



国际信息工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

宽带无线通信中的 空时编码

**Space-Time Coding for
Broadband Wireless
Communications**

(美) Georgios B. Giannakis

Zhiqiang Liu

Xiaoli Ma

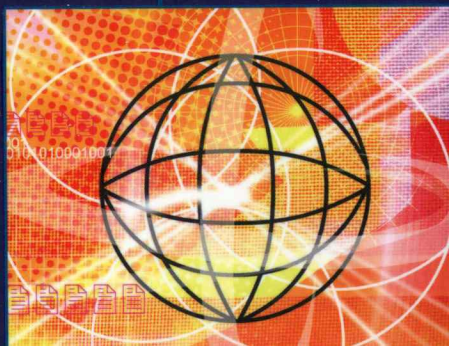
Shengli Zhou

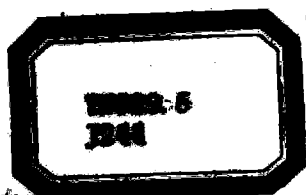
著

王 钢 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





国际信息工程先进技术译丛

宽带无线通信中的空时编码

(美) Georgios B. Giannakis, Zhiqiang Liu,
Xiaoli Ma, Shengli Zhou 著
王 钢 等译



机械工业出版社

本书详细介绍了宽带无线移动通信下的空时编码设计方法、基本性质及性能分析,还详细讲述了复数域编码传输、球形译码、闭环空时编码和多用户多天系统等内容。本书内容覆盖面广泛,叙述方式深入浅出、条理清晰,从而使得读者能对这一研究领域的基本原理、研究现状及未来趋势有一个比较全面的理解。

本书既可以作为高等院校电子信息、通信等专业高年级本科生和研究生的教材,也可供工程技术人员提供参考。

Space-Time Coding for Broadband Wireless Communications/

by Georgios B. Giannakis, Zhiqiang Liu, Xiaoli Ma, Shengli Zhou.

ISBN: 9780471214793

All Rights Reserved. This translation published under license.

本书原版由 Wiley 公司出版,并授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Wiley 公司的防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2007-5830

图书在版编目(CIP)数据

宽带无线通信中的空时编码/(美)贾那斯(Giannakis, G. B.)等著;王钢等译. —北京:机械工业出版社,2009.6

(国际信息工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-26926-7

I. 宽… II. ①贾…②王… III. 宽带通信系统—移动通信—编码 IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 066714 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:朱林 版式设计:霍永明 责任校对:姜婷

封面设计:马精明 责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·27.75 印张·539 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-26926-7

定价:88.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379045

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

近十几年，特别是最近几年，随着电子信息技术的快速发展，无线通信技术取得了令人瞩目的成就，信息产业已成为世界各国国民经济中的一个主导产业。而如何利用有限的频谱资源实现宽带移动多媒体业务，满足人们日益增长的物质文化生活需求，对无线通信技术的发展提出了巨大的挑战。多天线技术能够充分利用空间资源，在不增加系统带宽和天线总发射功率的情况下，有效对抗无线信道衰落的影响，提高通信系统的频谱利用率，是近几年来无线通信研究中的一个重大突破。

本书是作者所在课题组多年科研、教学成果的系统总结，采用统一的观点，全面地介绍了宽带无线通信系统中的空时编码设计方法、基本性质及性能分析。本书不但详细介绍了平坦衰落信道、频率选择性信道和时间选择性信道下的空时编码技术，还详细介绍了复数域编码传输、球形解码、闭环空时编码和多用户多天线系统等内容。本书着重强调理论联系实际，提供了大量图表和例子，可以帮助读者更好地理解基本原理。

本书以无线通信领域科研人员为对象，要求读者具有矩阵论、随机过程和通信原理的基本知识。本书既可以作为高等院校电子信息、通信等专业研究生课程的教材，也可以为工程技术人员提供参考。

本书由王钢组织翻译，参加本书翻译和初校工作的人员还有邓建民、魏洪涛、李晓、张小军、阎伟、尹家军、王国栋、王铁成、王瑞松、刘岱、孙向东、侯萍、李冬、王晓峰、李艳林等，机械工业出版社的朱林编辑为本书的后期出版做了大量细致的工作，在此，对所有为本书出版提供帮助的人士表示诚挚的谢意！

