

信息科学与工程系列专著

MIMO系统与空时编码

——分集的理论与实践

MIMO System and STC:
The Theory and Practice of Diversity

邵朝 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

信息科学与工程系列专著

MIMO 系统与空时编码

——分集的理论与实践

**MIMO System and STC:
The Theory and Practice of Diversity**

邵 朝 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书在分析多输入多输出(MIMO)系统信道特性和容量的基础上,系统阐述了MIMO系统与空时编码的相关理论、编码方案、性能分析、优化及应用。主要内容包括:无线信道的传播和衰落特性分析与模拟、MIMO信道的容量分析、空时分组码的设计原则、正交空时分组码编码及性能分析、空时格型码的编码原理及性能分析、分层空时编码原理及检测算法分析、准正交空时分组码和最小解码复杂度分析、MIMO系统与正交频分复用及空时编码传输技术,凸优化理论与MIMO系统收发机的设计。

本书内容的阐述循序渐进、条理清晰、系统性强,书中重要结论、编码方案等均利用MATLAB®软件平台进行编程实现;各章均对重要知识点予以总结,并附有练习题。

本书读者对象:通信专业的高年级本科生和研究生,以及相关专业工程技术人员和高校教师。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

MIMO系统与空时编码:分集的理论与实践 / 邵朝编著. —北京:电子工业出版社, 2013.1
(信息科学与工程系列专著)

ISBN 978-7-121-19110-7

I. ①M… II. ①邵… III. ①移动通信—通信系统—编码—研究 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第285475号

策划编辑:张来盛(zhangls@phei.com.cn)

责任编辑:毕军志

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:787×1 092 1/16 印张:23 字数:588.8千字

印 次:2013年1月第1次印刷

印 数:3 000册 定价:59.00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。

前 言

在未来,大多数无线通信系统中应用具有适当的空时编码、调制、解调或解码的多天线技术似乎已成为必然。如今,最主要的问题就是如何应用多天线技术以及在某些特殊应用场合什么方法最为合适。在过去的几年里,学术界对空时编码和多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统的兴趣大增,众多研究人员投入该课题的研究和探索,其中既仅有对空时编码背后的数学理论感兴趣的数学家,又有试图构造这样的实际系统的工程师。因而在理论深度上不仅包括了空时编码理论,而且空时编码与多输入多输出(MIMO)理论与实践方案也日渐成熟,包括对空时传播理论的研究、信道模型的建立、空时编码调制及接收机的设计等。人们对 MIMO 系统的容量潜能的认识以及对其实现的探究,大量能够深度挖掘 MIMO 系统容量的空时编码传输方案的提出,以及相应实验平台的建立与运作,都从各个方面印证空时编码与 MIMO 技术将成为未来通信发展的核心支撑之一。例如,目前的 2.5G 与 3G 通信标准都已集成了发送与接收空时分集技术,关于无线局域网(WLAN)的 IEEE 802.11 标准以及关于固定和移动无线通信的 IEEE 802.16 标准都将两端需要阵列天线的空间复用技术纳入其中。作者在与国内主要通信研发机构及设备制造商的接触中看到,他们在不同场合均表示了应用空时编码技术的强烈愿望。大家普遍深感空时编码与 MIMO 技术课题从理论探索到业界的工程实践居然发展得如此迅速,不得不令人惊奇。在国外,一些利用空时技术(如简单的波束形成及空间复用技术)的产品已经面市。另外, MIMO 系统的基本思想符合人类认识自然界及人类与自然界沟通的基本方式,它已渗透到相关学科与技术领域。因此,掌握和理解具有空时编码技术的 MIMO 系统,对于当前及将来的电子工程、通信工程、控制工程、计算机技术等不同专业的从业人员是重要的和必要的。

本书的定位是作为通信专业硕士研究生和高年级本科生的教材,以及通信领域从业人员的参考书。

本书形成的初衷是为研究生毕业论文选题进行一定的基础性准备和开拓他(她)们的学术视野。本书前半部分作为基础性内容,作者曾为西安邮电大学部分硕士研究生讲授多遍;这部分内容对于学习了大学《通信原理》的高年级本科生,也可作为应用其所学知识并加深理解其内容的拓宽性读物。在此基础上,本书结合作者多年教学和科研成果,对 MIMO 系统与空时编码的前沿理论、技术及应用(如空—时—频域分集、优化合并技术、最优化理论等)进行了介绍,并借鉴一些在相关领域或研究课题较有影响的作品,将作者对大家的思考问题、论述和演绎问题的认知渗透到相关章节中,力图使研究生在相关领域的选题能与该领域研究前沿相对接,以更好地适应研究生招生规模不断增长后他们在该领域选题范围的需求,满足通信领域的从业工程师对于了解未来通信发展动向、掌握潜在应用技术的需要。

