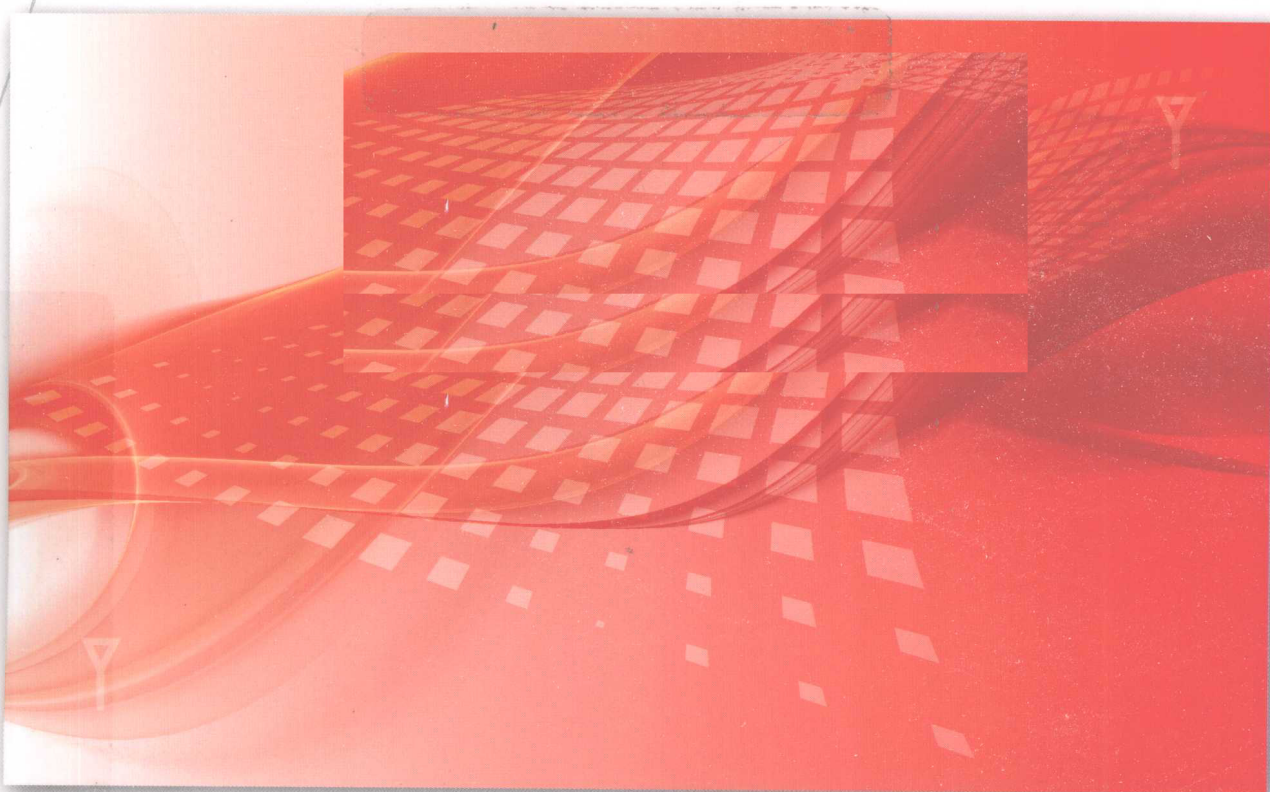


深入挖掘未来移动通信网络的关键技术之一——MIMO技术，透析无线领域的研究热点。

MIMO

技术原理及应用

■ 林云 何丰 编著

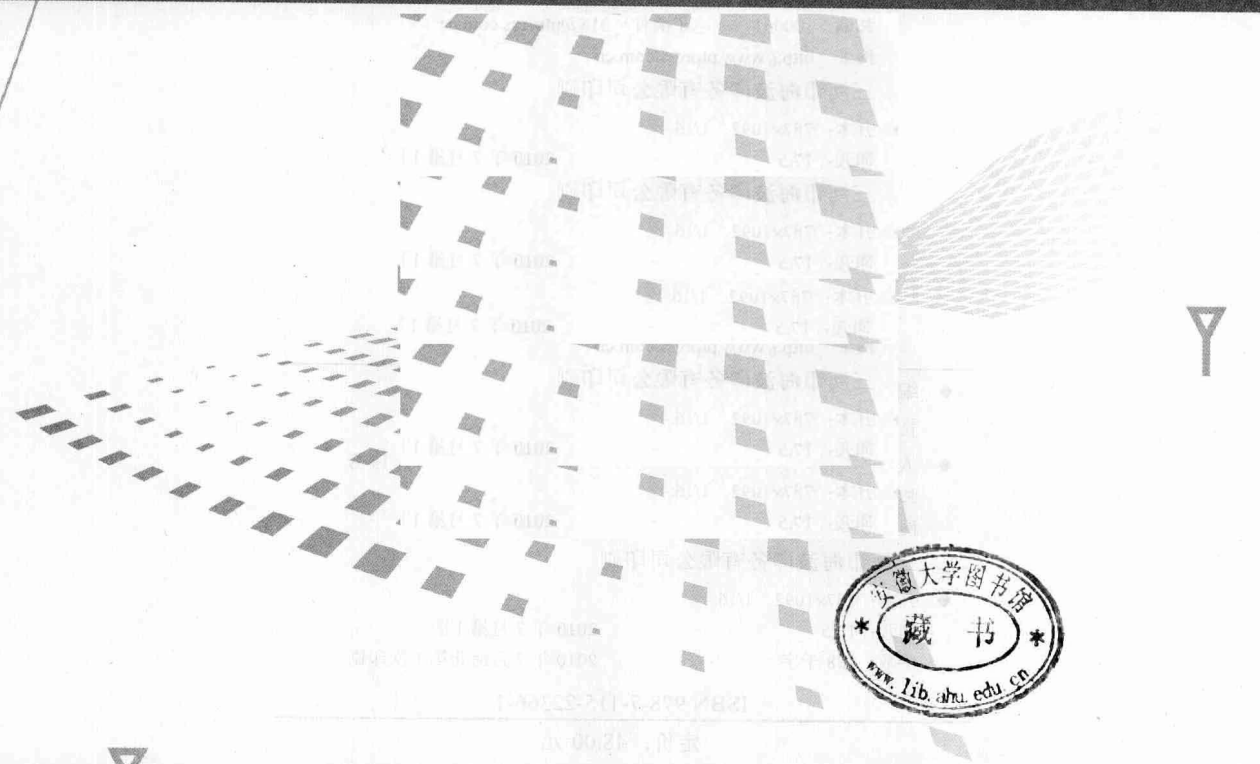


 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

MIMO

技术原理及应用

■ 林云 何丰 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

MIMO技术原理及应用 / 林云, 何丰编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2010.7
ISBN 978-7-115-22366-1

I. ①M… II. ①林… ②何… III. ①移动通信—通信
系统 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第062096号

内 容 提 要

本书系统地介绍了 MIMO 技术相关原理、应用及技术难点, 分析了 MIMO 技术的现状和存在的问题, 具体内容包括 MIMO 信道建模、衰落信道的容量、MIMO 信道的容量、分集技术、空时编码技术、MIMO 系统检测算法、MIMO 中继信道、MIMO-OFDM 系统和 MIMO 天线设计。

本书可作为从事移动通信研究和相关领域研究的专业技术人员的参考书, 也可以作为高等院校通信和电子系统方面的教师、研究生、高年级学生的教材或参考书。

MIMO 技术原理及应用

-
- ◆ 编 著 林 云 何 丰
责任编辑 青晓琴
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.5
字数: 438 千字
 - 2010 年 7 月第 1 版
2010 年 7 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-22366-1

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前 言

移动通信技术已经成为当今通信领域发展最快、市场潜力最大的热点技术。到目前为止,第三代移动通信系统已经在世界各国使用,包括 WCDMA、cdma2000 以及 TD-SCDMA 系统。第三代通信系统能提供基本的数据和多媒体业务,但是对于高速的移动多媒体业务尚显能力不足。移动用户要求更为丰富和个性化的服务,同时互联网与移动通信正在相互融合,人们希望在互联网上的所有应用都能够在移动通信中实现,这样便出现了一个以 IP 为基础的,集中多种功能甚至是各种网络互通的宽带移动通信系统,其数据传输速率在 100Mbit/s 以上的未来移动通信网络。