

5G 新技术丛书



开启未来无线通信 创新之路



**5G: A Novel Technology
for Future Wireless
Communication**



◎ 赵绍刚 李岳梦 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

5G 新技术丛书

5G：开启未来无线通信创新之路

5G: A Novel Technology for Future Wireless Communication

赵绍刚 李岳梦 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书重点对 5G 无线系统的五大关键技术——大规模天线、新型多址技术、新型波形、毫米波通信、轨道角动量复用进行了详细介绍，并对其性能进行对比分析，使读者对 5G 无线网络关键技术有更直接、更具体、更全面的认识。首先对 5G 网络进行简要介绍，让读者对 5G 系统的需求有个基本了解，然后对大规模天线、新型多址技术、新型波形技术、毫米波通信、轨道角动量复用技术进行了详细介绍，并对其性能进行了对比分析。

本书既可作为制造商、运营商、设计院等从事 5G 网络研发、维护 and 设计等人员的专业指导图书，也可作为高等院校通信类专业教材或教辅用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

5G：开启未来无线通信创新之路 / 赵绍刚，李岳梦编著. —北京：电子工业出版社，2017.3
(5G 新技术丛书)

ISBN 978-7-121-31041-6

I. ①5… II. ①赵… ②李… 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（2017）第 044600 号

策划编辑：宋 梅

责任编辑：底 波

印 刷：北京季蜂印刷有限公司

装 订：北京季蜂印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：720×1000 1/16 印张：22.25 字数：356 千字

版 次：2017 年 3 月第 1 版

印 次：2017 年 3 月第 1 次印刷

印 数：3000 册 定价：68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：mariams@phei.com.cn。



前言

IMT-2020 (5G) 推进组于 2015 年发布《5G 概念白皮书》，明确了未来移动互联网和物联网的业务需求，提出 5G 将重点支持连续广域覆盖、热点大容量、低功耗大连接和低时延高可靠 4 个主要技术场景，为实现上述业务需求就必须采用崭新的无线空口技术。这些关键无线技术包括：大规模天线阵列、新型多址、新型波形、全频谱接入和基于轨道角动量无线传输等，通过新空口来实现几十甚至上百吉位每秒 (Gb/s) 用户体验速率及万用户量级的小区用户数。

本书写作的目的是为了让从事移动通信的专业技术人员和相关专业的高校学生对 5G 无线网络的关键技术有一个比较详细、全面的了解。本书首先对 5G 网络进行简要的介绍，让读者对 5G 系统的需求有个基本了解。之后重点、详细介绍 5G 无线网络中关键的技术：大规模天线阵列、新型多址、新型波形、全频谱接入和基于轨道角动量的无线传输技术。内容不仅包括各种无线关键技术的基本原理和技术特征，同时还对这些技术的性能进行了仿真和对比分析。

这些内容不仅对从事 TD-LTE 网络维护的工程技术人员有积极的指导意义，同时对高校的师生、设计研发人员有很好的参考意义。

全书共 12 章。

第 1 章简要对 5G 系统进行介绍，包括 5G 的基本需求、挑战、5G 无线关键技术等。

第 2 章对大 MIMO 系统进行总体介绍，包括大 MIMO 的机遇、大维度下的信道硬化、实现的技术挑战和解决方法。

第 3 章对大 MIMO 系统的编码与检测进行详细介绍，包括空间复用、空时编码、MIMO 检测等。

第 4 章对大 MIMO 信道模型进行详细介绍，包括分析信道模型、空间相关对

大 MIMO 性能的影响、信道模型标准化、早期对大 MIMO 的测量等，最后还对紧凑大天线阵列进行了介绍。

第 5 章对非正交多用户叠加与共享多址技术进行介绍，包括非正交多用户多址技术的基本原理和特征、下行非正交多用户传输、上行非正交多址技术等。

第 6 章对非正交多址的概念和设计进行介绍，包括 NOMA 概念、上/下行 NOMA 与 OAM 的比较、NOMA 的优势、NOMA 的设计原则，最后对上/下行 NOMA 的性能进行评估。

