

科技经典
3G/B3G

核心技术丛书

0101010101100
0101010101100

MIMO

相关技术与应用

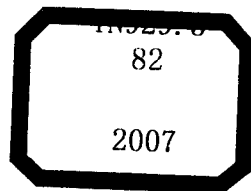
黄韬 袁超伟 杨睿哲 刘鸣 编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

3G/B3G核心技术丛书



3G/B3G 核心技术丛书



MIMO 相关技术与应用

黄韬 袁超伟 杨睿哲 刘鸣 编著

机械工业出版社

本书系统地阐述了 MIMO (多输入多输出) 多天线收发技术的基本原理、关键技术以及最新的理论和研究成果。本书从 MIMO 信道模型及容量入手, 对编码设计准则和主要的空时编码技术作了详细介绍, 并引入了相关领域知识。本书主要围绕 MIMO 的基本理论及在无线通信系统中的相关应用进行介绍, 既有各种性能分析与仿真结果, 又有生动的应用举例。本书内容新颖、系统性强, 适用对象为无线通信工程及相关专业的研究生、工程师和科研人员。

图书在版编目 (CIP) 数据

MIMO 相关技术与应用/黄韬等编著. —北京: 机械工业出版社, 2006.10
(3G/B3G 核心技术丛书)
ISBN 7-111-20105-1

I. M… II. 黄… III. 移动通信-天线
IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 124240 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: 朱 林 版式设计: 霍永明 责任校对: 吴美英
封面设计: 马精明 责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2007 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷
184mm × 260mm · 18.75 印张 · 465 千字
0 001—4 000 册
定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68326294
编辑热线电话 (010) 88379768
封面无防伪标均为盗版

3G/B3G 核心技术丛书

编 委 会

主任委员：袁超伟 姜宇柏

委 员（排名不分先后）：

程宝平 曾春亮 黄 韬 梁守青

贾 宁 赵 鑫 俞一鸣 汪裕民

杨睿哲 李美玲 张 宁 齐伟民

孙昌璐 刘 鸣 王旭莹 蒋建新

丛 书 序

目前, 3G 移动通信技术已成为中国传统电信运营企业转型的关键技术之一, 同时成为中国电信设备制造企业国际化发展的重要机遇。

然而, 随着宽带数据和多媒体业务的迅猛发展, 第三代移动通信原定目标规定的 2Mbit/s 的传输速率已经远远不能满足需求, 3G 技术正在朝着 B3G、4G 技术方向发展。由于我国至今没有正式颁发 3G 业务牌照, 一方面使得国内很多著名的 3G 设备制造企业不得不将更多的精力放在国际市场的开拓上; 另一方面使得我国可以充分发挥后优势, 在 3G 网络的建设过程中可以引入各项成熟的新技术, 即在我国 3G 网络中直接应用部分 B3G 乃至 4G 的核心技术, 提高我国 3G 网络的业务能力。

因此, 我们策划了这套“3G/B3G 核心技术丛书”, 对 HSDPA/HSUPA 技术、IMS 技术、OFDM 技术、MIMO 技术、智能天线技术、软件无线电技术和 WiMAX 技术等主流的新技术进行阐述, 内容涉及 3G/B3G 网络的无线接入、核心网、智能天线、频分复用、系统设计等多个方面。

希望通过阅读本套丛书, 读者能够比较全面地了解 3G/B3G 系统的各项核心技术, 更希望本套丛书能对我国 3G/B3G 系统的网络建设和产业发展作出一定的贡献。

由于通信技术发展十分迅速, 加上编写时间相对紧张, 书中难免存在不足, 恳请广大读者和专家批评指正, 联系信箱为 buptzjh@163.com。

3G/B3G 核心技术丛书编委会

2006 年 8 月

前 言

传统的无线通信系统是利用一个发射天线和一个接收天线的通信系统，即所谓的单输入单输出（SISO）天线系统，SISO 天线系统在信道容量上具有一个不可突破的瓶颈——Shannon 容量限制。多输入多输出（MIMO）作为未来宽带无线通信的关键技术，是实现充分利用空间资源以提高频谱效率的一个重要手段。它能够在不占用额外频谱带宽的前提下，有效地提高信道容量。基于 MIMO 的无线通信理论已成为当今研究的热点。

