

新一代信息通信技术书系·无线通信专辑

多天线无线通信 原理与应用

罗涛 乐光新 编著

DUOTIANXIAN

WUXIAN TONGXIN

YUANLI YU YINGYONG



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

新一代信息通信技术书系·无线通信专辑

多天线无线通信原理与应用

罗 涛 乐光新 编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书首先介绍了多天线无线通信技术的基本原理和信息论基础;然后,分别研究了平坦衰落、频率选择性衰落以及时变环境下多天线无线通信系统(包括空时编码)的差错传输性能及系统容量分析;最后,较为系统地介绍了多天线技术在宽带无线通信领域中的应用。本书的讲解力求做到深入浅出,希望读者通过本书能对多天线技术的基本原理、研究现状及其应用有一个较为全面的了解。本书可作为通信与信息类专业高年级本科生及相关专业研究生的教学用书或参考书,也可供从事无线通信领域的教师及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

多天线无线通信原理与应用/罗涛,乐光新编著. —北京:北京邮电大学出版社,2005

ISBN 7-5635-1164-4

I. 多... II. ①罗...②乐... III. 无线通信—高等学校—教材 IV. TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 111670 号

书 名: 多天线无线通信原理与应用

编 著: 罗 涛 乐光新

责任编辑: 李欣一

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

电话传真: 010-62282185(发行部) 010-62283578(FAX)

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京通州皇家印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 16.5

字 数: 355 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2005 年 11 月第 1 版 2005 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1164-4/TN·402

定 价: 26.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·



21 世纪是经济全球化、全球信息化的崭新世纪。

信息化要靠信息系统的支持,通信则是信息系统的核心和桥梁。离开了通信来谈信息化是不可能的。今天,人们越来越倾向于以更为广义的信息通信的丰富内涵来替代相对狭义的通信的概念。

信息通信发展的目标是要实现无论何人在何时何地都能与另一用户(包括网站)进行用各种媒体表达的高质量的信息传输,实现各种信息服务。信息通信是一个巨系统,凡是人类活动之所及都能找到它的踪迹。信息通信同时又是一个整体,任何一种通信方式和通信技术都不可能孤立地存在、单独地发挥作用,各种通信方式和技术只有互相协同、配合和支撑才能构成一个完整的通信过程。当代信息通信系统还有一个特点是与计算机相互交融、相伴相随、密不可分。自 20 世纪以来,计算机与集成电子技术得到了飞速发展,与此相应,信息通信技术也呈现日新月异的发展态势。摩尔定律在信息通信领域同样显示出它的规律。

信息通信既是一个巨大的概念,又是一个巨大的系统,同时还是发展迅速、变幻莫测的领域。我们不敢奢望用一两本书的有限容量来展示它的全貌和魅力。显然,在世纪之初全面地回顾、盘点信息通信技术在近年的发展 and 现状,展望和评述它的趋势和变化,无疑是有意义的和必要的。基于此,北京邮电大学出版社聘请业界的著名专家、学者组成阵容强大的编委会,全面、深入、系统地分析并探讨当今信息通信最新技术的发展和未来发展的走向,条分缕析,精挑细选,决定策划出版一套反映信息通信技术最新发展及其热点的图书,并向信息通信领域的知名专家组稿。在经过周密而细致地论证、研讨,并得到方方面面的热情支持和鼎力相助之后,初步形成了现在由 4~5 个专辑组成的“新一代信息通信技术书系”。

由于覆盖面宽、内容庞大,该书系按技术基础和应用相近的原则划分为不

同的专辑,基本涵盖了当今信息通信技术发展的大部分前沿领域。每一专辑只介绍信息通信领域中的一种技术门类,包括原理综述,技术进展的评介和作者自己的工作成果。由于该书系的作者都是信息通信领域的知名学者和领军人物,他们撰写的内容无疑具有权威性和前瞻性,相信会得到广大读者的欢迎,并产生积极意义和影响。

在写作方式和篇幅上,书系不追求系统、严格和完善的理论分析,不追求大而无当的鸿篇巨制,而坚持立足于对相关技术的原理阐述、应用开发、趋势评介和引导等原则,尽可能做到深入浅出、规模适当,因此特别适合大多数信息通信和相关领域工程师及高等院校的教师学生以及从业人员阅读和参考。

本书系从一开始就得到许多领导和专家学者的热情支持和帮助,在此一并表示深切的感谢!