这种网络的主要特征是宽带化、自组织化、移动化和全 IP 化等。为了满足未来宽带通信时的高速传输速率和宽覆盖范围的需求,MIMO 技术已经被视为其关键技术之一。考虑到移动终端天线数目有限,为了保证其也能获得 MIMO 增益,于是便诞生了 MIMO 中继的概念。MIMO 技术现在已经出现在将要应用的无线系统中,更是未来移动通信中不可或缺的技术。

近年来的研究表明,在收发端采用多天线技术即 MIMO 技术,可以大大地提高无线系统的传输速率。自 MIMO 技术提出以来,采用空时编码的发射分集、空分复用方案以及有关 MIMO 技术的解码问题,一直是无线领域的研究热点。尽管这一领域已有的研究取得了卓有成效的工作,但是很多基础性的工作仍需解决。本书在提供有关 MIMO 基本知识的基础上,对 MIMO 系统的容量问题和 MIMO 中继问题作了较为深入的论述。对于想深入理解本书内容的读者,作者建议其最好具备数字通信、线性代数、概率论等方面的知识。

全书共分为 10 章,第 1 章概述了 MIMO 系统的提出及一些研究成果;第 2 章介绍了 MIMO 信道建模,不仅讨论了其研究现状,还给出了 MIMO 信道建模的两个实例研究;第 3 章阐述了衰落信道容量,分别包括高斯信道下的信道容量、平坦衰落信道的容量和频率选择性衰落信道的容量;第 4 章详细阐述了 MIMO 的信道容量,分别对独立衰落、相关衰落下的单用户 MIMO 系统容量,信道系数固定时和信道系数随机变化时的 MIMO 系统容量,多用户 MIMO 系统容量等进行了论述和分析,并给出了相关实例及仿真分析;第 5 章介绍了接收和发射分集技术;第 6 章详细论述空时编码的相关技术,并对其性能指标进行了分析;第 7 章介绍了 MIMO 系统的检测算法,对最大似然检测、线性检测算法、非线性检测算法、结合格缩减技术的检测、球形译码算法、半定松弛算法、堆栈算法等作了较为详细的讨论;第 8 章从加性高斯信道协同无线信道容量、多节点高斯协同中继信道、衰落信道 MIMO 协同中继系统容量、协同中继系统的功率分配和协同功率分配等几个方面重点介绍了 MIMO 中继信道的相关内容;第 9 章结合 OFDM 系统讨论 MIMO-OFDM 系统;第 10 章讨论了 MIMO 天线系统的设计思想及相关技术,并给出了几种移动天线设计方案、MIMO 基站设计方案。

本书第 1 章第 1 节由何丰执笔,其余章节由林云执笔。本书参考和引用了国内外相关研究论文,且作者指导的硕士生在一些基础性的仿真和资料准备上做了贡献,在此一并表示感谢。

本书获得了重庆邮电大学出版基金资助，研究内容也得到了重庆市科技委员会的基金资助，作者在此表示感谢。由于 MIMO 技术正在不断发展，新技术推陈出新，加上作者水平有限，书中难免有不妥和谬误之处，欢迎广大读者来信批评指正。

