



工业和信息产业科技与教育专著出版资金资助出版

5G技术丛书

大规模MIMO传输 理论与关键技术

金 石 温朝凯 高飞飞 江 涛 © 编著



中国工信出版集团

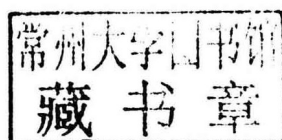


电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息产业科技与教育专著出版资金资助出版
5G 技术丛书

大规模 MIMO 传输理论 与关键技术

金 石 温朝凯 高飞飞 江 涛 编著



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书主要内容为大规模 MIMO 传输理论与关键技术,详细介绍了大规模 MIMO 的基本概念、基本原理、关键技术、原型验证平台以及最新进展。全书共 9 章,内容包括 MIMO 无线通信系统发展、大规模 MIMO 系统信息论基础及信道容量分析、大规模 MIMO 空分多址传输、大规模 MIMO 多用户调度技术、大规模 MIMO 信道估计与导频设计、大规模多天线接收机、毫米波大规模 MIMO 技术、大规模 MIMO 原型验证平台设计和应用、以及大规模 MIMO 技术最新进展。

本书可作为高等学校通信工程、信息工程、电子工程和其他相近专业的教材,也可以作为通信工程技术人员和科研人员的参考书。

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

大规模 MIMO 传输理论与关键技术 / 金石等编著. —北京: 电子工业出版社, 2018.7

ISBN 978-7-121-34264-6

I. ①大… II. ①金… III. ①移动通信—通信系统 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 109388 号

策划编辑: 窦 昊

责任编辑: 谭丽莎 特约编辑: 周宏敏

印 刷: 辽宁泰阳广告彩色印刷有限公司

装 订: 辽宁泰阳广告彩色印刷有限公司

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: 787×1092 1/16 印张: 16.25 字数: 416 千字

版 次: 2018 年 7 月第 1 版

印 次: 2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 89.00 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 zltz@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: (010)88254466, douhao@phei.com.cn。

5G 技术丛书专家委员会

专家委员会主任

邬贺铨：中国工程院院士，IMT-2020（5G）推进组顾问

专家委员会副主任

刘韵洁：中国工程院院士，中国联合网络通信集团有限公司

丛书特别顾问

张乃通：中国工程院院士，哈尔滨工业大学

专家委员会委员

曹淑敏：IMT-2020（5G）推进组组长，中国信息通信研究院原院长

张新生：中国通信学会副理事长，未来移动通信论坛常务副理事长

侯自强（中国科学院声学研究所）

王晓云（中国移动通信集团公司）

毕奇（中国电信股份有限公司）

赵先明（中兴通讯有限公司）

童文（华为技术有限公司）

陈山枝（大唐电信科技产业集团）

张平（北京邮电大学）

尤肖虎（东南大学）

李少谦（电子科技大学）

王京（清华大学）

李建东（西安电子科技大学）

5G 技术丛书编审委员会

编审委员会主任

杨 旻（中国科学院上海微系统与信息技术研究所）

编审委员会委员

杨峰义（中国电信股份有限公司）

王映民（大唐电信科技产业集团）

陶小峰（北京邮电大学）

张钦宇（哈尔滨工业大学）

金 石（东南大学）

季新生（解放军信息工程大学）

李云洲（清华大学）

葛晓虎（华中科技大学）

武 刚（电子科技大学）

王海明（东南大学）

徐 景（上海无线通信研究中心）

邬贺铨院士之序

Introduction

电子工业出版社从我国大力推动第五代移动通信系统 (IMT-2020, 又称 5G) 研究的背景出发, 通过充分调研和认真组织, 策划出版“5G 技术”丛书, 以期及时总结、深入分析和充分反映我国在新的无线通信国际标准制定过程中的最新进展。丛书将按照 5G 关键技术和 5G 系统设计与应用两个层面分成两卷, “关键技术卷”各分册主要从理论和技术层面对 5G 关键候选技术进行具体详实的分析和介绍, “系统设计与应用卷”各分册主要从系统和应用层面对 5G 总体架构以及关键方法的评估和应用进行深入分析和描述, 各分册的作者都是国内活跃在相关研究领域的优秀中青年科研工作者, 具有较强的理论研究积累和实践经验, 目前又都承担了与 5G 有关的国家重大专项和“863 计划”等项目。很高兴看到这批优秀的中青年科研工作者在参与科研工作的同时, 积极参加编写这套高新技术丛书。

