

国家

CAMBRIDGE

5G丛书

大规模MIMO系统原理与设计分析

【美】托马斯·马尔泽塔 (Thomas L. Marzetta) 【瑞典】埃里克·拉森 (Erik G. Larsson) 著
【美】杨弘 (Hong Yang) 【瑞典】吴贤国 (Hien Quoc Ngo) 著
高晖 译

Fundamentals of Massive MIMO

大规模MIMO之父

Thomas L. Marzetta 撰写



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

CAMBRIDGE

5G丛书

大规模MIMO系统原理与设计分析

【美】托马斯·马尔泽塔 (Thomas L. Marzetta) 【瑞典】埃里克·拉森 (Erik G. Larsson) 著
【美】杨弘 (Hong Yang) 【瑞典】吴贤国 (Hien Quoc Ngo) 译
高晖译

Fundamentals of Massive MIMO



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

大规模MIMO系统原理与设计分析 / (美) 托马斯·马尔泽塔 (Thomas L. Marzetta) 等著 ; 高晖译. — 北京: 人民邮电出版社, 2018. 12
(5G丛书)
ISBN 978-7-115-49984-4

I. ①大… II. ①托… ②高… III. ①多变量系统
IV. ①TP271

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第250700号

版 权 声 明

This is a translation of the following title published by Cambridge University Press:
Fundamentals of Massive MIMO, Edited by Thomas L. Marzetta, Erik G. Larsson, Hong Yan, Hien Quoc Ngo, first published by Cambridge University Press 2016.
ISBN: 978-1107175570

This simplified Chinese translation for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and Posts & Telecom Press.

This translation is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this translation is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and Posts & Telecom Press.

本书中文简体字版由剑桥大学出版社授权人民邮电出版社出版, 专有版权属于人民邮电出版社, 未经授权严禁出版。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾省)销售。

Copies of this book sold without a Cambridge University Press sticker on the cover are unauthorized and illegal.
本书封面贴有 Cambridge University Press 防伪标签, 无标签者不得销售。

-
- ◆ 著 [美]托马斯·马尔泽塔 (Thomas L. Marzetta)
[瑞典]埃里克·拉森 (Erik G. Larsson)
[美]杨弘 (Hong Yang) [瑞典]吴贤国 (Hien Quoc Ngo)
- 译 高 晖
- 责任编辑 李 强
- 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>
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 800×1000 1/16
印张: 14
字数: 223 千字
- 2018 年 12 月第 1 版
2018 年 12 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 第 01-2018-2547 号

定价: 88.00 元

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

内容提要

本书由大规模多输入多输出系统概念的创始人撰写，是该系统物理层及工程应用原理的第一部完全指南。本书仅仅需要读者具备通信和统计信号处理的基础知识，在此基础上本书将指导读者深入理解多小区大规模多输入多输出系统中的信道传播模型、复用和解复用、信道估计、功率控制和性能分析等核心问题。作者独具特色的容量界方法将能够帮助读者开展有效的系统性能分析和研发，适用于大规模多输入多输出系统的关键技术和算法。

本书丰富的示例以及与本书配套的习题、解答等网络资源将帮助读者实践所学的知识并获取对复杂无线通信系统设计与分析的技能。无论你是研究生、研究人员，还是从事无线通信研发的专业人士，本书将是不可或缺的指南。

精彩推荐

大规模多输入多输出系统在过去几年成为无线通信领域研究的热点之一，也即将成为 5G 的关键组成部分。这本书由该领域的创始人撰写，以系统而简明的方式阐述了大规模多输入多输出系统的基础，不拘泥于细节。我将这本书推荐给所有在该领域工作的人。

南加州大学 Andreas Molisch

灵巧而深刻，本书为读者提供了理解大规模多输入多输出系统特殊能力所需的基础知识，并展示了该系统在诸多用例中的有益之处。作者不仅是科学先驱，还是阐述科学原理的大师，他们在本书中分享各自的观点：对于那些对大规模多输入多输出技术有兴趣的人来说，这确实是一场智慧的盛宴。