编写本书的宗旨是,使电子工程、通信工程、控制工程、计算机技术等不同专业的学生及相应领域的从业工程技术人员,能够通过本书的学习,掌握 MIMO 系统及空时编码理论、原理,理解其基本的思想方法,并将其应用于各自的工程实践。同时,兼顾在校研究

生毕业论文选题需求,对相关问题能有一定深度的探究,体现理论的扎实与严谨,清晰可行的实践路线图。在这个原则指导下,取材及编写的理念是:内容力求深入浅出;叙述论点尽量环环紧扣;知识点尽量体现循序渐进;基础理论与实践相结合、相辅相成。对关键理论及知识点的阐述,注重背景分析及细节介绍,但不纠缠之。全书充分利用了 MATLAB® 软件平台来产生理论结果的直观描述或算法的模拟仿真展现,通过直观图形使理论说明一目了然,对算法性能的佐证有理有据。另外,也引导初学者注重培养严谨的学风、系统辩证的思维以及理论联系实际的方法,通过实践加深与强化对理论的理解和掌握。

基于这样一些考量,全书安排了下面的内容。

第1章主要内容是 MIMO 无线信道的传输特性论述。对无线信道,从天线结构分有单输入单输出(SISO)、单输入多输出(SIMO)、多输入单输出(MISO)和多输入多输出(MIMO)信道等;从传输环境分有室内和室外信道;从衰减特性分主要有大尺度衰落、小尺度衰落、频率平坦(也被称为频率非选择性)衰落和频率选择性衰落信道等;从多阵元天线的结构特征分有空域相关(互耦)和空域非相关(独立)信道等。这些林林总总的信道均有一定的数学模型逼近表示。为能将 MIMO 系统的论述简化为 MISO 系统问题,本章最后还介绍了几个重要的合并算法。

第2章详细地讨论了 MIMO 信道容量和影响 MIMO 信道容量的一些主要因素。例如,发送端已知信道状态信息时,能够实现最佳信道容量的注水算法、天线阵元间互耦对信道容量的影响、莱斯因子对信道容量的影响、极化对信道容量的影响、锁眼效应等。基于对 MIMO 信道容量的基础是循环对称复高斯随机矢量的分布密度函数及其信息熵的认识,在该章的预备知识中,讨论了循环对称复高斯随机矢量的一些基本概念和性质。

第3章主要是对空时编码的设计准则的讨论,它是后面几个章节的基础。以平均成对差错概率分析为依据,引入编码矩阵的行列式准则、迹准则、秩准则和最大互信息熵准则等,而以前三个准则最为实用。这样第2章从传输速率角度,给出 MIMO 系统与空时分集的效益;而第3章从传输可靠性角度展现 MIMO 系统与空时分集的有效性。结合第2章与第3章的讨论,就能很好地理解 MIMO 系统与空时编码对于提升通信系统整体性能是有效及有力的。

第4章讨论正交空时分组码(Orthogonal Space Time Block Coding, OSTBC)的设计理论和方法及其解码算法等。从总体衡量,本章具有中心位置,也具有承前启后的作用。OSTBC 的经典方案是 Alamouti 空时码。所以该章首先对 Alamouti 空时编码进行了详细的分析讨论,总结出 Alamouti 空时编码方案的一系列优点。以 Alamouti 空时编码方案为基准,讨论分析 OSTBC 的设计理论和解码算法。OSTBC 设计理论的核心是 Hurwitz-Radon 实正交设计理论。基于 Hurwitz-Radon 实正交设计理论,即使对于实 OSTBC,具有方形矩阵的 OSTBC 是严格受限的,即能提供满分集、全速率的 OSTBC 是严格受限的。但仅弱化全速率(或满分集)限制,则对于任意发射天线个数,均能设计出相应实或复的 OSTBC。本章详细论述了实 OSTBC 设计理论、广义实 OSTBC 设计理论、复 OSTBC 设计理论和广义复 OSTBC 设计理论。OSTBC 的另一个特点是,对应最大似然解码算法是最简单的单符号解码。本章详细讨论了对应最大似然(Maximum Likelihood, ML)解码算法以及对符号判决统计量的构造等。OSTBC 能将编码的行列式准则、秩准则、迹准则等最佳设计准则以及最佳解码算法——ML 解码算法、最佳延迟传输和平均成对差错概率分析等一系列概念贯穿在一起,

这对理解和认知整个 MIMO 系统与空时编码体系是很有意义的。

第 5 章讨论了空时格型码 (Space Time Trellis Coding, STTC) 的设计方法。相比 OSTBC 而言, STTC 既有分集增益又有编码增益。其付出是 ML 解码算法的复杂度大幅度提升, 对应解码算法为 Viterbi 译码算法。STTC 编码器可等价为的一组并行的横截 (FIR, 有限长脉冲响应) 滤波器, 其移位器有寄存功能, 而加法器为“模”加法器; 基此形成空时格型编码器生成多项式以及生成矩阵的闭形表达式; 利用 STTC 编码器的生成矩阵, 将 STTC 编码器等价为一个“黑箱”系统, 只关注其对输入码序列的变换进而实现对 STTC 编码器的系统论认知。通过分析研究 STTC 输入/输出网格图, 对输入/输出关系加以分类, 可实现 Viterbi 译码算法复杂度降低。

