



国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程
网络强国建设

5G 丛书

Non-Orthogonal Multiple
Access (NOMA) for 5G NR

5G 非正交多址技术

袁弋非 袁志锋 著

非
正
交
多
址
技
术

★ ★ ★ ★
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程

网络强国建设

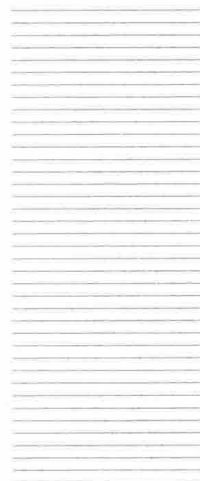
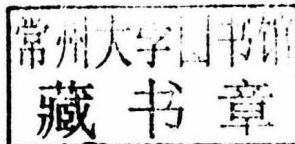
5G 丛书



5G 非正交多址技术

Non-Orthogonal Multiple
Access (NOMA) for 5G NR

袁弋非 袁志锋 著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

5G非正交多址技术 / 袁弋非, 袁志锋著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2019.9

(5G丛书)

国之重器出版工程

ISBN 978-7-115-51778-4

I. ①5… II. ①袁… ②袁… 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171897号

内 容 提 要

本书以 5G 主要应用场景和性能指标为切入点, 分别对下行非正交传输和上行非正交接入进行了详细的描述。下行非正交传输的介绍以 3GPP 正在标准化的方案为主, 兼带其他潜在技术。下行非正交传输除单播传输, 还包括广播/多播的场景。上行非正交接入以海量物联网场景为主, 突出免调度接入来降低信令开销、终端功耗和接入时延。本书重点介绍了几种主要的上行方案的原理、性能仿真和接收机复杂度分析。

本书适合从事无线通信的科技人员, 工科大学教授和研究生阅读, 同时也可作为工程技术及科研教学的参考书。

-
- ◆ 著 袁弋非 袁志锋
责任编辑 李 强
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: 720×1000 1/16
印张: 20 2019 年 9 月第 1 版
字数: 369 千字 2019 年 9 月河北第 1 次印刷
-

定价: 118.00 元

读者服务热线: (010) 81055493 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

《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	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



序 言

5G 移动通信不仅作为战略性高技术产业的热点受到各国的高度关注，还因其增强移动宽带、高可靠低时延和大连接的应用场景激发社会的期待，对于通信行业而言，更感兴趣于 5G 通过集成先进无线与网络技术实现了网络的创新升级。在蜂窝移动通信中，一个蜂窝可同时支持的用户数和流量是衡量通信效率的重要指标，支持多用户复用的技术称为多址复用技术。前几代移动通信技术的演进以多址技术的发展作为重要表征，1G 是频分多址（FDMA）、2G 主要是时分多址（TDMA）、3G 是码分多址（CDMA）、4G 是正交频分多址（OFDMA）。多址复用技术也是 5G 的关键支撑技术，但 5G 并不是单一的多址技术，对于增强移动宽带业务，5G 下行物理层将采用带循环前缀的 OFDM（CP-OFDM），但上行物理层将采用离散傅里叶变换的扩谱正交频分复用（DFT-s-OFDM）。对于低速率的大连接业务，OFDMA 方式开销大和效率低，非正交多址（NOMA）技术应运而生，多个非正交用户同频同时复用在同一信道，在接收端用干扰消除技术分离出用户所需的有用信号。目前已经出现多种 NOMA 技术提案，包括多用户共享接入（MUSA）、稀疏码分多址接入（SCMA）、资源扩展多址接入（RSMA）和图样分割多址接入（PDMA）等，各有特点，目前标准化还在进行中。

本书并不局限于上述多种非正交多址技术，而是从非正交多址的底层技术入手，分析在下行单播与多播/广播两大类场景下的应用特点，比较直接符号叠加、镜像变换叠加、比特分割这几种多址复用方式。对于上行非正交接入，本书重点介绍免调度方式，包括非竞争与竞争两类方案的设计与算法。

现在有不少书介绍 5G 无线与网络技术，但还没有专门讨论非正交多址技



术的书，本书专注于研究非正交多址的基础技术，从原理出发，有数据分析、基本算法、仿真方法和评估方式等。本书条理清晰，语言通俗，资料翔实，既是一本信息技术科普著作，也可作为通信专业教学参考书，相信本书将有助于吸引更多的通信界专业人员从事新型多址技术的研究，这不仅对完善 5G 的标准化有重要意义，也将是未来下一代移动通信值得关注的技术方向。

