



国际信息工程先进技术译丛



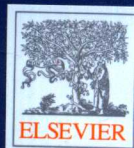
MIMO无线网络手册

(原书第2版)

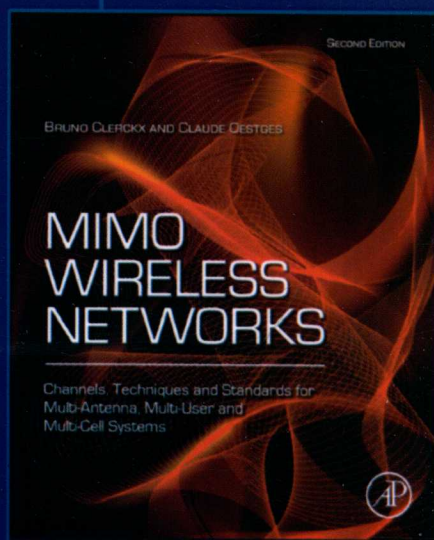
MIMO Wireless Networks (Second Edition)
Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna,
Multi-User and Multi-Cell Systems

[比] 布鲁诺·克拉克斯 (Bruno Clerckx) 著
克劳德·奥思特杰斯 (Claude Oestges)

许方敏 郑长亮 邱海龙等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

MIMO 无线网络手册

(原书第2版)

[比] 布鲁诺·克拉克斯 (Bruno Clerckx) 著
克劳德·奥思特杰斯 (Claude Oestges) 著
许方敏 郑长亮 邱海杰 等译



机械工业出版社

MIMO Wireless Networks: Channels, Techniques and Standards for Multi-Antenna, Multi-User and Multi-Cell Systems, Second Edition

Bruno Clerckx, Claude Oestges

ISBN: 978-0-12-385055-3

Copyright © 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2014 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and China Machine Press.

All rights reserved.

Published in China by China Machine Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. . This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予机械工业出版社在中国大陆地区（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记图字：01-2013-8268 号

图书在版编目 (CIP) 数据

MIMO 无线网络手册：原书第 2 版 / (比) 克拉克斯 (Clerckx, B.), (比) 奥思特杰斯 (Oestges, C.) 著；许方敏等译. —北京：机械工业出版社，2015.7

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文：MIMO Wireless Networks (Second Edition)

ISBN 978-7-111-50932-5

I. ①M… II. ①克… ②奥… ③许… III. ①移动通信 - 通信系统 - 技术手册 IV. ①TN929.5-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 168059 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：张俊红 责任编辑：吕 潇 责任校对：陈立辉 刘怡丹

封面设计：马精明 责任印制：李 洋

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 39.75 印张 · 822 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-50932-5

定价：168.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066 机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294 机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版 教育服务网：www.cmpedu.com

本书讨论了 MIMO 无线网络的信道、关键技术和标准，包括多用户和多小区 MIMO 技术。本书特别强调了实际的信号传播机制对系统性能（MIMO 容量和错误率）以及 MIMO 中的空时编码技术设计的影响及原因。作为原书第 2 版，本书更新了第 1 版的内容，介绍了无线通信标准 MIMO 方面的最新进展，如 LTE、LTE-A 和 WiMAX 以及在标准中讨论的一些新议题，包括 CoMP、大规模 MIMO、干扰对齐等。本书讨论范围广，适合高校高年级硕士和博士研究生、产业界研究人员作为参考书籍。



译者序

MIMO 技术从 20 世纪 90 年代末被提出后就引起了学术界和产业界的广泛关注和研究,包括贝尔实验室。经过十几年的研究和发展,它已经成为当今乃至今后很多年内的通信领域主流物理层技术,包括 4G 时代的 LTE、LTE-A/WiMAX 以及未来 5G 时代的大规模天线阵列、3D-MIMO (FD-MIMO) 等,这些都离不开 MIMO 技术。

近年来,MIMO 方面的书籍林林总总,本书的主要特点在于:

