

► 21世纪通信网络技术丛书



移动通信前沿技术系列

MIMO

通信系统编码

Coding for MIMO Communication Systems

[美] Tolga M.Duman [加] Ali Ghrayeb 著

艾 渤 唐世刚 译
钟章队 审校



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



WILEY

21 世纪通信网络技术丛书
——移动通信前沿技术系列

MIMO 通信系统编码

Coding for MIMO Communication Systems

[美]Tolga M. Duman [加]Ali Ghrayeb 著

艾 渤 唐世刚 译

钟章队 审校

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书重点论述了 MIMO 通信系统编码技术的基础和最新应用。全书共分 11 章, 首先简单回顾了 MIMO 技术的进展; 介绍了衰落信道与分集技术、MIMO 系统的信道容量和信息速率问题; 系统、深入地阐述了 MIMO 系统中的空时分组码、空时格形码、分层空时码、级联码及迭代译码、酉空时码和差分空时码、频率选择性衰落信道下的空时编码, 并详尽地探讨了 MIMO 通信系统中的天线选择等一些实际问题。全书概念清晰, 事例详实, 取材新颖, 充分反映了近年来关于 MIMO 通信编码的新理论。每章还附有思考题供读者思考。

本书可作为高等院校通信、信息类专业高年级本科生及研究生教材, 也可供在政府、军队、科学技术研究院等部门工作、对 MIMO 通信系统编码感兴趣的相关技术、科研人员使用。

Coding for MIMO Communication Systems

Tolga M.Duman and Ali Ghrayeb

All rights reserved. This translation published under license

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2008-4027

图书在版编目 (CIP) 数据

MIMO 通信系统编码/(美)多曼(Duman,T.M.), (加)格拉耶布(Ghrayeb,A.)著; 艾渤等译.—北京: 电子工业出版社, 2008.9

(21 世纪通信网络技术丛书—移动通信前沿技术系列)

书名原文: Coding for MIMO Communication Systems

ISBN 978-7-121-07305-2

I. M... II. ①多...②格...③艾... III. 移动通信—通信系统—编码 IV.TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 133641 号

责任编辑: 王春宁 田宏峰

印 刷: 北京市通州大中印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

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: 17.25 字数: 442 千字

印 次: 2008 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 49.00 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。

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。

服务热线: (010) 88258888。

出版说明

通信网络技术是当今发展最快、应用最广和最前沿的通信领域之一。通信技术发展到今天,已经不是传统意义上的充满神秘色彩的深奥技术了,它已经与日常的应用密不可分。可以说,网络的出现,使通信技术得以有了广阔的用武之地。正是由于有了固定电话网、移动通信网和 Internet,使通信技术的应用在这些平台上有了用武之地,渗透到了我们日常生活的方方面面。

为了促进和推动我国通信产业的发展,电子工业出版社通信分社特策划了一套《21世纪通信网络技术丛书》。这套丛书根据不同的层面,又细分为三个系列:〈移动通信前沿技术系列〉、〈3GPP LTE 无线通信新技术系列〉和〈网络通信与工程应用系列〉。

〈移动通信前沿技术系列〉是从移动通信技术(3G 技术)的应用现状与发展情况出发,全面介绍当今移动通信领域涉及的关键技术与热点技术,例如:软件无线电;移动 IP 技术;移动数据通信;WCDMA;TD-SCDMA;cdma2000 移动通信系统网络规划与优化;智能天线技术;认知无线电技术;WiMAX, WiFi, ZigBee 宽带无线接入技术;UWB 技术;UMTS 技术;Ad Hoc 技术等。

〈3GPP LTE 无线通信新技术系列〉是以 3GPP 中 LTE 标准的关键技术在无线、宽带、高速、资源的有效管理和利用,以及在 B3G/4G 无线通信领域的应用为主。LTE 作为 3G 技术的一个重要的长期演进计划,代表了国际无线通信领域的最新发展需求和解决方案,例如:基于 OFDM 的上、下行(HSxPA)的多址接入技术、随机接入技术、多天线 MIMO 技术、多链路自适应技术、多播技术、功率控制技术、宽带无线网络的安全性、可移动性、可管理性;高效信源与信道编码和调制 MQAM 技术等。