从出版社和著作者提供的样书看出, 丛书以及每本书的结构都是经过仔细斟酌的, 逻辑清晰、内容全面、观点鲜明、创新性强, 内容充分反映了我国在新一代移动通信国际标准探索和技术开发中的最新成果, 可供国内外的同行参考, 将促进我国对国际 5G 标准制定的贡献。相信本套丛书的出版发行, 将会推动我国移动通信技术的自主创新和产业发展。

邬贺铨

2016 年 8 月

刘韵洁院士之序

Introduction

面向 2020 年及未来，移动通信技术和产业将迈入第五代移动通信（5G）的发展阶段。5G 将满足人们的超高业务吞吐量、超高连接数密度、超高移动速度和超可靠低时延的广泛应用需求，大幅改善提升通信网络频谱效率、能量效率与成本效率，拓展移动通信产业的发展空间。更为重要的是，5G 将渗透到物联网和传统产业领域，与工业设施、医疗仪器、交通工具等深度融合，全面实现“万物互联”，有效满足工业、医疗、交通等垂直行业的信息化服务需要。

在 2016 年 7 月 15 日，美国政府宣布推出 4 亿美元的先进无线研究计划(Advanced Wireless Research Initiative)，由美国国家科学基金会牵头实施，将部署四个城市规模的 5G 实验测试平台，推动面向未来无线通信的基础理论和关键技术研究。我国工信部、发改委、科技部联合成立了“IMT-2020 推进组”，汇聚产、学、研、用各方力量，引领规划和重点推动 5G 关键技术研发，充分支持我国优势电信企业和研究院所在新一代移动通信国际标准制定过程中掌控影响力和话语权。

随着 5G 研发和标准化工作的快速深入展开，急需一套全面论述 5G 基础理论、关键技术和应用架构的系列书籍，电子工业出版社提前预见这一技术发展趋势和重要产业需求，有效组织国家 IMT-2020 推进组、国家 03 科技重大专项和国家“863 计划”5G 前期研发项目等的主要承担单位和优秀科技工作者，成功策划了这套 5G 技术丛书，及时总结和深入分析了最新 5G 技术的理论基础、体系架构、系统设计、测试评估、应用实现等多个方面的最新进展和研发挑战，相信这套丛书的丰富理论成果和实践经验能够帮助和培养新一代移动通信科技工作者，有效推进和巩固我国在 5G 国际标准化进程中的领导地位。

刘韵洁

2016 年 9 月

张乃通院士之序

Introduction

移动通信的发展不仅深刻改变了人们的生活方式，且已成为推动国民经济发展、提升社会信息化水平的重要引擎。移动互联网关键技术和基础设施的发展是“中国制造 2025”、“互联网+”战略的基础和保障。当前，面向 2020 年及未来的第五代移动通信（5G）已成为全球研发热点。为占领信息领域国际领先地位、掌握产业发展话语权，国家工信部、发改委、科技部成立“IMT-2020 推进组”，组织我国产、学、研、用各方力量，推动 5G 技术研究，以期在新的无线通信国际标准制定中掌握话语权和主导权，推动技术创新发展战略，为自主可控的信息网络提供基础设施保障。目前，我国的 5G 研发工作已走在国际前列。

电子工业出版社以此为背景，提出 5G 技术丛书的出版计划，组织国家 IMT-2020 推进组的主要参与单位，承担或参与国家“863 计划”5G 系统研究开发先期研究重大项目的单位，选择在国家重大科技专项中承担 5G 相关项目研发工作的中青年科技工作者作为丛书编著团队，编著这套丛书。丛书分为两卷：