第 6 章讨论了分层 (Layered) 空时码的设计思想和解码方法。分层空时码“侧重”于空时复用而“非”分集。由于分层空时码的解码算法与信道估计及多用户信号检测算法完全相同, 因此本章将分层空时码与信道估计问题融合在一起讨论。对于分层空时码的讨论主要以对应编码结构为主线展开, 分层结构有水平 (Horizontal) 分层与垂直 (Vertical) 分层, 水平分层中有对角 (Diagonal) 分层与线程 (Thread) 分层, 垂直分层中有 D-BLAST 和 V-BLAST。BLAST (Bell Laboratories Layered Space Time) 技术的关键是在设计空时码传输结构的同时考虑接收端信号处理、信道估计和符号解码算法。本章采用各个关键技术相割裂的论述方法, 在完成分层空时码编码结构讨论后详细论述了最大似然检测、最小均方误差 (MMSE) 检测和解相关 (Decorrelation) 或称为迫零 (Zero-Force) 检测等算法以及它们之间内在的联系。

第 7 章讨论准正交空时码 (Quasi-Orthogonal Space Time Coding) 编码方案和解码复杂度分析。从几种经典的准 (拟) 正交空时码论述开始, 通过分析计算其编码矩阵的距离增益矩阵的行列式, 揭示其非满分集特性, 引出所谓的“分集积”概念。利用调制符号星座图旋转变换, 使编码矩阵满足满分集特性, 求使分集积最大的最佳调制符号星座图旋转角度。准正交编码对应的最大似然解码算法是多个符号联合解码, 调制符号星座图旋转增加了最大似然解码搜索符号集的“集重”或“势”。因此, 调制符号星座图旋转的准正交空时码在两个维度增加了对应最大似然解码算法的复杂度。本章的中心议题是讨论对准正交空时码编码矩阵建立相应的线性变换, 降低对应最大似然解码算法的复杂度。

第 8 章讨论正交频分复用 (OFDM) 技术与 MIMO 系统的空时编码方案的结合问题, 实现 MIMO 系统的空—时—频编码以获得信号空—时—频分集或复用。这一技术被认为是未来通信技术的关键解决方案之一。本章内容可谓“三足鼎立”: OFDM 的基本原理和峰均值比问题、MIMO-OFDM 空—时—频编码系统成对差错概率分析、MIMO-OFDM 系统中空—时—频编码方案研究。本章详细地论述了 OFDM 峰均值比降低的三类方法、信号非线性形变方法、编码类方法; 加扰—选择方法。建立了 MIMO—OFDM 空—时—频编码系统成对差错概率分析的“闭—形”解析表达式, 并在空域相关信道情形实现计算机仿真。针对 MIMO 系统的空—时—频编码, 在频率选择性信道中从理论与实践两个方面演绎了 Lindskog-Paulraj 空频编码、Park-Kim-Baik 空—时—频编码和修正的 Lee-Williams 空—时—频编码等方法。

最优化理论贯穿整个 MIMO 系统与空时编码设计理论, 第 9 章论述凸优化在 MIMO 系统与空时编码中的应用。一般优化问题转化为凸优化最著名的方法是 Lagrange 乘子对偶理论和 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件, 前者能够实现问题简单地转化, 后者能保证转化前

后两个问题的解相同。利用接收端信号的均方误差、系统输出信—干—噪比、系统误比特率等指标度量实现线性解码器的最优设计。利用发送端发送功率约束的波束形成（预编码）技术实现发送滤波器的最优设计。

所有这些内容对于 MIMO 系统与空时编码技术是非常基础性的。然而，作者认为，从第 1 章到第 9 章，每一章节的内容其实都可以作为电子通信类专业硕士研究生阶段深入钻研的课题，特别是适合作为他们学习阶段的学期论文课题。对于欲做更高层次研究的研究生同学，通过本书的研读可能会较“全方位”理解 MIMO 系统与空时编码理论和技术，为向前拓展、深化研究奠定基础。对于电子通信类专业本科生同学，每一章中都可以分解出一些小的专题作为他们毕业论文设计的题目，对于他们综合运用及加深理解、认知大学期间所学课程，培养分析问题和解决问题的能力都是很好的选择。对于一般工程从业人员，本书作为一个深入浅出的启蒙，相信读者会从中获益。但同时，由于作者的知识结构有限，对问题认识片面及局限是难免的，读者如有不同的见解，可发邮件至 shaochao@xupt.edu.cn，请不吝赐教，愿我们共同提高。

