

5G关键技术系列丛书

# 5G 新型多址技术

New Multiple Access Technologies for 5G Communication Systems

◆ 曾捷 栗欣 容丽萍 任斌 邢艳萍 梁林 编著

5G 关键技术系列丛书

# 5G 新型多址技术

New Multiple Access Technologies for 5G Communication Systems

◆ 曾捷 粟欣 容丽萍 任斌 邢艳萍 梁林 编著



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

5G新型多址技术 / 曾捷等编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2017. 6

(5G关键技术系列)

ISBN 978-7-115-45692-2

I. ①5… II. ①曾… III. ①无线电通信—多址通信  
IV. ①TN914.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第164067号

## 内 容 提 要

本书从多址技术的发展历程出发,指出随着无线通信的发展,传统的正交多址接入方式在支持超高系统接入容量、超低时延和海量用户连接方面遇到了瓶颈,因此,面向5G的新型多址技术被提出并引起了工业界和学术界的广泛重视。本书具体介绍了由移动通信行业领先企业提出的SCMA、PDMA、MUSA、NOMA、RSMA、IGMA等新型多址技术,涵盖了技术原理、传输方案、关键技术、原型开发及测试评估等方面。最后,探讨了新型多址技术在5G中的应用,特别是其在eMBB、URLLC和mMTC三大典型应用场景中的核心优势、上下行方案和性能评估等方面。

本书适合信息通信专业技术人员和管理人员使用,也可作为高等院校通信、电子、计算机、自动化等专业硕士、博士研究生的参考书。

---

◆ 编 著 曾 捷 粟 欣 容丽萍 任 斌  
邢艳萍 梁 林  
责任编辑 代晓丽  
执行编辑 刘 琳  
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>  
三河市潮河印业有限公司印刷

◆ 开本: 880×1230 1/32  
印张: 5.75 2017年6月第1版  
字数: 155千字 2017年6月河北第1次印刷

---

定价: 59.00元

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

反盗版热线: (010)81055315

# 《5G 新型多址技术》编委会

## 主 编

清华大学：曾 捷 粟 欣

## 副 主 编

清华大学：容丽萍 刘 蓓

大唐电信（电信科学技术研究院）：任 斌 邢艳萍

中国电信：梁 林

高通公司：曹一卿 李 俨

## 参编人员

清华大学：孔 丹 肖驰洋 林小枫

大唐电信（电信科学技术研究院）：孙韶辉 康绍莉

高秋彬 李 铁 赵 铮

中国电信：朱剑驰 杨 姗

高通公司：曾 威 季庭方 陈万士

## 前 言

在移动通信系统的快速发展过程中，多址接入技术一直发挥着至关重要的作用。在从第一代到第四代的演进过程中，移动通信系统分别采用了频分多址（Frequency Division Multiple Access, FDMA）、时分多址（Time Division Multiple Access, TDMA）、码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）以及正交频分多址（Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA）技术。可以认为上述多址技术主要采用了正交的时频域资源分配方式，但是在即将商用的第五代（5G）移动通信系统中，传统的正交多址接入方式在有限的频谱效率和复杂的正交资源调度约束下，难以满足超高系统接入容量、超低时延和海量用户连接这些关键指标。基于此，一系列基于非正交时频资源分配方式的新型多址技术被提出和加速研究，试图解决 5G 的瓶颈问题。

国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）和第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）已经在积极推动 5G 规范的制订工作并主导了多种关键技术（包括新型多址技术）的讨论和评估，得到了通信领域各单位的积极响应。多家单位提案中涉及的新型多址技术通过在不同维度（如码域、功率域、交织域等）处理将多用户信号在时频资源上进行非正交叠加，实现在有限的频谱资源上复用更多的用户。因此，新型多址技术不仅能够有效提升系统频谱效率，还可成倍提高系统的接入容量。同时，基于免调度传输，新型多址接入技术还可以通过简化信令流程来有效地降低空中接口传输时延。这样，新型多址技术可以通过恰当的匹配性方案设计，来满足未来存在于 5G 的增强移动宽带