编写本书的目的是引导初学者入门，并了解未来无线通信的关键技术——MIMO 技术。本书按照先易后难、先简单后复杂的思路对 MIMO 相关技术作了详尽的介绍，是我们在教学科研的基础上总结出来的成果。本书首先从 MIMO 信道的模型及容量分析入手，系统介绍了与 MIMO 技术相关的各种空时编码方案，重点讨论了相关的空时处理技术，详细介绍了与 MIMO 技术接收相关的 MIMO 信道估计、MIMO 系统的均衡、2D-RAKE 接收、空时多用户检测技术等；还介绍了同为阵列天线系列的智能天线技术，以便读者对无线通信系统的现代天线两大主流技术——MIMO 与智能天线都有所了解，扩大读者的视野；最后介绍了 MIMO 系统的天线设计以及 MIMO 技术在无线通信中的应用。

如果没有曾志民教授、温向明教授的关怀和帮助，这本书是不可能完成的。在此特向他们表示衷心的感谢！参与本书编写工作的人员还有丁义、张海瑛、李天松、王永玉、李海军、余宏妮、吴红海、童磊、赵翔、朴燕、孟楠、马力佳、黄修栋、李美玲、杨奎、贾宁、刘佳佳、李荣胜、朱晓路、魏蔚、杨海波等。

由于编者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

作 者

2006 年 8 月

书中涉及到的主要数学符号列表

符号类别	示 例
变量	a
矢量	$\mathbf{a}$
矩阵	$\mathbf{A}$
矢量转置	$\mathbf{a}^T$
矩阵转置	$\mathbf{A}^T$
共扼转置	$\mathbf{A}^H$
卷积运算	$*$
Kronecker 乘积运算	$\otimes$
单位矩阵	$\mathbf{I}_m$
Frobenius 范数	$\ \mathbf{A}\ _F$
方阵的行列式值	$\det(\mathbf{A})$
矩阵的秩	$\text{rank}(\mathbf{A})$
矩阵的迹	$\text{tr}(\mathbf{A})$
欧氏矢量范数	$\ \mathbf{a}\ $
矩阵的元素	$[\mathbf{A}]_{i,j}$
矩阵的矢量化	$\text{vec}(\mathbf{A}) = [\mathbf{a}_1^T, \mathbf{a}_2^T, \dots, \mathbf{a}_n^T]^T$
矩阵的对角化	$\text{diag}(\mathbf{a})$
正态分布函数	$N(\mu, \sigma^2)$

目 录

丛书序

前言

第 1 章 绪论..... 1

- 1.1 概述 1
- 1.2 无线通信的特点 1
- 1.3 MIMO 系统的引入 2
- 1.4 MIMO 系统的发展历史 3
- 1.5 MIMO 系统的研究现状 3
- 1.6 MIMO 系统的特点 4
- 1.7 MIMO 系统的性能度量 5
- 1.8 MIMO 系统的分集与复用 5
- 1.9 MIMO 系统的展望 6

第 2 章 MIMO 信道的模型及

容量..... 7

- 2.1 概述 7
- 2.2 基本的无线信道 7
 - 2.2.1 信号传播方式 7
 - 2.2.2 信道衰落 8
 - 2.2.3 信道扩展 9
- 2.3 无线信道的数学模型 11
 - 2.3.1 瑞利衰落信道 11
 - 2.3.2 莱斯衰落信道 12
- 2.4 MIMO 无线信道 13
 - 2.4.1 信道模型 13
 - 2.4.2 相关信道 15
- 2.5 MIMO 信道容量 17
 - 2.5.1 平均功率分配的 MIMO 信道容量 17
 - 2.5.2 天线的相关性和 K 参数对信道容量的影响 22
 - 2.5.3 自适应功率分配的 MIMO 信道容量 24
 - 2.5.4 已知和未知信道的状态信息时的信道容量 26

第 3 章 空时编码 28

- 3.1 概述 28
- 3.2 空时编码设计准则 29

3.2.1 $N_{\text{R}}r$ 值较大的情况 30

3.2.2 $N_{\text{R}}r$ 值较小的情况 31

3.3 分层空时码 32

- 3.3.1 分层空时码模型 32
- 3.3.2 分层空时码的编码方案 33
- 3.3.3 分层空时码的译码方案 35

3.4 空时格码 38

- 3.4.1 空时格码模型 38
- 3.4.2 空时格码的编码 41
- 3.4.3 空时格码的译码 42
- 3.4.4 Turbo 空时格码 43

3.5 空时分组码 45

- 3.5.1 Alamouti 发射分集方案 45
- 3.5.2 空时分组码模型 47
- 3.5.3 正交编码设计 48
- 3.5.4 准正交编码设计 51