值得一提的是，本书的研究内容得到陕西省教育厅自然科学基金项目（08JK427）和陕西省科技厅科学工业攻关计划项目（2012K06—27）的资助，在此表示感谢；本书的部分内容历经了西安邮电大学多届硕士研究生的教学实践，多年来已有十多位研究生将 MIMO 系统与空时编码理论作为他们硕士论文的研究主题，并对本书初稿提出过许多比较中肯的建议或意见，特别是李伍洋、肖乾、范莉爽、张睿、莫增涛、王闯、赵龙凯、张成程、史鑫、徐春瑶和刘玉明等同学，他们反复阅读书稿，指出其中的差错，为保证本书的出版质量付出了艰辛的劳动，作者在此对他们表示谢意。还要深深地感谢我的家人，是他们一如既往的支持与理解，才使我在纷乱的日常工作中得以坚持，我衷心地与他们分享我的一切。

另外，作者仍计划将本书的内容作为西安邮电大学通信类专业硕士研究生阶段的课程，并有相应的幻灯片讲义。有类似计划的外校同行可来函电索取。对于相关领域的研究人员，只要在您的作品中注明引用本书作为参考，均可来函电索取相关资料。

邵 朝
2012 年 5 月于西安

主要符号表

a	标量 a	$\max\{\cdot\}$	取最大值
$\mathbf{a}$	矢量 $\mathbf{a}$	$\min\{\cdot\}$	取最小值
$\mathbf{A}$	矩阵 $\mathbf{A}$	$\sup\{\cdot\}$	取上确界
$(\cdot)^*$	复数取共轭	$\inf\{\cdot\}$	取下确界
$(\cdot)^T$	矩阵或矢量的转置	$\lambda \succ^w d$	λ 是弱优于 d
$(\cdot)^H$	矩阵或矢量的共轭转置	$\mathcal{S}^n$	$n \times n$ 维对称矩阵集合
$\operatorname{Re}(\cdot)$ 和 $\operatorname{Im}(\cdot)$	复数取实部和虚部	$\mathcal{S}_+^n$	$n \times n$ 维对称半正定矩阵集合
$\log_a x$	x 的以 a 为底的对数	$\mathcal{S}_{++}^n$	$n \times n$ 维对称正定矩阵集合
$\arg(z)$	变量 z 的相角	$(x)^+ = \max\{x, 0\}$	当 $x \geq 0$, $(x)^+ = x$; 否则 $(x)^+ = 0$
$\operatorname{rank}(\cdot)$	矩阵的秩	$\odot$	矩阵或矢量的 Hadamard 积
$\det(\cdot)$	矩阵的行列式	$\otimes$	矩阵或矢量的 Kronecker 积
$\operatorname{tr}(\cdot)$	矩阵的迹	$\operatorname{vec}(\cdot)$	将矩阵按列变换成矢量
$\mathbf{X}_{(k,l)}$	矩阵 $\mathbf{X}$ (k, l) 处的元素	$\lfloor x \rfloor$	取小于或等于 x 的正整数
$\lambda\{\mathbf{X}\}$	矩阵 $\mathbf{X}$ 的特征谱	$\lceil x \rceil$	取大于或等于 x 的正整数
$ \cdot $	复数的模值或取绝对值	$\langle \cdot, \cdot \rangle$	两个矢量内积的运算符号
$\ \cdot\ _p$	矢量的 p 范数或矩阵的范数	$\gg$ 和 $\ll$	远大于和远小于
$\ \mathbf{X}\ _F$	矩阵 $\mathbf{X}$ 的 Frobenius 范数	$\mathbf{n}: \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_N)$	$\mathbf{n}$ 为服从零均值 功率为 σ_n^2 的 N 维复高斯随机矢量
$\operatorname{diag}\{\mathbf{x}\}$	将向量 $\mathbf{x}$ 生成对角矩阵	$\mathbf{n}: \mathcal{N}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_N)$	$\mathbf{n}$ 为服从零均值, 功率为 σ_n^2 的 N 维实高斯分布的随机矢量
$\mathbf{I}_N$	$N \times N$ 维的单位矩阵	$(\cdot)^\dagger$	Moore—Penrose 广义逆
$\mathbf{0}_{M \times N}$	$M \times N$ 维的零矩阵		
$E[\cdot]$	对随机变量求期望		
$\mathbf{R}^{m \times n}$	$m \times n$ 维的欧氏空间		
$\mathbf{C}^{m \times n}$	$m \times n$ 维的复空间		