作 者

2010 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2 平坦衰落信道的容量	53
1.1 MIMO 系统的提出	1	3.2.1 信道与系统模型	53
1.2 MIMO 系统的特征及研究进展	2	3.2.2 接收机知道信道状态信息, 发射机知道信道分布	54
1.2.1 MIMO 系统的主要特征	2	3.2.3 发射机与接收机均已知 信道状态信息	55
1.2.2 已取得的进展	3	3.2.4 分集接收机的容量	58
1.3 存在的问题	4	3.2.5 相关 Nakagami 信道分集 接收机的容量	60
参考文献	5	3.3 频率选择性衰落信道的容量	61
第 2 章 MIMO 信道建模	6	3.3.1 时不变频率选择信道	61
2.1 无线信道建模的必要性	6	3.3.2 时变频率选择信道	63
2.1.1 大尺度衰落及其典型模型	6	参考文献	64
2.1.2 小尺度衰落及其典型模型	8	第 4 章 MIMO 信道的容量	65
2.1.3 信道的一阶和二阶统计量	10	4.1 独立衰落下单用户 MIMO 系统的容量	65
2.2 MIMO 信道建模的研究现状	11	4.2 信道系数固定时的 MIMO 系统容量	67
2.2.1 MIMO 信道建模的必要性	11	4.2.1 循环对称复高斯随机向量	67
2.2.2 从 SISO 信道到 MIMO 信道的演变	11	4.2.2 通过互信息推导 MIMO 系统的容量	67
2.2.3 MIMO 信道建模方法的 分类	13	4.2.3 通过信道矩阵的奇异值 推导 MIMO 系统的容量	69
2.2.4 MIMO 信道典型模型	14	4.3 信道系数随机变化时的 MIMO 系统容量	71
2.3 MIMO 信道建模两个实例 研究	19	4.3.1 容量的定义	71
2.3.1 MIMO 无线信道参数	19	4.3.2 MIMO 系统的各态历经 容量	72
2.3.2 MIMO 信道的空间相关性	21	4.4 MIMO 系统的容量实例及 仿真分析	74
2.3.3 基于 Kronecker 的 MIMO 信道模型	25		
2.3.4 单环及改进型单环 MIMO 信道模型	33		
参考文献	51		
第 3 章 衰落信道的容量	53		
3.1 高斯信道下的信道容量	53		

4.4.1 单输入单输出 (SISO)		5.4.3 发射机已知信道状态:	
系统的容量	74	MIMO	117
4.4.2 SIMO 系统的容量	74	5.5 矩分析方法在分集技术中的	
4.4.3 MISO 系统的容量	76	运用	118
4.4.4 两种典型的 MIMO		参考文献	120
系统容量	78	第 6 章 空时编码技术	121
4.5 相关衰落下单用户 MIMO		6.1 空时编码技术基础	121
系统容量	78	6.1.1 空时编码模型	121
4.5.1 接收机能准确估计信道,		6.1.2 空时编码的性能分析	122
发射机不能估计信道	79	6.2 空时编码设计准则	128
4.5.2 接收机和发射机均不能		6.2.1 慢衰落瑞利信道的编码	
估计信道	84	设计准则	128
4.5.3 频率选择性衰落相关信道下		6.2.2 快衰落瑞利信道的编码	
MIMO-OFDM 系统容量	86	设计准则	129
4.6 多用户 MIMO 系统容量分析	91	6.3 空时编码的性能指标	129
4.6.1 MIMO_MAC 系统	92	6.4 空时编码的成对差错概率的	
4.6.2 MIMO_BC 系统	92	准确估算	130
4.6.3 MIMO_MAC 和		6.5 空时格形码性能分析	131
MIMO_BC 的对偶性	94	6.5.1 空时格形码的编码方案	131
4.6.4 迭代注水算法	95	6.5.2 空时格形码的译码方案	133
4.7 基于训练序列估计的 MIMO		6.5.3 空时格形码的性能分析	133
系统容量	97	6.6 基于正交设计的空时分组码	134
4.7.1 基于训练序列信道估计的		6.6.1 Alamouti 发射分集方案	134
MIMO 系统模型	97	6.6.2 空时分组编码的	
4.7.2 基于训练序列的信道		正交设计	139
估计值的推导证明	100	6.6.3 准正交空时编码的基本	
4.7.3 等效的系统模型	102	原理和设计准则	146
4.7.4 基于训练序列估计的		6.7 基于星座旋转的满分集的	
信道容量	103	准正交空时编码	150
参考文献	108	6.7.1 满分集的准正交空时	
第 5 章 分集技术	111	编码设计	151
5.1 分集类型	111	6.7.2 满分集的准正交空时	
5.2 分集增益与编码增益	111	编码的性能指标	153
5.3 接收分集系统模型	112	6.8 酉空时编码器	154
5.4 发射分集	115	6.8.1 酉空时信号的构建	154
5.4.1 发射机不知信道状态:		6.8.2 酉空时码的性能	159
MISO	115	6.9 差分空时码	159
5.4.2 发射机已知信道状态:		6.9.1 单天线系统中的差分	
MISO	116	空时码	159