1) 贴近产业界,由于作者 Bruno Clerckx 从事 LTE/LTE-A 和 WiMAX 中 MIMO 专题讨论多年,多项专利被标准采纳,因此很多章节都紧密联系标准。译者也都是从事 3GPP LTE-A 标准化多年的人员,如邱海杰是 3GPP CoMP 议题的主要参与完成者,许方敏参与了 3GPP RAN1/4 从 R9 ~ R12 版 MIMO 相关议题的讨论。

2) 丰富的数学推导和验证,尤其是在信息论推导容量方面。

3) 重视实际,尤其突出实际的无线传播环境、实际的信道信息获取和反馈对 MIMO 空时编码设计性能的影响方面。

本书的引进过程十分曲折,从 2013 年初在美国亚马逊网站上看到这本书的原版书起,当时这是市面上众多 MIMO 技术唯一一本介绍最新研究进展的专著。本书的第 1 版在国内外通信学术界有着很好的声誉,在 2010 年由机械工业出版社引入国内。本书的第 2 版被国外某著名网站评为 2013 年十佳通信类图书之一,与第 1 版相比,内容有了很大的改变,如强调多用户、多小区和标准化进展。另外,作者中的 Bruno Clerckx 与译者在三星电子共事时,有着深厚的友谊和联系。所以译者觉得有理由把本书介绍给中国的读者。但是由于本书的篇幅较长、又兼具相当的内容深度,所以当时有很多的顾虑。在机械工业出版社张俊红编辑的热情支持下,最终决定引进该书。

虽然翻译过程没有想象的顺利,但译者还是从中收获颇丰,包括无线信号传播模型的建模、信息论分析等方面。本书适合高等院校相关专业高年级的硕士和博士研究生,以及科研单位的研究员用作参考书籍。

由于本书内容十分丰富,理论推导较多,在翻译过程中,我们已经修改了一些比较明显的小错误,并且已经和作者多次通过电子邮件进行联系沟通以期在未来的第 3 版中进行修改,希望中文版看上去并不比英文版难懂。因为译者水平精力都有限,可能会在翻译过程中引入新的错误和不妥之处,恳请大家在阅读过程中发现问题后不吝赐教。可以用 email 向我们反馈 (xufm@bupt.edu.cn), 十分感谢!

本书的前言、第 1 ~ 6 章和附录部分由许方敏负责翻译,第 7、11、13 和 14 章由邱海杰负责翻译,第 8、9、10、12 和 15 章由郑长亮负责翻译。此外,北京邮电大学的李斌、章扬、王鹏彪、孙梦巍、刘晓凯,三星中国通信研究院的陈子雄、周

续涛、付景兴等同学和同事也参与了部分翻译和校对工作并提出了宝贵的建议。

最后要感谢机械工业出版社编辑的帮助,感谢各位在翻译和审校等环节的辛勤付出。感谢北京邮电大学信息与通信工程学院、三星中国通信研究院、杭州电子科技大学通信工程学院相关领导和同事的支持。感谢家人对我们的支持。

许方敏 郑长亮 邱海杰

2015 年秋于北京、杭州

原书前言

当我们几位作者几年前开始构思写这本书的第 1 版时,已经在信号传播和信号处理领域内合作工作超过 5 年。本书主要讨论 MIMO 无线通信的传播模型和设计工具,但是,本书绝不仅仅是把传播和信号处理这两个领域简单合并,而是希望能表达我们对 MIMO 技术融合的理解,这些都来源于对多天线相关的许多问题无休止的争议、讨论以及和很多同事的研究。显然,这个技术涉及的领域很广泛,因此我们很难详细地讨论到所有的方面。但是,我们的目标是研究者、研发工程师和研究生更全面地介绍多天线、多用户和多小区网络的无线传播模型和空时信号处理技术。