第 7 章对 5G 新波形技术进行了介绍，包括 5G 中的新波形：FBMC、UFMC、GFDM 和 f-OFDM、FTN 和新调制技术等。

第 8 章对灵活支持 5G 物理层的新波形 GFDM 进行介绍，包括 5G 应用场景对灵活波形的需求、GFDM 原理和性能、GFDM 的偏置 QAM 调制、预编码对灵活性的支持、GFDM 的发射分集、支持 LTE 资源栅格的 GFDM 参数化等。

第 9 章对基于毫米波通信的网络架构、模型和性能进行介绍，包括无线频谱、波束跟踪、具有角度变量的信道模型、UAB 网络架构、系统容量等。

第 10 章对毫米波无线传播特征进行介绍，包括其无线传播特征、传播模型和参数、链路预算分析等。

第 11 章对室外环境下的毫米波通信特征进行介绍，包括毫米波信道特征、毫米波传播模型等。

第 12 章对基于轨道角动量 OAM 的无线通信进行介绍，包括承载 OAM 的 EM 波、OAM 在通信中的应用、OAM 波束的产生、复用和检测、OAM 复用在无线通信中的应用等。

本书由赵绍刚、李岳梦编著，参与本书编写工作的还有田盛泰、金文研、庄浩、王粟、肖巍、周兴围，在此表示感谢！

希望本书能够对从事移动通信特别是从事 5G 网络维护、研发和设计的人员有一定的借鉴作用，由于作者水平有限，加上时间仓促，书中不妥之处请各位专家、同仁批评指正。在此深表感谢。

编著者

2017 年 3 月于北京

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

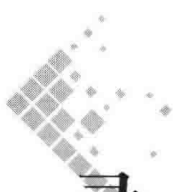
传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036



目 录

第 1 章 5G 简介：无线网关键技术	1
1.1 为什么需要 5G	1
1.2 什么是 5G	6
1.3 5G 的应用	8
1.4 5G 标准化	9
1.5 5G 的挑战	10
1.6 5G 网络关键技术	12
1.6.1 大规模天线阵列 (Massive MIMO) 技术	14
1.6.2 新型多址技术	15
1.6.3 新型波形技术	17
1.6.4 全频谱接入：毫米波技术	19
1.6.5 基于轨道角动量的传输技术	20
1.7 小结	21
参考文献	21
第 2 章 大规模天线阵列系统	23
2.1 大 MIMO 系统的优势	24
2.2 大维度下的信道硬化	25
2.3 技术挑战和解决方法	28
2.3.1 独立空间维度的有效性	28

2.3.2 大量天线和 RF 链路的放置	29
2.3.3 低复杂度的大 MIMO 信号处理	30
2.3.4 多小区操作	32
参考文献	33

第 3 章 大 MIMO 系统的编码与检测

3.1 空间复用	35
3.2 空时编码	36
3.2.1 空时分组码	37
3.2.2 高码率 NO-STBC	39
3.2.3 基于循环可除代数 (Cyclic Division Algebras, CDA) 的 NO-STBC	39
3.3 空间调制	41
3.3.1 SM 机制	41
3.3.2 SSK	42
3.3.3 GSM	43
3.4 大 MIMO 系统信号检测	48
3.5 系统模型	51
3.6 最优检测	52
3.7 线性检测	53
3.7.1 MF 检测器	53
3.7.2 ZF 检测器	54
3.7.3 MMSE 检测器	55
3.8 干扰抵消	56
3.8.1 V-BLAST 检测器	56
3.9 LR 辅助的线性检测	58
3.9.1 LR 辅助的检测	58
3.9.2 SA 算法	59

3.10 球译码	64
3.10.1 算法	65
参考文献	69
 第 4 章 大 MIMO 系统信道模型	70
4.1 分析信道模型	71
4.1.1 基于空间相关的信道模型	71
4.1.2 基于传播的信道模型	75
4.2 空间相关对大 MIMO 性能的影响	79
4.2.1 针孔效应	81
4.2.2 空间相关对局部搜索检测器性能的影响	82
4.3 信道模型标准化	85
4.3.1 IEEE 802.11 WiFi 模型	86
4.3.2 3GPP LTE 模型	87
4.4 大 MIMO 系统测量活动	89
4.4.1 12×15MIMO 室内测量	89
4.4.2 16×16MIMO 都市室外测量	90
4.4.3 32×64 室内测量	91
4.4.4 16×16 室内测量	91
4.4.5 16×32 室内测量	91
4.4.6 24×24 和 36×36MIMO 立方体	92
4.4.7 8×16 室外到室内测量	93
4.4.8 128 天线阵列的测量	94
4.5 紧凑天线阵列	95
4.5.1 PIFA	96
4.5.2 PIFA 作为阵元的紧凑天线阵列	98
4.5.3 MIMO 立方体	98
参考文献	100