6.9.2 MIMO 系统中的差分空时码	160	7.12 蒙特卡罗统计等算法	190
参考文献	161	参考文献	190
第 7 章 MIMO 系统检测算法	163	第 8 章 MIMO 中继信道	195
7.1 单小区情况单用户 MIMO 系统模型	163	8.1 协同通信	195
7.2 最大似然检测	163	8.1.1 协同 MIMO 技术	195
7.3 线性检测算法	165	8.1.2 协同中继传输	196
7.3.1 基于迫零准则	165	8.1.3 用户协同传输	196
7.3.2 基于 MMSE 准则	166	8.1.4 协同通信技术特征	197
7.3.3 串行干扰抵消算法	166	8.2 加性高斯信道协同无线信道容量	197
7.4 非线性检测算法	167	8.2.1 三节点中继信道模型	198
7.4.1 QR 分解算法	167	8.2.2 半双工协同中继方法	200
7.4.2 MMSE 意义上的 SQRD	172	8.2.3 半双工解码前向中继	202
7.5 结合格缩减技术的检测	173	8.2.4 半双工放大前向中继	203
7.5.1 基本原理	174	8.2.5 半双工选择性中继	205
7.5.2 格缩减技术	174	8.2.6 半双工增量中继	206
7.5.3 格缩减辅助的检测算法	176	8.3 多节点高斯协同中继信道	207
7.5.4 格缩减辅助的线性检测	176	8.4 衰落信道 MIMO 协同中继系统容量	209
7.5.5 格缩减辅助的 BLAST 非线性检测	177	8.4.1 传统 MIMO 信道容量	209
7.6 球形译码算法 (SDA)	178	8.4.2 MIMO 协同中继系统容量	209
7.6.1 FP 算法	178	8.5 协同中继系统的功率分配	216
7.6.2 VB 算法	179	8.5.1 中继链路系统模型	217
7.6.3 SE-VB 算法	179	8.5.2 中断概率相等功率分配策略	220
7.6.4 自动球形译码算法	180	8.5.3 DF 中继链路功率分配策略	220
7.6.5 各种改进版本的 k-best SDA	181	8.5.4 AF 中继链路功率分配策略	225
7.7 QRM 算法	183	8.5.5 仿真分析	227
7.8 半定松弛算法	183	8.5.6 MIMO 协同中继系统的功率分配	230
7.8.1 关于松弛的基本概念	183	8.5.7 仿真分析	235
7.8.2 半定松弛最大似然检测	184	8.6 协同功率分配	235
7.9 分枝定界算法	187	8.6.1 三节点两跳中继网络	235
7.10 堆栈算法	188	8.6.2 多节点两跳中继网络	240
7.11 智能检测算法	189	参考文献	245
7.11.1 禁忌搜索检测	189		
7.11.2 粒子群优化	190		

第 9 章 MIMO-OFDM 系统247	9.5 LTE 系统简介 260
9.1 OFDM 系统基本概念.....247	参考文献..... 262
9.2 OFDM 的系统结构框图.....248	第 10 章 MIMO 天线设计 263
9.2.1 OFDM 主要功能模块.....248	10.1 概述..... 263
9.2.2 串并变换.....249	10.2 MIMO 多天线与传统天线 设计的比较..... 263
9.2.3 子载波调制.....250	10.3 MIMO 天线设计基础..... 264
9.2.4 DFT 的实现.....251	10.3.1 MIMO 天线单元 设计要求..... 264
9.2.5 保护间隔和循环前缀.....251	10.3.2 设计思想..... 264
9.2.6 OFDM 系统的缺点.....253	10.4 天线设计准则..... 266
9.3 基于 IEEE 802.16 的 WiMAX 系统.....254	10.5 MIMO 移动台天线设计..... 267
9.3.1 IEEE 802.16 无线接入 标准.....254	10.6 MIMO 基站天线设计案例..... 269
9.3.2 WiMAX 论坛.....255	10.7 多模式天线在 MIMO 系统中的应用..... 270
9.3.3 物理层关键技术.....255	10.7.1 同轴波导馈电的 双锥天线..... 270
9.3.4 IEEE 802.16 物理层 简单介绍.....256	10.7.2 自补偿阿基米德四臂 螺旋天线..... 272
9.3.5 IEEE 802.16e 的网络 结构.....257	参考文献..... 272
9.4 IEEE 802.11 无线局域网标准.....258	

第 1 章 绪 论

1.1 MIMO 系统的提出

在传统的无线通信系统中,发射端和接收端通常是各使用一根天线,这种单天线系统也称为单输入和单输出(Single Input Single Output, SISO)系统。对于这样的系统,C.E.Shannon(1916—2001)于1948年在《通信的数学理论》^[1]中提出了一个信道容量的计算公式: $C=W \log_2(1+S/N)$,其中 W 代表信道带宽, S/N 代表接收端的信噪比。用 W 归一化后,得到带宽利用率 $\eta = \log_2(1+S/N)$,它确定了在有噪声的信道中进行可靠通信的上限速率。以后的电信工作者无论使用怎样的调制方案和信道编码方法,只能一点一点地接近它,却无法超越它,Shannon速率成了现代无线通信发展的一大瓶颈。

随着移动通信的广泛应用,加上互联网要求无线接入,提高无线通信速率成为非常紧迫的研究任务,因此必须设法突破上述传统无线通信系统的容量界限。一般来说,提高移动通信的信道容量有3种方法,一是设置更多的基站;二是拓宽已使用的频带;三是提高频谱的使用效率。设置更多的基站意味着增加更多的蜂窝,为此付出的代价高。为了提高无线通信的传输速率,有人建议把目前使用的频带拓展到毫米波段。

在传统的无线系统中,根据C.E.Shannon给出的信道容量公式,增加信噪比可以提高频谱的使用效率,信噪比每增加3dB,信道容量每秒每赫兹增加1bit。对于单用户方案,信噪比主要跟系统热噪声有关,而系统热噪声在通信期间基本保持不变,如果增大发射端的发射功率,接收端的信噪比将随之增加。然而,要设计一个功率放大器能在很宽的线性范围内和很高的发射功率上工作是很困难的,并且当发射功率很高时,器件的散热也成问题。在蜂窝方案中,由于来自其他用户的干扰电平通常高于系统的热噪声,所以在这种情况下增大发射功率似乎对增加信道容量没有太大的帮助。