MIMO 方面的书籍已经有很多了,但是,在实际的无线信道和网络以及实际的功率限制下,如何让 MIMO 更好地工作仍然是亟待解决的问题。实际上,天线尺寸和发射功率受限都会对系统设计带来一些限制。例如,依赖于理想传播模型的空时编码设计,在实际的无线信道中就不能完全发挥空时编码的优势。因此,考虑到 MIMO 传播的空时编码设计方法非常具有挑战。通常,传播模型是由很多简单的模型像菜谱一样组合而成,典型的简单模型包括路径损耗法则和抽头延迟线。类似的,有些人认为无线传输方案不需要考虑实际无线信道,而只需要考虑信道对接收信号的影响。换言之,传播模型在后验测试和修改特定的设计上最有用,这是传播模型的一个重要方面,在 IEEE 标准中包括这些模型,但是这并不是传播模型应用的唯一方面,尤其是考虑多天线无线系统时。无线传播不仅为 MIMO 相关的一些棘手问题提供了答案,也对设计高效的传输方案起着重要的作用。因此,我们深入研究了多天线和多链路传播的各个方面,自然包括但不局限于经典的设计和仿真模型。这样可以让设计者基于经典的理论基础并考虑到实际信号传播从而开发出鲁棒的信号处理方案。

本书的第 2 版包括了对最近 MIMO 信号处理技术更新的描述和更新的 MIMO 传播模型,不仅仅包括单用户/单小区场景(类似第 1 版),还包括多用户和多小区网络。基于信息论和通信理论基础,我们着重介绍了实际的信号传播是如何影响 MIMO 传输方案在单用户单小区和多用户多小区部署下的吞吐量和错误性能。此外,本书还介绍了创新和实际的设计鲁棒的空时/空频码和预编码技术,以及多用户 MIMO 和多小区技术方面更新更详细的内容,包括信息论分析多址,广播和干扰信道,具有完全和部分信道状态信息的多用户预编码,协同和协作多小区 MIMO 技术,干扰对齐和大规模 MIMO 系统。这些技术总体构成了部署 4G 网络和超 4G 的关键技术。本书第 2 版的很大一部分是在目前主流的无线通信标准中 MIMO 的实际实现和

性能评估, 例如 WiMAX IEEE802.16e/m 和 3GPP LTE (R8 版和 R9 版) 和 LTE-A (R10 版和 R11 版)。从第 1 章到最后一章, 我们仔细地按照逻辑流程来组织章节内容, 指出重要的理论结果并提供了很多示例。虽然我们尽量对大多数结果提供了详细和清楚的证据, 读者有时还需要阅读参考文献以找到更详细的内容。

现在本书第 2 版的编写已经结束, 我们要向下面的人表示我们诚挚的感谢。首先我们要感谢斯坦福大学的 Arogyaswami J. Paulraj 教授把我们带入 MIMO 通信这个具有挑战的领域。TUWien 的 Ernst Bonek 教授也对本书第 1 版的出版起着重要的作用, 同时他还一如既往地支持和仔细阅读书稿。我们还要感谢 Elsevier 出版社的 Tim Pitts、Charlotte Kent 和 Lisa Jones 友善并高效的编辑工作。

最后但同样重要的, 我们衷心地感谢一些匿名和不匿名的审稿人和读者的认真审读并提出宝贵的意见, 他们: Junil Choi, Sébastien Deru, Bertrand Devillers 博士, Mischa Dohler 博士, Maxime Guillaud 博士, Chenxi Hao, Are Hjørungnes 教授, Younsun Kim 博士, Marios Kountouris 教授, Harold Sneessens 博士。