第 5 章 非正交多用户叠加与共享多址技术	101
5.1 引言	101
5.2 非正交多用户多址技术的基本原理和特征	102
5.2.1 非正交多用户叠加改善频谱效率	102
5.2.2 非正交多用户多址技术支持大连接	105
5.3 下行非正交多用户传输	107
5.3.1 无 Gray 映射的直接叠加	107
5.3.2 具有 Gray 映射的叠加	108
5.4 上行非正交多址技术	117
5.4.1 LDS-CDMA/OFDM	118
5.4.2 SCMA	119
5.4.3 MUSA	122
5.4.4 PDMA	129
参考文献	131
第 6 章 非正交多址 (NOMA) 概念与设计	133
6.1 引言	133
6.2 NOMA 概念	135
6.2.1 下行 NOMA	135
6.2.2 上行 NOMA	137
6.3 NOMA 优势和驱动力	140
6.4 NOMA 接口设计	141
6.4.1 下行 NOMA	141
6.4.2 上行 NOMA	142
6.5 对 MIMO 的支持	145
6.5.1 下行 NOMA	145
6.5.2 上行 NOMA	149

6.6	NOMA 性能评估	150
6.6.1	下行 NOMA	151
6.6.2	上行 NOMA	158
6.7	小结	163
	参考文献	163
第 7 章	5G 中的新波形技术	165
7.1	新波形	165
7.1.1	滤波器组多载波 (Filter Bank Multi Carrier, FBMC)	166
7.1.2	通用滤波多载波 (Universal Filtered Multi Carrier, UPMC)	174
7.1.3	通用频分复用 (Generalized Frequency-Division Multiplexing, GFDM)	177
7.1.4	滤波 OFDM (Filtered OFDM, f-OFDM)	181
7.2	新调制	183
7.2.1	频率正交幅度调制 (Frequency and Quadrature Amplitude Modulation, FQAM)	184
7.3	超奈奎斯特通信 (Faster Than Nyquist, FTN)	185
7.4	无线完全双工技术	189
	参考文献	191
第 8 章	灵活支持 5G 物理层的新波形: GFDM	192
8.1	5G 应用场景对灵活波形的需求	194
8.1.1	比特管道通信	195
8.1.2	物联网 (Internet of Things, IoT)	196
8.1.3	触摸因特网	196
8.1.4	无线区域网 (Wireless Regional Area Network, WRAN)	197
8.2	GFDM 原理和性能	197

8.2.1	GFDM 波形	198
8.2.2	GFDM 的矩阵表示	200
8.2.3	连续干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC)	205
8.2.4	使用 Zak 变换的接收滤波器设计	206
8.2.5	低 OOB 辐射的解决方案	210
8.2.6	GFDM 符号差错率性能分析	214
8.3	GFDM 的偏置 QAM	221
8.3.1	时域 OQAM-GFDM	222
8.3.2	频域 OQAM-GFDM	225
8.4	使用预编码的增强灵活性	226
8.4.1	每个子载波的 GFDM 处理	226
8.4.2	每个子符号的 GFDM 处理	228
8.4.3	GFDM 的预编码	229
8.5	GFDM 的发射分集	233
8.5.1	时间反向 STC-GFDM	234
8.5.2	全面线性均衡器 (Widely Linear Equalizer, WLE)	
	STC-GFDM	240
8.6	支持 LTE 资源栅格的 GFDM 参数化	246
8.6.1	LTE 时频资源栅格	246
8.6.2	支持 LTE 时频栅格的 GFDM 参数	247
8.6.3	GFDM 信号与 LTE 信号的共存	249
8.7	GFDM 作为框架支持各种波形	250
8.8	小结	255
	参考文献	255