(enhanced Mobile BroadBand, eMBB)、低时延高可靠通信(Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC)和海量机器类通信(massive Machine Type Communications, mMTC)这些典型应用场景下多样化的需求。

本书从多址技术的概述出发,引出并介绍了5G新型多址技术的原理、核心候选技术和潜在应用场景。第1章首先介绍多址技术的发展历程和新型多址技术的研究现状,指出新型多址技术在全球5G标准化过程中扮演了重要的角色并且得到了绝大部分5G推进组织的重视,同时在工业界和学术界得到了广泛的研究。第2章阐述新型多址技术的基础原理,从理论角度分析它的上下行容量,并从设计角度描述关键的发送方案和接收技术,包括通过在不同维度的处理来支持多用户信息叠加的发送方案设计,以及支持多用户间干扰消除的先进接收机设计。第3章介绍引起业界高度关注的多个有望进入5G标准的新型多址技术,它们分别由引领移动通信行业发展的华为、大唐电信、中兴、NTT DoCoMo、高通、三星等公司提出,本书从其技术原理、传输方案、核心技术、原型开发和测试评估等方面将它们详细展示给读者。第4章针对5G的3种典型应用场景(eMBB、URLLC和mMTC),分别给出现阶段新型多址技术的具体应用方案和多家单位提交3GPP讨论的性能评估结果,通过展示采用新型多址技术带来的显著增益,验证其在5G典型应用场景中的可行性。

本书的写作团队来自于国内外知名的高校和通信企业,长期以来一直致力于移动通信相关研究、开发和标准化工作,具有承担众多国家级科研项目的丰富经验,也亲自参与和推动了移动通信的标准化工作,对新型多址技术从理论和技术到实现和标准化都有很好的理解。

在此特别感谢积极参与本书编写和校对工作的同事和同学,分别是清华大学的刘蓓、孔丹、肖驰洋、林小枫,大唐电信(电信科学技术研究院)的孙韶辉、康绍莉、高秋彬、李铁、赵铮,中国电信的朱剑驰、杨姗,以及高通公司的曹一脚、李俨、曾威、季庭方、陈万士。

同时，本书在撰写过程中得到了国内外新型多址技术领域多位顶尖教授专家的宝贵意见和建议，包括北京邮电大学的吕铁军、高晖，清华大学的彭克武，三星公司的孙程君、喻斌、钱辰，华为公司的吴艺群、陈雁、王轶，以及中兴公司的袁弋非等，在此一并感谢。

非常感谢国家“863”计划课题（编号：2015AA01A709）对本书的资助。

最后，衷心感谢家人对作者工作的理解和大力支持。

作者

2017年3月于北京

# 目 录

第 1 章 多址技术概论	1
1.1 多址技术发展历程	2
1.1.1 频分多址	2
1.1.2 时分多址	3
1.1.3 码分多址	4
1.1.4 正交频分多址	5
1.1.5 5G 新型多址	5
1.2 新型多址技术研究现状	6
1.2.1 标准化进展	6
1.2.2 各国研究现状	8
1.2.3 工业界研究现状	12
1.2.4 学术界研究现状	15
参考文献	19
第 2 章 新型多址技术理论基础	25
2.1 新型多址技术概述	26
2.2 新型多址技术的容量分析	30
2.2.1 上行多址接入信道容量分析	30
2.2.2 下行广播信道容量分析	33
2.3 新型多址技术发端设计	35
2.3.1 空口设计	35
2.3.2 与 MIMO 结合设计	39



