的任务，5G 移动通信系统应运而生。



图 1-1 移动通信发展回顾

5G 作为面向 2020 年及以后的移动通信系统，将深入社会的各个领域，作为基础设施为未来社会的各个领域提供全方位的服务，如图 1-2 所示。5G 将提供光纤般的接入速度，“零”时延的使用体验，使信息突破时空限制，为用户即时呈现；5G 将提供千亿设备的连接能力、极佳的交互体验，实现人与万物的智能互联；5G 将提供超高流量密度、超高移动性支持，让用户随时随地获得一致的性能体验；同时，超过百倍的能效提升和超百倍的比特成本降低，也将保证产业的可持续发展。超高速率、超低时延、超高移动性、超强连接能力、超高流量密度，加上能效和成本超百倍改善，5G 最终将实现“信息随心至，万物触手及”的美好愿景。



图 1-2 5G 深入移动互联网和物联网的各个领域

1.2 驱动力和市场趋势

移动互联网和物联网，是当前及未来移动通信的热门方向。根据 IMT-2020 (5G) 推进组预测^[1]，2020 年相比 2010 年，全球移动数据流量的增长将超过 200 倍，而到了 2030 年更将进一步超过万倍增长，如图 1-3 所示；而物联网终端的规模也将在 2020 年达到与人口相当

的量级，后续将进一步发展至千亿级别，如图 1-4 所示。

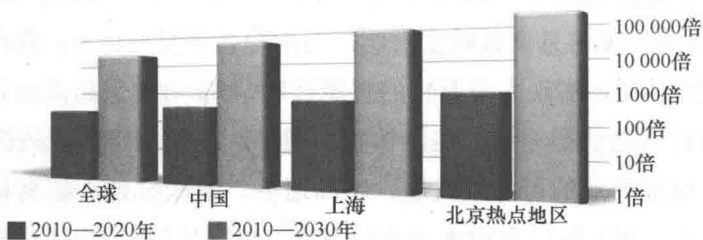


图 1-3 移动互联网流量增长

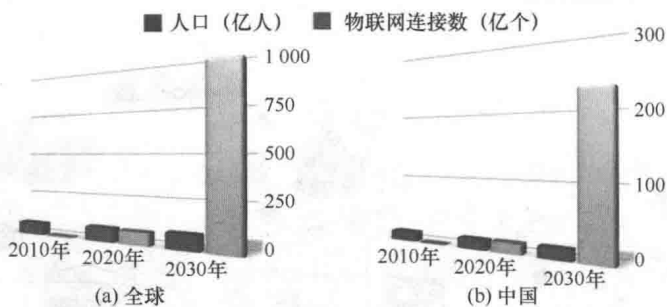


图 1-4 物联网连接数增长

移动互联网和物联网的迅猛增长，将为 5G 提供广阔的前景。移动互联网将推动人类社会信息交互方式的进一步升级，为用户提供增强现实、虚拟现实、超高清（3D）视频、移动云等更加身临其境的极致业务体验。各种新业务不仅带来超千倍的流量增长，更是对移动网络的性能提出了挑战，必将推动移动通信技术和产业的新一轮变革。

物联网则是将人与人的通信进一步延伸到人与物、物与物智能互联，使移动通信技术渗透至更加广阔的行业和领域。在移动医疗、车联网、智能家居、工业控制、环境监测等场景，将可能出现数以千亿的物联网设备，缔造出规模空前的新兴产业，并与移动互联网发生化学反应，实现真正的“万物互联”。

1.3 典型业务、场景与性能挑战

移动通信网络已经越来越多地融入人们的工作和生活中，未来的 5G 网络将与人们的

居住、工作、休闲和交通等各个领域结合得更加紧密。当前，在一些特殊区域，例如体育场、露天集会、地铁、快速路、高铁等，由于这些场景的超高流量密度、超高连接数密度、超高移动性等特征，现有网络情况下体验还不理想；另外一些区域，例如密集住宅区、办公室、广域覆盖场景等，考虑到未来将出现的新业务，如增强现实、虚拟现实、超高清视频、云存储、车联网、智能家居、OTT 消息等，也对速率、时延等提出更为苛刻的要求。

对日常工作、生活中的各种环境以及其中可能出现的各类应用，以“高流量密度”“高连接数密度”“高移动性”为依据进行筛选之后，列举出一些 5G 的典型场景。结合各场景未来可能的用户分布、各类业务占比及对速率、时延等性能要求，可以得到各个应用场景下的 5G 性能指标，主要包括用户体验速率、连接数密度、端到端时延、流量密度、移动性和用户峰值速率，见表 1-1。表 1-2 中，办公室场景的最大性能挑战是数十 Tbit/s/km² 的流量密度，密集住宅场景的最大性能挑战是 Gbit/s 用户体验速率，体育场和露天集会场景的最大性能挑战是 100 万/km² 的连接数，地铁场景的最大性能挑战是 6 人/m² 的超高用户密度，快速路场景的最大性能挑战是毫秒级端到端时延，高铁场景的最大性能挑战是 500 km/h 以上的高速移动，广域覆盖场景的最大性能挑战是 100 Mbit/s 的用户体验速率。

表 1-1 5G 性能指标

名称	定义
用户体验速率 (bit/s)	真实网络环境下用户可获得的最低传输速率
连接数密度 (km ⁻²)	单位面积上支持的在线设备总和
端到端时延 (ms)	数据分组从源节点开始传输到被目的节点正确接收的时间
移动性 (km/h)	满足一定性能要求时，收发双方方向的最大相对移动速度
流量密度 (bit/(s·km ²))	单位面积区域内的总流量
用户峰值速率 (bit/s)	单用户可获得的最高传输速率

表 1-2 5G 性能指标

地点	关键性能挑战	典型业务
办公室	数十 Tbit/(s·km ²)以上流量密度	多方视频会议
		云桌面
		数据下载、云存储