提高频谱使用效率的另一种方法是采用分集技术。单输入多输出(Single Input Multiple Output, SIMO)系统采用最佳合并的接收分集技术,通常能够改善接收端的SNR,从而提高信道的容量和频谱的使用效率。在多输入单输出(Multiple Input Single Output, MISO)系统,如果发射端不知道信道的状态信息,无法在多发射天线中采用波束形成技术和自适应分配发射功率,信道容量的提高不是很多。SIMO和MISO技术的发展自然演变成MIMO(多输入多输出)技术,即在无线链路的两端都使用多根天线,Bell实验室的学者E.Telatar^[2]和J.Foschini^[3]分别证明了MIMO系统与SIMO和MISO系统相比,可以取得巨大的信道容量,也突破了传统的SISO信道容量的瓶颈,是C.E.Shannon信道容量的推广。与目前已实现的信道容量相比,MIMO系统提高了几个数量级,因此MIMO技术在B3G乃至未来移动通信系统中有着广阔的应用前景。

1.2 MIMO 系统的特征及研究进展

多径通常会引起衰落,这在普通的通信系统中是非常不利的,但对于 MIMO 系统来说,多径可以作为一个有利因素加以利用。图 1.1 为 MIMO 系统的原理图,在发送端和接收端安置了多根天线,在发送端的二进制串行数据流经过一些必要的空时处理后被送到天线进行发射,在接收端通过各种空时检测技术进行数据符号的恢复。可见, MIMO 技术的出发点是将发送天线和接收天线相结合以改善每个用户的通信质量或通信效率。通常为了保证各个子数据流能够有效分离,各个天线之间必须保持足够大的距离(通常要求半个载波波长以上),以防止接收信号间过大的相关性。和智能天线技术不一样的是,在 MIMO 系统中从任意一个发送天线到任意一个接收天线间的无线信道是相互独立的或者具有很小的相关性。

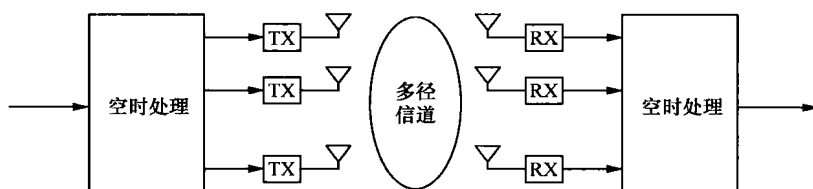


图 1.1 MIMO 系统原理图

由于各子数据流同时发送到信道,它们共用同一频带,因而并未增加带宽。若各发射、接收天线间的信道响应独立,则 MIMO 系统可以创造多个并行空间信道。通过这些并行空间信道独立地传输数据符号,数据率必然可以提高。

1.2.1 MIMO 系统的主要特征

1. 信道容量

容量是表征通信系统的最重要标志之一,表示通信系统的最大信息传输速率。Telatar 和 Foschini 分别对高斯噪声下多发送多接收天线系统信道容量进行了较深入的研究。研究表明,在假设各天线互相独立的条件下,多天线系统比单天线系统的信道容量有显著的提高。考虑 M 副发送天线、 N 副接收天线的无线传输系统,在接收端已准确知道信道传输特性的情况下, $M=N$ 时得到与 M 成线性增加的信道容量。在相同发射功率和传输带宽下,多天线系统比单天线系统的信道容量提高 40 多倍^[4]。这些增加的信道容量可以用来提高信息传输速率,也可以不提高信息速率而通过增加信息冗余度来提高通信系统的传输可靠性,或者在两者之间取得一个合理的折中。

2. 空间复用提高频谱利用率

在信道容量研究的基础上, Foschini 等人提出了分层空时结构 (Layered Space-Time Architecture)^[3,4],建立了 BLAST 多天线 MIMO 实验系统,在实验室中获得了 20~40bit/s/Hz 的频谱利用率,这在普通系统中极难实现。由于这种 BLAST 系统是将高速信源数据流按照发送天线数目串并变换为若干子数据流,独立地进行编码、调制,然后分别从各副发送天线上发送出去,因而严格说来它不是基于发射分集技术的,而是利用了空间复用技术 (Spatial Multiplexing)。由于这些数据流占据相同的频带,因此经过无线信道后,信号发生了混合。在接收端,利用估计的信道特性,接收机按照一定的译码算法分离独立的数据流并给出其估

值。根据发送端对输入串行数据流进行分路方式的不同,主要有垂直(V-BLAST)、对角(D-BLAST)和平行(H-BLAST)3种空间复用方案。这种纯粹的空间复用系统实际上是自由度(一般指发送天线和接收天线的最小值)受限的^[4,5],较适用于高信噪比的情况,它追求的是速率的极大化,因此对于一定差错率目标来说,空间复用系统并非最佳的传输方案。

3. 利用发送分集提高系统的传输性能

通常,在传统的无线传输系统中多径引起的衰落是造成误码的主要原因之一,因而被视为有害因素。然而研究表明,MIMO 系统能利用多副天线所带来的多条传输路径来获得空间分集增益,从而提高系统的传输性能,这是 MIMO 系统的一个主要特征。

另外，MIMO 系统虽然能提供高的频谱效率，但要真正实现这一点却很困难。比如，在信道变化很快的环境下，信道等效的独立数据流的数目也会发生较大的变化，这时，要从 MIMO 信道获得最大频谱效率的空时分层结构，其差错性能可能会相当差。其实，从工程角度看，链路的效率是由发送数据流的数目和每个数据流的差错率水平共同决定的，不仅仅取决于数据流的数目，因此能影响通信系统差错性能的措施，比如，对于多天线的信号的编码，在 MIMO 系统的设计中也显得非常重要。