〈网络通信与工程应用系列〉是以技术为先导,以构建网络的体系结构、标准、协议为目标所开展的对现代无线、移动、宽带通信网络的规划与优化,以及结合工程应用的方向所提出来的。例如:无线网状网、WLAN、无线传感器网络、B3G/4G 通信网工程设计与优化、卫星移动通信网、三网融合技术、网络新安全技术策略、RFID 应用网络、下一代基于 SIP 的统一通信、光网络与光通信等。

本套丛书依托各高等院校在通信领域从事科研、教学、工程、管理的具有丰富的理论与实践经验的专家、教授;各科研院所的研究员;国内有一定规模和研发实力的科技公司的研发人员,以及国外知名研究实验室的专家、学者等组成编写和翻译队伍,力求实现内容的先进性、实用性和系统性;力求内容组织循序渐进、深入浅出、理论阐述概念清晰、层次分明、经典实例源于实践;力求很强的可读性和可操作性。

本套丛书的主要读者对象是广大从事通信网络技术工作的各科研院所和公司的广大工程技术人员;各高等院校的专业教师和研究生;刚走上工作岗位的大学毕业生;以及与此相关的其他学科的技术人员阅读和参考。

本套丛书从 2008 年上半年开始将陆续推出,希望广大读者能关注它,多对本套丛书提出宝贵意见与建议,欢迎通过电子邮箱 wchn@phei.com.cn 进行探讨、交流和指正,以便今后为广大读者奉献更多、更好的优秀通信技术类图书。

电子工业出版社
通信分社

前 言

已经证明,在提供可靠的无线传输链路方面,采用多发射和接收天线,即使用多输入/多输出(MIMO)系统,是一个主要突破。自从20世纪90年代中期提出MIMO系统以来,通过空时编码实现的发射分集以及空间复用方案一直是无线通信领域研究的焦点。尽管近些年来在MIMO通信方面已经做了许多卓有成效的工作,但在这一领域仍旧有很多要进行的研究。很多通信公司已开始在他们当前及将来的无线通信系统中集成了MIMO系统。实际上,将来无线通信应用的几个标准中已采纳MIMO系统作为一种选择。

本书旨在为读者提供关于MIMO通信系统广泛、全面的编码技术。本书的内容也是作者这些年对MIMO通信系统深入研究的成果,其中包括在几个会议[IEEE通信国际会议(ICC),全球无线通信会议(GLOBECOM),交通技术会议(VTC),无线通信和网络会议(WCNC)]上的指导和短期讲授的内容。作者由此收到的反馈信息激励他们撰写成此书,也是为了以更容易理解的方式给读者讲解关于MIMO通信的原理。

截至目前,已有不少关于MIMO系统的书籍出版。然而,本书与这些已出版的书籍在以下几点有所不同:首先,尽量避免非常复杂的推导过程、数学表示以及非常特殊的系统,而更注重与MIMO系统相关的基本原理;所使用的语言简洁,使对这一话题感兴趣的读者很容易理解,包括低年级的研究生或那些主修电子工程而又对于数字通信和概率论知识有限的高年级研究生;对于特定的话题,本书给出了较详细的推导以满足那些更专业的研究者或研究生的需要;另外一个使本书区别于其他书籍的主要因素在于:所讨论话题的覆盖面很广,例如,除了涵盖了基本的MIMO通信算法,如空时分组码、空时格形码、酉信号与差分信号以及空间复用方案外,本书也包含了MIMO系统中的Turbo码及迭代译码、天线选择算法、一些与MIMO系统相关的诸如空间相关性及信道估计这样的实际问题,还包含了频率选择性衰落信道下的MIMO系统;最后,本书为读者提供了所讨论话题的大量实例,一些是基本的,一些更专业。在每一章末还给出了关于MIMO通信的大量参考文献。

读 者

本书的主要读者包括对学习MIMO系统感兴趣的高年级本科生、研究生、相关行业的从业人员以及研究人员。对于那些想从本书中充分获益的读者,建议应具备数字通信、线性代数及概率论的基本知识。

尽管本书主要针对研究人员及相关行业从业人员,但也可以作为研究生或高年级本科生关于“无线MIMO通信”的教材,本书的语言、组织结构、材料的编排流程都使其也适合作为教材使用,可以作为一学期的课程。本书在每章末都给出了一些思考题,目的是使读者对每章所讨论的话题有更清晰、深入的理解。

感谢美国国家科学基金以及加拿大自然科学与工程研究理事会在过去几年中为开展MIMO通信研究提供的基金支持,这为本项目的合作、顺利开展提供了有力保障。此外,我们还要感谢为完成本项工作付出辛劳的许多人,尤其要感谢为本书中各种图形提供帮助的学生们以及他们所给出的大量建议。Tolga M. Duman 要感谢: Jun Hu, Subhadeep Roy, Mustafa N.