目 录

第 1 章 无线信道的传播和衰落特性分析与模拟	1
引言	1
1.1 一些预备知识与概念	2
1.2 无线信道一般传播特性分析	3
1.2.1 大尺度衰落	6
1.2.2 小尺度衰落	13
1.3 单输入单输出信道模型	22
1.3.1 室内信道模型	23
1.3.2 室外信道模型	30
1.4 多输入多输出信道模型	45
1.4.1 多输入多输出信道统计模型	45
1.4.2 I-METRA 多输入多输出信道统计模型	54
1.4.3 SCM 多输入多输出信道模型	63
1.5 天线分集及合并算法	69
1.5.1 分集增益的一些概念	69
1.5.2 几种经典的合并算法	71
1.6 多输入多输出信道系统	75
1.7 本章要点总结	75
练习题	76
参考文献	77
第 2 章 MIMO 信道的容量分析	80
引言	80
2.1 一些准备	81
2.2 具有确定传输函数的多输入多输出高斯信道的容量分析	83
2.2.1 多输入多输出信道容量的定义	83
2.2.2 发送端未知信道参数时的信道容量	84
2.2.3 发送端已知信道参数时的信道容量	86
2.2.4 确定性信道的信道容量	88
2.2.5 随机性信道的信道容量	91
2.2.6 遍历性容量	91
2.2.7 中断容量	92
2.3 差错指数	93
2.4 影响信道容量的其他一些因素	94

2.4.1 衰落相关对信道容量的影响94

2.4.2 直达波对信道容量的影响96

2.4.3 交叉极化判别对信道容量的影响97

2.4.4 信道蜕化—锁眼效应对信道容量的影响99

2.4.5 频率选择性信道对信道容量的影响100

2.5 模拟说明103

2.6 本章要点总结103

练习题103

参考文献104

第3章 空时分组码的设计准则105

引言105

3.1 秩和行列式准则106

3.2 迹准则112

3.3 最大互信息熵准则114

3.4 本章要点总结115

练习题115

参考文献116

第4章 正交空时分组码编码及性能分析117

引言117

4.1 Alamouti 空时编码方案118

4.2 Alamouti 空时编码方案与最大比合并器的比较122

4.3 实正交设计124

4.4 广义实正交设计133

4.5 复正交设计和广义复正交设计139

4.6 OSTBC 的解码（符号估计判决量的构造）147

4.7 性能分析149

4.7.1 正交空时码情形的性能分析150

4.7.2 非正交空时码情形的性能分析154

4.8 计算机模拟实验说明157

4.9 本章要点总结158

练习题159

参考文献161

附录 A 有关函数 $Q(x)$ 的几个结果163

附录 B 编码矩阵 $\mathcal{H}_3$ 对信道参数的编码变换公式164

第5章 空时格型码的编码原理及性能分析165

引言165

5.1 空时格型编码器的网格图165

5.2 空时格型码编码器结构、生成多项式及生成矩阵 166

5.3 空时格型码的解码算法 172

5.4 空时格型码的性能分析 172

5.5 空时格型码的设计 174

5.6 本章要点总结 178

练习题 178

参考文献 179

第 6 章 分层空时编码原理及检测算法分析 180

引言 180

6.1 系统模型和层的概念 181

6.2 分层空时码的编码结构和原理 183

6.2.1 分层空时码的水平编码结构 183

6.2.2 分层空时码的垂直编码结构 190

6.3 分层空时编码的几个经典检测算法 192

6.3.1 最大似然检测器 193

6.3.2 迫零（解相关）检测器 193

6.3.3 最小均方误差检测器 194

6.3.4 基于 QR 分解的干扰逐个剔除接收机 195

6.4 分层空时编码的性能分析 197

6.4.1 水平分层空时码的性能分析 197

6.4.2 慢衰落信道的性能分析 198

6.4.3 快衰落信道的性能分析 198

6.5 信道估计问题 199

6.6 计算机模拟实验结果和说明 203

6.7 本章要点总结 207

练习题 207

参考文献 208

第 7 章 准正交空时分组码和最小解码复杂度分析 209

引言 209

7.1 拟（准）正交空时分组码的传输模型 210

7.2 拟（准）正交空时分组码的编码规则和解码算法 214

7.2.1 几种拟（准）正交空时分组码的编码方案 214

7.2.2 拟（准）正交空时分组码的星座图旋转编码与解码算法 216

7.2.3 拟（准）正交空时分组码的解码算法复杂度分析 222

7.3 通用的非奇异线性星座图符号变换公式 224

7.4 非奇异线性变换矩阵 U_i 的设计 226

7.4.1 非奇异线性变换矩阵 U_i 对最大似然解码为实符号对复杂度的充分必要条件 226

7.4.2 正方形 QAM 情形下的最佳线性变换 228

7.4.3 矩形 QAM (RQAM) 情形下的最佳线性变换	230
7.4.4 关于任何格点上的任意 QAM 调制符号星座图的非奇异线性变换	233
7.5 关于矩形 QAM 调制符号星座图和坐标交织正交设计的最佳线性变换	235
7.5.1 坐标交织正交设计编码的概念	235
7.5.2 坐标交织正交码的最优解码	237
7.5.3 坐标交织正交码的空时分集增益和编码增益	239
7.5.4 4-QAM 星座图的最佳旋转角	240
7.5.5 坐标交织正交设计的非奇异线性变换	240
7.6 计算机仿真和结论	242
7.7 本章要点总结	245
练习题	246
参考文献	248
附录 C 定理 7.1 的证明	251
附录 D 定理 7.2 的证明	254
附录 E 定理 7.3 的证明	259
附录 F 定理 7.7 的证明	263