基于以上原因,以获得高分集增益、注重分集阶数的增加为目的的另一种 MIMO 系统产生了,这便是基于发送分集的空时编码技术。与空间复用系统不同,空时编码技术追求的是分集效果的极大化(可能会导致速率的损失)。它有效地结合了编码、调制以及分集技术,在获得分集增益的同时,在一定条件下也可获得编码增益。这样,并行信道数目的减少只会导致分集效果的减少,而不会引起系统性能的迅速恶化。这种基于发送分集的空时编码技术主要包括空时分组编码和空时网格编码两大类。空时网格码可以同时获得分集增益和编码增益,但其译码复杂度却很高。虽说空时分组码只能获得分集增益,但却由于编译码简单、易于实现而受到广泛关注,并已经被 WCDMA 等标准采纳。

4. 空间复用与发送分集的折中

从上面的分析可知,空间复用技术追求的是频谱效率的极大化,但并不适于低信噪比环境;发送分集技术追求的是分集增益的最大化,却有可能导致速率的损失,因此,MIMO系统需要在编码处理与复用的优势之间进行折中考虑,根据不同的目标要求,采取相应的传输方案^[5]。

1.2.2 已取得的进展

信息论预示了无线 MIMO 系统具有潜在的巨大的信道容量, 因此, 目前全球有许多学术机构和大企业正在对 MIMO 技术进行更深入的研究, 而 ITU 和 3GPP 已着手制定在 3G 和 B3G 的移动通信中使用 MIMO 技术的有关标准。对于 3G 系统, MIMO 及其相关的技术可以看成是用于提高数据流量、系统性能和频谱效率方面的有力措施之一。在蜂窝移动通信中, 目前还没有商用化的 MIMO 产品; 在 3G 系统中, 除了使用纯发射分集的解决方案 MISO 外也没有使用 MIMO 技术。几年前, 美国朗讯 (Lucent) 公司已做过了 MIMO 系统的早期实验, 并成功地测试了两款 BLAST 芯片, 芯片的最高速度达到了 19.2Mbit/s; BLAST 研究小组取得了以前难以想象的无线频谱效率: $20 \sim 40 \text{ bit/s/Hz}$ 。使用传统的无线调制技术, 对于蜂窝移动通信系统取得的频谱效率为 $1 \sim 5 \text{ bit/s/Hz}$; 对于点对点的微波通信系统取得的频谱效率为 $10 \sim 12 \text{ bit/s/Hz}$; 在 30kHz 的带宽内, Bell 实验室在上述的频谱效率上实现了 $0.5 \sim 1 \text{ Mbit/s}$ 的有效载荷数据速率, 而使用传统的技术, 在该带宽内取得的数据速率仅为 50kbit/s。

表 1.1给出了在 3GPP 中，关于在平坦衰落条件下，2~4GHz 频段、5MHz 载波间隔，在移动通信的下行链路中使用 MIMO 技术所取得的峰值数据速率与使用传统技术所得的峰值数据速率的比较。

表 1.1 各种 MIMO 结构的数据峰值速率

(M, N)	TX 技术	码速	调制方式	子数据流	子数据流数量	数据速率
(1, 1)	传统	3/4	64QAM	540kbit/s	20	10.8Mbit/s
(2, 2)	MIMO	3/4	16QAM	360kbit/s	40	14.4Mbit/s
(2, 2)	MIMO	3/4	QPSK	180kbit/s	80	14.4Mbit/s
(4, 4)	MIMO	1/2	8PSK	540kbit/s	80	21.6Mbit/s

注： M 表示发射天线数， N 表示接收天线数。

上述内容只是目前 MIMO 技术在应用研究方面已取得的一些进展的简单回顾，实际上可能远不止这些。

1.3 存在的问题

自从 Telatar 和 Foschini 在无线 MIMO 系统中做出了开创性的工作以来，目前人们在蜂窝无线系统、固定接入系统方面已提出了各种实验性的 MIMO 系统，但是距离 MIMO 技术大规模投入商用的时间还需要数年，因为还有许多实际问题需要解决，这些问题主要包括以下几个方面。

1. 天线的数量和间距

天线的数量和各天线之间的距离是 MIMO 系统设计的关键参数，想要实现 MIMO 系统的高频谱效率，后者更为重要。在基站安装大量的天线，对周围的环境会造成一定的损害，因此天线的数量宜限制在中等的水平，例如有 4 根相同类型的天线，它们之间的距离一般选择 10 个波长。这个距离稍微偏大，之所以这样选择是因为基站一般安装在较高的位置，不能保证总是存在能使衰落去相关的本地散射体。

2. 接收机的复杂性

MIMO 接收机与单天线接收机相比，复杂性明显增加，具体表现如下。

(1) 由于多用户、多天线的存在，消除空间干扰的空时合并器和信号检测器的设计变得异常复杂，例如 (4, 4) MIMO 系统与单天线接收机相比，复杂性增加约 2 倍。

(2) MIMO 接收机受周围环境的散射影响，存在角度扩展和延时扩展，在均衡和干扰对消方面需要增加一些附加的处理。

(3) MIMO 信道估计会导致复杂性的增加，因为整个信道矩阵的每一条路径延时（在 OFDM 系统中为每一个时隙）都需要及时跟踪和更新，而不是只跟踪和更新单个系数。

(4) 额外的复杂性还来自增加的 RF 电路（与 RX 天线的数目相等）和相应的基带运算单元，还有接收机的隔离算法等。对于蜂窝手机，它的电池寿命长短也跟接收机的复杂性有关。