信息通信技术的发展变化极快,本书系虽尽可能顾及方方面面,但仍有一些内容没能被纳入,我们会不断地充实,在今后的一段时间内努力完善这一书系。另外,书系中的每一本书也会受种种条件的限制,在内容和行文中可能存在欠缺,对技术发展的评价也会因人而异,我们也并不追求一致。本书系虽经编委会、所有作者和编辑出版者的努力,但疏漏和错误在所难免,我们恳请读者的批评和建议,希望能把这一有意义的工作做得更好!

乐克新

于 2005 年新春

序

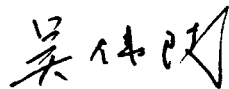
信息通信日新月异,无线技术前景无限。

为了尽快适应飞速发展的无线通信的需求,北京邮电大学出版社在2004年特别组织有关专家撰写了“新一代信息通信技术书系·无线通信专辑”,在这一专辑中为广大专业读者提供了近10本图书。在内容上,这些书大致可以分为两大类型:物理层技术与网络层技术。其中:

在物理层技术中,本专辑汇集了“移动通信中多媒体业务基础”、“无线通信中的先进DSP技术”等内容,同时还涉及以空域为主体的比较前沿的新技术“智能天线技术”、“无线通信中的多天线技术”。

在网络层技术中,则除了包含“移动通信中的资源管理”、“宽带移动互联网”等内容外,本专辑还包含更为前沿的新技术“无线网络中的信息安全”、“无线重构技术”和“异构网的业务综合”等。

以上内容将分别成书,陆续出版提供给广大的读者,同时,也殷切希望广大读者对本专辑的编写提出宝贵的意见,并提出新的需求,以便我们能进一步充实和改进,为读者提供更好的服务。



2005年3月于北京邮电大学信息学院



跨入 21 世纪,人类社会同时也进入了信息时代。发达的通信是信息时代的重要标志,也是实现信息化的基础。人们希望做到的是,任何人能够在任何时间、任何地点、与任何用户以任何方式方便地进行通信。无线移动通信无疑是实现这一目标的一个重要关键,这就要求其应能够提供综合语音、视频和数据等多种业务的多媒体服务的能力,这是未来通信技术和业务发展的大趋势。

为了达到上述目标,各种无线通信业务和宽带数据业务近几十年得到了巨大发展。但随之而来的问题是,无线资源,尤其是频谱资源变得越来越紧张,如何更高效地利用这些有限的通信资源来提供高速、可靠的宽带数据业务成为无线通信新技术发展的焦点所在。同时,与固定有线通信不同的是,无线通信中的信号要通过自由空间来传输,这一信道的随机时变性和严重的传输缺陷决定了无线通信技术的特殊性和复杂性。为了解决无线通信的可靠性和有效性,新的理论和技术不断涌现。其中,多输入多输出(MIMO, Multiple Input Multiple Output)系统就是近年来在无线移动通信研究中的一个重大突破,它通过在发送端和接收端分别安置多副天线来实现,故本书中简称之为“多天线”。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送功率的情况下,有效对抗无线信道衰落的影响,大大提高通信系统的频谱利用率和信道容量,是新一代无线移动通信系统可能采用的关键技术之一。