由于本书的新颖性和译者水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，敬请读者不吝指正。

译者
2009年5月

前 言

展望下一代宽带无线通信系统,将向广大移动用户提供宽带多媒体服务,包括高速无线互联网接入、无线电视以及移动计算。对这些服务的快速增长需求,促使通信技术朝向更高数据传输速率、更高的移动性以及特定系统中甚至更高的载波频率发展,这样增加了对共享空中接口上可靠通信的要求。为了支持可靠的宽带无线通信,当前正进行大量的研究工作,设计先进的编码、调制、信号处理以及多址接入方案,提高无线链路的质量与谱效率。其中,特别有前途的是,研究多输入多输出(Multi Input Multi Output, MIMO)信道上的多天线系统的空时(Space Time, ST)编码和处理算法。

利用 MIMO 信道提供的额外自由度,在错误性能以及谱效率方面,ST 系统能潜在提供很大的增益。为了这一目标,空时编码和处理技术预期在下一代宽带无线移动系统中扮演重要角色。然而,为了实现空时编码多天线系统的潜力,设计者必须应对各种性能极限挑战,包括但不限于时间和频率选择性衰落,多用户干扰,以及大小、功率和成本的限制。在过去的 8 年中,学术界、工业界以及政府实验室中应对这些挑战的研究开发工作,得到了大量令人激动的成果。随着标准化工作的迅速开展,这一领域的研究在未来的几年中预期仍将保持活力。

本书的目标是,展示运用在宽带无线移动信道上的空时编码多天线系统的技术发展水平。尽管多天线系统的好处渗透到了协议栈的高层,但本书仍专注于在物理层上的空时编码系统的算法与性能分析。各章内容的概要在 1.5 节中介绍。第 1 章和第 2 章提供了无线通信基础、分集技术以及 MIMO 信道容量的背景,以使得内容完备。为了更进一步了解这些主题,感兴趣的读者可以参考这些领域的标准引文和最近的书籍。本书适于具有线性代数基本背景、大学无线通信和统计信号处理方面知识以及数字通信领域硕士水平专门技术的学者和实际工作工程师阅读。

空时编码多天线系统这一主题,近来已出版许多研究专著^[8,16,119,126,130,208,281]和编著^[85,268]。本书补充了这些著作的文献,并且在几个方面是独一无二的。它提供了这个主题的统一全面的讲解。除了平坦衰落 MIMO 信道的空时编码,还深入展示了宽带无线移动链路遇到的全部频率、时间、双选择性 MIMO 信道下的空时编码。它进一步涵盖了复数域编码传输、球形解码算法、闭环空时编码和多用户多天线系统方面近来的进展。尽管试图公正综述空时编码系统方面的技术发展水平,篇幅的限制以及作者的主观看法,必导致一些参考文献不可避免的遗漏或

不充分的概括。除致歉之外,我们必须承认有个人的偏爱。本书内容受到从1999~2005年期间本书第一作者指导的网络与通信信号处理(SPiNCOM)组开展的研究工作激发,这期间3个合作作者开始了在Minnesota大学的研究生学习。这一事实解释了为什么内容自然偏向于由SPiNCOM学者探索的课题。

写作这本书是一个长期但是收获颇丰的经历。作者们和本书内容各种形式地受益于许多人们,他们直接或间接慷慨地提供了帮助和支持。在技术方面,我们很高兴致谢这些贡献,并且感谢SPiNCOM组以前和现在的成员:Zhengdao Wang教授,通过合作研究以及联合讨论,影响了本书中的各种想法;Wanlun Zhao和Renqiu Wang博士,他们贡献了第5章的早期版本;以及Alfonso Cano、Alejandro Ribeiro、Yingqun Yu和Xiaodong Cai教授、Geert Leus教授、Shuichi Ohno教授、Yan Xin教授、Liuqing Yang教授、Yinwei Yao教授以及Qing wen Liu博士与Pengfei Xia博士,他们提供了许多有帮助的讨论。本书的叙述由一些我们收到的建设性的评论得到了显著的提升,这些评论来自朋友和同事,他们用简短的评论回顾了各章。我们由衷地感谢P. Banelli、H. Bölcskei、X. Cai、T. Davidson、F. Digham、M. Kisiou、J. Kleider、G. Leus、S. Ohno、L. Rugini、B. Sadler、E. Serpedin、S. Shahbazpanahi、N. Sidiropoulos、A. Swami、C. Tepedelenlioglu、Z. Tian、Z. Wang、Y. Xin、Y. Yao以及W. Zhao。