伦敦帝国学院 Bruno Clerckx

天主教鲁汶大学 Claude Oestges

作者简介

Bruno Clerckx 是英国伦敦帝国学院电气和电子工程学院的助理教授（讲师）。他分别于 2000 年和 2005 年在天主教鲁汶大学（比利时新鲁汶）取得电子工程硕士和博士学位。他 1998 ~ 1999 年在天主教鲁汶大学（比利时鲁汶）学习，并于 2003 年到斯坦福大学（美国加州）访问，于 2004 年在 Eurecom 学院（法国，索菲亚安提波利斯）访问研究。2006 年，他在天主教鲁汶大学任博士后。在加入伦敦帝国学院之前，他从 2006 年到 2011 年在三星技术院（SAIT）和三星电子（韩国，水原）担任高级工程师和项目经理。他从 2007 年到 2011 年担任三星下行 MIMO、协作多点（CoMP）传输/接收和异构网（HetNet）的首席代表，积极参与 3GPP LTE/LTE-Advanced RAN1（R8 ~ R11 版）和 IEEE 802.16m 的标准化工作。他在标准化组中担任 LTE-Advanced 协作多点（CoMP）研究项目的报告员和技术报告 3GPP TR36.819 的编辑。

Bruno Clerckx 是两本书的作者，并且出版了超过 70 篇国际期刊和会议论文，150 篇标准提案和许多已授权和待授权专利。他获得了 IEEE SCVT2002 的最佳学生论文奖以及三星特别贡献奖。Bruno Clerckx 目前担任 IEEE Transactions on Communications 的编辑和 EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 特刊的特邀编辑。

Claude Oestges 是比利时新鲁汶的天主教鲁汶大学信息和通信技术、电子和应用数学学院电子工程部的副教授，以及比利时科研基金（FRS-FNRS）的研究员。他于 1996 年和 2000 年在天主教鲁汶大学获得硕士和博士学位。2001 年 1 月到 12 月，Claude Oestges 进入斯坦福大学（美国加州）的智能天线研究组（信息系统实验室）任博士后，期间他参与了在 G2 MMDS 技术的宽带无线接入中部署 MIMO 多极化信道模型。从 2001 年 10 月到 2005 年 9 月，Claude Oestges 是比利时国家科学基金的博士后。同时，他数次短期访问斯坦福大学和 Eurecom 学院（法国），并参与 COST 273 目标移动宽带多媒体网络项目，NEWCOM 卓越网络项目和 IEEE 802.11 标准工作组中的多天馈信道建模。他目前的研究包括无线通信的多维信道建模，包括 MIMO 和协同网络，UWB 系统和卫星系统。他曾主持 COST 2100 普遍的移动环境无线通信项目中的参考信道建模工作组，并积极参与 NEWCOM++ 卓越网络项目。他目前主持 COST IC1004 项目绿色智能环境的协同无线通信的无线信道工作组。

Claude Oestges 是三本书和一些书部分章节的作者，此外还有 170 多篇国际期刊和会议论文。他在 2001 年获得 IET 马可尼优秀奖，在 2004 年获得 IEEE 车载通信技术协会 Neal Shepherd 奖。他目前担任 IEEE Transactions on Vehicular Technology, IEEE Transactions on Antennas and Propagation 和 EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 的副编辑。

缩 略 语

2D, 3D	二/三维	DoD	离开方向
3G, 4G	第三代/第四代	EGC	等功率合并
3GPP	第三代合作伙伴计划	EM	期望最大化
ABS	高级基站	eNB	增强 NodeB
AMS	高级移动站	EVD	特征值分解
AWGN	加性高斯白噪声	FDD	频分双工
BCJR	Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv (算法)	FEC	前向纠错
BD	分块对角	FER	误帧率
BER	误比特率	GDD	通用延迟分集
BF	波束赋形	HE	水平编码
BFS	广度优先搜索	HS/MRC	混合选择/最大比合并
BPSK	二进制相移键控	ICI	小区间干扰
BICM	比特交织编码调制	ICIC	小区间干扰协调
BS	基站	IDFT	离散傅里叶逆变换
CB	协同波束赋形	iff	当且仅当
CCI	共信道干扰	i. i. d.	独立同分布
CDD	循环延迟分集	ISI	符号间干扰
CDF	累计分布函数	JLS	联合泄漏抑制
CDI	信道方向信息	JP	联合处理
CDIT	发射端的信道分布信息	JT	联合传输
CDMA	码分多址	LDC	线性疏散码
CFO	载波频率偏移	LLF	对数似然函数
CIR	信道脉冲响应	LLR	对数似然比
CL	闭环	LOS	视距
CoMP	协作多点	LSR	本地散射比率
CP	循环前缀	MAP	最大后验
CS	协作调度	MC	多小区
CSI (T)	信道状态信息-(在发射端)	MCS	调制编码方案
D-BLAST	贝尔实验室对角分层空时码	MCW	多个码字
DCS	动态小区选择	MFB	匹配滤波器界
DFT	离散傅里叶变换	MGF	矩量母函数
DL	下行	MIMO	多输入多输出
DPS	方向功率谱	MISO	多输入单输出
DoA	到达方向	ML (D)	最大似然 (检测)