Kaynak, Israfil Bahceci, Andrej Stefanov, Zheng Zhang, Vinod Kandasamy, Yunus Emre, Tansal Gucluoglu 以及 Renato Machado。Ali Ghrayeb 想对 Xian Nian Zeng, Abdollah Sanei, Chuan Xiu Huang, Hao Shen, May Gomaa, Jeyadeepan Jeganathan 以及 Ghaleb Al Habian 表达谢意。此外, 作者还要深深感谢 John G. Proakis, Masoud Salehi, William E. Ryan, Cihan Tepedepenioglu, Junshan Zhang 以及 Walaa Hamouda, 感谢他们为本书反馈回的各种信息。

最后, Tolga M. Duman 要感谢他的妻子 Dilek 给予的理解、关爱与支持。Ali Ghrayeb 想要表达他对妻子 Rola 以及儿子 Adam 的感激之情, 感谢他们在完成本书过程中所给予的支持、鼓励、耐心与关爱。

Tolga M. Duman, 亚利桑那州立大学 (Arizona State University)

Ali Ghrayeb, 肯考迪大学 (Concordia University)

译者序

无线通信技术的发展始终围绕着如何在恶劣的信道环境和有限的带宽内提高传输速率和质量。已经证明,在无线信道上提高数据传输率和质量的最有效途径是采用多输入/多输出(MIMO)技术,即在无线通信系统的发送端和/或接收端使用多个天线或者天线阵列来进行信息传输的技术。MIMO 技术在不增加带宽的情况下,成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率,是新一代无线移动通信系统广泛采用的关键技术之一。MIMO 技术已经用于 WiMAX 和 4G 等无线移动通信系统中。目前,世界各国学者都在对 MIMO 的理论、性能、算法和实现等各方面进行着广泛的研究,MIMO 技术已成为通信技术发展中最为炙手可热的课题。但是,由于无线移动通信的 MIMO 信道是一个时变且非平稳多输入/多输出系统,尚有大量的问题需要研究。

空时编码是实现 MIMO 系统的常用方式之一,现在已经提出了不少关于 MIMO 空时编码的算法。但是为了在未来无线移动通信中的实际应用,人们正在不断地提出新的或者改进的空时编译码算法,以改善 MIMO 系统的性能、减小空时编码系统的复杂性,更好地适应新一代无线移动通信系统的要求和信道实际情况。《MIMO 通信系统编码》一书正是在这样的背景下产生的。它介绍了 MIMO 通信系统中各种各样的编码技术,其内容包括:MIMO 信道容量、空时分组码、空时格形码、空间复用、级联码与迭代译码等,并讨论了信道相关性、信道估计和天线选择等 MIMO 通信系统中的实际问题。本书既有系统性,又不失重点性,概念清晰,理论分析严谨,逻辑性强,深入浅出地介绍了 MIMO 通信系统中的编码问题。每章末给出的思考题有助于加强对本章知识的进一步理解,因此它是一本可供高年级本科生和研究生使用的很好的教科书,同时也可供无线通信领域的研究人员和工程技术人员参考。

本书第 1~5 章由清华大学电子工程系、数字电视技术研究中心的唐世刚博士翻译;第 6~11 章由北京交通大学、轨道交通控制与安全国家重点实验室的艾渤博士翻译;北京交通大学现代通信研究所所长钟章队教授对全书做了审校。

需要指出的是,本书中的一些专业词汇在国内尚无统一标准译法,只能按实际含义较准确地译出供读者参考;另外,译稿对原书中的更正之处做了注释。由于译审者水平有限,错误和不妥之处在所难免,望读者批评指正。

译者

2008 年 5 月

于轨道交通控制与安全国家重点实验室(北京交通大学)

关于作者

Tolga M. Duman

Tolga M. Duman 于 1993 年从土耳其的安卡拉 Bilkent 大学获得学士学位；分别于 1995 年和 1998 年从美国波士顿东北大学获得硕士学位和博士学位，专业为电子工程。自 1998 年以来，他一直在美国亚利桑那州立大学电子工程系任教，1998—2004 年间为助教，目前为副教授。2004—2005 年间在土耳其的 Bilkent 大学作为访问副教授。Duman 博士目前的研究兴趣包括数字通信、无线和移动通信、MIMO 系统、信道编码、水下声通信、无线信道和记录信道的编码应用。