中国工程院院士



前言

非正交多址 (NOMA) 是 5G 物理层重要的基础技术之一。通过多用户在相同时/频域上的叠加传输,系统容量和负载的用户数能够得到显著的提升。与 4G 蜂窝通信系统类似,5G 的多址方式仍然以正交的 OFDM 为主,但是非正交多址技术作为正交多址技术的一个互补,既适用于基于调度的传输,也适用于免调度/竞争式的传输。其应用场景包括海量物联网 (mMTC)、增强的宽带移动 (eMBB) 的小包业务以及高可靠低时延通信 (URLLC),因此无论在工业界还是学术界都得到广泛的关注。国际标准组织 3GPP 在 2015—2016 年 (Release 14),对下行非正交技术进行了研究和标准化工作。基于 5G 新空口,3GPP 于 2017 年正式立项研究 NOMA,重点是上行免调度传输。在整个研究过程中,众多公司积极参与,解决方案“百花齐放”。3GPP 中的 NOMA 研究项目于 2018 年年底完成,部分内容在后续的两步随机接入 (2-Step RACH) 工作项目中进行标准化。

中国公司在非正交多址技术上起步较早,积累较深厚。在 IMT-2020 (5G) NOMA 无线技术专题组,中兴、华为和大唐早在 2014 年就提出了 MUSA、SCMA 和 PDMA 等技术,并进行了大量的前期研究。这些都激励了更多中外公司的参与,对之后的 NOMA 在 3GPP 中的立项起了促进作用,中兴也成为研究项目的报告人 (Rapporteur) 公司。

本书对 3GPP 中的非正交多址技术做了相对全面的介绍,包含 Release 14 的下行多用户叠加传输 (MUST) 和 5G NR Release 16 的上行非正交多址中的各类技术和设计方案。叙述的顺序是由基础的学术理论出发,从原理到实践,然后详细阐述其设计思想和工程意义,最后落实到相关的标准协议,并配有丰



富的链路级和系统级的仿真结果。所面向的读者包括无线通信工程技术人员，以及科研院校的师生。

本书由中兴通讯的袁弋非和袁志锋等人编著。其中，第 1 章主要由袁弋非撰写；第 2 章主要由袁弋非、袁志锋、戴建强和唐红撰写；第 3 章主要由袁弋非、唐红和李卫敏撰写；第 4 章主要由戴建强和袁弋非撰写；第 5 章主要由袁弋非、袁志锋、张楠、李卫敏、栗子阳、郭秋瑾和李剑撰写；第 6 章主要由袁弋非、袁志锋、田力、黄琛、胡宇洲、严春林和栗子阳撰写；第 7 章主要由栗子阳、郭秋瑾、唐红、李卫敏、李剑、袁弋非、黄琛和田力撰写；第 8 章主要由张楠、曹伟、袁志锋、戴建强、栗子阳、唐红、李卫敏、李剑和马一华撰写。全书由袁弋非和袁志锋等统筹规划。在此我们感谢王欣晖、杜忠达、胡留军、郁光辉、柏刚、耿鹏、孙波、韩玮等专家的大力支持；感谢清华大学的戴凌龙老师、彭克武老师、粟欣老师和上海交通大学陈文老师的支持；感谢 IMT-2020 (5G) NOMA 无线专题组中的各成员单位，包括中国信息通信研究院、华为、大唐、中国移动、高通、三星、NTT DOCOMO、诺基亚、爱立信等的技术贡献！最后，还要感谢人民邮电出版社的鼎力支持和高效工作。

本书是基于作者的有限视角对 5G 非正交多址技术的研究和标准化的理解，观点难免有欠周全之处。对于书中存在的叙述不当的地方，敬请读者谅解，并提出宝贵意见。

作者

2019 年 5 月



目 录

第 1 章 背景介绍	001
1.1 前几代蜂窝通信的演进	002
1.2 第五代蜂窝通信的系统要求	004
1.2.1 主要场景	005
1.2.2 关键性能指标	006
1.2.3 性能评估方法	007
1.3 下行非正交多址的主要方案	008
1.4 上行非正交多址的主要方案	008
参考文献	009
第 2 章 下行非正交传输技术	011
2.1 下行非正交传输的基本原理	012
2.2 仿真评估方法	018
2.2.1 链路仿真参数及评定指标	018
2.2.2 链路到系统的映射方法	020
2.2.3 系统仿真参数	024
2.2.4 调度算法	027
2.3 直接符号叠加	029
2.3.1 发射侧过程	030
2.3.2 接收机算法	031
2.4 灵活功率比的 Gray 叠加	033