2.3.3	星座设计	41
2.4	先进接收机设计	43
2.4.1	最优接收机	43
2.4.2	IC 接收机	43
2.4.3	BP 接收机	45
2.4.4	BP-IDD 接收机	46
2.4.5	BP-IDD-IC 接收机	48
2.4.6	IS 接收机	49
	参考文献	50
<b>第 3 章</b>	<b>5G 候选新型多址技术</b>	<b>53</b>
3.1	SCMA	54
3.1.1	技术原理	54
3.1.2	传输方案和关键技术	56
3.1.3	仿真评估及性能分析	59
3.1.4	原型开发和测试评估	64
3.2	PDMA	65
3.2.1	技术原理	65
3.2.2	传输方案和关键技术	70
3.2.3	仿真评估及性能分析	75
3.2.4	原型开发和测试评估	82
3.3	MUSA	84
3.3.1	技术原理	84
3.3.2	传输方案和关键技术	85
3.3.3	仿真评估及性能分析	86
3.3.4	原型开发和测试评估	90
3.4	NOMA	93
3.4.1	技术原理	93
3.4.2	传输方案和关键技术	95
3.4.3	仿真评估及性能分析	98

3.4.4 原型开发和测试评估 .....	104
3.5 RSMA .....	105
3.5.1 技术原理 .....	105
3.5.2 传输方案和关键技术 .....	107
3.5.3 仿真评估及性能分析 .....	108
3.6 IGMA .....	115
3.6.1 技术原理 .....	115
3.6.2 传输方案和关键技术 .....	117
3.6.3 仿真评估及性能分析 .....	122
3.7 其他候选多址技术 .....	127
3.7.1 BDM .....	127
3.7.2 IDMA .....	129
3.7.3 LSSA .....	131
3.7.4 NOCA .....	132
3.7.5 NCMA .....	133
3.7.6 小结 .....	135
参考文献 .....	135
<b>第 4 章 新型多址技术在 5G 中的应用 .....</b>	<b>141</b>
4.1 支持 eMBB 场景 .....	143
4.1.1 eMBB 场景概述 .....	143
4.1.2 新型多址在 eMBB 场景中的应用 .....	144
4.1.3 新型多址在 eMBB 场景中的性能评估 .....	147
4.2 支持 URLLC 场景 .....	149
4.2.1 URLLC 场景概述 .....	149
4.2.2 新型多址在 URLLC 场景中的应用 .....	150
4.2.3 新型多址在 URLLC 场景中的性能评估 .....	153
4.3 支持 mMTC 场景 .....	154
4.3.1 mMTC 场景概述 .....	154
4.3.2 新型多址在 mMTC 场景中的应用 .....	160

4.3.3 新型多址在 mMTC 场景中的性能评估·····	162
参考文献·····	165
中英文对照·····	169
名词索引·····	171



# 第1章

## 多址技术概论

1.1 多址技术发展历程

1.2 新型多址技术研究现状

## 1.1 多址技术发展历程

多址通信是多个用户使用一个公共信道实现多用户间通信的通信方式。多址接入技术是无线通信物理层的核心技术之一。第一代（1G）移动通信系统的频分多址（Frequency Division Multiple Access, FDMA）、第二代（2G）移动通信系统的时分多址（Time Division Multiple Access, TDMA）、第三代（3G）移动通信系统的码分多址（Code Division Multiple Access, CDMA）以及第四代（4G）移动通信系统的正交频分多址（Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA）都采用正交资源分配方式。而面向 2020 年及未来，第五代（5G）移动通信系统不仅需要提升系统频谱效率，还需要具备支持海量设备连接的能力，5G 多址技术的资源利用必须更加灵活高效，新型多址技术就是在这一背景下提出的。

### 1.1.1 频分多址

20 世纪 80 年代，1G 模拟蜂窝移动通信系统实现大规模商用，其典型代表有美国的高级移动电话系统（Advanced Mobile Phone System, AMPS）、英国的全接入通信系统（Total Access Communications System, TACS）以及北欧的移动电话系统（Nordic Mobile Telephony System, NMTS）等。1G 的主要技术为模拟调制和 FDMA 技术。FDMA 技术原理如图 1-1 所示，将信道频带分割为若干互不相交的频带（称为子频带），并把每个子频带分给一个用户专用，即不同的用户分配在时隙相同而频率不同的信道上。信道之间通常需要设置保护频带，以抵消非理想滤波器、邻道干扰及由多普勒频移导致的频谱扩展<sup>[1]</sup>。基于 FDMA 技术的模拟蜂窝系统具有频谱利用率低、系统保密性差、抗干扰能力差等缺点，因此在日益激烈的市场环境中逐渐被淘汰。