（1）“关键技术卷”，从理论和技术层面对 5G 关键技术进行全面深入的分析，系统总结近年来我国在面向 IMT-2020（5G）研发方面所取得的进展。

（2）“系统设计与应用卷”，从系统应用层面对 5G 总体架构、传输性能评估和应用等方面进行阐述，具有系统创新特色和理论联系实际的效果，符合当前开展 IMT-2020 研究与工程的需求。

IMT-2020 推进组当前为了更加广泛与深入地开展研发工作，急需一套从理论技术到应用的丛书，相信本套丛书的丰富内容和先进成果能够有效促进完成 IMT-2020 推进组的既定目标。

张乃通

2016 年 11 月

尤肖虎教授之序

Introduction

从 2009 年开始,全球掀起 4G 建设热潮,截至 2015 年年底,全球 4G 用户数已达到 10.5 亿,中国 4G 用户数达到 3.86 亿,4G 在网用户人均月度使用流量突破了 200MB,运营商从原本以语音为主的运营,逐步转向以数据为主的流量运营,同时极大地激活了移动互联网。

2012 年年底,欧盟启动了全球首个 5G 研究项目 METIS。2013 年,国际电联正式启动了 5G 标准研究工作,开展 5G 需求、频谱及技术趋势的研究工作,计划 2016 年完成技术评估方法研究,2018 年完成 IMT-2020 标准征集,2020 年最终确定 5G 标准。3GPP 作为国际移动通信的标准化组织,于 2015 年确定了 5G 研究计划,2016~2017 年完成 5G 技术方案研究阶段,2018~2019 年完成 5G 技术规范制定。我国“863 计划”于 2014 年启动了 5G 技术研究项目,系统研究 5G 领域的关键技术,包括无线网络架构、大规模天线、超密集无线网络、软基站试验平台、无线网络虚拟化、毫米波室内无线接入和评估与测试验证。与“863 计划”5G 相衔接,国家科技重大专项 5G 相关研发课题的目标是面向国际标准,鼓励我国产学研联合开展研发,由企业推动创新成果纳入 IMT-2020 国际标准。进一步,我国已将“积极推进第五代移动通信(5G)和超宽带关键技术研究,启动 5G 商用”写入“十三五”规划中。

5G 的主要应用为移动宽带、物联网和工业互联网,旨在成为未来社会的信息基础设施。5G 将引入新型传输技术,提高频谱利用率和支持高频段使用;同时以网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)和软件定义网络(Software Defined Network, SDN)为主要手段,构建控制与转发分离和控制集中的网络架构,实现网络资源的灵活编排和部署;通过新型波形、新多址和新帧结构等技术,为海量物联网设备提供低功耗与深度覆盖,为工业无线通信等应用提供高可靠、低时延的连接。

本套丛书内容涉及 5G 系统的最新理论研究成果和关键技术评估,具体包括 5G 网络架构、无线传输、超密集网络、大规模多天线、能效和频谱优化、仿真与测试等多个方面的研究成果和技术趋势,作者来自电信运营商、设备研制企业和科研院所,内容和视角全面完整,注重理论分析与实际应用相结合,具有很好的时效性和参考价值。本丛书适合高等院校通信信息、电子工程及相关专业的高年级本科生和研究生,以及无线通信领域的专业工程技术人员。

尤肖虎

2016 年 9 月

前言

Preface

随着移动互联网的蓬勃发展,移动通信业务量呈现爆炸式增长,新一代蜂窝移动通信将具备“海容量、泛连接、超效能”等新特征,急需在频谱效率、功率效率、频谱扩展与网络密集化等多重方向上取得突破性进展。现有的 4G 技术难以满足未来超高传输速率移动互联无线通信需求,在频谱资源日趋紧缺的情况下,需要引入变革性的无线传输新技术。近年来,大规模 MIMO 传输理论与关键技术由于能够显著提升无线网络容量、应对新一代蜂窝移动通信的多重需求,引发了国内外学术界和工业界的极大关注。

大规模 MIMO 技术是利用基站侧配置的大规模天线阵列服务小区中若干用户的 MIMO 系统。早期的理论研究表明:当天线数目趋于无穷大时,大规模 MIMO 技术能够有效提高空间分辨率,削弱快衰落以及非相关噪声的影响,使空间资源能够进一步划分,可以采用空分多址的复用方式,同时调度服务的用户个数,实现多用户传输,提高系统容量。