Duman 博士是国家科学基金 CAREER 奖及 IEEE 第三届 Millennium 奖的获得者。他目前是 IEEE 高级会员，IEEE Transactions on Wireless Communications 及 IEEE Transactions on Communications 期刊的编辑。

Ali Ghrayeb

Ali Ghrayeb 于 2000 年 5 月从美国亚利桑那州的图森市亚利桑那州立大学获得博士学位，专业为电子工程。目前是加拿大蒙特利尔 Concordia 大学的副教授。他是 Concordia 大学高速无线通信研究方向的负责人。他的研究兴趣包括无线移动通信、无线网络、数据传输和存储中的编码和信号处理，曾在几个主要的 IEEE 会议中指导并讲授关于 MIMO 系统编码以及 WCDMA 系统中的同步问题。他目前是 IEEE Transactions on Vehicular Technology 及 Wiley Wireless Communications and Mobile Computing Journal 期刊的副编辑 (AE)。

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 MIMO 系统的必要性	(1)
1.2 无线标准中的 MIMO 通信	(2)
1.3 本书的内容安排	(3)
1.4 MIMO 系统的其他主题	(4)
第 2 章 衰落信道与分集技术	(5)
2.1 无线信道	(5)
2.1.1 路径损耗、阴影和小尺度衰落	(6)
2.1.2 衰落信道模型	(7)
2.2 衰落信道下的差错/中断概率	(11)
2.2.1 瑞利衰落信道的中断概率	(12)
2.2.2 瑞利衰落信道下的平均差错概率	(12)
2.2.3 推广到其他衰落信道	(13)
2.2.4 在频率选择性衰落信道下的性能	(14)
2.3 分集技术	(14)
2.3.1 分集的类型	(15)
2.3.2 L 阶分集的系统模型	(15)
2.3.3 最大比合并 (MRC)	(16)
2.3.4 次优合并算法	(18)
2.3.5 选择合并	(19)
2.3.6 举例	(20)
2.4 作为时间分集的信道编码	(21)
2.4.1 充分交织信道下的分组编码	(22)
2.4.2 卷积编码	(24)
2.5 无线通信中的多天线	(25)
2.5.1 接收分集	(25)
2.5.2 智能天线和波束成形	(26)
2.5.3 空时编码的基本思想	(27)
2.6 本章小结与进一步阅读建议	(28)
思考题	(29)
第 3 章 MIMO 信道的容量与信息速率	(32)
3.1 噪声信道的容量和信息速率	(32)
3.2 AWGN 和衰落信道的容量和信息速率	(33)
3.2.1 AWGN 信道	(33)
3.2.2 衰落信道	(34)

3.3	MIMO 信道的容量	(37)
3.3.1	确定性 MIMO 信道	(38)
3.3.2	各态历经 MIMO 信道	(42)
3.3.3	非各态历经 MIMO 信道和中断容量	(45)
3.3.4	MIMO 衰落信道的发射 CSI	(48)
3.4	MIMO 通信的约束信号	(48)
3.5	讨论: 为什么要使用 MIMO 系统	(51)
3.6	本章小结与进一步阅读建议	(51)
	思考题	(52)
第 4 章	空时分组码	(54)
4.1	双天线发射分集: Alamouti 方案	(54)
4.1.1	传输方案	(54)
4.1.2	Alamouti 方案的最佳接收机	(55)
4.1.3	Alamouti 方案的性能分析	(57)
4.1.4	举例	(59)
4.2	正交空时分组码	(60)
4.2.1	线性正交设计	(61)
4.2.2	线性正交设计的译码	(63)
4.2.3	空时分组码的性能分析	(65)
4.2.4	举例	(66)
4.3	准正交空时分组码	(67)
4.4	线性分散码	(68)
4.5	本章小结与进一步阅读建议	(69)
	思考题	(70)
第 5 章	空时格形码	(72)
5.1	一个简单的空时格形码	(72)
5.2	一般性的空时格形码	(73)
5.2.1	表示法与预备知识	(73)
5.2.2	空时格形码的译码	(74)
5.3	空时码设计的基本准则	(75)
5.3.1	成对差错概率	(75)
5.3.2	空时码设计准则	(77)
5.3.3	优良的空时码例子	(78)
5.3.4	平衰落信道的空时格形码	(81)
5.4	PSK 星座图的空时格形码表示	(82)
5.4.1	生成矩阵表示	(82)
5.4.2	改进的空时码设计	(83)
5.5	空时格形码的性能分析	(84)
5.5.1	空时格形码的一致界	(85)
5.5.2	空时格形码的有用性能界	(87)