第 8 章 MIMO 系统与正交频分复用及空时频编码传输技术 264

引言	264
8.1 正交频分复用 (OFDM) 技术的基本概念	265
8.2 正交频分复用 (OFDM) 技术的基本原理	266
8.2.1 正交频分复用 (OFDM) 信号的生成和表达式	267
8.2.2 OFDM 信号的数学表达式	268
8.2.3 保护间隔与循环前缀的插入	269
8.2.4 加窗函数对 OFDM 信号的意义	270
8.3 正交频分复用 (OFDM) 信号的接收与解码	271
8.3.1 OFDM 信号接收端结构分析	272
8.3.2 OFDM 信号在接收端的数学表示分析	273
8.4 OFDM 信号功率峰均值比 (PAPR) 问题	281
8.4.1 OFDM 信号峰均值功率比的分布	281
8.4.2 非线性形变类限幅法	282
8.4.3 编码类方法	288
8.4.4 加扰类方法	289
8.5 MIMO-STFC-OFDM 系统成对差错概率分析	292
8.5.1 系统模型及其分集特性	293
8.5.2 基于 OFDM 调制的发送端阵列天线系统与空 频编码	295
8.5.3 成对差错概率分析	296
8.5.4 空时频编码矩阵对成对差错概率的影响分析	301
8.5.5 接收数据矢量协方差分析	303

8.6 空—时—频分集增益的实现.....306

8.7 关于成对差错概率的模拟分析.....319

8.8 本章要点总结.....321

练习题.....322

参考文献.....325

附录 G 接收信号数据矢量 $\mathbf{Y}$ 的 2 范数的计算公式推导.....329

附录 H 成对差错概率的计算公式推导.....330

第 9 章 凸优化理论与 MIMO 系统收发机的设计.....335

引言.....335

9.1 优化理论的一些基本概念.....335

9.2 凸优化及其对偶理论.....338

9.2.1 凸优化的定义和分类.....338

9.2.2 将一般优化问题转化为凸优化问题.....339

9.2.3 拉格朗日乘子对偶理论和 KKT 条件.....340

9.3 MIMO 系统接收端的优化问题.....341

9.3.1 MIMO 系统发送端和接收端信号模型.....341

9.3.2 与线性接收滤波器有关的性能指标.....342

9.3.3 最优线性接收滤波器.....343

9.3.4 不同性能度量间的联系.....344

9.4 MIMO 系统发送端波束形成优化问题.....345

9.4.1 MIMO 系统发送端波束形成的凸优化处理.....346

9.4.2 性能指标直接约束的发送端滤波器优化设计.....346

9.4.3 广义性能指标约束的系统发送端滤波器优化设计.....348

9.4.4 最小误比特率发送端滤波器优化设计.....349

9.5 本章要点总结.....350

练习题.....351

参考文献.....352

第 1 章 无线信道的传播和衰落特性分析与模拟

引言

无线通信的发展目标是使用者能够在任意地点、任何时间与任何人实现即时通信。其发展的瓶颈是无线频谱资源的短缺，而阻滞是信道的复杂时变特性，如多径衰落与多普勒频移等。

随着移动通信的演进发展，遇到的最大挑战之一是在系统频谱效率（计量单位为 bps/Hz）不变的情形下要求不断提升其传输速率（计量单位为 bit/s）。例如，20 世纪 90 年代普及的所谓第二代（2G）移动通信系统，在我国和欧洲的体制为 GSM（Global System for Mobile communications），北美的体制为 TDMA/136，其工作频带为 900~1800 MHz，需要支撑的传输速率为 22.8Kbit/s。而第三代（3G）移动通信系统在同样工作频带下需要支撑的传输速率至少为 384Kbit/s。另外，随着科学技术的发展，频谱资源的枯竭也是一个现实的障碍。表 1.1 及图 1.1 所示是第三代移动通信合作伙伴计划（Third-Generation Partnership Project, 3GPP）为通用陆地无线接入（Universal Terrestrial Radio Access, UTRA）以罗马数字命名的频分双工（Frequency Division Duplex, FDD）频带，表 1.2 所示是时分双工（Time Division Duplex, TDD）频带^[1]。从图 1.1 中不难看出，有一些频带是重叠的。