人们对多天线的应用研究可追溯到 20 世纪初的马可尼时代,但直到 20 世纪 70 年代,由于军事上的原因以及数字信号处理技术的快速发展,才真正实现了用于雷达系统的自适应天线阵列技术。20 世纪 90 年代,人们发现使用多天线可以增加无线信道的容量,尤其是 Bell 实验室在 20 世纪 90 年代中后期一系列研究成果的出台,对多天线系统的研究起了很大的推动作用,从而开创了无线通信的一场革命。目前,多天线技术已经在无线通信系统中得到了广泛的应用。如 BLAST 实验系统、WCDMA 系统、cdma2000 系统、无线城域网 IEEE 802.16 系列、正在制定的新的无线局域网 IEEE 802.11n 和移动宽带无线接入 IEEE 802.20 以及下一代无线蜂窝通信系统 3G/4G 等均已采用或者计划采用多天线技术。

北京邮电大学电信工程学院数字通信与信息网络实验室(DCN BUPT, Laboratory for Digital Communications and Information Networks of BUPT)多年来一直从事高速信息传输理论及数字通信系统方面的研究,近年来更致力于宽带无线通信理论及其应用和移动IP网的研究,先后在xDSL、OFDM、MIMO、WLAN和无线蜂窝系统等研究方向上得到了国家自然科学基金(项目批准号:69872008、60172052、90104018、60472070)、国家教育部博士点基金(项目批准号:97001301)、国家教育部科学技术研究重点基金(项目批准号:105035)、国家“863”高技术研究与发展计划(项目批准号:2001AA121031、2003AA1231004)等项目及多项与企业合作的通信应用开发研究项目的资助,先后有20余名博士生、60余名硕士生从事本领域的研究与开发工作,已在国内外重要学术刊物上发表论文150多篇,出版著作6本,提交国家发明专利申请9项。本书正是在上述研究成果的基础上编撰完成的,包含多位老师和博、硕士研究生的科研成果,是集体智慧的结晶。

本书系统介绍了多天线无线通信的基本原理、当前研究进展及其在无线通信领域中的应用,重点分析其系统模型、各种环境下的差错传输性能及系统容量等。全书共分8章。其中,刘江华硕士、滕勇博士和王健康博士分别参与了第4章,第4、5章和第7章相关内容的编写,其余部分均由罗涛博士负责编写。全书由罗涛博士主持编写并统稿。乐光新教授审阅了全书,并提出了许多建设性的宝贵意见。

各章节具体内容安排如下:

第1章绪论。概述了多天线系统的发展历史、特征及目前的研究进展,试图给读者一个整体的概念;并在最后介绍了无线衰落信道的几种特性:频率选择性衰落、时间选择性衰落和空间选择性衰落。

第2章无线通信中的分集技术。作为目前对抗无线信道衰落最有效的方法之一,也是多天线技术提高传输性能的核心技术所在——提供空间分集增益,本章阐述了分集的基本原理,接收合并技术以及影响分集增益的几个重要因素:各分集支路的平均信号强度和它们之间的相关程度。

第3章MIMO系统的信息论基础及其信道模型。给出了MIMO系统模型,在此基础上从信息论角度分析了MIMO技术提高系统容量和传输性能的原因所在,并在最后给出了关于MIMO信道的物理模型和统计模型。

第4章空时编码技术。作为当前MIMO系统比较成熟的一种应用,本章主要讲述了几种空时编码技术,包括提供空间复用增益的分层空时编码和提供空间分集增益的空时分组码和空时格状码等。

第5章MIMO系统的传输性能。主要从差错传输性能和信道容量性能等方面分析

了 Rayleigh、Rice 和 Nakagami 几种衰落环境下各种不同 MIMO 系统的性能。

第 6 章 MIMO-OFDM 系统。由于 MIMO 对频率选择性深衰落的无能为力,以及 OFDM 技术在这方面得天独厚的优势,使得两者的结合成为必然,本章在阐述 OFDM 基本原理的基础上,介绍了目前适用于宽带无线通信的关于 MIMO-OFDM 系统的一些研究成果。