本书主要内容为大规模 MIMO 传输理论与关键技术,详细介绍了大规模 MIMO 的基本概念、基本原理、关键技术、原型验证平台以及最新进展。全书共 9 章,内容包括 MIMO 无线通信系统发展、大规模 MIMO 系统信息论基础、大规模 MIMO 空分多址传输、大规模 MIMO 多用户调度技术、大规模 MIMO 的信道估计与导频设计、大规模 MIMO 先进接收机设计、毫米波大规模 MIMO 技术、大规模 MIMO 原型验证平台设计和应用以及大规模 MIMO 技术最新进展。

本书由金石组织编写并统稿,东南大学移动通信国家重点实验室金石主要负责或参与撰写本书第 2、3、4、7、8、9 章,台湾中山大学通讯技术实验室温朝凯主要负责或参与撰写本书第 6、7、8、9 章,清华大学自动化系信息处理研究所高飞主要负责或参与撰写本书的第 1、2、7 章,华中科技大学电子信息与通信学院江涛主要负责或参与撰写本书第 5、9 章。本书部分原型验证平台的介绍得到了美国国家仪器公司的授权。此外,还要特别感谢东南大学移动通信国家重点实验室李峥、阳析、韩瑜、范利等研究生为本书所做的贡献。

限于作者认知水平和写作时间,对于本书中存在的错误或不足之处,恳请同行专家与读者给予批评指正,我们将不胜感谢!

作者
于中国无线谷

目 录

Contents

第 1 章	Chapter 1	
	MIMO 无线通信系统发展	1
1.1	MIMO 无线通信系统发展简史	2
1.2	大规模 MIMO 系统特征及当前研究进展	4
1.2.1	大规模 MIMO 系统研究需求	4
1.2.2	基本原理及系统特征	4
1.2.3	主要研究内容	6
1.2.4	研究现状	7
1.3	MIMO 无线衰落信道的基本特征	11
1.4	大规模 MIMO 信道特点	16
1.4.1	大规模 MIMO 信道的最佳传播条件	16
1.4.2	大规模 MIMO 信道的非平稳性	18
1.4.3	大规模 MIMO 阵列组态及球面波前	18
1.4.4	大规模 MIMO 用户信道建模	19
第 2 章	Chapter 2	
	大规模 MIMO 系统信息论基础及信道容量分析	21
2.1	大规模 MIMO 系统信息论基础	22
2.1.1	MIMO 技术	22
2.1.2	多用户 MIMO 技术	23
2.1.3	大规模 MIMO 技术	24
2.2	大规模 MIMO 系统模型	26
2.2.1	六边形小区	26
2.2.2	正交频分复用	26
2.2.3	时分双工	27
2.2.4	传输模型	27
2.3	导频污染形成机理	28
2.3.1	反向链路导频传输	28
2.3.2	导频污染	29

2.4 大规模 MIMO 信道容量分析	30
2.4.1 反向链路数据传输	30
2.4.2 前向链路数据传输	32
2.5 本章小结	34

第 3 章 | Chapter 3

大规模 MIMO 空分多址传输	35
3.1 多用户 MIMO 传输基本原理	36
3.1.1 多用户信道	36
3.1.2 多址接入	36
3.1.3 多用户 MIMO 系统的速率域	38
3.2 多用户 MIMO 下行预编码技术	40
3.2.1 预编码基本原理	40
3.2.2 ZF 预编码	41
3.2.3 MMSE 预编码	41
3.3 大规模 MIMO 空分多址传输	42
3.4 联合空分复用传输技术	43
3.4.1 系统模型	43
3.4.2 JSMD 方案	44
3.4.3 JSMD 性能	46
3.4.4 性能仿真	47
3.5 大规模 MIMO 统计空分多址传输	49
3.5.1 系统模型	49
3.5.2 空间信道特征	50
3.5.3 波束域下行最优传输理论	54
3.5.4 MB-SDMA 传输方案	56
3.6 本章小结	58