- MMSE 最小均方误差
- MPC 多径分量
- MRC 最大比合并
- MT 移动终端
- MU 多用户
- NP 非确定性多项式复杂问题
- OFDM 正交频分复用
- OL 开环
- OSIC 有序串行干扰消除
- O-SFBC 正交空频分组码
- O-STBC 正交空时分组码
- PAPR 峰均功率比
- PC 功率控制
- PDF 概率密度函数
- PDCCH 物理下行控制信道
- PDSCH 物理下行共享信道
- PDS 功率延迟谱
- PEP 成对错误概率
- PF 比例公平
- PMI 预编码矩阵指示
- PSK 相移键控
- PUCCH 物理上行控制信道
- PUSCH 物理上行共享信道
- QAM 正交调幅
- QoS 服务质量
- QP 二次规划
- QPSK 正交相移键控
- RB 资源块
- RF 射频
- r. h. s. 右手边
- RMS 方均根
- RS 参考信道
- RU 资源单元
- Rx 接收机
- SC 单载波
- SCW 单码字
- SD 球形解码
- SDR 半正定松弛
- SER 误符号率
- SIC 串行干扰消除
- SIMO 单输入多输出
- SISO 单输入单输出
- SINR 信干噪比
- SM 空间复用
- SNR 信噪比
- SRS 探测参考信号
- ST 空时
- STBC 空时分组码
- STCM 空时编码调制
- STTC 空时格状码
- SU 单用户
- SUI 斯坦福大学过渡模型
- SUS 准正交用户选择
- SVD 奇异值分解
- SVER 误符号矢量率
- TCM 网格编码调制
- TD 传输分集
- TDD 时分双工
- Tx 发射机
- UE 用户设备
- UL 上行
- ULA 均匀直线阵列
- UMTS 通用移动通信系统
- UTD 一致性绕射理论
- V-BLAST 贝尔实验室垂直分层空时码
- VE 垂直编码
- WLAN 无线局域网
- WLL 无线本地回路
- WMAN 无线城域网
- WSSUS (H) 广义平稳非相关散射 (同构)
- XPD 交叉极化鉴别率
- XPI 交叉极化隔离度
- XPR 交叉极化比
- ZF 迫零
- ZFBF 迫零波束赋形

运算符号表

$\triangle$ 变量定义

ε 数学期望运算符

$\otimes$ 克罗内克乘积

$\odot$ 哈达玛 (按元素) 乘积

$\star$ 卷积

$\doteq$ 指数相等, $f(x) \doteq x^n \iff \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\log_2(f(x))}{\log_2(x)} = b$

$\mathbb{R}$ 实数域

$\mathbb{Z}$ 整数域

$\mathbb{C}$ 复数域

ρ 信噪比

a, α 标量

$\mathbf{a}$ 行或列向量

$\mathbf{A}$ 矩阵

$\mathbf{A}(m, n)$ 矩阵 $\mathbf{A}$ 中第 m 行第 n 列的元素

$\mathbf{A}(m, :)$ 矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 m 行

$\mathbf{A}(:, n)$ 矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 n 列

$\mathbf{A}^T$ 转置

$\mathbf{A}^*$ 共轭

$\mathbf{A}^H$ 共轭转置 (厄米特)