本书中的研究工作基金主要来自于通信和网络合作技术联盟下属的军方研究实验室(ARL)(CTA-CN授予DAAD19-01-2-0011);并且部分来自于军队研究办公室(ARO授予DAAG55-98-1-0336、W911NF-04-1-0338、W911NF-05-01-0283及W911NF-06-1-0090);国家科学基金会(NSF无线首创9979443和CCF-0515032);ETRI,韩国;I2R,新加坡。作者也感谢他们的学院为这本专著的写作提供了方便。

个人方面,我们都感谢在写作这本书期间,我们家人的理解、忍耐以及坚定的爱。

Georgios B. Giannakis, Minnesota 大学

Zhiqiang Liu, Iowa 大学

Xiaoli Ma, Georgia 理工学院

Shengli Zhou, Connecticut 大学

缩 略 语

1G First Generation 第一代

2G Second Generation 第二代

3G Third Generation 第三代

a. k. a. also known as 也可看作是

AMPS Advanced Mobile Phone System 先进移动电话系统

AP Affine Precoding 仿射预编码

AWGN Additive White Gaussian Noise 加性白高斯噪声

BCDD Block Circular Delay Diversity 分组循环延迟分集

BEM Basis Expansion Model 基本扩展模型

BER Bit Error Rate 误码率

BPSK Binary Phase Shift Keying 二进制相移键控

BS Base Station 基站

CC Convolutional Coding 卷积编码

CDF Cumulative Distribution Function 累积分布函数

CDMA Code Division Multiple Access 码分多址

cf. confer (Latin: Compare) 对比

CFO Carrier Frequency Offset 载波频率偏移

CIBS Chip-Interleaved Block Spread 切普交织分组扩展

CM Constant Modulus 恒模

CP Cyclic Prefix 循环前缀

CSI Channel State Information 信道状态信息

D-BLAST Diagonal Bell Laboratories Layered Space-Time 对角贝尔实验室分层空时

DFE Decision-Feedback Equalizer 判决反馈均衡器

DFT Discrete Fourier Transform 离散傅里叶变换

DPS Digital Phase Sweeping 数字扫相

DS Direct Sequence 直接序列

DS-CDMA Direct Sequence- Code Division Multiple Access 直接序列-码分多址

EDGE Enhanced Data Rates for GSM Evolution GSM 演进增强型数据率

EP Error Performance 差错性能

- EVD Eigenvalue Decomposition 特征值分解
FDD Frequency Division Duplex 频分复用
FDFR Full Diversity Full Rate 满分集满速率
FDMA Frequency Division Multiple Access 频分多址
FER Frame Error Rate 误帧率
FFT Fast Fourier Transform 快速傅里叶变换
GDD Generalized Delay Diversity 广义延迟分集
GMSK Gaussian Minimum Shift Keying 高斯最小移位键控
GPRS General Packet Radio Service 通用分组无线电服务
GSM Global System for Mobile Communication 全球移动通信系统
GSTF Grouped Space Time Frequency 群空时频率
IBI Interblock Interference 分组间干扰
IC Interference Cancellation 干扰抵消
IFFT Inverse Fast Fourier Transform 快速傅里叶反变换
IN Interference Nulling 干扰置零
ISI Inter-Symbol Interference 符号间干扰
LCFC Linear Complex Field Code 线性复数域编码
LMMSE Linear Minimum Mean Square Error 线性最小方均误差
LOS Line-Of-Sight 视距
LS Least Squares 最小二乘
MC Multi-Carrier 多载波
MC-CDMA Multiple Carrier-Code Division Multiple Access 多载波-码分多址
MGF Moment Generating Function 矩生成函数
MIMO Multiple Input Multiple Output 多输入多输出
MISO Multiple Input Single Output 多输入单输出
ML Maximum Likelihood 最大似然
MLSE Maximum Likelihood Sequence Estimation 最大似然序贯估计
MMSE Minimum Mean Square Error 最小方均误差
MP Modulus-Preserving 模保留
MRC Maximum Rate Combining 最大比合并
MRT Maximum Ratio Transmission 最大速率传输
MUI Multiple User Interference 多用户干扰
MUD Multi-User Detection 多用户检测
NC Nulling-Cancelling 消零
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing 正交频分复用

- OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access 正交频分复用接入
- OTD Orthogonal Transmit Diversity 正交传输分集
- OSTBC Orthogonal Space Time Block Code 正交空时分组编码
- PAM Pulse Amplitude Modulation 脉冲幅度调制
- PAR Peak-to-Average Power Ratio 均峰功率比
- PCCC Parallel Concatenated Convolution Code 并行级联卷积编码
- PCS Personal Communication System 个人通信系统
- pcu per channel use 每信道使用
- PDA Probabilistic Data Association 概率数据相关
- PDC Pacific Digital Cellular 太平洋数字化蜂窝通信
- pdf probability density function 概率密度函数
- PEP Pairwise Error Probability 成对错误概率
- PER Pair-wise Error Rate 成对错误率
- PSK Phase Shift Keying 相移键控
- QAM Quadrature Amplitude Modulation 正交幅度调制
- QO-STBC Quasi-Orthogonal Space Time Block Code 准正交空时分组编码
- QPSK Quadrature Phase Shift Keying 正交相移键控
- Rx Receiver Antenna 接收机天线
- SCCC Serially Concatenated Convolution Code 串行级联卷积编码
- SDA Sphere Decoding Algorithm 球形解码算法
- SDMA Space Division Multiple Access 空分多址
- SER Symbol Error Rate 符号错误率
- SF Space Frequency 空间频率
- SFBC Space-Frequency Block Code 空频分组编码
- SFTC Space-Frequency Trellis Code 空频格码
- SISO Single Input Single Output 单输入单输出
- siso soft-input soft-output 软输入软输出
- SNR Signal-to-Noise Ratio 信噪比
- ST Space-Time 空时
- STBC Space-Time Block Code 空时分组编码
- STC Space-Time Code 空时编码
- STF Space-Time-Frequency 空时频率
- STS Space-Time Spreading 空时扩展
- STTC Space-Time Trellis Code 空时格码
- SU Subscriber Unit 用户单元

- SVD Singular Value Decomposition 奇异值分解
TCM Trellis Coded Modulation 格码调制
Time Dispersion 时间弥散性
TD Transmit Diversity 传输分集
TDD Time Division Duplex 时分复用
TDMA Time Division Multiple Access 时分多址
TD-S-CAMA Time Division Synchronous CDMA 时分同步码分多址
TU Typical Urban 典型市区
TV Time-Varying 时变
Tx Transmitter Antenna 发射器天线
UP Unitary Precoding 酉预编码
USTC Unitary Space-Time Code 酉空时编码
V-BLAST Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time 垂直贝尔实验室分层
空时
WCDMA Wideband Code Division Multiple Access 宽带码分多址
WF Water Filling 注水
WP Water Pouring 放水
ZF Zero Forcing 迫零
ZP Zero Padding 尾部补零

目 录

译者序

前言

缩略语

第1章 动机与内容	1
1.1 无线通信系统的发展	1
1.2 无线传播效应	2
1.3 无线信道的参数与分类	4
1.3.1 延迟扩展和相干带宽	5
1.3.2 多普勒扩展和相干时间	6
1.4 提供的分集及其作用与分类	10
1.4.1 频率选择性信道下的分集	10
1.4.2 时间选择性信道下的分集	12
1.4.3 多天线信道下的分集	13
1.5 章节组织	16
第2章 空时无线通信基础	21
2.1 一般空时系统模型	21
2.2 空时编码与信道编码	24
2.3 空时信道容量	26
2.3.1 中断容量	27
2.3.2 各态历经容量	31
2.4 空时编码的错误性能	36
2.5 空时编码的设计准则	39
2.6 分集与速率：有限信噪比与渐近信噪比	40
2.7 空时编码的分类	45
2.8 小结	46
第3章 平坦衰落信道下的相干空时编码	47
3.1 延迟分集空时编码	47
3.2 空时格码	49
3.2.1 栅格表达式	49
3.2.2 TSC 空时格码	50
3.2.3 BBH 空时格码	51
3.2.4 GFK 空时格码	54