5.5.3 例子	(91)
5.6 空时分组与格形码的比较	(92)
5.7 本章小结与进一步阅读建议	(94)
思考题	(94)
第6章 分层空时码	(95)
6.1 基本的贝尔实验室分层空时 (BLAST) 结构	(95)
6.1.1 VBLAST/HBLAST/SCBLAST	(95)
6.1.2 基本 BLAST 结构的检测算法	(96)
6.1.3 举例	(101)
6.2 对角 BLAST (DBLAST)	(104)
6.2.1 DBLAST 检测算法	(105)
6.2.2 举例	(109)
6.3 多层空时码	(110)
6.3.1 编码器结构	(110)
6.3.2 组干扰消除检测	(110)
6.3.3 举例	(112)
6.4 线状空时码	(113)
6.4.1 分层方法	(114)
6.4.2 线状空时码设计	(114)
6.4.3 举例	(117)
6.4.4 线状空时码的检测	(117)
6.5 空间复用系统的其他检测算法	(118)
6.5.1 贪婪检测	(118)
6.5.2 置信传播检测	(118)
6.5.3 Turbo-BLAST 检测	(119)
6.5.4 复杂度减小的 ZF/MMSE 检测	(119)
6.5.5 球形译码	(119)
6.6 分集/复用增益的折中	(120)
6.7 本章小结与进一步阅读建议	(123)
思考题	(123)
第7章 级联码与迭代译码	(124)
7.1 级联码的进展	(124)
7.2 AWGN 信道中的级联码	(125)
7.2.1 编码器结构	(125)
7.2.2 迭代译码器结构	(127)
7.2.3 SOVA 译码器	(136)
7.2.4 最大似然译码的性能	(140)
7.2.5 举例	(142)
7.3 MIMO 信道中的级联码	(144)
7.3.1 级联空时 Turbo 编码方案	(145)

7.3.2	Turbo 空时网格编码方案	(146)
7.3.3	Turbo 空时编码方案	(146)
7.4	MIMO 信道的 Turbo 编码调制	(147)
7.4.1	编码器结构	(147)
7.4.2	译码器结构	(148)
7.4.3	举例	(150)
7.5	级联空时分组编码	(151)
7.5.1	编码器结构	(151)
7.5.2	译码器结构	(152)
7.5.3	性能分析	(153)
7.5.4	举例	(156)
7.6	本章小结与进一步阅读建议	(158)
	思考题	(159)
第 8 章	酉空时码及差分空时码	(160)
8.1	非相干 MIMO 信道的容量	(160)
8.1.1	信道容量	(161)
8.1.2	实现容量的信号 (结构)	(163)
8.2	酉空时码	(163)
8.2.1	USTC 编码器	(163)
8.2.2	USTC 的 ML 检测	(163)
8.2.3	性能分析	(165)
8.2.4	酉空时信号的构建	(165)
8.2.5	举例	(170)
8.3	差分空时码	(171)
8.3.1	单天线系统中的差分空时编码	(171)
8.3.2	MIMO 系统中的差分空时编码	(173)
8.4	Turbo 编码的酉空时码	(177)
8.4.1	编码器结构	(178)
8.4.2	非相干迭代译码器	(178)
8.4.3	举例	(180)
8.5	格形编码的酉空时码	(181)
8.6	Turbo 编码的差分空时码	(182)
8.6.1	编码结构	(182)
8.6.2	迭代检测器	(183)
8.7	本章小结与进一步阅读建议	(184)
	思考题	(184)
第 9 章	频率选择性衰落信道下的空时编码	(185)
9.1	MIMO 频率选择性信道	(185)
9.2	MIMO 频率选择性信道容量及信息速率	(186)
9.2.1	Gaussian 输入的信息速率	(186)