$\mathbf{A}^\dagger$ 伪逆

$\mathbf{A} \geq 0$ $\mathbf{A}$ 是半正定矩阵

$\det(\mathbf{A})$ $\mathbf{A}$ 的行列式

$\text{Tr}\{\mathbf{A}\}$ $\mathbf{A}$ 的迹

$\Re[\mathbf{A}]$ $\mathbf{A}$ 的实部

$\Im[\mathbf{A}]$ $\mathbf{A}$ 的虚部

$|a|$ 标量 a 的绝对值

$\|\mathbf{A}\|_F$ $\mathbf{A}$ 的 Forbenius 范数

$|\mathbf{A}|$ 矩阵 $\mathbf{A}$ 对应元素的绝对值

$\|\mathbf{a}\|$ 向量 $\mathbf{a}$ 的范数

$\bar{\mathbf{a}}$ $\bar{\mathbf{a}} = \mathbf{a}/\|\mathbf{a}\|$ 向量 $\mathbf{a}$ 的方向信息

$\angle(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 向量 $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 之间的角度

$\text{vec}(\mathbf{A})$ 把 $\mathbf{A}$ 按列排列成 $mn \times 1$ 维的向量

$\text{diag}\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ $n \times n$ 维的对角矩阵,

其中第 (m, m) 个元素是 a_m

$r(\mathbf{A})$ 矩阵 $\mathbf{A}$ 的秩

$\sigma_k(\mathbf{A})$ 矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 k 个奇异值

$\lambda_k(\mathbf{A})$ 矩阵 $\mathbf{A}$ (厄米特矩阵) 或 $\mathbf{A}\mathbf{A}^H$ (非厄米特矩阵) 的第 k 个特征值

$\mathbf{0}_{m \times n}$ $m \times n$ 维的零矩阵

$\mathbf{1}_{m \times n}$ $m \times n$ 维的 1 矩阵

$\mathbf{I}_m$ $m \times m$ 维的单位矩阵

$\lceil x \rceil$ $\lceil x \rceil = \begin{cases} 0, & \text{如果 } x = 0 \\ 1, & \text{如果 } x > 0 \end{cases}$

$\lfloor x \rfloor$ 小于或等于 x 的最大整数

$\text{mod } x$ 模 x 操作

$\log(x)$ 以 e 为底的对数 (标准写作 $\ln(x)$, 此处为忠实原书, 维持原写法)

$\log_2(x)$ 以 2 为底的对数 (标准写作 $\text{lb}(x)$, 此处为忠实原书, 维持原写法)

$x \text{ dB}$ 把 x 从线性值转换为 dB

$\delta[x]$ 狄拉克 δ (单位脉冲) 函数

δ_{kl} $\delta_{kl} = \begin{cases} 1 & \text{如果 } k = l, \\ 0 & \text{如果 } k \neq l \end{cases}$

$\#\tau$ 集合 τ 的基数

$\text{Conv}\{\tau\}$ 集合 τ 的凸包

$\psi(n)$ digamma 函数, $\psi(n) = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k} - \gamma$,

γ 是欧拉常数, $\gamma \approx 0.57721566$

$\mathcal{Q}(x)$ Q 函数 $\mathcal{Q}(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$

$E_p(x)$ p 阶指数积分, $E_p(x) = \int_1^\infty e^{-xu} u^{-p} du$, $\Re[x] > 0$

$\Gamma(x, y)$ 不完备 gamma 函数, $\Gamma(x, y) = \int_y^\infty u^{x-1} e^{-u} du$, $\Re[x] > 0$

$\Gamma(x)$ gamma 函数, $\Gamma(x) = \Gamma(x, 0) = \int_0^\infty u^{x-1} e^{-u} du$, $\Re[x] > 0$