第 4 章 | Chapter 4

大规模 MIMO 多用户调度技术	59
4.1 多用户 MIMO 调度基本原理	60
4.1.1 多用户 MIMO 系统模型	60
4.1.2 启发式搜索调度算法概述	62
4.1.3 基于零空间投影的调度算法	64
4.1.4 半正交用户选择算法	65
4.1.5 基于树形搜索的调度算法	66
4.2 JSMD 传输下大规模 MIMO 多用户调度	68

4.2.1	用户分组算法	68
4.2.2	组内用户调度算法	74
4.3	统计大规模 MIMO 多用户调度	76
4.3.1	多用户和速率及其在线估计	76
4.3.2	用户调度算法	79
4.4	大规模 MIMO 多用户调度技术性能评估	82
4.4.1	JSDM 方案中多用户调度性能	82
4.4.2	统计大规模 MIMO 多用户调度性能	84

第 5 章 | Chapter 5

	大规模 MIMO 信道估计与导频设计	91
5.1	大规模 MIMO 信道估计与导频设计基本原理	92
5.1.1	信道估计原理	92
5.1.2	导频设计基本原理	93
5.2	低复杂度的大规模 MIMO 信道估计	93
5.2.1	传统的信道估计	94
5.2.2	低复杂度的信道估计	95
5.3	基于压缩感知的大规模 MIMO 信道估计	98
5.3.1	压缩感知与信道估计	98
5.3.2	压缩感知信道重建方法	99
5.3.3	信道反馈与压缩感知	100
5.4	导频设计与导频再用	101
5.4.1	导频再用与导频污染	101
5.4.2	导频再用与导频分配	102
5.5	性能评估	105
5.5.1	信道估计误差	106
5.5.2	传输速率	106
5.5.3	频谱效率	108

第 6 章 | Chapter 6

	大规模多天线接收机	109
6.1	系统模型	111
6.2	信号解调	111
6.2.1	ZF 解调器	112
6.2.2	LMMSE 解调器	112
6.2.3	近似信息传递解调器	112
6.3	信道估计	118

6.3.1	信道特性	118
6.3.2	贝叶斯信道估计	119
6.4	AMP 算法性能评估	123
6.4.1	信号解调	123
6.4.2	信道估计	125
6.5	本章小结	128

第 7 章 | Chapter 7

	毫米波大规模 MIMO 技术	129
7.1	毫米波信道模型	130
7.1.1	可分辨路径集合	130
7.1.2	路径损耗	131
7.1.3	角度扩散	131
7.1.4	阻塞概率	132
7.1.5	小尺度衰落	133
7.1.6	简化模型	133
7.2	结合波分多址与干扰抑制的多用户传输方案	134
7.2.1	系统模型	135
7.2.2	波束域分析	136
7.2.3	多用户传输方案设计	139
7.2.4	仿真结果	145
7.3	本章小结	148

第 8 章 | Chapter 8

	大规模 MIMO 原型验证平台设计和应用	149
8.1	Argos 原型平台	150
8.2	NI 原型平台	152
8.2.1	NI 的大规模 MIMO 应用程序框架	152
8.2.2	128 天线大规模 MIMO 原型验证平台	155
8.2.3	IO 流速率分析	159
8.2.4	系统的同步	161
8.2.5	系统实物图和测试结果	163

第 9 章 | Chapter 9

	大规模 MIMO 技术最新进展	169
9.1	低成本大规模 MIMO 技术	170

9.2	低精度量化研究现状	172
9.3	量化 OFDM 技术	174
9.3.1	系统模型	174
9.3.2	MAP 信道估计	176
9.3.3	MMSE 数据检测	176
9.4	大规模 MIMO 系统的混合 ADC 设计方案	177
9.4.1	系统模型	178
9.4.2	MIMO 检测器	180
9.4.3	混合 ADC 设计方案	185
9.4.4	仿真结果与分析	187
9.5	大规模 MIMO 系统中的多水平低位数 ADC 应用方案	194
9.5.1	系统模型	195
9.5.2	状态演化方程	196
9.5.3	多水平低位数 ADC 替换高位数 ADC	200
9.5.4	仿真结果与分析	203
附录 A	Appendix A 松弛置信度传播算法推导	207
附录 B	Appendix B AMP 算法推导	213
附录 C	Appendix C 概率密度函数修正推导	217
附录 D	Appendix D 缩略语	221
参考文献		229