3. MIMO 信道模型

MIMO 系统的性能在很大程度上取决于所处环境多径信号的性质，特别会受各条路径之间的相关度、延时扩展和角度扩展的影响，因此，了解和掌握户内和户外环境中无线 MIMO 信道的特性，对发掘潜在的巨大信道容量、取得预期的性能效果、选择合适的系统结构和设计优良的信号处理算法至关重要。为此除了一些必要的实际测量外，必须建立合适的信道模

型，用于预测系统的性能和评估算法的优劣。为了适应无线信道的时变特性，不仅需要建立 MIMO 信道的静态模型，还要建立特定的动态模型。因为提出新的和更具体的信道模型，可用于分析现有的传输算法是如何影响系统的性能的，同时为适应这些更具体的模型要求，还应该提出一些新的算法。传统的无线系统的传播模型已成为标准，但到目前为止，ITU 还未制定相应的 MIMO 信道模型标准，3GPP 已制定出有关 MIMO 的信道模型标准。

4. 信道状态信息 (CSI) 的获取和利用

如何准确地获取信道的状态信息并及时地反馈给发射机是 MIMO 系统设计中一个值得深入研究的课题。信道容量实际上是信道特征模式的函数,而且如果已知信道的相关矩阵,还可以使信道编码、每一支流的比特分配和放大器的功率管理做到最佳。

5. 系统的集成和信号设计

MIMO 系统需要与现有的非 MIMO 通信网络集成、向后兼容，即未来的 MIMO 接收机应该是双模式的。

除上述因素外, 还有其他一些因素也会使 MIMO 系统的性能退化, 例如, 不正确的信道估计、天线单元之间存在相关、较高的多普勒频移等, 这些因素也需要进一步深入研究。

参考文献

- [1] C.E.Shannon. A Mathematical Theory of Communication[J]. Reprinted with corrections from The Bell system Technical Journal, July,October,1948,27:379-423,623-656
- [2] I.E.Telatar. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. Bell Labs Tech. MIMO, June 1995:1-28
- [3] G.J.Foschini , M.J.Gans. On limits of wireless communications in a fading environment When using multiple antennas[J]. Wireless Personal communications, March,1998,6:311-353
- [4] G.J.Foschini. Layered space-time architecture for wireless communication in fading environment when using multiple antennas[J]. Bell Labs Technical Journal,Autumn, 1996:41-59
- [5] L.Zheng,D.Tse. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003,49(5):1073-1096

第 2 章 MIMO 信道建模

2.1 无线信道建模的必要性

移动通信系统中的无线信道具有随机性、时变性、复杂性，因此需要对无线信道进行建模。信道的建模，就是对实际信道的特性进行模拟的过程，因此，了解无线信道的特性是建模的第一步。

通常，无线信道的传播可以分为大尺度（Large-Scale）衰落和小尺度（Small-Scale）衰落两种^[8,15]。

2.1.1 大尺度衰落及其典型模型

大尺度传播描述的是长距离（几百米甚至更长）内接收信号强度的缓慢变化。一般说来，大尺度衰落与发射天线和接收天线之间的距离、发射天线和接收天线的高度、载波频率以及环境特性等参数有关，在给定了上述参数时，可以预测出电波传播的路径损耗，建立传播预测模型。对于传播预测模型的研究，传统上集中于给定范围内平均接收场强的预测和特定位置附近场强的变化。这些研究结果可用于估计无线覆盖范围、指导无线通信系统的规划。

移动通信系统中的无线电一般是在不规则的地形环境下传播的。在估算路径损耗时，应考虑特定地区的地形地貌因素。有很多传播模型可用来预测不规则的地形的路径损耗，这些模型的目标是预测特定点或特定区域的信号强度，但在方法、复杂性和精确性方面差异很大。有些实测模型能够对服务区测试数据进行较为精确的解释。现在讨论一些常用的大尺度传播模型。

2.1.1.1 Longley-Rice 模型

Longley-Rice 模型应用于频率范围为 40MHz~100GHz、不同种类的地形中点对点的通信系统，利用地形地貌的路径几何光学和电磁波的绕射性预测中值传输损耗。几何光学（主要是双线地面反射模型）用于预测无线电地平线以内的信号场强，使用 Frensel-Kirchoff 刃形模型来估计阻挡体的绕射损耗；前向散射理论用于长距离对流散射预测，并采用改进的 Vander Pol-Bremmer 方法预测双地平线路径的远地绕射损耗。Longley-Rice 传播预测模型又称为 ITS 不规则地形模型。

Longley-Rice 模型可通过两种方式使用：一种方式是在能获取详细的地形地貌数据时，可很容易地确定路径参数，这种预测称为点到点预测模式；另一种方式是，如果不能获取地形地貌数据，那么就采用 Longley-Rice 方法来估计特定路径参数，这种预测称为区域预测模式。

从原始模型发布以来, Longley-Rice 模型已经有了很多的改进和修正方法。一个重要的改进是针对城区的无线传播, 特别与移动台有关。这种修改增加了一个额外项, 以作为接近接收天线的城区杂波所引起的额外衰减的补偿。这个额外项称为城区因子 (UF), 可以通过原始 Longley-Rice 模型的预测与 Okumura 模型的对比获得。Longley-Rice 模型的一个缺点是在接收机附近时不提供对环境因素的修正, 只涉及建筑物和树叶的修正。此外, 该模型没有考虑多径传播。

2.1.1.2 Okumura 模型

Okumura 模型是预测城区信号时使用最广泛的模型。此模型适用频率在 150~1 920MHz、距离为 1~100km、天线高度为 30~1 000m 的情况。