$\binom{n}{p}$ 二项式系数, $\binom{n}{p} = \frac{n!}{p!(n-p)!}$

$p_x(x)$ 随机变量 x 的概率密度函数

$p_{x_1, \dots, x_n}(x_1, \dots, x_n)$ 随机变量 $x_1, \dots, x_n$ 的联合概率密度函数

$\mathcal{M}_x(\tau)$ 随机变量 x 的矩量母函数

$\mathcal{CN}(0, \mathbf{R})$ 协方差矩阵为 $\mathbf{R}$ 的零均值复高

斯分布

$\mathcal{F}(v_1, v_2)$ $\mathcal{F}$ 分布 [JKB95], $\rho \mathcal{F}(x) =$

$$\frac{\Gamma\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v_1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{v_2}{2}\right)} \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\frac{v_1}{2}} x^{\frac{v_1}{2}-1} \left(1 + \frac{v_1}{v_2}x\right)^{-\frac{v_1+v_2}{2}}$$

目 录

译者序

原书前言

作者简介

缩略语

运算符表

第 1 章 多天线通信介绍	1
1.1 天线阵列处理概述	1
1.2 多天线系统的空时无线信道	2
1.2.1 离散时域表示	2
1.2.2 路损和阴影	3
1.2.3 衰落	4
1.2.4 MIMO 信道	4
1.3 在无线系统中利用多天线	5
1.3.1 分集技术	5
1.3.2 复用能力	7
1.3.3 干扰管理	8
1.4 单输入多输出系统	8
1.4.1 选择合并实现接收分集	8
1.4.2 增益合并实现接收分集	9
1.4.3 混合选择/增益合并实现接收分集	12
1.5 多输入单输出系统	12
1.5.1 多波束天线切换	13
1.5.2 匹配波束赋形实现发射分集	13
1.5.3 零陷和最优波束赋形	14
1.5.4 空时编码实现发射分集	14
1.5.5 间接发射分集	15
1.6 多输入多输出系统	16
1.6.1 具有完全发射信道信息的 MIMO	16
1.6.2 无发射信道信息的 MIMO	18
1.6.3 具有部分发射信道信息的 MIMO	21
1.7 多链路 MIMO 网络：从多用户到多小区 MIMO	22
1.8 商用无线系统中的 MIMO 技术	22
第 2 章 从多维传输到多链路 MIMO 信道	24

2.1	方向性信道建模	25
2.1.1	双方向性信道冲激响应	25
2.1.2	多维相关函数和平稳性	29
2.1.3	信道衰落统计量和 K 因子	30
2.1.4	多普勒谱和相干时间	31
2.1.5	功率延迟和方向谱	33
2.1.6	双方向性信道的互相关特性	35
2.2	MIMO 信道矩阵	35
2.2.1	推导 MIMO 信道矩阵	35
2.2.2	天线和传播的联系: 引入导向向量	36
2.2.3	有限散射体时的 MIMO 信道表示	37
2.3	MIMO 信道矩阵的统计特性	37
2.3.1	空间相关	37
2.3.2	奇异值和特征值	40
2.3.3	Frobenius 范数	41
2.4	多链路 MIMO 传播	41
2.5	天线阵列对 MIMO 信道的影响	42
2.5.1	理想与实际的天线阵列	42
2.5.2	互耦合	43
2.5.3	双极化天线	46
2.6	MIMO 信道建模	47
2.6.1	分析表示与实际模型	47
2.6.2	离散 MIMO 信道建模: 重温抽样理论	47
第 3 章	系统设计中 MIMO 信道的分析表示	49
3.1	基于传播的 MIMO 度量	50
3.1.1	模型和相关矩阵的比较	50
3.1.2	多径丰富程度特征的度量	51
3.1.3	测量 MIMO 信道的非平稳性	53
3.1.4	测量多链路 MIMO 信道之间的距离	56
3.2	窄带相关 MIMO 信道的单链路分析表示	58
3.2.1	瑞利衰落信道	58
3.2.2	莱斯衰落信道	60
3.2.3	双瑞利衰落小孔信道	60
3.2.4	相关瑞利动态信道	61
3.3	双极化信道	63
3.3.1	建模去极化的天线和散射	63
3.3.2	双极化瑞利衰落信道	65
3.3.3	双极化莱斯衰落信道	70
3.4	MIMO 信道可分离的表示	70