3.6 盲空时码 55

- 3.6.1 差分空时技术 55
- 3.6.2 酉空时差分技术 57

3.7 空时编码的研究热点 61

第 4 章 MIMO 系统的信道估计 62

4.1 概述 62

4.2 基于训练序列的估计 63

- 4.2.1 平坦 MIMO 信道下的训练序列估计 63
- 4.2.2 频率选择性 MIMO 信道下的训练序列估计 65
- 4.2.3 导频序列的设计 67

4.3 盲信道估计 69

- 4.3.1 盲估计信道模型 70
- 4.3.2 MIMO 信道盲估计条件 71
- 4.3.3 基于二阶统计的线性预测 71
- 4.3.4 基于二阶统计的子空间法 76
- 4.3.5 基于 QR 分解的信道盲估计 80

第 5 章 MIMO 系统的均衡 84

5.1 概述 84

5.2 MIMO 系统均衡概述 84

5.2.1 均衡原理	84	6.7 WCDMA 系统中的空时级联 RAKE 接收机	128
5.2.2 MIMO 信道均衡的目标	85	6.7.1 接收机结构	128
5.2.3 MIMO 信道均衡的评价标准	85	6.7.2 基于空时信道估计的空时 RAKE 接收机	128
5.3 MIMO 均衡技术的分类	86	6.7.3 基于码滤波方法的空时 RAKE 接收机	129
5.3.1 线性均衡器	86	第 7 章 空时多用户检测	131
5.3.2 判决反馈均衡器	88	7.1 概述	131
5.3.3 分数间隔均衡器	90	7.2 多用户检测	131
5.4 自适应均衡算法	93	7.3 最优空时多用户检测	133
5.4.1 自适应均衡算法衡量准则	93	7.3.1 问题描述	133
5.4.2 迫零算法	94	7.3.2 最优空时多用户检测接收机结构	134
5.4.3 最小方均算法	94	7.3.3 最优空时多用户检测的 Viterbi 算法	134
5.4.4 递归最小二乘算法	96	7.3.4 算法复杂度分析	136
5.4.5 格型滤波算法	97	7.4 线性空时多用户检测	136
5.5 MIMO 盲均衡	99	7.4.1 问题描述	137
5.5.1 恒模算法	100	7.4.2 系统可辨识性	138
5.5.2 超指数算法	100	7.4.3 最优的 FIR 空时解相关接收机	140
5.5.3 线性预测方法	101	7.4.4 性能分析	142
5.5.4 子空间跟踪法	102	7.5 空时干扰抵消多用户检测	142
5.6 MIMO 系统的频域均衡	104	7.5.1 空时串行干扰抵消	143
第 6 章 2D-RAKE 接收技术	107	7.5.2 空时并行干扰抵消	147
6.1 概述	107	7.6 盲空时多用户检测	151
6.2 一维处理技术的局限性	107	7.6.1 盲空时多用户检测接收机结构	152
6.2.1 时域一维处理的局限	107	7.6.2 盲空时多用户检测算法	153
6.2.2 空域一维处理的局限	109	7.7 CDMA 系统自适应空时多用户检测	155
6.3 RAKE 接收机	110	7.7.1 单发射天线和双接收天线情况	155
6.3.1 分集接收技术	110	7.7.2 双发射天线和单接收天线情况	157
6.3.2 时域一维 RAKE 接收机	112	7.7.3 双发射天线和双接收天线情况	159
6.3.3 空时二维 RAKE 接收机	113	7.8 Turbo 空时多用户检测	161
6.4 2D-RAKE 接收机处理算法	115	7.8.1 STBC 系统中 Turbo 多用户检测	161
6.4.1 空时最小方均误差算法	115	7.8.2 STTC 系统中 Turbo 多用户检测	166
6.4.2 空时解重扩恒模算法	116		
6.5 2D-RAKE 接收机的常用结构	118		
6.5.1 空时级联接收机结构	118		
6.5.2 时空级联接收机结构	120		
6.5.3 空时联合接收机结构	120		
6.6 2D-RAKE 接收机中信道估计	121		
6.6.1 信道模型	121		
6.6.2 传统 2D-RAKE 接收机的信道估计	123		
6.6.3 带投影的基于导频符号的信道估计	124		
6.6.4 带投影的基于数据符号的信道估计	125		