3.2.5 空时格码的维特比解码算法	56
3.3 正交空时分组码	56
3.3.1 OSTBC 的编码设计	57
3.3.2 OSTBC 的线性最大似然解码	59
3.3.3 OSTBC 的误码率性能	60
3.3.4 采用 OSTBC 的信道容量	62
3.4 准正交空时分组码	63
3.5 空时线性复数域码	65
3.5.1 天线转换和线性预编码	66
3.5.2 线性预编码矩阵的设计	67
3.5.3 编码增益的上界	68
3.5.4 基于参数的构造方法	68
3.5.5 基于代数工具的构造方法	69
3.5.6 空时线性复数域码的解码	72
3.5.7 系数保留的空时线性复数域码	75
3.6 OSTBC、QO-STBC 和 STLCFC 设计方法之间的联系	78
3.6.1 MP-STLCFC 嵌入到 Alamouti 码	78
3.6.2 2×2 的 MP-STLCFC 嵌入到 OSTBC	79
3.6.3 QO-MP-STLCFC 的解码	80
3.7 小结	81
第 4 章 分层空时编码	83
4.1 BLAST 设计	84
4.1.1 D-BLAST	84
4.1.2 V-BLAST	87
4.1.3 BLAST 码的速率性能	88
4.2 速率分集折中的空时编码	88
4.2.1 具有天线组的分层空时编码	89
4.2.2 分层高速率编码	89
4.3 满分集满速率空时编码	91
4.3.1 FDFR 收发机	91
4.3.2 代数 FDFR 编码设计	93
4.3.3 互信息分析	94
4.3.4 分集-速率-性能折中	95
4.4 数值仿真实例	96
4.5 小结	99
第 5 章 球形解码和 (近) 最优 MIMO 解调	100
5.1 球形解码算法	101

5.1.1 选择一个有限的搜索半径	103
5.1.2 无约束最小二乘法的初始化	104
5.1.3 在固定半径球内搜索	105
5.2 球形解码算法的实际平均复杂度	107
5.3 球形解码算法的改进	111
5.3.1 采用检测顺序和零消除的球形解码算法	111
5.3.2 球形解码算法的 Schnorr-Euchner 变化	112
5.3.3 增大半径搜索的球形解码算法	113
5.3.4 仿真比较	114
5.4 减小复杂度的 IRS-SDA	116
5.5 软判决球形解码	119
5.5.1 列表球形解码	119
5.5.2 采用硬球形解码算法的软球形解码算法	121
5.6 小结	122
附录	123
第6章 平坦衰落信道下的非相干与差分空时编码	125
6.1 非相干空时编码	125
6.1.1 基于搜索的设计	126
6.1.2 基于训练的设计	129
6.2 差分空时编码	131
6.2.1 标量差分编码	131
6.2.2 差分酉空时编码	132
6.2.3 差分 Alamouti 编码	135
6.2.4 差分 OSTBC	137
6.2.5 Cayley 差分酉空时编码	139
6.3 小结	140
第7章 频率选择性衰落信道下的空时编码：单载波系统	141
7.1 系统模型与性能极限	141
7.1.1 平坦衰落等价形式和分集	142
7.1.2 速率中断概率	144
7.2 空时格码	145
7.2.1 广义延迟分集	146
7.2.2 基于搜索的 STTC 构造	147
7.3 空时分组码	150
7.3.1 使用两根发射天线的分组码	150
7.3.2 接收器处理	153
7.3.3 基于 Viterbi 算法的 ML 解码	155

7.3.4 Turbo 均衡	157
7.3.5 多天线扩展	158
7.3.6 OSTBC 的性质	161
7.3.7 数值仿真实例	163
7.4 小结	166
第8章 频率选择性衰落信道下的空时编码: 多载波系统	167
8.1 通用的 MIMO OFDM 框架	168
8.1.1 OFDM 基础	168
8.1.2 MIMO OFDM	171
8.1.3 STF 框架	172
8.2 ST 和 SF 编码 MIMO OFDM	175
8.3 STF 编码 OFDM	176
8.3.1 子载波分群	176
8.3.2 GSTF 分组码	177
8.3.3 GSTF 格码	179
8.3.4 数值仿真实例	182
8.4 数字相位扫描与分组循环延迟	184
8.5 满分集满速率 MIMO OFDM	188
8.5.1 编码器和解码器	188
8.5.2 分集和速率分析	190
8.5.3 数值仿真实例	192
8.6 小结	193
第9章 时变信道下的空时编码	195
9.1 时变信道	196
9.1.1 信道模型	196
9.1.2 时间-频率对偶性	199
9.1.3 多普勒分集	200
9.2 空时多普勒分组码	201
9.2.1 基于对偶性的 STD0 码	203
9.2.2 相位扫描设计	206
9.3 空时多普勒 FDFR 码	211
9.4 空时多普勒格码	211
9.4.1 设计准则	212
9.4.2 Smart-Greedy 码	212
9.5 数值仿真实例	213
9.6 空时多普勒差分码	216
9.6.1 内部编解码器	217