表 1.1 由 3GPP 为 UTRA FDD 所定义的频带

频分双工频带	上行频带范围/MHz	下行频带范围/MHz	主要应用区域
I	1920~1980	2110~2170	欧、亚
II	1850~1910	1930~1990	美
III	1710~1785	1805~1880	欧、亚、美
IV	1710~1755	2110~2155	美
V	824~849	869~894	美
VI	830~840	875~885	日本
VII	2500~2570	2620~2690	欧
VIII	880~915	925~960	欧、亚
IX	1749.9~1784.9	1844.9~1879.9	日本
X	1710~1770	2110~2170	美

因而，新技术绝对不能再在频域加塞，必须从其他方面开垦资源。空时编码与多输入多输出结合技术就是不占用额外频谱资源，能够将移动无线的不利因素变为有利因素，且不需要对原系统做大的变动，它只是在无线通信的空中接口处进行一些小的技术改造，就能大幅度提高系统运行质量。因此，它是未来移动通信发展最具前途的技术之一。第三代

及第三代演进移动通信技术均将它作为首选关键技术。学习和理解这项技术，对于未来移动通信从业者是必要的。本章先从无线信道特性等基本概念入手，为理解空时编码与多输入多输出理论奠定基础。下面的讨论叙述方式较多地参考了文献[2-18]，关于信道较详细的讨论建议读者参考文献[19-22]。

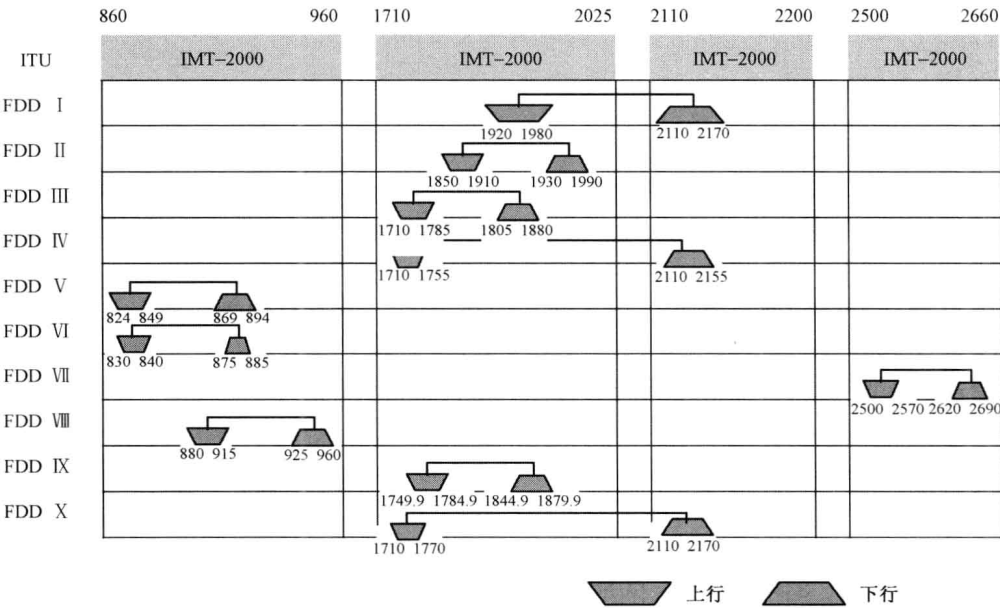


图 1.1 3GPP 为 UTRA FDD 所制定的工作频段

表 1.2 由 3GPP 为 UTRA TDD 所定义的频段

时分双工频段	频段范围/MHz	主要应用区域
(A)	1900~1920	欧、亚
	2010~2025	
(B)	1850~1910	美
	1930~1990	
(C)	1910~1930	美
(D)	2570~2620	欧

1.1 一些预备知识与概念

下面先给出经常用到的一些名词，以便于叙述的方便。

1. 单天线、多阵元天线系统

我们说多输入多输出（Multiple Input Multiple Output，MIMO）技术是破解现代通信瓶

颈与难题的首选，而与之相对的是所谓的单输入多输出（Single Input Multiple Output, SIMO）技术、多输入单输出（Multiple Input Single Output, MISO）技术、单输入单输出（Single Input Single Output, SISO）技术、多输入多输出多用户（Multiple Input Multiple Output Multiuser, MIMO-MU）系统。图 1.2 给出了它们结构的示意图。这些是系统的基本构架。