鲁汶大学 Liesbet Van der Perre

这本书是大规模多输入多输出系统“创始人”撰写的时效性极强的著作。它提供很多简单而具启发性的例子，非常适合该领域的新人；同时，它给出了很多重要的文献，非常适合有经验的工程师。本书内容简明扼要，每章结尾处的总结和要点归纳使读者可以轻松地聚焦阅读。强烈推荐本书给想快速深入了解大规模多输入多输出系统的读者。

加州大学欧文分校 Lee Swindlehurst

作者简介

Thomas L. Marzetta 是大规模多输入多输出系统的创始人。他是 Nokia 公司 Bell 实验室院士和 IEEE 会士，曾经在 Schlumberger-Doll 研究院和 Nichols Research 公司工作。他曾获得诸多认证和奖励，其中包括 IEEE W. R. G. Baker 奖（2015）、IEEE 通信协会的 Stephen O. Rice 奖（2015）以及 IEEE Guglielmo Marconi 最佳文献奖（2013）。他曾获得 Linkoping 大学的荣誉博士学位。

Erik G. Larsson 是瑞典 Linkoping 大学的正教授和 IEEE 会士。他曾合著了包含 120 篇期刊文献和无线通信中的空时编码一书（剑桥大学出版社，2003）。他目前是 IEEE 信号处理协会中面向通信及网络的信号处理专题组技术委员会主席（2015—2016 年）。他于 2012 年和 2014 年两次获得 *IEEE Signal Processing Magazine* 的最佳专栏奖，2015 年获得了 IEEE 通信协会的 Stephen O. Rice 奖。

Hong Yang 是 Nokia 公司 Bell 实验室网络及通信的数学研究部的研究员，他的研究集中在无线通信网络领域。他具有超过 15 年的工业界研究及开发经验，他曾经供职于 Alcatel-Lucent 公司的射频技术系统工程部和无线设计中心。

Hien Quoc Ngo 是瑞典 Linkoping 大学的研究员。他于 2015 年获得了 IEEE 通信协会的 Stephen O. Rice 奖和 IEEE 瑞典 VT-COM-IT 的联合最佳学生期刊文献奖。他于 2014 年和 2015 年获得了 *IEEE Communications Letters* 和 *IEEE Transactions on Communications* 的模范审稿人称号。

中文版序

大规模 MIMO 作为 5G 最主要的技术之一，对很多人已不再是个陌生的专业名词。大规模 MIMO 之父 Marzetta 在 2006 年提出其主要概念，而进一步完善的理论发表于 2010 年。此后，该领域的理论研究及工程实践如雨后春笋般迅速发展，以此为题材发表的学术论文及实验报告至今已数以万计。大规模 MIMO 的成功在于其为理论上极为优越的多用户 MIMO 技术提供了实际可行的工程应用化身，其精髓在于通过有效获得信道状态信息而实现闭环波束赋形，随着服务天线数量的增多，大数定理使无线信道迅速正交化并硬化，因此，简单的线性处理趋于最优，功率控制的实施难度大幅降低。

Marzetta 博士的我最初的构想是为专业研究人员及工程师撰写一本 100 页左右的专著，而与 Larsson 教授及 Ngo 教授的合作使本书成为一本具有专著性质的教科书。本书既为专业研究员及工程师提供了丰富的研究题材和可用于实际系统设计、分析及优化的实用工具，又适合作为研究生一学期的教材，附带的习题和题解也为教师提供了方便。

本书从 2013 年 11 月开始撰写到 2016 年 3 月底定稿提交剑桥大学出版社，书中的内容经历了无数次精心的筛选和改写，以达到既简洁又完整的目的。我们希望本书能够成为读者们喜爱的经典。