第 8 章 智能天线	169	10.1 概述	236
8.1 概述	169	10.2 MIMO 多天线分集技术	236
8.2 智能天线基本概念	170	10.2.1 MIMO 多天线与传统天线设计 的比较	236
8.2.1 智能天线的用途	170	10.2.2 天线分集技术	237
8.2.2 智能天线的基本结构和工作 原理	170	10.3 多天线特性对 MIMO 信道性能的 影响	242
8.2.3 智能天线的分类	173	10.3.1 天线阵列方位对 MIMO 信道性 能的影响	242
8.2.4 智能天线和 3G 系统	175	10.3.2 天线互耦方位对 MIMO 信道性 能的影响	246
8.2.5 目前的主要研究内容	178	10.3.3 极化分集系统中的通道互耦 与天线角度偏差分析	250
8.3 自适应波束形成算法	180	10.4 MIMO 天线设计基础	254
8.3.1 自适应波束形成准则	181	10.4.1 天线形式	254
8.3.2 几种常见的自适应波束形成 算法	182	10.4.2 天线布局	255
8.3.3 盲波束形成算法	184	10.4.3 天线设计思想	256
8.3.4 半盲波束形成算法	186	10.4.4 天线设计准则	258
8.4 波达方向估计算法	188	10.5 MIMO 系统基站天线设计	258
8.4.1 经典波束形成器法	188	10.5.1 蜂窝移动通信基站天线设计 概述	258
8.4.2 最大似然法	190	10.5.2 一种 MIMO 系统基站天线设计 方案	261
8.4.3 DOA 估计的子空间法	192	10.6 MIMO 系统移动台天线设计	262
8.4.4 DOA 估计的综合法	197	10.6.1 移动台天线设计选型	262
8.5 智能天线技术的展望	198	10.6.2 几种移动台天线设计方案	263
第 9 章 MIMO-OFDM	200	第 11 章 MIMO 技术的应用	266
9.1 概述	200	11.1 概述	266
9.2 OFDM 概述	200	11.2 MIMO 技术在 CDMA2000 中的 应用	266
9.2.1 OFDM 基本原理	201	11.2.1 正交发送分集	266
9.2.2 OFDM 系统的优点	204	11.2.2 空时扩展发送分集	267
9.2.3 OFDM 系统的缺点	204	11.2.3 选择式发送分集	268
9.3 MIMO-OFDM 概述	205	11.2.4 发射自适应阵列发送分集	269
9.4 MIMO-OFDM 基本模型	205	11.3 MIMO 技术在 WCDMA 中的应用	269
9.5 MIMO-OFDM 的关键技术	207	11.3.1 空时发送分集	269
9.6 MIMO-OFDM 中的编码	208	11.3.2 闭环发送分集	270
9.6.1 空时编码	208	11.4 MIMO 技术在 TD-SCDMA 中的 应用	272
9.6.2 空频编码	212	11.4.1 上行链路处理	272
9.7 同步	219	11.4.2 下行链路处理	273
9.7.1 前导字	221	11.4.3 空间分集技术与智能天线技术 的区别	273
9.7.2 粗时间同步	223		
9.7.3 细时间同步	224		
9.7.4 载波同步	224		
9.7.5 采样同步和细载波频偏跟踪	225		
9.8 MIMO-OFDM 的信道估计	228		
9.8.1 基于训练序列的信道估计	228		
9.8.2 基于导频符号的信道估计	231		
第 10 章 MIMO 系统的天线设计	236		

11.5 MIMO 技术在 WLAN 中的应用	273	11.6.1 技术原理及概述	276
11.5.1 IEEE802.11n 中的 MIMO-OFDM 实现	273	11.6.2 性能评价	278
11.5.2 IEEE802.11n 中的关键技术	274	11.6.3 复杂度评价	280
11.6 MIMO 技术在 HSDPA 中的应用	276	附录 缩略语	282
		参考文献	287