Okumura 提出了一系列在准平滑城区, 基站有效天线高度 (h_{te}) 为 200m、移动天线高度 (h_{re}) 为 3m 的相对于自由空间的中值损耗 (A_{mu}) 曲线。在基站和移动台均使用垂直全向天线的情况下, 通过广泛的测量得到了大量的结果, 将这些测量结果画成频率在 100~1 920MHz, 到基站的距离为 1~100km 的曲线。利用 Okumura 模型确定路径损耗时, 首先要确定所关注点之间的自由空间路径损耗, 然后将 $A_{mu}(f, d)$ 的值与考虑了地表特征的修正因子一起加到其上, 模型可以表示为

$$L_{50}(\text{dB}) = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{\text{AREA}} \quad (2.1)$$

其中, L_{50} 为传播路径损耗 50% 处的值 (即中值), L_F 为自由空间传播损耗, A_{mu} 为相对自由空间的衰减中值, $G(h_{te})$ 为基站天线高度增益因子, $G(h_{re})$ 为移动台天线增益因子, G_{AREA} 为环境类型所带来的增益。需要注意的是, 天线高度增益仅仅是高度的函数而与天线模式无关^[39]。

另外, Okumura 发现, $G(h_{te})$ 以 20dB/10 倍程的斜率变化, $G(h_{re})$ 对于高度小于 3m 的情况以 10dB/10 倍程的斜率变化, 见式 (2.2)、式 (2.3)、式 (2.4)。

$$G(h_{te}) = 20 \log \left(\frac{h_{te}}{200} \right) \quad 1\,000\text{m} > h_{te} > 30\text{m} \quad (2.2)$$

$$G(h_{re}) = 10 \log \left(\frac{h_{re}}{3} \right) \quad h_{re} \leq 3\text{m} \quad (2.3)$$

$$G(h_{re}) = 20 \log \left(\frac{h_{re}}{3} \right) \quad 10\text{m} > h_{re} > 3\text{m} \quad (2.4)$$

其他修正也可以应用于 Okumura 模型。一些与重要的地形相关的参数为地形波动高度、平均地面斜度和混合陆地、海上参数。一旦计算了地形相关参数, 相应的修正因子就要根据需要加上或者去掉。所有的修正因子可以从 Okumura 曲线中获得。

Okumura 模型完全基于测量数据, 不提供任何理论方面的解释。很多情况下, 对推导出的曲线进行外推可以得到测量范围之外的值, 但其有效性取决于环境和曲线的平滑性。

Okumura 模型为成熟的蜂窝和陆地移动无线系统路径损耗预测提供了最简单和最精确的解决方案。它的实用性很强, 已经成为日本现代无线系统规划的标准。该模型的主要缺点是对地形变化的反应较慢, 因此在城区和郊区使用要比在乡村好一些。一般预测和测试的路径损耗的标准偏差为 10~14dB。

2.1.1.3 Hata 模型

Hata 模型是根据 Okumura 曲线图所做的经验公式, 频率范围为 150~1 500MHz。Hata 模型以市区传播损耗为标准, 对于其他地形的应用需要在此基础上进行修正。市区中值路径损耗的公式为

$$L_{50}(\text{urban})(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \lg f_c - 13.82 \lg h_{te} - a(h_{re}) + (44.9 - 6.55 \lg h_{te}) \lg d \quad (2.5)$$

其中, f_c 为频率 (单位为 MHz), 范围从 150~1 500MHz; h_{te} 为有效发射天线高度, 范围为 30~200m; h_{re} 为有效接收天线高度, 范围为 1~10m; d 为 T - R 距离 (单位为 km); $a(h_{re})$ 为有效移动天线高度修正因子, 是覆盖区大小的函数。对于中小城市, 移动天线修正因子为

$$a(h_{re}) = (1.1 \lg f_c - 0.7) h_{re} - (1.56 \lg f_c - 0.8) (\text{dB}) \quad (2.6)$$

对于大城市, 移动天线修正因子为

$$a(h_{re}) = 8.29 (\lg 1.54 h_{re})^2 - 1.1 (\text{dB}) \quad f_c \leq 300 \text{MHz} \quad (2.7)$$

$$a(h_{re}) = 3.2 (\lg 11.75 h_{re})^2 - 4.97 (\text{dB}) \quad f_c \geq 300 \text{MHz} \quad (2.8)$$

为获得郊区的路径损耗, 标准的 Hata 模型修正为

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urban}) - 2 [\lg(f_c/28)]^2 - 5.4 \quad (2.9)$$

对于农村地区, 公式修正为

$$L_{50}(\text{dB}) = L_{50}(\text{urban}) - 4.78 (\lg f_c)^2 + 18.33 \lg f_c - 40.94 \quad (2.10)$$

尽管 Hata 模型不像 Okumura 模型那样可以获得特定路径的修正因子, 但上述几个公式还是很有实用价值的。在 d 超过 1km 的情况下, Hata 模型的预测结果与原始 Okumura 模型非常接近。该模型适用于大区制移动系统, 不适用于小区半径为 1km 左右的个人通信系统 (PCS)。

2.1.2 小尺度衰落及其典型模型

小尺度衰落是由于同一传输信号沿两个或多个路径传播, 以微小的时间差到达接收机而相互干扰引起的。这些多径波被接收机天线合成为一个幅度和相位都急剧变化的信号, 其变化程度取决于多径波的强度、相对传播时间和传输信号的带宽。无线信号在经过短时间或短距离传播后会经历小尺度衰落, 此时其幅度快速衰落, 以致大尺度衰落的影响可以忽略不计。对小尺度衰落的研究有助于选择相应的抗干扰、抗衰落技术。

小尺度衰落模型采用随机过程描述在接收端的空间位置小范围变动下接收信号的幅度与相位的剧烈变化, 它是透彻理解无线信道的基础。通常认为多径衰落的相位服从均匀分布, 而将其衰落幅度建立为以下几种模型。