9.6.2 外部差分编解码器	217
9.7 双选择信道下的空时编码	219
9.7.1 数值仿真实例	221
9.8 小结	223
第10章 联合 Galois 域和线性复数域空时编码	224
10.1 GF-LCF 空时编码	225
10.1.1 分离与联合 GF-LCF 空时编码	226
10.1.2 性能分析	227
10.1.3 Turbo 解码	231
10.2 GF-LCF 分层空时码	233
10.2.1 GF-LCF ST FDFR 码: QPSK 信号	233
10.2.2 GF-LCF ST FDFR 码: QAM 信号	235
10.2.3 性能分析	238
10.2.4 GF-LCF FDFR 对 GF 编码 V-BLAST	241
10.2.5 数值仿真实例	242
10.3 GF-LCF 编码 MIMO OFDM	245
10.3.1 联合 GF-LCF 编码和解码	245
10.3.2 数值仿真实例	247
10.4 小结	248
第11章 MIMO 信道估计和同步	250
11.1 基于导频的信道估计	250
11.2 基于最优训练的信道估计	252
11.2.1 基于 ZP 的分组传输	254
11.2.2 基于 CP 的分组传输	263
11.2.3 特殊情形	267
11.2.4 数值仿真实例	269
11.3 (半) 盲信道估计	272
11.4 联合符号检测和信道估计	273
11.4.1 判决引导方法	273
11.4.2 基于 Kalman 滤波的方法	274
11.5 载波同步	278
11.5.1 基于跳导频的 CFO 估计	279
11.5.2 盲 CFO 估计	283
11.5.3 数值仿真实例	285
11.6 小结	289
第12章 使用部分信道知识的空时编码: 统计 CSI	291
12.1 部分 CSI 模型	292

12.1.1 统计 CSI	293
12.2 空时扩展	296
12.2.1 平均错误性能	298
12.2.2 基于平均 SER 界的优化	300
12.2.3 均值反馈	301
12.2.4 协方差反馈	304
12.2.5 波束成形解释	306
12.3 合并 OSTBC 和波束成形	307
12.3.1 二维编码器-波束成形器	308
12.4 数值仿真实例	311
12.4.1 使用均值反馈的性能	311
12.4.2 使用协方差反馈的性能	312
12.5 为提高速率的自适应调制	318
12.5.1 数值仿真实例	321
12.6 最优化平均容量	323
12.7 小结	325
第 13 章 使用部分信道知识的空时编码: 有限速率 CSI	327
13.1 一般问题的公式化描述	327
13.2 有限速率波束成形	329
13.2.1 波束成形器的选择	330
13.2.2 波束成形器的码书设计	330
13.2.3 量化功率损失	334
13.2.4 数值仿真实例	336
13.3 有限速率预编码的空间复用	338
13.3.1 预编码器选择准则	339
13.3.2 码书构造: 无限速率	341
13.3.3 码书构造: 有限速率	343
13.3.4 数值仿真实例	346
13.4 有限速率预编码 OSTBC	351
13.4.1 预编码器选择准则	351
13.4.2 码书构造, 无限速率	352
13.4.3 码书构造, 有限速率	352
13.4.4 数值仿真实例	353
13.5 具有有限速率反馈的容量优化	354
13.5.1 选择准则	354
13.5.2 码书设计	354
13.6 合并波束成形的自适应调制	355

13.6.1 模式选择	356
13.6.2 码书设计	356
13.7 MIMO OFDM 中的有限速率反馈	357
13.8 小结	358
第14章 干扰存在下的空时编码	360
14.1 空时扩展	361
14.1.1 最大化平均 SINR	361
14.1.2 最小化平均错误界	363
14.2 合并 OSTBC 的 STS	365
14.2.1 低复杂度接收器	367
14.3 具有干扰的最优训练	368
14.3.1 LS 信道估计	368
14.3.2 LMMSE 信道估计	369
14.4 数值仿真实例	370
14.5 小结	376
第15章 正交多址的空时编码	377
15.1 系统模型	377
15.1.1 同步下行链路	378
15.1.2 准同步上行链路	379
15.2 单载波系统: OSTBC-CIBS-CDMA	380
15.2.1 用户分离的 CIBS-CDMA	381
15.2.2 OSTBC 编码和解码	383
15.2.3 OSTBC-CIBS-CDMA 的诱人特征	385
15.2.4 数值仿真实例	387
15.3 多载波系统: STF-OFDMA	391
15.3.1 用户分离的 OFDMA	391
15.3.2 STF 分组码	392
15.3.3 STF-OFDMA 有吸引力的特征	393
15.3.4 功率效率	393
15.3.5 数值仿真实例	395
15.4 小结	397
参考文献	399