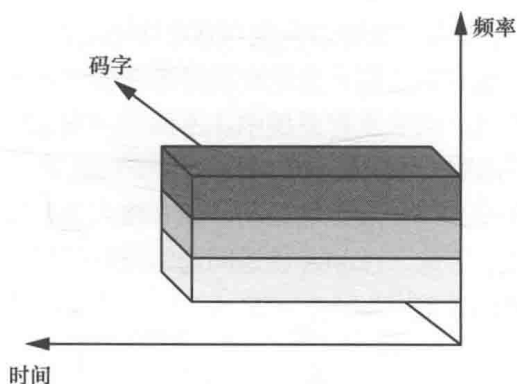


图 1-1 频分多址技术

### 1.1.2 时分多址

20 世纪 90 年代蓬勃发展的 2G 是窄带数字蜂窝系统，以美国的数字化高级移动电话系统（Digital AMPS, DAMPS）、IS-95 和欧洲的全球移动通信系统（Global System for Mobile communication, GSM）为代表，采用 TDMA 或窄带 CDMA 技术。如图 1-2 所示，在 TDMA 中，传输时间被划分为不同时间隙，用户的收发分别使用一个指定的时间隙，且不同用户不能同时发送信息，即不同用户在相互正交的时间隙上传输。

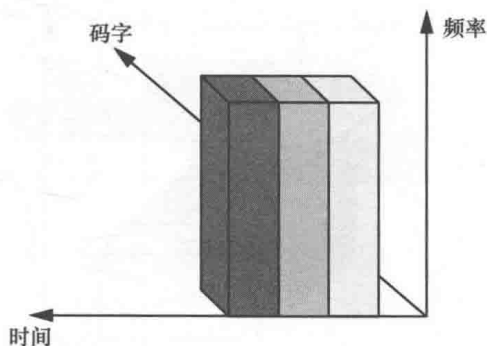


图 1-2 时分多址技术

TDMA 的一个主要难点在于对不同用户间同步的需求。在下行系

统中,所有信号由相同的发射器产生并且经历相同的信道到达接收端。对于平坦衰落信道,若各用户在正交的时隙传输,则接收到的信号在时间上也是正交的。而在上行系统中,不同用户发送信号经历不同的信道,时延各不相同,因此上行 TDMA 需要同步过程以保证接收到的信号在时间上正交。同步通常需要基站或者接入点之间的协作,由此带来较大的开销。因此,TDMA 信道间通常采用保护间隔以弥补同步误差和多径带来的影响<sup>[1]</sup>。

### 1.1.3 码分多址

1996年,国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)确定3G的官方名称为IMT-2000。3G的主要通信制式包括CDMA2000、宽带码分多址(Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA)和时分同步码分多址(Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA)。CDMA是3G的技术基础。在CDMA技术中,采用带宽远大于信号带宽的伪随机扩频序列对原信号进行扩展,然后经载波调制后发送。在接收端,采用相同的伪随机扩频序列将宽带信号解扩得到原信号。如图1-3所示,不同用户选择不同的扩频码序列,占用相同的时频资源。某一用户的接收机虽然能接收到所有用户的叠加信号,但是不能解出其他用户的信号。