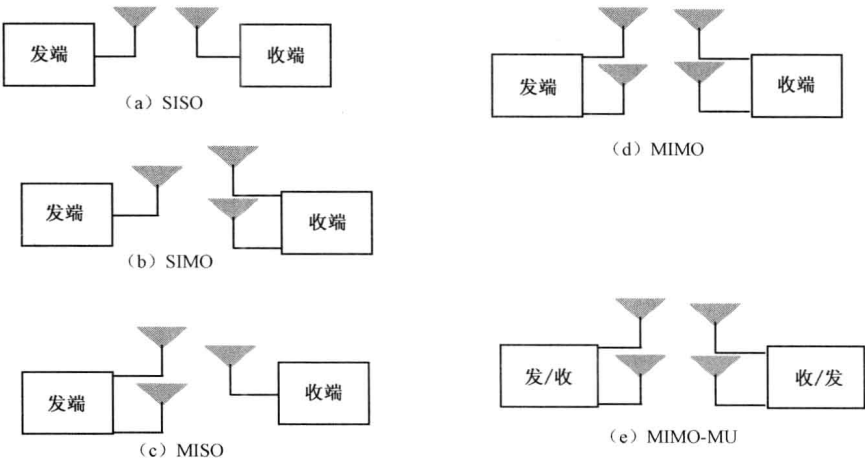


图 1.2 不同天线结构的空时系统

2. 天线增益

天线增益（Array Gain）是与系统内在结构有关的概念。所谓天线增益，是指发端、收端或同时在两端由于有多个天线阵元对信号的相干相加使信号平均信噪比的增加。若发送阵列天线已知信道参数，则它可以通过对发送信号做加权处理发送，使信号到达接收端保持同相位相加，即相干相加，这个增益我们称之为发送阵列天线增益。同样的，若接收阵列天线已知信道参数，则它可以通过对接收信号做加权处理接收，使信号实现同相位及同幅度相加，即相干相加，这个增益我们称之为接收阵列天线增益。从这两个方面，我们看到前提是要对信道信息已知。在通信系统中，一般移动终端要通过注册、请求服务等过程，所以一般可假设移动终端“已知”信道信息，即收端已知假设。而基站由于多窗口、被动式服务等特点的制约很难获得信道信息，即所谓的发端未知假设。我们在这两个假设成立条件下进行讨论。

1.2 无线信道一般传播特性分析

无线通信系统的性能主要受无线信道所处的环境支配。与有线信道的静态和“可预知”特性相反，无线信道是动态和“不可预知”的，因而无线通信系统的“恰当”分析通常是十分困难的。近年来，由于移动通信业务以及宽带移动互联网接入业务的迅猛增长，

无线通信系统的“优化”越来越关键。事实上，对无线信道的理解是构建高性能频谱有效无线通信技术的基础。在无线通信中，无线电波由发射机到达接收机称为无线电波的传播。在无线电波传播过程中，无线电波主要受三种不同模式的物理现象影响：反射、衍射和散射^[2-3]。

1. 反射

若物体的尺寸远大于电磁波的波长，则电磁波遇到该物体就发生反射。这通常发生在地球表面或大的建筑物的墙壁。当电磁波在一个媒介中传播，遇到另一个电特性不同的介质就可能发生部分传播与反射。当平面波入射到一个完全绝缘体，其能量部分进入此绝缘体，部分被反射回，没有任何因吸收而导致的能量损失。当平面波入射到一个全导体，则所有的入射能量被反射回。反射和传播波的电场强度与入射介质的菲涅尔反射系数（Fresnel Reflection Coefficient）有关。这个系数是介质特性的函数，且依赖于波的极化、入射角和波的频率等。

2. 衍射

若电磁波入射到一个非规则物体表面，如尖锐的边缘，就可能发生衍射。无线电信号沿地球表面传播，超越地平线，绕过障碍物的现象也是电磁波的衍射现象。衍射使得当移动终端进入障碍物的阴影区时接收的电场强度虽迅速降低但仍能检测到该信号。衍射现象可用惠更斯原理（Huygens Principle）得以解释，该原理指出，所有波前上的点可视为产生二次子波的点波源，这些二次子波结合起来在波的传播方向产生一个新的波前，衍射是二次子波传播到阴影区域的现象。

3. 散射

若电磁波照射到一个由大量尺寸小于电磁波波长的物体构成的物体上就可能发生散射。图 1.3 所示是几种传播方式的示意图解释。

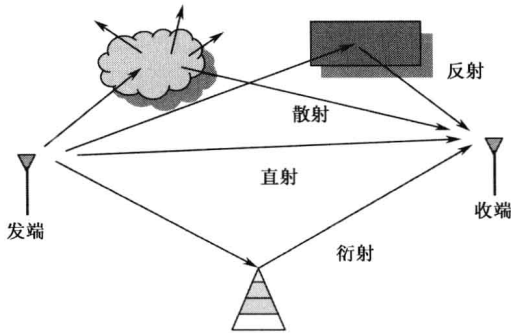


图 1.3 几种不同的无线传播方式

电磁波还有其他一些传播方式，如折射、吸收等，而且常见的是上述各方式相互结合、同时存在的传播现象，但反射、衍射、散射可认为是主要的无线传播方式。在无线信道中