第 1 章 绪 论

1.1 概述

无线通信是当今世界最活跃的科研领域之一。它突破了有线通信的物理限制,使得用户可以自由地在任何无线电波能够到达的地方进行通信,这大大拓宽了通信的空间和活力。截至 2006 年,仅中国就有超过 4.06 亿移动电话用户,而在全世界范围内,移动电话用户数目已经超过了固定电话用户。无线通信产业的迅速增长驱动了无线通信技术的发展和创新。正如 20 世纪 90 年代有线通信迅速发展时一样,目前无线通信面临的主要问题是如何提供更高的数据传输速率。虽然在有线通信中仍然有很多技术问题没有解决,但是诸如光纤、路由、交换机等技术已经足以满足用户对数据传输速率的需求。无线通信则面临着更加困难的问题。由于无线通信借以提高数据传输速率的传统资源——频率带宽和发射功率——目前都已濒临饱和,因此要依靠增加这两种资源的损耗来提高传输速率是行不通的。而用户对图像传输和电话会议等高传输速率数据业务的需求已经越来越迫切。现今世界上主要使用的第二代移动通信网络受到其最初设计目的的限制,根本无法满足用户的这类需求。自然地,人们开始研究全新的移动通信技术。时至今日,第三代移动通信标准已基本定型,多家著名的通信设备商都已拿出了自己的系统解决方案,在韩国、日本等地 3G 网络甚至已经被商业应用。但是由于 3G 主要采用的还是传统的无线通信技术,能够提供的数据传输率还是偏低($384\text{ kbit/s} \sim 2\text{ Mbit/s}$),运营商无法给出“杀手”业务来吸引用户,3G 在全世界的大规模商业应用举步维艰。此时,一种新的不需要损失频带和发射功率资源就能提供前所未有的数据传输速率的技术进入了人们的视野,那就是 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, 多输入多输出)无线通信技术。目前, MIMO 技术已经被视作第四代移动通信技术的重要组成部分而受到通信界的强烈关注。

本章旨在从 MIMO 技术的发展、现状以及特点等方面对 MIMO 系统做一个宏观的介绍,作为全书知识展开的铺垫。

1.2 无线通信的特点

无线移动通信的矛盾主要集中在以下几个方面:

1. 共道干扰 (CCI)

因频率复用造成的共道干扰是目前应用系统中同时工作的多个同信道用户所必须首先考虑的问题。

2. 多径现象

由于移动环境的复杂性,通常从发射端到接收器的信号包含有反射、衍射和绕射等多种信号成分,不同信号成分到达接收器的强度、时间和方向不同,并且在不同环境下差别很

大。由于不同多径分量的不同到达时间，造成接收信号的时域（时域的说法就是信道的记忆性）展宽，时域展宽直接造成接收信号的码间干扰，从而决定了信道所能传输的最大信号速率。

3. 衰落

由于多径效应（矢量叠加）的影响，接收器接收到的信号功率会随收发两端间的距离而大幅度的波动（通常可达 20dB）。衰落通常分为阴影衰落（慢衰落）和多径衰落（快衰落）。慢衰落是由于遮挡效应造成的，其信号的局部平均近似呈对数正态分布，而快衰落是因为接收信号分量的相位差引起的，其信号近似呈瑞利分布。实际接收信号是由快衰落信号与慢衰落信号的乘积得到。由于收发两端之间的相对运动，使得接收信号存在多普勒频移，又由于多径现象，不同的多径分量有着不同的多普勒频移，从而使接收信号带宽整体被展宽。多普勒频移的大小反映了信道特性变化的快慢，多普勒频移越大，信道变化越快，信号的衰落越严重。

传统的解决上述问题的办法主要包括信道的编码调制技术、信道均衡技术、分集技术等，这些技术日益成熟，对于上述问题的进一步解决已十分困难。近年来阵列天线技术在移动通信领域的引入为这些问题的进一步解决带来了新的思路和方法。阵列天线技术广泛地应用于雷达、声纳及军事通信领域，它在移动通信领域的引入，特别是在当前的蜂窝式移动通信系统基站的使用，为从空间角度上利用信号的传播特征提供了可能。阵列天线技术通过不同的信号处理方式可以满足不同的性能需求，如扩大覆盖范围、提高系统容量、提高系统频谱利用率、降低发射功率、减小用户干扰和提高系统抗干扰性能等方面的需求。

1.3 MIMO 系统的引入

传统的无线通信系统是采用一个发射天线和一个接收天线的通信系统，即所谓的单输入单输出（SISO）天线系统。SISO 天线系统在信道容量上具有一个通信上不可突破的瓶颈——Shannon 容量限制。不管采用哪种调制技术、编码策略或其他方法，无线信道总是给无线通信工程做了一个实际的物理限制。这一点在当前无线通信市场中形势尤为严峻，因为用户对更高的数据传输速率的需求是非常迫切的，必须进一步提高无线通信系统的容量。