第 1 章

Chapter 1

► MIMO 无线通信系统发展

1.1 MIMO 无线通信系统发展简史

在传统无线通信系统中,接收端和发射端通常都采用单天线形式,这种系统被称为单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)系统。SISO 系统的信道容量可以表示为: $C = W \log_2(1 + S/N)$,其中 W 和 S/N 分别表示信道带宽和接收信噪比。该式给出了系统在加性高斯白噪声信道中进行无差错传输的最大速率。此时,无论运用什么样的信道编码方法和调制方案,只能逼近系统容量 C 而无法超越它。因此系统容量是一个不可逾越的上界,这也成为了现代通信系统的一个瓶颈问题。

与此同时,多径传播在传统的通信理论中一直被视为信号传输的一种不利因素,因为不同时延多径信号的叠加会对通信链路产生很大的干扰,影响链路的性能。为了对抗多径效应、提高链路的稳定性等性能,研究者们提出了天线分集的概念。在多种分集技术(天线分集、时间分集、频率分集)并存的无线通信系统中,数据传输能够获得空间维度、时间维度、频率维度的分集效应,从而提高链路的性能。为了实现空间分集,发送机或接收机需要采用多天线系统。因此,从传统的单天线系统向多天线系统演进是无线通信技术发展的趋势。

事实上,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术已成为第四代(4th Generation, 4G)移动通信系统中的关键技术,其基本原理是在无线通信的发送端和接收端同时采用多个发送天线或接收天线,发送机利用多个天线进行独立传输,而接收机则利用多个天线来恢复原始信息。MIMO 技术源于智能天线和分集技术,是单入多出(Single Input Multiple Output, SIMO)和多入单出(Multiple Input Single Output, MISO)技术的结合,其能够充分利用空间资源以及多径传播特性,在不增加频谱资源和发射功率的前提下,通过先进的无线传输和信号处理技术,建立并行传输机制,从而成倍地提升信道容量^[1-4]。

利用多天线提高无线传输速率和性能的思想最早由马可尼于 1908 年提出。20 世纪 70 年代,人们提出将 MIMO 技术运用到无线通信系统中^[5],然而直到 20 世纪 90 年代才由美国贝尔实验室的 Telatar、Foschini 和 Tarokh 等学者完成了无线通信系统 MIMO 技术的重要奠基工作^[6-10]。Telatar 分析了 MIMO 系统的理论容量^[6],Foschini 则开发出了 MIMO 系统的接收/发送算法——贝尔实验室空时分层码(Bell Labs Layered Space-Time, BLAST)算法^[7]。1998 年,Volniansky 等人进一步开发了垂直贝尔实验室空时分层码(Vertical Bell Labs Layered Space-Time, V-BLAST)算法,并据此建立了一套 MIMO 实验室系统。该系统在室内实验时达到了 20b/s/Hz 的频谱利用率^[10],引起了学术界的极大关注,从而推动了 MIMO 技术的迅猛发展。Foschini 在 1996 年到 1998 年的研究成果^[7,8,10]表明:若在无线通信系统的收发端同时配备多天线阵列,那么只要信道中存在足够多的非相关散射路径,该信道的信道容量就会与收发端天线数量成比例,即收发端天线数量越多,信道的容量就越大。这表明,MIMO 技术的应用可以显著增加无线通信系统的信道容量,尤其对于最大数据传输速率超过 100Mb/s 的 IMT-Advanced 系统,这种信道容量的线性增加变得尤其重要。

20 世纪 90 年代,整个无线通信领域致力于提升蜂窝网络的性能以及开发更加紧密的频率复用机制。1991 年,Roy 等人提出了空分多址接入(Space Division Multiple Access, SDMA)系统。该系统采用定向或智能天线,可在同一频段上同时调度基站范围内的不同