第 7 章时变环境下 MIMO 系统。前面几章研究的都是时不变信道环境下 MIMO 系统的性能,本章则侧重于研究时变性对 MIMO 系统性能的影响,以及如何使用 Doppler 分集技术来提高 MIMO 系统的传输性能。

第 8 章多天线 MIMO 技术在无线领域中的应用。详细介绍了目前一些使用 MIMO 技术的无线通信系统,包括 WCDMA、cdma2000、IEEE 802.16、802.11n 及 B3G/4G 等系统。

本书力图全面介绍多天线技术的各方面内容,讲解尽量做到深入浅出,希望读者能通过本书对多天线技术的原理和现状有一个系统的了解。本书可作为通信与信息类专业高年级本科生及相关专业研究生的教学用书或参考书,也可供从事无线通信领域的教师及工程技术人员参考。

最后,感谢国家自然科学基金、国家“863”高技术研究与发展计划、国家教育部博士点基金和科学技术研究重点基金对我们研究工作的持续支持,感谢实验室已经毕业的及在读的各位博、硕士研究生出色的工作,感谢实验室的纪红教授、刘丹谱教授、郝建军副教授、尹长川副教授和李剑峰研究员的大力支持与友好合作。

由于作者水平有限,加之时间匆促,错误在所难免,不妥之处敬请广大读者批评指正。

编者
于 2005 年 6 月

目 录

第1章 绪 论

1.1 多天线无线通信系统发展简史	2
1.2 多天线系统特征及当前研究进展	4
1.2.1 多天线 MIMO 系统的主要特征	5
1.2.2 当前研究进展	7
1.3 无线衰落信道的基本特征	8
1.3.1 传输衰减	8
1.3.2 多径(时延)扩展——频率选择性衰落	9
1.3.3 多普勒扩展(时变性)——时间选择性衰落	11
1.3.4 角度扩展——空间选择性衰落	12
1.3.5 Rayleigh、Rice 和 Nakagami 衰落	13
1.4 本书的章节结构	14
本章参考文献	15

第2章 无线通信中的分集技术

2.1 分集的基本原理	19
2.2 合并准则	20
2.2.1 最佳选择合并	21
2.2.2 最大比合并	22
2.2.3 等增益合并	22
2.3 空间分集技术	23
2.3.1 接收分集技术	23
2.3.2 发送分集技术	24
2.4 分集对传输性能和信道容量的影响	29
2.4.1 分集阶数和分集增益	30
2.4.2 中断概率和中断容量	32
2.5 影响分集增益的基本因素	33
2.5.1 相关性要求	33
2.5.2 信号强度要求	35

2.6 小结	37
本章参考文献	37
第3章 MIMO 系统的信息论基础及信道模型	
3.1 SISO 系统模型及其信道容量	40
3.1.1 SISO 系统模型	40
3.1.2 香农信道容量	41
3.1.3 多个独立并行加性白高斯带限信道的容量	41
3.2 MIMO 系统模型	42
3.3 MIMO 系统的信息论基础	44
3.3.1 信道系数确定时 MIMO 系统的容量	44
3.3.2 几种特殊情形	48
3.3.3 信道系数随机时 MIMO 系统的平均容量	51
3.4 MIMO 系统的信道模型	59
3.4.1 MIMO 信道的物理模型	59
3.4.2 MIMO 信道的统计模型	62
3.5 小结	65
本章参考文献	65
第4章 空时编码技术	
4.1 线性空时码及其性能	68
4.1.1 块衰落模型	69
4.1.2 线性空时码	69
4.2 空时分组编码	74
4.2.1 线性分组码	74
4.2.2 发送分集-空时编码方案	75
4.2.3 空时分组码的编码原理	80
4.2.4 空时分组码的译码算法	86
4.3 空时网格码	95
4.3.1 网格编码调制技术	95
4.3.2 空时网格码	98
4.4 分层空时编码	102
4.4.1 分层空时码的发送与接收模型	102
4.4.2 分层空时码的编码原理	104
4.4.3 分层空时码的译码算法	105
4.5 差分空时分组编码	113
4.5.1 单天线下的差分空时分组编码	113