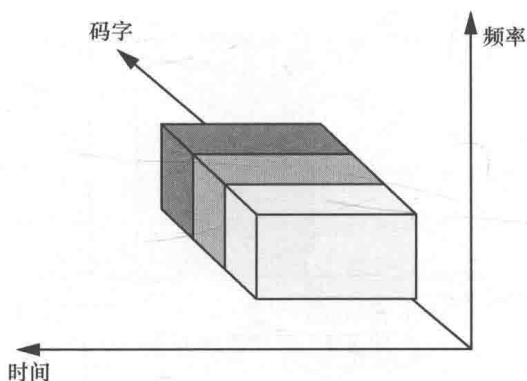


图 1-3 码分多址技术

CDMA 下行一般采用正交扩频码，如 Walsh-Hadamard 码，而在上行一般采用非正交扩频码。CDMA 上行使用非正交扩频码可提高用户接入数，但同时会带来用户间的干扰。此外，由于各用户的上行信道增益不同，到达接收端的功率也不同，因此需要进行功率控制以避免远近效应<sup>[1]</sup>。

#### 1.1.4 正交频分多址

OFDMA 是在正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术的基础上发展起来的一种多址接入方式。由于在 OFDM 调制中子载波之间相对独立，每个子载波都可以被指定一个特定的调制方式和发射功率。如图 1-4 所示，OFDMA 通过为每个用户在不同的时隙提供不同的可用子载波实现多用户接入，并以子载波的频率来区分用户。由此可见，OFDMA 结合了 FDMA 和 TDMA 的特点。但与 FDMA 不同，OFDMA 不需要在各个用户频率之间采用保护频段，而且每个用户使用的子载波不一定连续，因此大大提高了系统的频率利用率。

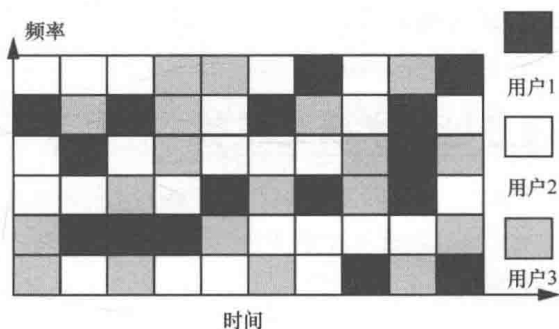


图 1-4 正交频分多址技术

#### 1.1.5 5G 新型多址

为了满足更高频谱效率、更大容量、更多用户连接数，以及更



低时延等 5G 网络需求, 5G 多址技术的资源利用必须更加灵活高效<sup>[2]</sup>。从 1G 到 4G 的多址接入主要采用正交的资源分配方式, 接入用户数受资源数的限制, 无法满足 5G 海量连接的业务需求。为实现在有限的资源上接入更多的用户, 5G 新型多址技术在发送端通过不同维度(如码域、功率域、交织域等)处理将多用户信号在时频资源上进行非正交叠加, 而在接收端通过先进的多用户检测技术实现多用户信号的分离。新型多址接入技术通过在相同资源上复用多个用户, 大大增加了网络中的用户连接数。由于用户有更多机会接入, 网络整体吞吐量和频谱效率也得到了提升。此外, 采用新型多址接入技术可以更好地实现免调度接入, 实现低时延通信, 降低设备功耗。可见, 新型多址技术相比传统的正交接入技术, 能够更好地满足 5G 海量连接、低时延及低功耗等的业务场景。

目前, 业界提出的候选新型多址技术主要包括: 功率域非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)、图样分割多址接入(Pattern Division Multiple Access, PDMA)、稀疏码分多址接入(Sparse Code Multiple Access, SCMA)、多用户共享接入(Multi-User Shared Access, MUSA)和交织网格多址接入(Interleave-Grid Multiple Access, IGMA)等。

## 1.2 新型多址技术研究现状

### 1.2.1 标准化进展

国际电信联盟无线电通信部门(ITU-Radio Communications Sector, ITU-R)作为国际电信联盟中专门制定无线电通信相关国际标准的组织, 先后制定了 IMT-2000(3G)和 IMT-Advanced(4G)的规范。目前, ITU-R 已经着手推动 5G 规范的制定工作, 并由 WP5D(Working Park 5D)小组负责 5G 的相关事宜。WP5D 针对 IMT-2020