9.2.2	具有实际星座的可达信息速率	(186)
9.2.3	举例	(189)
9.3	MIMO FS 信道的空时编码	(191)
9.3.1	使用虚拟天线的 MIMO FS 信道	(191)
9.3.2	MIMO FS 信道简单的全分集码	(193)
9.3.3	MIMO FS 信道的空时格形码	(194)
9.3.4	MIMO FS 信道的级联编码	(196)
9.3.5	MIMO FS 信道的空间复用	(198)
9.4	MIMO FS 信道检测	(198)
9.4.1	MIMO FS 信道的线性均衡	(199)
9.4.2	MIMO FS 信道的判决反馈均衡	(199)
9.4.3	软输入/软输出信道检测	(200)
9.4.4	其他降低复杂度的方法	(200)
9.5	MIMO OFDM 系统	(200)
9.5.1	MIMO OFDM 信道模型	(202)
9.5.2	空频编码	(202)
9.5.3	MIMO OFDM 的挑战	(203)
9.6	本章小结与进一步阅读建议	(203)
	思考题	(204)
第 10 章	MIMO 通信中的实际问题	(205)
10.1	信道状态信息估计	(205)
10.1.1	利用导频估计 CSI	(205)
10.1.2	如何对待 CSI	(208)
10.1.3	带有估计 CSI 信息的空时编码举例	(208)
10.2	MIMO 系统的空间信道相关性	(210)
10.2.1	空间相关性的测量及建模	(211)
10.2.2	空间信道相关模型	(211)
10.2.3	具有空间相关的信道容量	(212)
10.2.4	具有空间相关的空时码性能	(215)
10.3	时域信道相关	(217)
10.4	MIMO 通信系统设计问题	(217)
10.5	本章小结与进一步阅读建议	(218)
	思考题	(218)
第 11 章	MIMO 系统中的天线选择	(220)
11.1	基于容量的天线选择	(220)
11.1.1	系统模型	(220)
11.1.2	最优选择	(221)
11.1.3	简化(次优)选择	(222)
11.1.4	举例	(222)
11.2	基于能量的天线选择	(223)

11.3	空时格形码的天线选择.....	(225)
11.3.1	准静态衰落信道.....	(225)
11.3.2	块衰落信道.....	(226)
11.3.3	快衰落信道.....	(228)
11.3.4	举例.....	(229)
11.4	空时分组码的天线选择.....	(231)
11.4.1	接收天线选择.....	(231)
11.4.2	发射天线选择.....	(233)
11.4.3	举例.....	(233)
11.5	组合的正交 STBC 和信道编码的天线选择.....	(235)
11.5.1	性能分析.....	(235)
11.5.2	举例.....	(236)
11.6	频率选择性信道的天线选择.....	(237)
11.7	非理想状况下的天线选择.....	(238)
11.7.1	空间相关性的影响.....	(238)
11.7.2	举例.....	(239)
11.7.3	信道估计错误的影响.....	(240)
11.8	本章小结与进一步阅读建议.....	(240)
	思考题	(241)
	符号表	(242)
	缩略语	(244)
	参考文献	(247)

第1章 概述

1.1 MIMO 系统的必要性

在过去大约十年内,我们见证了对支持包括语音、视频、电子邮件和网页浏览等广泛应用的可靠高速率无线通信链路需求的空前增长。提供这样的可靠链路是具有挑战性的,因为不像其他信道那样,无线环境中的接收信号来自于多个路径。通常多个路径上的信号相抵消的叠加会造成性能的恶化,这种现象通常称为“衰落”。另外,传播媒介一般由多个不同的用户或者应用系统共用,因此还有干扰的可能。在高速率无线应用系统中其他的挑战还包括可用带宽的贫乏、发射功率的严格限制、硬件复杂度和费用要求等。

随着频谱的匮乏以及新的无线应用系统数目的稳步增长或者已有无线应用的扩展,如何支持这些应用成为了一个显著的难题。自然而然地想到的一个简单的办法是采用高阶调制,以便提高带宽利用率。但是,该方法的缺点之一是可靠性的不足,即对于同样的发射功率,高阶调制的性能比低阶调制的差。事实上,即使对于小的信号星座图,即低阶调制(如二进制调制),在无线链路上非编码通信的可靠性也是非常差的。

在无线信道上实现可靠通信的唯一最有效的技术是分集,即尽量给接收机提供发送信号的多个独立衰落复制,以期至少有一个复制将被正确接收。分集可以采用不同的方法来实现,例如频率分集、时间分集、天线分集和调制分集等。在实际的无线通信场合中会经常碰到采用分集的例子,例如,移动通信中大多数的手机具有极化分集功能。