4.5.2 两发送天线下的差分空时分组编码	114
4.6 空时弥散码	118
4.6.1 基本模型	119
4.6.2 设计准则	119
4.6.3 线性弥散码的例子	121
4.7 小结	124
本章参考文献	124
第 5 章 MIMO 系统的传输性能	
5.1 衰落信道中不同调制方式下系统的平均误码率性能	127
5.2 采用 STBC 编码的 MIMO 系统的性能	128
5.2.1 系统模型	129
5.2.2 STBC-MIMO 系统的差错传输性能	129
5.2.3 STBC-MIMO 系统的信道容量性能	150
5.3 采用 LSTC 编码的 BLAST 多天线系统的传输性能	164
5.3.1 差错传播对系统传输性能的影响	165
5.3.2 信道相关性对系统传输性能的影响	169
5.4 小结	172
本章参考文献	173
第 6 章 宽带信道中的多天线 MIMO 系统	
6.1 OFDM 系统基本原理	176
6.1.1 无线衰落多径信道模型	176
6.1.2 OFDM 基本原理和频域模型	177
6.2 MIMO-OFDM 系统	179
6.2.1 MIMO-OFDM 系统的信道容量	180
6.2.2 空时格状编码与 OFDM 系统相结合	182
6.2.3 空时分组编码与 OFDM 系统相结合	185
6.2.4 空时频编码技术	189
6.3 小结	194
本章参考文献	194
第 7 章 时变信道下的 MIMO 系统	
7.1 基扩展时变信道模型	199
7.1.1 时变信道统计模型	199
7.1.2 基扩展时变信道模型	201
7.1.3 MIMO 时变信道下的基扩展模型	204
7.2 时变平坦衰落信道下的分集性能	205

7.2.1	等效时不变系统模型	205
7.2.2	差错性能分析	206
7.2.3	编码方案及性能分析	208
7.2.4	中断性能分析	210
7.3	时间频率双选择性信道下的分集性能	212
7.3.1	等效时不变系统模型	213
7.3.2	差错性能分析	214
7.3.3	编码方案及性能分析	216
7.3.4	中断性能分析	217
7.4	小结	219
	本章参考文献	219
第 8 章 MIMO 技术在无线通信系统中的应用		
8.1	BLAST 系统	221
8.2	无线局域网	222
8.2.1	IEEE 802.11 系列标准	222
8.2.2	IEEE 802.11n 中的 MIMO 技术	223
8.3	无线城域网	228
8.3.1	IEEE 802.16 系列标准	229
8.3.2	空时编码发送分集	231
8.4	WCDMA 建议中的多天线发送分集技术	234
8.4.1	开环发送分集技术	235
8.4.2	闭环发送分集技术	237
8.4.3	性能比较	238
8.5	cdma2000 建议中的多天线发送分集技术	238
8.5.1	开环发送分集方案	239
8.5.2	闭环发送分集方案	239
8.5.3	性能比较	240
8.6	未来宽带无线系统	241
8.6.1	移动宽带无线接入	241
8.6.2	未来蜂窝移动无线通信系统	242
8.7	小结	242
	本章参考文献	242
附录 A 书中使用符号简单说明		245
附录 B 行列式微分的求解		246

绪论

第 1 章

20 世纪 80 年代以来,全球范围内无线移动通信得到了前所未有的发展,这种发展的势头还在延续,今后甚至会更快^[1]。与此同时,因特网不论是技术还是业务也以空前的速度向前发展。随着便携式微机、掌上电脑、智能手机以及个人数字助理(PDA)等的普及,人们对通过无线方式随时随地接入因特网获取信息,将会有越来越迫切的需求。这种需求从最初简单的收发 E-mail,到进行网络浏览、获取多媒体信息及其他多种服务。因此,结合无线通信、计算机和因特网^[2~5],能为广大用户提供更丰富的业务种类、更广泛的覆盖范围以及更快捷的接入方式,这是未来通信系统所必须具备的能力,也是未来通信技术和业务发展的一大趋势。