第 9 章 基于毫米波通信的网络架构、模型和性能 257

9.1	引言	257
9.2	频谱	258

9.3	波束跟踪	261
9.4	具有角度变量的信道模型	263
9.5	UAB 网络架构	268
9.5.1	以负荷为中心的回传 (Load-Centric Backhauling, LCB)	269
9.5.2	多频传输架构	272
9.6	系统容量	273
9.6.1	MIMO 预编码	273
9.6.2	性能评估	275
	参考文献	276
第 10 章	毫米波无线传播特征	278
10.1	引言	278
10.2	传播特性	279
10.2.1	高方向性	279
10.2.2	噪声受限的无线系统	281
10.3	传播模型和参数	283
10.3.1	路径衰耗模型	283
10.3.2	毫米波特定衰耗因子	285
10.4	链路预算分析	288
10.4.1	基于香农容量的计算	288
10.4.2	60GHz 毫米波基于 IEEE 802.11ad 基带参数的计算	289
10.5	小结	295
	参考文献	295
第 11 章	室外环境毫米波通信特征	297
11.1	引言	297
11.2	毫米波信道特征	299

11.2.1	自由空间传播	300
11.2.2	大尺度衰落	301
11.2.3	小尺度衰落	308
11.2.4	车载环境下的毫米波特性和	310
11.3	毫米波传播模型	312
11.3.1	基于几何的随机信道模型	312
11.3.2	封闭自由空间参考路径衰耗模型	313
11.3.3	射线跟踪仿真模型	316
	参考文献	316

第 12 章 基于轨道角动量（OAM）的无线通信318

12.1	承载 OAM 的 EM 波	318
12.2	OAM 到 RF 通信的应用	320
12.3	OAM 波束的产生、复用和检测	322
12.3.1	OAM 波束的产生和检测	322
12.3.2	OAM 波束的复用和解复用	324
12.4	使用 OAM 复用的无线通信	326
12.4.1	使用高斯波束和 OAM 波束的无线通信	326
12.4.2	使用 OAM 和极化复用的 32Gb/s 毫米波通信	326
12.4.3	空间复用和 OAM 复用组合的 16Gb/s 毫米波通信	328
12.4.4	OMA 信道的多径效应	332
12.4.5	基于贝塞尔波束的 OAM 通信	338
	参考文献	341

5G 简介：无线网关键技术

1.1 为什么需要 5G

在探讨第五代移动通信架构和特征之前，首先需要澄清设计这样一张网络的必要性。为此需要对之前的移动通信网络进行简单的介绍。1G 是第一代移动通信系统，其最高速率为 2.4kb/s。该网络提供语音呼叫仅限于国内，并且该网络基于模拟信号。1G 网络有很多缺点，如较差的语音质量、较差的待机续航能力、终端尺寸过大、容量受限、较差的切换可靠性等。第二代移动通信系统 2G 是基于 GSM 的蜂窝系统。该网络使用数字信号，其数据速率最高可达 64kb/s。该网络除了支持语音业务外，还支持短信、图片消息和彩信（Multimedia Message Service, MMS）。网络的质量和容量较 1G 有了很大的改善。但该网络的缺点是网络质量取决于较强的数字信号，并且该网络不支持复杂的数据处理，如图像等。随后网络演进到 2.5G，即通用分组无线网络（General Packet Radio Service, GPRS）。该网络的特征是既可以提供语音呼叫，还可以支持电子邮件消息的收发，可以支持 Web 浏览，其支持的数据为 64~144kb/s。随着 2000 年 3G 时代的来临，数据传输速率大大提升，从 144kb/s 增加到 2Mb/s。3G 的突出特征是可

以支持更快速的通信，可以发送和接收较大的邮件，并提供更快的 Web 浏览，支持视频会议、TV 媒体流和移动 TV。但 3G 的牌照非常昂贵，并且建设非常具有挑战性。需要较高的带宽、较大的蜂窝电话，其昂贵的终端是 3G 的缺点。4G 作为下一代通信网络，可以提供更快的数据速率和更高质量的视频流，并把 WiFi 和 Wimax 融合在一起。4G 网络可以提供 100Mb/s 到 1Gb/s 的速率。5G 希望能够较前几代网络有更大的优势，尤其是较 4G 有较大的改善。4G 中已经大大改善了业务质量（Quality of Service, QoS）和安全性，同时每比特成本也在下降。与前几代网络相比，4G 也存在一些问题，如较大的功耗（电池待机时长），难以部署、硬件过于复杂、设备成本过高等，所以上述问题急需通过下一代网络进行解决。5G 总体而言就是要提供完备的无受限的无线通信系统。5G 可以提供 Gb/s 量级的数据速率，可以支持多媒体报纸和具有高保真质量的 TV，更快的接通速度和更清楚的音/视频，支持交互多媒体业务。表 1.1 给出了各代移动通信系统的区别。图 1.1 给出了 5G 系统通过各种不同网络来构成一个完整网络。