信道编码也可能用于提供一种时间分集,以对抗无线信道的失真。实际的信道编码例子包括卷积和分组码、网格编码调制、多级编码、比特交织编码调制以及最近发现的逼近容量极限的编码方式,比如 Turbo 码、低密度奇偶校验码和编码调制等。在无线通信中,信道编码通常结合交织一起使用,以便有效地实现时间分集。

作为另外一种方法,发射和/或接收天线分集,也称为空间分集,代表了对抗衰落有害影响的一种强有力的途径。具有多个天线的系统也称为多输入/多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)系统。MIMO 系统的一个主要优点是信道容量的本质提高,从而直接转化为高的数据吞吐量,另外一个好处是显著地提高了数据传输的可靠性,即低误码率。这些好处的获得,是不需要以增加可用带宽或者提高发射功率为代价的。

结合不同的分集技术可以进一步提升系统在无线环境中的性能。例如,可以将通过发射和接收天线实现的空间分集与信道编码结合起来,把这种方式叫做空时编码,把这种系统叫做编码的 MIMO 系统。在过去约十年里的研究已经证明,编码与空间分集的结合开创了无线通信的新纪元,它可以提供在实现可靠高速率无线通信链路中面临挑战的有效解决方法。所以, MIMO 系统中的编码是 MIMO 系统实现可靠性和所希望达到的传输速率基础。

在 MIMO 通信链路的两端有许多可利用多个天线的方式，比如，为了实现最好传输可靠性，应当采用多个发射天线，从而实现发射分集。在这种方式下获得的传输速率通常与单输入/单输出系统的传输速率相当，即 MIMO 信道中所有的自由度均用于提高传输可靠性而不是传输速率。另外一种方式是用发射天线来最大化传输速率。此时，不同的发射天线发送独立的信号，即不同的发射天线发送的信号之间是不相关的。虽然该方法提高了传输速率，但是其可靠性较差。上述两种方式的结合也是有可能的，即可以用传输速率换可靠性，反之亦然。获得最佳空间分集的编码方式例子是空时网格码（Space-Time Trellis Codes）和空时分组码（Space-Time Block Codes），而贝尔实验室的分层空时编码使得传输速率最大化。这两种空时编码方式代表了两种极端，其中一个实现了最佳的可靠性，而另外一个实现了最大的传输速率。另外，还有在分集与速率之间进行折中的其他空时编码方案。

使用 MIMO 系统和相关的信号发射技术预计对于将来高数据率且极高可靠性的无线通信是至关重要的。因此，本书主要的目标是对 MIMO 系统中各种编码方式进行详细地介绍。

1.2 无线标准中的 MIMO 通信

由于其巨大的前景，MIMO 系统已经应用到几个未来无线通信系统的标准中，特别是无线局域网和蜂窝网，例如 IEEE 802.11、802.16 和第三代合作伙伴项目（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）标准。基于 IEEE 802.11 标准已经产生了 Wi-Fi（Wireless Fidelity）。Wi-Fi 通常用于公共无线接入 [通常所说的热点区域（Hotspots）]，比如咖啡店、机场和购物中心等地方的接入，该种标准的一个早期版本（IEEE 802.11a）支持高达 11 Mb/s 的数据速率，而最新标准（IEEE 802.11n）引入了 MIMO 通信。该标准还没有最终完成，但是它预期支持的数据速率达 100 Mb/s 或者更高。这类应用正在考虑几个 MIMO 配置，包括 2×2 和 4×4 空时分组码方案（IEEE 802.11n/D1.0, 2006）。

基于 IEEE 802.16 标准已经产生了所谓的 WiMAX（World Interoperability for Microwave Access），旨在实现长距离上的高数据速率。该标准的 IEEE 802.16e 版本采用 MIMO 通信作为一个选项，其中考虑了 2×1 和 4×4 MIMO 配置（IEEE 802.16e Part 16, 2004; IEEE 802.16e/D12: Part 16, 2006）。在某些情况下，多天线用于对用户进行高数据速率传输，而在其他一些情况下，特别是在蜂窝网络中，多天线用于波束成形（Beamforming），以提高整个网络容量，比如所支持的用户数目。

3GPP 技术也称为宽带码分多址（W-CDMA），作为 CDMA 技术的一个扩展，用于第三代（3G）蜂窝网络中。引入 W-CDMA 背后的动机在于相比早期版本 CDMA 的高数据速率传输，它可以在多径衰落信道中获得额外的分集。MIMO 通信已经引入此标准，特别是在第 7 版本和第 8 版本中，其中后者称为长期演进（Long Time Evolution, LTE）。第 7 版本采用了基于空时分组码的 2×1 和 4×2 MIMO 配置，而 2×2 和 4×4 MIMO 配置用于第 8 版本中 [（TSG-R1 (04) 0336, 2004）]。