可以实现这个目标的方法有很多，如设置更多的基站、拓宽带宽等。增设基站意味着采用更多的蜂窝，这是提高容量代价最大的办法。由于目前实际的无线应用市场仍是在 3G 系统和 WLAN（无线局域网）之间，是微波频带（3G 系统大约为 2GHz，WLAN 技术的 ISM 频带为 2~5GHz），加大该频带的带宽，就会导致与现行系统具有非常大的兼容性问题，其代价也是很昂贵的，因此更高频段的使用在近期内不是提高无线通信系统容量问题的最佳解决方法。

在单天线系统中，提高系统容量的另一个方法是加大系统的发射功率。加大系统发射功率可能引起人的健康状况的变化，对硬件设计者来说，这也是非常困难的，因为功放器件在大功率区域下的线性工作特性是很难设计的。另外，散热及发射功率的加大所引起的功率消耗也是移动终端要考虑的问题。还有一个提高系统容量的方法是使用分集技术，提高发射/接收信噪比，以增大系统的容量。近年来，主要是通过接收端使用多元阵列天线来获得接收分集，其发射天线仍采用一个阵元，这就是 SIMO 系统。为减小接收端特别是移动终端的

处理复杂度和体积,可以考虑把接收分集处理技术平移到发射端(如 WCDMA 标准中),发射天线采用阵列结构而接收天线采用单天线结构,这就是等价的 MISO 系统。

SIMO 和 MISO 技术的进一步发展就自然产生了收发两端同时采用阵列天线的系统——MIMO 系统。

1.4 MIMO 系统的发展历史

在通信领域, MIMO 并不是一个新的概念, Salz 在 1985 年就首先讨论了加性噪声 MIMO 信道中存在耦合的优化问题,后来被拓展到数字环路中消除码间干扰的判决反馈均衡问题,以及联合收发的优化问题。而在无线通信领域,对 MIMO 的研究源于对多个天线阵元空间分集的性能研究。从 20 世纪 80 年代开始,研究学者发现与合并技术结合的多天线空间分集可进一步改善无线链路性能并增加系统容量, Salz 在技术报告中针对考虑了单用户 MIMO 高斯信道,以两径传播信道模型分析了空间分集对信道容量和容量分布的影响。Winters 讨论了干扰受限的无线系统中,利用多天线空间分集和最优合并所能带来容量增益,并明确地指出了增加分集天线数目可以增加系统容量。1995 年, Bell 实验室的研究人员 Telatar 假定已知接收端信道参数,分析了高斯平坦衰落信道中接收端和发送端同时使用多天线阵元的容量,推导出了信道容量、信道分布、中断概率容量以及错误指数三者的公式,在 1996 年, Foschini 提出了贝尔实验室分层空时结构(Bell Layered Space-Time, BLAST)编码结构,这种收发端同时使用多阵元阵列结构的编码方法可以理论上逼近信道容量的下界。Foschini 进一步分析了无线通信的收发端使用同等阵元数 n 时,多阵元阵列信道容量的下界,并给出了信道容量与信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)、发送和接收天线数目的关系。这些研究结果显示,在信噪比较大时, SNR 每增加 3dB,容量增加 n bit/s/Hz。需要指出的是,在上述这些研究中,都假定了信道衰落矩阵各元素为独立同分布(Independent Identical Distributed, IID)的复高斯随机变量,且信道为准静态平坦衰落模型。对时变多径 MIMO 信道的容量研究表明,无线信道中存在的多径恰恰能保证信道容量获得较大的分集阶数。在 Foschini 的理论指导下, Wolniansky 等人采用垂直-贝尔实验室垂直分层空时(V-BLAST)进行的试验结果,利用 V-BLAST 的实验平台达到了 20bit/s/Hz 以上的频谱利用率。

1.5 MIMO 系统的研究现状

从 Winters 对无线通信系统空间分集与系统容量关系的讨论,到 Telatar 和 Foschini 关于 MIMO 信道容量的理论分析,这些研究奠定了 MIMO 无线通信的信息论理论基础。而 BLAST 的试验结果则从实践的角度证明了 MIMO——这种在无线链路的发送端和接收端同时使用多个天线的通信结构,能够在不占用额外频谱带宽的前提下,有效地提高信道容量。上述研究掀起了近几年无线通信领域对 MIMO 研究的热潮,也标志着 MIMO 无线通信研究的真正开始。