第一代移动通信只能提供模拟话音业务。目前得到广泛应用的第二代移动通信系统主要有 GSM 系统、IS-136 TDMA 系统以及 IS-95 CDMA 系统^[6]。它实现了话音的数字化,并用时分多址替代了频分多址接入方式,大幅度增加了系统的用户容量。但即便如此,GSM 系统也仅能提供 2.4~9.6 kbps 甚至 14.4 kbps 的电路交换语音业务以及通过 GPRS 和 EDGE 分别提供 144 kbps 和 384 kbps 的分组交换数据业务;IS-136 系统能提供 9.6 kbps 的电路交换语音和传真业务,其最高数据传输速率可达 40~60 kbps。IS-95 系统能够提供可变速率接入,其峰值速率分别可以达到 9.6 kbps 和 14.4 kbps,还可以通过使用蜂窝分组数据网络(CDPD)来提供 19.2 kbps 的数据业务。显然,第二代移动通信系统还不能满足用户日益增长的对全多媒体业务的需要。

目前,第三代移动通信系统(3G)主要有欧洲的 WCDMA、北美的 cdma2000 以及中国的 TD-SCDMA 方案,它们都可以在无线蜂窝网络中提供更加丰富的因特网业务和多媒体业务。Internet 业务的日益普及,促使移动通信技术向全 IP 方向发展^[7]。目前 3GPP 和 3GPP2 等标准化组织制定了基于全 IP 的第三代移动通信增强型体制标准。比如 3GPP2 提出了能够支持高速分组业务(峰值速率为 4~5 Mbps)的 cdma2000-1x/EV 标准,3GPP 也制定了称为 HSDPA 的增强型第三代移动通信标准,其分组业务峰值传输速率达到 8 Mbps 以上^[8]。但是,3G 移动通信系统所能提供的业务能力与人们的期望仍相去甚远。另外,3G 系统还不能实现现有各种无线网络(各种无线局域网、卫星网络、公用无线蜂窝网络等)之间的无缝漫游。

因此,考虑到核心网络传输能力强,而现有的无线网络又不能提供足够的接入速率,

以满足用户对多媒体业务的需求,人们已经开始研究新一代移动通信系统。未来移动通信的目标是,能在任何时间、任何地点、向任何人提供快速可靠的通信服务。具有高数据率、高频谱利用率、低发射功率、灵活业务支撑能力的未来无线移动通信系统应将无线通信的传输容量和速率提高十倍甚至数百倍。同时,考虑到无线局域网 IEEE 802.11a/g、无线城域网 802.16 系列标准等各种无线接入技术在固定或者便携模式下的高速率数据传输特点,构建分层的无缝隙全覆盖整合系统,并实现各系统之间的互通,将是通往未来无线与移动通信系统的必然途径^[9~11]。

随着各种无线通信业务和宽带数据业务的不断发展,无线资源,尤其是频谱资源变得越来越紧张,如何更高效地利用这些有限的通信资源成为无线通信新技术发展的焦点所在。研究表明,使用多天线的 MIMO 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送功率的情况下,可有效对抗无线信道衰落的影响,大大提高系统的频谱利用率和信道容量,是高速数据传输的优选技术之一^[12,13]。Telatar^[12]和 Foschini^[13]等人对白高斯信道下多输入天线、多输出天线信道容量的研究表明,多天线 MIMO 技术可大大提高容量。据 Bell 实验室公布的结果,采用 8 天线收发 D-BLAST 系统可获得 42 bps/Hz 的频谱利用率,是单天线收发系统的 40 多倍^[20]。正是基于这些原因,MIMO 系统已经在许多无线通信系统中得到了广泛的应用。如 Bell 实验室的 BLAST 实验系统、3GPP WCDMA 系统、3GPP2 cdma2000 系统、无线城域网 IEEE 802.16、新的无线局域网 IEEE 802.11n 方案以及正在制定的移动宽带无线接入 IEEE 802.20 方案等均已经采用或者计划采用 MIMO 技术。