2.4.1	发射侧过程	033
2.4.2	接收机算法	037
2.5	比特分割	037
2.5.1	发射侧过程	039
2.5.2	接收机算法	039
2.6	性能评估	040
2.6.1	链路性能	040
2.6.2	系统性能	042
2.7	其他技术	048
	参考文献	050
第 3 章	下行广播/多播的非正交传输	051
3.1	应用场景	052
3.2	LTE 物理多播信道 (PMCH) 简介	053
3.3	广播/多播业务的非正交传输	056
3.4	仿真性能分析	057
	参考文献	062
第 4 章	下行叠加传输的标准化	063
4.1	下行非正交传输方案的融合	065
4.2	支持 MUST 传输的下行物理控制信令的概述	070
4.3	MUST Case 1/2 信令	076
4.4	MUST Case 3 信令	077
	参考文献	081
第 5 章	上行非正交接入概述	083
5.1	免调度接入	084
5.1.1	场景分析	084
5.1.2	基本过程	091
5.2	仿真评估方法简介	098
5.2.1	链路仿真总体配置及评定指标	098
5.2.2	系统仿真总体配置及评定指标	099
5.3	发射侧方案和接收机类型简介	102



参考文献	105
第 6 章 上行发射侧方案和接收机算法	107
6.1 基于短码的线性扩展和典型接收算法	108
6.1.1 设计的基本原理	109
6.1.2 各类具体码本的介绍	117
6.1.3 符号级加扰	133
6.1.4 MMSE Hard-IC 接收机算法及复杂度分析	135
6.2 基于比特级的处理和典型的接收算法	148
6.2.1 发射方案介绍	148
6.2.2 ESE + SISO 接收机算法及复杂度分析	159
6.3 基于多维调制的扩展和典型接收算法	168
6.3.1 SCMA 方案介绍	168
6.3.2 EPA + SISO 接收机算法及复杂度分析	173
6.4 Multi-Branch 传输	182
参考文献	187
第 7 章 上行非竞争式免调度的性能评估	191
7.1 仿真评估参数	192
7.1.1 链路仿真参数	192
7.1.2 链路到系统映射模型	198
7.1.3 系统仿真参数	206
7.2 链路性能分析	209
7.2.1 中低频谱效率情形	210
7.2.2 高频谱效率情形	217
7.3 系统性能分析	229
7.3.1 海量物联网场景	229
7.3.2 eMBB 小包业务场景	237
7.3.3 低时延高可靠场景	240
7.4 波形峰均比	244
7.4.1 CP-OFDM 波形	244
7.4.2 DFT-s-OFDM 波形	246
参考文献	250



第 8 章 支持上行竞争式免调度接入的设计和性能评估	251
8.1 竞争式免调度接入过程	252
8.2 Preamble + Data 信道结构	253
8.2.1 备选的信道结构	253
8.2.2 信道各部分的功能描述	255
8.2.3 基本设计问题	257
8.3 Data-only 方案	259
8.3.1 信道结构	260
8.3.2 接收机算法	261
8.4 DM-RS 增强	280
8.5 性能评估参数和方法	284
8.5.1 链路仿真参数	284
8.5.2 链路到系统映射模型	285
8.6 性能评估结果	290
8.6.1 链路仿真结果	290
8.6.2 系统仿真结果	296
参考文献	298
缩略语	301



第 1 章 背景介绍

前 几代蜂窝通信基本上都是采用正交多址的方式。在第五代移动通信中，非正交多址作为物理层的关键基础技术，弥补了正交多址的不足，更加有效地支持 5G 丰富的部署场景：eMBB、URLLC 和 mMTC。不仅可以增加下行调度系统的频谱效率，还能大大提升上行免调度场景下的用户连接数和系统吞吐。



| 1.1 前几代蜂窝通信的演进 |

无线资源是有限的，蜂窝通信从发展之初就一直以提高频谱利用效率为目标。AT&T 贝尔实验室于 1968 年提出蜂窝通信的思想，即采用类似蜂窝六边形的小区，彼此相连，构成连续覆盖的网络。小区之间可以复用频谱资源，使网络的容量成倍增长。在这几十年中，蜂窝通信飞速发展，频谱效率、用户速率以及系统容量都有若干数量级的增加，其间经历了四代的演进。虽然年代的划分需要在最高速率、系统带宽、系统容量/频谱效率、业务等方面有较大的飞跃，但是每次的更迭都是以新的多址技术为标志，如表 1-1 所示。

表 1-1 前几代蜂窝通信的多址技术演进

蜂窝通信的代别	第一代	第二代	第三代	第四代
多址技术特征	频分复用 (FDMA)，固定占用	时分复用 (TDMA) 为主，如 GSM 系统；少量系统采用码分复用，如 IS-95	基本为码分复用 (CDMA)，在演进版中融入时分复用以有效支持数据业务	以正交频分复用 (OFDM) 为主，包含时分复用，部分控制信道和参考信号存在码分复用