在 MIMO 技术成为无线通信研究热点之前,智能天线及空域自适应信号处理技术一直是无线通信领域的研究热点之一,并被期望应用于第二代和第三代移动通信系统中。与智能天线技术相比较,与基于 MIMO 的编码和信号处理技术是对智能天线技术的继承和重大突破。

一方面,从通信结构的数学模型来看,智能天线信号模型的单输入多输出 (Single-Input Multiple-Output, SIMO) 结构可视为 MIMO 无线通信系统的一个特例;另一方面,从涉及通信的深度来看, MIMO 技术不仅包含了智能天线技术的信号处理,其近来的发展已经涉及编码、调制和网络系统结构等方面。比如,最具代表的空时编码 (Space-Time Codes, STC) 技术和自适应 MIMO 调制,以及分布式 MIMO 天线系统和协同空时无线通信结构等,都已经突破了智能天线技术包括的自适应空时信号处理技术。

从 1998 年开始,跟随着 Telatar、Foschini 以及 Rayleigh 等人的脚步,国内外著名的无线通信研究机构和学者们对 MIMO 技术开始了大量的深入研究。很多电子与通信领域的国际学术刊物在近两年也出版了关于 MIMO 无线通信的专辑等。此外,在近几年的国际通信与信号处理相关领域的学术会议也都将 MIMO 无线通信列为一个重要的主题。总结近几年来关于 MIMO 技术的研究,可以发现, MIMO 技术研究的内容主要包括 4 个方面:

- 1) MIMO 衰落信道的测量和建模方法;
- 2) MIMO 信道容量的分析;
- 3) 基于 MIMO 的空时编/解码方法;
- 4) 基于 MIMO 的接收机关键技术,如信道估计、均衡、多用户检测等。

这 4 个方面的相关研究涉及了 MIMO 无线通信的各个子课题。虽侧重角度各有不同,但都面对着一个相同的核心问题,即针对各种复杂的无线衰落信道环境,如何更有效地利用 MIMO 通信结构抗多径衰落、增加数据传输速率以及提高系统容量。

1.6 MIMO 系统的特点

无线通信系统的 3 个最主要的有害因素是:信号衰落、码间干扰 (ISI) 和同频道干扰 (CCI)。信号衰落和 ISI 是由无线信道的多径产生的, CCI 一般是由共道用户或系统中未知的干扰源产生的。为了对抗信号衰落,单用户 MIMO 系统采用分集技术来处理,如空间分集、时间分集、极化分集和频率分集。空间分集和极化分集由采用阵列天线而获得,频率分集可通过利用多径物理信道来获得,时间分集可以通过具体的(编码调制)发射技术而获得。为了消除或利用无线通信系统中 ISI,信道均衡技术包括自适应均衡或 RAKE 接收,可以用来均衡多径信道。为了消除共道干扰,自适应波束形成是在干扰信息未知时所采用的技术,当干扰信息在接收器中是已知时,采用多用户检测技术是更好的选择。自适应波束形成技术与多用户检测技术的组合可以进一步提高系统的性能,但它是系统复杂度的增加为条件的。采用阵列天线技术, MIMO 系统能够充分利用信号的所有空时频域的特性,具有如下优点:

- 1) 利用或减轻多径衰落: MIMO 技术能够充分采用多径的各种发射/合成技术,提高无线通信系统的性能。
- 2) 消除共道干扰: MIMO 系统能够采用自适应波束形成技术或多用户检测技术对共道干扰进行有效抑制或消除。
- 3) 提高频谱利用率、增加发射效率、减小发射功率、减小空间电磁干扰及增大系统容量: 由于阵列天线可以降低共道干扰和多径衰落的影响,因而在一定的 SINR (信干噪比) 条件下可以降低误码率,或者在一定的误码率下可以降低检测所需要的信干噪比。MIMO 系统能够抑制或消除共道干扰以及码间干扰,同时利用分集技术提高接收信号的信干噪比,因

此基站和移动终端的发射功率可以得到一定程度的降低，同时减小空间电磁干扰的影响、延长移动终端电池使用时间、减小对生态环境的影响、降低系统对功率控制精度和器件要求。

1.7 MIMO 系统的性能度量

由于在不同应用环境下需要考虑的因素不同，MIMO 系统具有不同的性能指标。一般来讲 MIMO 系统性能的主要参考指标包括：

1) 有效性：目标是在单位带宽内提供尽可能高的比特率，也叫频谱利用率。在高斯信道条件下，定义为在任意低误码率下可以获得的最高比特率。

2) 可靠性：又称发射的鲁棒性，用于衡量给定比特率下系统的通信质量的。一般来说，比特率越高，可靠性越低。

3) 复杂度：由于蜂窝系统无线链路的其中一端一般是靠电池供电的，系统复杂度越高，功率消耗越大。因此，设计收发两端不对称，在电池供电的一端具有较低复杂度的方案是更符合实际的。