衷心感谢高晖博士高度专业且精准的翻译，使本书能为广大的中文读者所享用。

杨弘

2018 年秋

新泽西州，慕瑞丘

前言

对证明模式的简化不仅仅标志着我们对一门学科理解的深入，更是对确保面向未来更进一步发展所做的必要准备。

——W. Thomson（第一位开尔文男爵）和 P. G. Tait,
《自然科学原理》，1873

无线通信领域有 3 个永恒的真理。

- （1）移动和固定的无线吞吐量需求会一直增加。
- （2）可用的电磁频谱总量永不增加，并且可以穿透建筑物、绕开障碍物并且不受天气影响的最理想的频带仅占整个频谱的一小部分。
- （3）通信理论研究者和工程师将永远面临发明或发现能够提供更高频谱效率的突破性技术的压力。

回顾一个多世纪的无线通信创新的历程，我们必须不断寻求物理层的突破性技术。本书认为，大规模 MIMO 就是这样的突破性技术。它是一种可扩展的技术，大量终端可以通过所分配的全部频谱同时进行通信。赋能这种激进多路复用方案的要素如下。

- （1）服务天线的数量远远大于终端数量。
- （2）复用和解复用过程都是基于测量而非假设的信道传播特性来完成。

服务天线数目与激活终端数目差距悬殊，这使得传播信道更有可能支撑多路复用；此外，基于直接信道测量的多路复用可以使天线阵的容差特性独立于天线数目。与激活

终端数量对应的天线数量增长,可以让最简单的复用和解复用信号处理技术也变得非常有效,并且可以在保证相同服务质量的前提下降低辐射功率,而更低的辐射功率有助于频率复用。不仅如此,大量天线的共同作用可以消除信道的频率选择性衰落并简化功率控制。利用时分双工操作,系统仅需在上行链路测量信道的传播特性即可支持上行链路数据检测和下行链路波束成形,这有助于实现高移动性场景中的通信。此外,通过适当的功率控制,经测量上下行传输的 95%可能性吞吐量可知,大规模 MIMO 可以对所有终端均提供优质服务。

显然,分析大规模 MIMO 系统的性能是一项艰巨的任务,因为系统中存在大量特性与频率相关的传播信道,并且所有的终端都在系统给定的所有频率上发送和接收信息。本书想要传递的核心信息是,即使是最复杂的多小区大规模 MIMO 部署,也基本上可以获取闭合的性能表达式。我们主要以 3 种方式实现易于处理的分析:第一,我们将小尺度衰落建模为先验已知、独立的瑞利分布;第二,我们假设所有相关传输节点都已知信道大尺度衰落信息;第三,在上行和下行传输中,我们将注意力集中在最简单的线性复用及解复用技术上,比如迫零和最大比处理上。总的来说,这些假设遵循贝叶斯分析和遍历容量的下界,其推导只需要基本的数学知识。对于多小区大规模 MIMO 部署,我们获得了完整且非常简捷的非渐近容量下界表达式。实际上,大规模 MIMO 在基站与其所服务的每个终端之间创建了专属的虚拟电路,包含了与频率特性无关的信道并且信道质量仅取决于大尺度衰落和功率控制。我们推导的容量下界考虑了接收机噪声、信道估计误差、与导频相关的系统开销、功率控制、所采用的具体复用或解复用信号处理中的缺陷、非相干小区间干扰、导频复用产生的小区间干扰等要素。这些性能界为大规模 MIMO 系统的工作机理,系统参数之间的相互作用以及系统可扩展性等均提供了直观的洞见。数值分析研究展现了大规模 MIMO 的巨大潜力以及容量界作为系统设计工具的价值。

这本书将吸引 3 种类型的读者。

(1) 无线工程师能够从中获取关于大规模 MIMO 原理的明晰阐述,并且这些原理仅仅使用基本通信理论和统计信号处理。虽然通过详尽的端对端系统仿真可以对系统性能展开分析并指导工程设计,但本书中的容量界方法可望获得更为广泛的利用。容量界方法具有高速、简捷的特点,可以揭示系统参数之间的相互作用,也可以作为系统仿真的独立检测手段。