本章首先从历史的角度介绍了多天线 MIMO 技术的发展过程,接下来探讨了多天线 MIMO 系统的主要特征及其目前研究现状;其次,为了便于后续章节系统性能的分析,对无线衰落信道的基本特征及其信号包络的几种典型分布进行了讨论。在本章的最后,给出了本书内容的章节安排,便于读者有选择地阅读。

1.1 多天线无线通信系统发展简史

人类采用通信的历史可一直追溯到遥远的古代。但直到 19 世纪末,人们还一直是采用十分直观的方式实现简单的信息传输。古代战争中利用烽火、金鼓和旌旗等传递消息都是直观通信的例子。1864 年,英国物理学家麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831~1879 年)创造性地总结了人们已有的电磁学知识,预言了电磁波的存在^[17]。1887 年,德国物理学家赫兹 (Heinrich Hertz, 1857~1894 年)用实验产生出电磁波,证明了麦克斯韦的预言^[17]。1897 年,意大利科学家马可尼 (Guglielmo Marconi, 1874~1937 年)首次使用无线电波进行信息传输并获得成功,并在 1901 年第一次在跨越大西洋的无线电通信中使用了发射天线^[17]。在后来一个多世纪的时间里,在飞速发展的计算机和半导体技术的推动下,无线移动通信的理论和不断取得进步。今天,无线移动通信已经发展到大规模

商用并逐渐成为人们日常生活中不可缺少的重要通信方式之一。

天线是一种用来发射或接收电磁波的器件,它是任何无线电系统都不可缺少的基本组成部分。发射天线将传输线中的导行电磁波转换为“自由空间”波,接收天线则与此相反。因此可以说,正是由于使用了天线,才使得信息可以在不同地点之间通过电磁波传输,实现真正的无线通信,而无需任何连接设备。因此可以说,没有天线就无法实现无线通信,天线在无线电通信中的重要性显而易见。

对无线通信中天线的研究及其应用主要集中在3个领域,如表1.1所示^[17]。第一个研究领域是天线及其天线阵列的电磁设计,主要包括天线增益、极化方向、波束带宽、旁瓣电平、效率和方向图(Radiation Pattern)等的设计。第二个研究领域是到达角AOA(Angle-of-Arrival)估计,顾名思义,主要集中在对到达天线的波阵面的到达角进行估计,尽量做到误差最小和分辨力(Resolution)最高。第三个研究领域是利用天线阵列来提高频谱效率、覆盖范围以及链路传输性能等,本书所讨论的多天线MIMO技术即属于这一领域。

表 1.1 对无线通信中天线研究的3个主要领域及其研究目的

主要研究领域	天线设计	AOA估计	链路性能
研究目的	增益 带宽 方向图 尺寸	误差方差 偏差 分辨力	覆盖范围 质量 干扰减小 频谱利用率

多副接收天线和接收分集的使用可追溯到20世纪初的马可尼时代,早在1908年马可尼就提出用它来抗衰落。人们研究发现,多副天线构成的接收阵列可以有效地克服无线蜂窝系统中的同道干扰。二次世界大战后,对雷达系统中天线阵列的研究尤为活跃。到20世纪70年代,由于军事上的原因,数字信号处理技术得到了快速发展,这使得更多的关于天线阵列研究的自适应信号处理技术的实现成为可能,从而进一步提高了分集性能,降低了干扰^[17]。到20世纪90年代初,人们发现使用多天线可以增加无线信道的容量。1994年,Paulraj和Kailath提出在发送端和接收端同时使用多天线可增加无线信道的容量^[18]。1996年,Roy和Ottersten提出在基站使用多天线可在同一信道上支持多个用户使用^[19]。接下来,Bell实验室在20世纪90年代中后期一系列研究成果的出台^[12,13,20~26],对多天线的研究起了很大的推动作用,开创了无线通信的一场新的技术革命。