表 1.1 不同移动通信系统之间的区别

网络	1G	2G/2.5G	3G	4G	5G
部署	1974/1984	1980/1999	1990/2002	2000/2010	2014/2020
带宽	2kb/s	14~64kb/s	2Mb/s	100Mb/s	10Gb/s
技术	模拟蜂窝	数字蜂窝	宽带 CDMA	全 IP 网络	新空口
业务	语音	语音、短信、数据	语音、视频、短信、数据	语音、视频、短信、数据、RCS	语音、视频、短信、数据、RCS
复用	FDMA	TDMA	CDMA	OFDM	NOMA
交换	电路	电路、分组	电路、分组	分组	分组
核心网	PSTN	PSTN	分组网	分组网	NFV
切换	水平	水平	水平	水平	水平、垂直

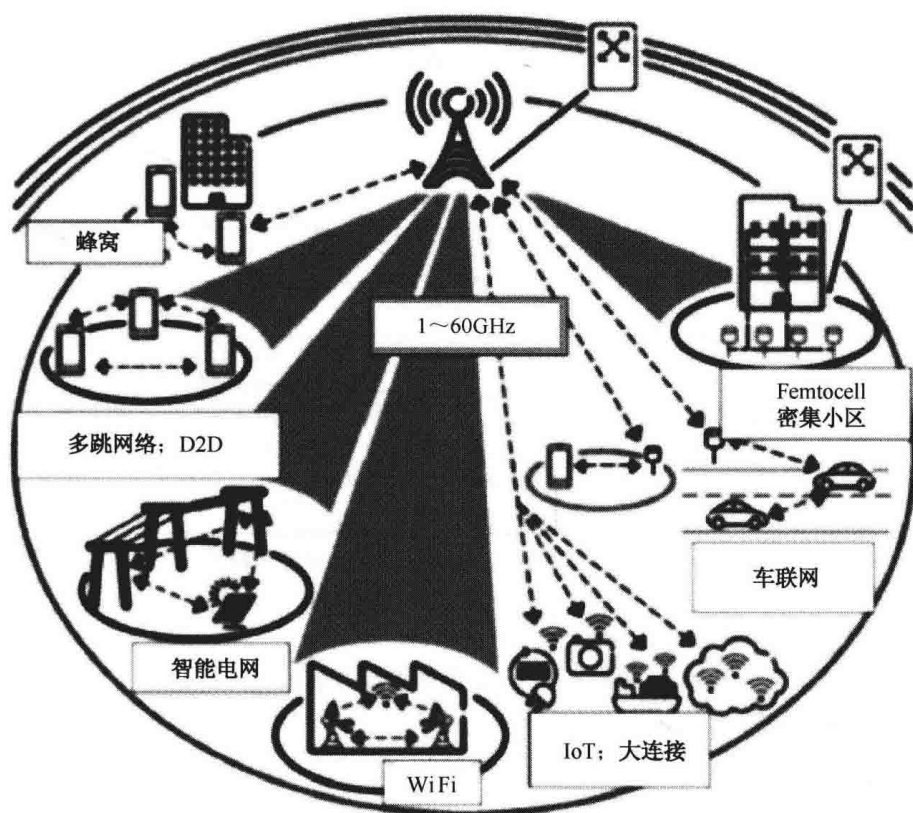


图 1.1 未来网络：多种无线/接入方案的融合

5G 与现在通信网络相比有以下期望。首先，5G 网络的主要目的是为更多用户提供更高数据速率业务。对于众多传感器应用而言，需要支持大量的同时连接。与 4G 相比，5G 网络的频谱效率应大大增强。该网络也需要与 4G LTE 和 WiFi 兼容，以提供高速率覆盖和具有低延时的平滑通信。图 1.2 给出了每月 IP 业务量的变化情况（单位 petabit）。从图 1.2 中可以清楚地看到，数据传输有非常大的需求，同时我们还希望新一代网络具有更高的灵活性。