3.4.1	克罗内克模型	70
3.4.2	虚信道的表示	72
3.4.3	特征波束模型	74
3.4.4	可分离表示方法的精度	76
3.5	频率选择性 MIMO 信道	82
3.6	MIMO 信道的多链路分析表示	83
第 4 章	性能评估中使用的实际 MIMO 信道模型	85
4.1	电磁波模型	85
4.1.1	基于射线的确定性模型	85
4.1.2	多极化信道	86
4.2	基于几何的随机模型	86
4.2.1	单环模型	87
4.2.2	双环模型	89
4.2.3	混合椭圆环模型	89
4.2.4	椭圆和圆形模型	91
4.2.5	基于几何的模型扩展到双极化信道	91
4.2.6	基于几何的信道模型的克罗内克可分离性	93
4.3	经验信道模型	95
4.3.1	扩展 Saleh-Valenzuela 模型	95
4.3.2	SUI 信道模型	96
4.3.3	多链路场景中的阴影相关模型	97
4.4	标准化中的 MIMO 信道模型	98
4.4.1	IEEE802.11 TGn 模型	98
4.4.2	IEEE802.16/WiMAX 模型	98
4.4.3	COST259/273 方向信道模型	99
4.4.4	3GPP/3GPP2 空间信道模型和 WINNER	100
4.4.5	COST2100 多链路 MIMO 信道模型	102
4.4.6	WINNER II 多链路 MIMO 信道模型	103
第 5 章	单链路 MIMO 信道容量	105
5.1	引言	105
5.1.1	信息论的一些概念	105
5.1.2	系统模型	106
5.2	确定性 MIMO 信道的容量	107
5.2.1	容量和注水算法	107
5.2.2	容量界和次优的功率分配	111
5.3	快衰落信道的遍历容量	111
5.3.1	理想传输信道信息的 MIMO 容量	112
5.3.2	部分传输信道信息的 MIMO 容量	113
5.4	独立同分布瑞利快衰落信道	113

5.4.1 理想信道信息	113
5.4.2 部分传输信道信息	115
5.5 相关瑞利快衰落信道	122
5.5.1 相等功率分配的频谱效率	122
5.5.2 部分传输信道信息	126
5.6 莱斯快衰落信道	129
5.6.1 相等功率分配的频谱效率	129
5.6.2 部分传输信道信息	131
5.7 中断容量和概率以及在慢衰落信道中分集-复用的折中	131
5.7.1 理想发射信道信息	132
5.7.2 部分传输信道信息	133
5.8 独立同分布瑞利慢衰落信道	134
5.8.1 无限 SNR	134
5.8.2 有限 SNR	139
5.9 相关瑞利和莱斯慢衰落信道	140
第6章 独立同分布瑞利平坦衰落信道的空时编码	142
6.1 空时编码概述	142
6.2 系统模型	143
6.3 基于错误率的设计方法	143
6.3.1 快衰落 MIMO 信道: 距离积准则	145
6.3.2 慢衰落 MIMO 信道: 秩-行列式和秩-迹准则	146
6.4 基于信息论的设计方法	148
6.4.1 快衰落 MIMO 信道: 达到遍历容量	148
6.4.2 慢衰落 MIMO 信道: 达到分集-复用折中	150
6.5 空时分组码	154
6.5.1 线性 STBC 的通用架构	155
6.5.2 空间复用/V-BLAST	160
6.5.3 D-BLAST	169
6.5.4 正交空时分组码	171
6.5.5 准正交空时分组码	177
6.5.6 线性离散码	179
6.5.7 代数空时编码	181
6.5.8 全局性能比较	184
6.6 空时格码	186
6.6.1 空时格码	186
6.6.2 超正交空时格码	192
第7章 MIMO 接收机设计: 检测和信道估计	194
7.1 回顾: 系统模型	194
7.2 非编码传输 MIMO 接收机	195