需要才能的是，上述指标是相互矛盾的，系统设计者必须仔细考虑，选择一个包括性能、经济性和移动性在内的整体系统优化的折中。

1.8 MIMO 系统的分集与复用

通过在无线通信系统的发射机和接收机上安装多元天线阵，就能够采用多种手段来克服无线信道的不良影响，从而提高通信的质量。概略地说，MIMO 系统主要能获得以下两方面的性能增益：空间复用增益和空间分集增益。下面对此进行简单的介绍。

一方面在 MIMO 系统中，多径衰落提高了通信系统可以利用的自由度。若各个收发天线对之间路径增益衰落是独立的，这种情况下就构建了多个并行的空间子信道，在这些子信道间发射不同的信息流，数据传输率自然就会提高，这个方法叫空间复用。它在自由度有限系统（相对与功率有限系统）的高信噪比（SNR）区域是特别重要的。复用的性能衡量就是系统所能提供的最大容量，著名的 BLAST 结构就是一种能够提供系统最高容量的满空间复用系统。

另一方面，MIMO 系统也可以用来实现空间分集，以对抗信道衰落。系统通过提供分集增益来提高无线链路的可靠性，其基本思想是给接收机提供信息符号的多个独立衰落副本，使得所有信号成分同时经历深度衰落的概率变小。在任意接近于信道遍历容量的数据传输率进行可靠通信要求时，在时间上对许多信道的独立实现作统计平均，这主要是用来对抗信道衰落的随机性的。一个信道的多个不同随机实现的统计平均能够决定信道的统计特征分布。分集的性能一般采用分集增益来衡量，分集最常用的例子就是空时编码和波束形成。

总之，MIMO 系统能够提供两种类型的增益：空间分集增益和空间复用增益（编码增益是时间分集），MIMO 系统分集与复用的折中本质上是系统错误概率与系统数据传输率的折中。由于 MIMO 系统本身的自由度是有限的，提高一种增益必定降低另一种增益。因此，不同体制和不同系统的性能比较是相当困难的，系统设计者需要综合考虑这两种增益在给定实际条件下的折中。

1.9 MIMO 系统的展望

回顾无线通信的发展历史,从移动通信系统的蜂窝化和无线通信中天线分集的应用开始,对空间资源的利用一直是提高无线系统频谱利用率的有效手段。过去的 50 年里,人们对多天线技术提高频谱利用率的认识和应用也在不断深入和发展,从早期利用多天线空间分集和天线极化分集改善无线链路传输性能,到基于自适应信号处理方法开辟自适应天线阵列处理理论,及至智能天线 (Smart Antenna, SA)、空分多址 (Space Division Multiple Access, SDMA) 被用于蜂窝通信,再到今天,国内外众多研究学者广泛关注在发送端和接收端同时使用多个天线阵元的多输入多输出 (MIMO) 通信结构,以 MIMO 技术为代表的多天线技术在无线通信中扮演的角色越来越重要,多天线技术在无线通信中的应用也越来越广泛。

目前,从国际国内的无线通信研究趋势的发展中可以发现,在无线通信传输理论和技术领域,基于多天线 (包括天线阵列) 的信号处理、编码、调制和资源管理等技术均处于研究和应用的最前沿。所有这些研究活动正验证着高通 (Qualcomm) 公司创始人——Andrew Viterbi 博士在 1995 年曾经说过的一句话:“在多 (用户) 接入系统的发展中,空域处理仍然是最有前途的,也是最后的一个未开发的领域 (Spatial processing remains as the most promising, if not the last frontier, in the evolution of multiple access systems)。”

综上所述,无线通信应用需求的持续增长直接推动着无线通信网络的发展和无线通信新技术的诞生。而在众多新技术中, MIMO 技术作为未来一代宽带无线通信系统的框架技术,是实现充分利用空间资源以提高频谱利用率的一个必然途径,基于 MIMO 的无线通信理论和传输技术显示了巨大的潜力和发展前景。