(2) 正在设计先进大规模 MIMO 技术和算法的研究人员,可以使用容量界作为性能对比基准,进一步量化系统性能提升和算法实现复杂度等指标。

(3) 对于学生来说,本书是帮助他们学习如何将基础信息论、通信和信号处理原理

转化应用到复杂通信系统性能分析的理想载体。

如何阅读这本书

本书内容完整独立，在附录的辅助下，读者仅仅需要线性代数和大学本科概率论的基础知识。

期望快速了解大规模 MIMO 技术潜力的执业系统工程师，可以先阅读第 6 章的案例分析和了解性能评估方法，阅读第 3 章中针对单小区的性能分析，阅读第 4 章中针对多小区的性能分析。在需要时，可以参考其他章节和附录。

希望深入了解这个专题（比如计划开始一学期的研究生课程）或者希望深入掌握大规模 MIMO 性能分析方法的学生、教师和研究人員，可以首先阅读第 1~2 章，接下来学习附录 A~附录 C 中的基础知识，然后依次阅读第 3~8 章，并按需参考其余附录。

本书每一章均附一系列习题，教学人员可以联系作者获取习题解答手册。

目 录

第 1 章 介绍	1
1.1 点到点 MIMO	2
1.2 多用户 MIMO	4
1.3 大规模 MIMO	6
1.4 时分双工与频分双工	10
1.5 要点总结	12
第 2 章 模型与准备工作	13
2.1 单天线发射机和单天线接收机	14
2.1.1 相干时间	14
2.1.2 相干带宽	16
2.1.3 相干间隔	17
2.1.4 根据奈奎斯特采样速率解释 T_c 和 B_c	18
2.1.5 TDD 相干间隔结构	18
2.1.6 OFDM 调制时的相干间隔	19
2.1.7 小尺度和大尺度衰落	22
2.1.8 归一化信号模型和 SNR	23

2.2 多天线基站和多个终端	23
2.2.1 单小区系统	24
2.2.2 多小区系统	25
2.3 性能指标——容量界	27
2.3.1 加性高斯噪声确定信道	28
2.3.2 加性非高斯噪声确定信道	29
2.3.3 具有加性高斯噪声及接收端完美 CSI 的衰落信道	30
2.3.4 具有加性高斯噪声但不具备接收端 CSI 的衰落信道	30
2.3.5 具有非高斯噪声和边信息的衰落信道	31
2.4 要点总结	32
第 3 章 单小区系统	35
3.1 上行链路导频和信道估计	36
3.1.1 正交导频	37
3.1.2 接收导频信号的解扩操作	37
3.1.3 MMSE 信道估计	38
3.2 上行链路数据传输	39
3.2.1 迫零处理	41
3.2.2 最大比处理	43
3.3 下行链路数据传输	46
3.3.1 线性预编码	47
3.3.2 迫零处理	48
3.3.3 最大比处理	49
3.4 讨论	51
3.4.1 对有效 SINR 表达式的理解	52
3.4.2 功率控制的意义	53
3.4.3 比例规律和 SINR 上界	54
3.5 当 $M \gg K$ 时, 线性处理的准最优性	55
3.6 净频谱效率	58
3.7 限制因素: 天线数目及移动性	58
3.8 要点总结	62

第4章 多小区系统	63
4.1 基于导频的上行链路信道估计	65
4.2 上行链路数据传输	66
4.2.1 迫零处理	67
4.2.2 最大比处理	69
4.3 下行链路数据传输	71
4.3.1 迫零处理	72
4.3.2 最大比处理	74
4.4 小结	75
4.4.1 基站天线数趋于无穷时的渐近性能限	76
4.4.2 导频污染的影响	76
4.4.3 非同步导频干扰	77
4.5 要点总结	78
第5章 功率控制准则	79
5.1 引言	80
5.2 给定目标 SINR 的功率控制	82
5.2.1 单小区系统	82
5.2.2 多小区系统	83
5.3 最大-最小公平功率控制	83
5.3.1 单小区系统中的最大-最小公平功率控制	84
5.3.2 具有网络范围最大-最小公平的多小区系统	87
5.3.3 用于可忽略相干干扰和全功率的每小区功率控制	88
5.3.4 一致优良的服务	91
5.4 要点总结	92
第6章 案例研究	93
6.1 单小区部署示例：农村地区固定宽带网接入	96
6.1.1 所需天线数和辐射功率	96
6.1.2 最大-最小公平功率控制算法分析	99
6.2 多小区部署：基础和算法	100
6.2.1 多小区分簇模型和导频复用	100