这些成果主要包括:1995年Telatar^[12]和1998年Foschini^[13]对白高斯信道下多输入天线、多输出天线信道容量的研究表明,多天线MIMO技术可大大提高容量。在此基础上,Foschini于1996年首先提出了分层空时编码(Layered Space-Time Coding)技术^[20]。分层空时编码将信源数据分为若干子数据流,独立地进行编码、调制,频谱效率可达

40 bps/Hz以上,但它较适于窄带系统和室内环境,不太适合应用于室外移动环境^[20~22]。基于此,Alamouti 于 1998 年在文献[23]中提出了一种发送分集实现方案:在发送端,信号经过简单的编码映射,然后经过 n 副天线同时发送;在接收端已准确知道信道传输特性的情况下,采用一些简单的信号处理技术,即可获得与 n 副天线接收分集相同的性能。随后,Tarokh^[24~26]等人在 Alamouti 关于发送分集研究工作的基础上,将这种发送分集技术结合正交编码,提出空时分组编码技术(STBC, Space-Time Block Coding)^[24,25];将这种发送分集结合格状编码调制(TCM)技术,提出空时网格编码技术(STTC, Space-Time Trellis Coding)^[26]。采用 2 副发送天线的空时网格编码,系统的传输性能与 Foschini 等人给出的中断容量(Outage Capacity)^[13]仅差 2~3 dB。

1.2 多天线系统特征及当前研究进展

本书所讨论的多天线 MIMO 系统,虽说也使用了多副天线,但它不同于移动通信中传统的智能天线。智能天线的概念源于军事上雷达和声纳系统中所采用的自适应阵列天线。其基本思想是:利用信号传输的空间特性自适应地控制波束成形,调整其方向图,跟踪强信号,减少或抵消干扰信号,提高信干比,从而达到降低信号发送功率、提高系统容量的目的。在智能天线系统中,出于体积和成本的考虑,通常是只在基站端安置多个天线阵列元素。这种多天线系统的智能功能源于对各个天线信号进行的加权选择算法。智能天线的另一个好处是实现了空间分集。在多径衰落环境下,用独立的多个天线元素时,信号同时受到衰落的概率很小,这就达到了分集的效果。

随着各种无线网络接入业务的出现,移动台已不仅仅是移动电话,对于移动台的体积和复杂度的约束也越来越小。因此可以在发送端和接收端都安置多副天线,从而构成了本书要讨论的多输入多输出系统。

MIMO 系统在无线通信系统的发送端和接收端都安置多个天线元素,其简化框图如图 1.1 所示。在发送端,二进制数据流输入到发送处理模块中,在这里,输入信息进行编码、星座映射,可能还要进行一定的加权,然后送到各副发送天线上,经过上变频、滤波和放大后发送出去。在接收端,接收机将多副接收天线接收的信号进行解调、匹配滤波、接收处理和译码,以恢复原始数据。可见,MIMO 技术的出发点是将发送天线与接收天线相结合以改善每个用户的通信质量(如差错率)或者通信效率(如数据速率)。

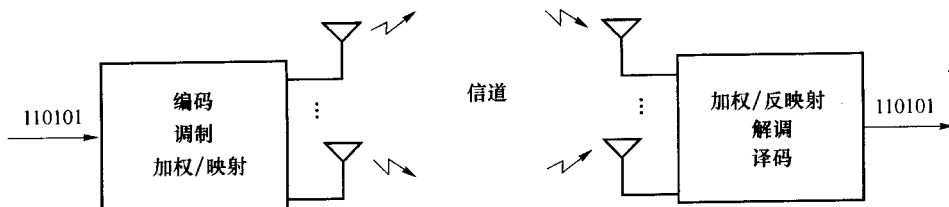


图 1.1 多输入多输出天线系统示意图