IEEE 802.20 和 802.22 标准同样考虑采用 MIMO，但是没有定论。IEEE 802.20 标准旨在为移动宽带无线接入插入地址指定，该宽带接入为 IP 服务提供基于包交换的空中接口。IEEE 802.22 标准旨在使用已经分配的电视频谱中未用到的信道构建无线本地网络。

1.3 本书的内容安排

本书讨论了关于 MIMO 系统各种不同的主题。

第 2 章介绍衰落信道与分集技术。该章描述了快衰落、分块衰落和准静态衰落等几种衰落形式，简单地讨论了平衰落和频率选择性衰落之间的区别，并描述了特别是在平衰落信道下接收机不同的信号检测方法，以及讨论了采用包括信道编码在内的各种不同的分集技术以实现时间分集。该章还分析了在发射机和/或接收机采用多天线的必要性，并且区分了在各种无线环境中多天线的不同作用。

第 3 章分析 MIMO 系统的容量，同时考虑了各态历经和非各态历经容量。首先，本章考虑信道容量的基本原理，特别是高斯白噪声 (AWGN) 信道和单输入单输出无线信道的容量，同时考虑了各态历经和非各态历经信道模型，以及相关的各态历经信道容量和中断 (Outage) 容量，并将信道容量结果推广到各种不同配置的 MIMO 系统，还给出了相应的例子；另外，本章考虑了当采用特定的输入星座图时 MIMO 系统能达到的信息速率。这些结果从根本上证明了采用 MIMO 系统时信道容量的巨大提高，从而本书在其他的内容中将主要致力于探索多天线各种不同的编码和信号设计方法。

第 4 章详细讨论空时分组码 (Space-Time Block Codes, STBC)。它是一种用于实现空间分集的空时码方案。首先，本章讨论 Alamouti 方案，它是 STBC 的一个非常简单的例子；其次，本章从编码、译码和性能分析方面详细地分析了该编码方案，并提供了几个数值例子用于阐明这种方案的性能；最后，本章简单地回顾了线性分散码。

第 5 章讨论空时格形码 (Space-Time Trellis Codes, STTC)。它是另外一种空时码方案。这类码与 STBC 的空间分集性能相当，在给定发射天线与接收天线数目的情况下，两种码均可以获得完全空间分集。与 STBC 不同的是，STTC 是基于网格 (Trellises) 设计的，从而不仅可以实现空间分集，还可以实现编码增益。由于其编码器由网格描述，所以 STTC 采用维特比 (Viterbi) 算法进行译码，其复杂度高于 STBC 译码器。本章给出了码设计的基本原理，回顾了许多优秀的空时格形码设计方法，并给出了适当的修改以达到联合界的性能分析。

第 6 章考虑分层空时码 (Layered Space-Time Codes, LSTC)，讨论了各种不同的 BLAST 方案版本。BLAST 方案适合应用于高数据率传输，但是缺乏由 STTC 和 STBC 获得的空间分集。本章还讨论了多层和纹状空时编码等其他 LSTC 方案，它们在空间分集和空间复用之间能提供一些折中，这在某些应用场合下是有必要的。本章还讨论了这些分层空时码的各种不同的检测方法，包括基于迫零 (Zero Forcing, ZF) 和最小均方误差 (Minimum Mean-Square Error, MMSE) 准则的检测器。

第 7 章详细分析了级联码与迭代译码。本章考虑了 AWGN 信道下的串行和并行级联码，并详细分析了用于级联码译码的迭代译码算法，包括一种后验概率 (APP) 算法和软输出维特比算法 (SOVA)。本章还详细分析了几种用于 MIMO 信道的级联方式，并展示了如何将信道编码和空时编码进行联合以进一步的提升性能。

第 8 章讨论酉空时码及差分空时码。这类空时码用于快速变化信道下接收机不可能估计信道状态信息时采用非相干检测的情况，有时这类信道也称为非相干信道。本章首先讨论非相干信道的容量，并将其与相干信道的容量进行对比，进而引出酉空时信号，并讨论其设计、编码、译码和性能分析。本章同时讨论了差分空时码，它是用于非相干信道的另外一类码。