6.2.2 为基站分配终端	102
6.2.3 从服务中丢弃终端	103
6.2.4 导频分配和所需的导频序列长度	104
6.2.5 考虑相干干扰的单小区最大-最小功率控制	104
6.3 多小区部署示例: 移动接入	106
6.3.1 密集城区场景	106
6.3.2 郊区场景	107
6.3.3 每个终端最低吞吐量性能	107
6.3.4 附加观察	109
6.3.5 功率控制策略的比较	110
6.4 要点总结	113
第 7 章 大规模 MIMO 与传播信道	115
7.1 有利传播与确定信道	116
7.1.1 容量上界	117
7.1.2 与有利传播间的差距	117
7.1.3 有利传播与线性处理	118
7.1.4 奇异值扩散作为有利传播的度量	119
7.2 有利传播与随机信道	120
7.2.1 独立瑞利衰落	120
7.2.2 均匀随机视距传输 (UR-LoS)	121
7.2.3 独立瑞利衰落与 UR-LoS 的比较	122
7.3 有限维度信道	127
7.4 要点总结	128
第 8 章 最终篇与未来的方向	129
8.1 性能分析的替代方法	130
8.2 多天线终端	130
8.3 导频污染与导频分配	131
8.4 频分双工 (FDD) 模式下的大规模 MIMO	132
8.5 非蜂窝大规模 MIMO	132
8.6 信号处理算法	133

8.7 非理想硬件的影响	133
8.8 随机接入与资源分配	134
8.9 总能效	135
附录 A 循环对称复高斯向量	137
A.1 复高斯随机向量	138
A.2 循环对称的复高斯随机向量	138
A.2.1 伪协方差矩阵	139
A.2.2 概率密度函数	139
A.2.3 线性变换	141
A.2.4 四阶矩	142
附录 B 有用的随机矩阵结果	143
B.1 对称性	144
B.2 QR 分解	145
B.3 期望值	147
附录 C 容量和容量定界工具	149
C.1 Jensen 不等式	150
C.2 点到点的标量信道	151
C.2.1 熵的转化不变性	152
C.2.2 高斯分布使熵最大化	152
C.2.3 带有加性高斯噪声的确定信道	153
C.2.4 带有加性非高斯噪声的确定信道	154
C.2.5 带有高斯噪声和接收端理想 CSI 的衰落信道	155
C.2.6 带有非高斯噪声和边信息的衰落信道	155
C.3 点到点的 MIMO 信道	157
C.3.1 确定的 MIMO 信道	157
C.3.2 接收端具有理想 CSI 时的 MIMO 衰落信道	159
C.4 多用户 MIMO 信道	159
C.4.1 多接入信道 (上行)	161
C.4.2 广播信道 (下行)	163

C.4.3 衰落与非理想 CSI	166
附录 D 单小区容量定界的替代方法	167
D.1 上行迫零传输	168
D.1.1 通过 Jensen 不等式获得容量下界	168
D.1.2 下界的紧致性	169
D.2 上行的最大比传输	170
D.2.1 基于 Jensen 不等式的容量下界	170
D.2.2 界的比较	171
D.3 下行的最大比处理	172
附录 E 多小区系统中的渐近 SINR	175
附录 F 链路预算的计算	179
附录 G 六边形中的均匀分布点	181
附录 H 缩写和注释	185
参考文献	191