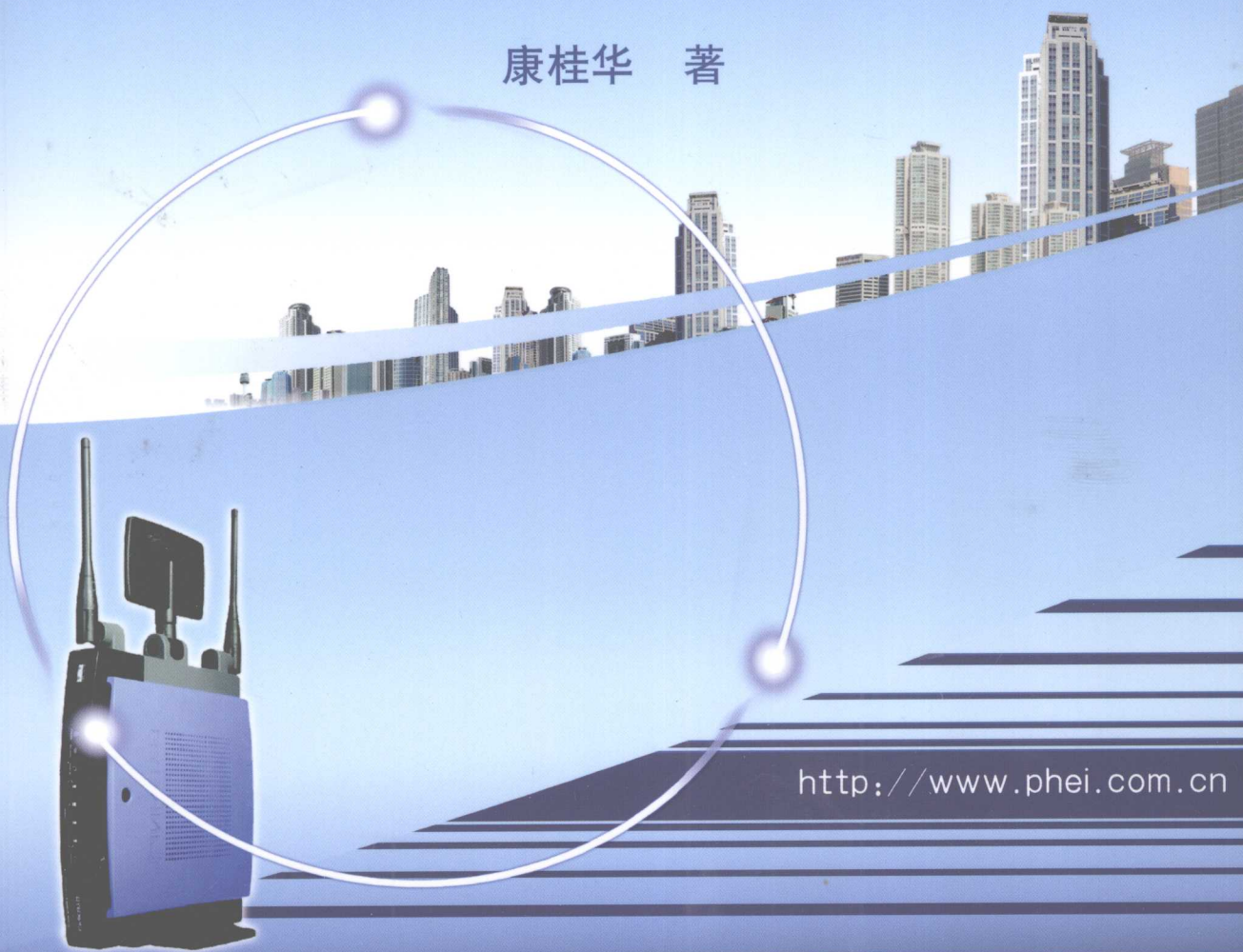


MIMO

无线通信原理及应用

康桂华 著



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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

MIMO 无线通信原理及应用

康桂华 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了多天线发送和多天线接收(MIMO)无线通信的基本原理,以及MIMO技术在宽带无线通信、分布式合作通信和无线网络中的相关应用。书中既有各种性能分析与仿真结果,又有生动的应用案例,还提供了一些代表性的实现方法。围绕MIMO无线通信的信道模型、信道容量、信道估计和实现算法四方面所涉及的有关理论和应用进行了较详细的阐述,并通过大量的计算机辅助仿真实验,验证了MIMO系统中的一些重要理论,同时也给出了作者在最近的研究中得到的一些新结果。

本书可为通信工程、信息工程、计算机应用及相关专业的研究生、工程师和科研人员提供借鉴和参考。

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 无线通信原理及应用 / 康桂华著. —北京: 电子工业出版社, 2009.7

ISBN 978-7-121-08677-9

I. M… II. 康… III. 移动通信—通信系统 IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 060257 号

责任编辑: 史 涛

印 刷: 北京智力达印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

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: 787×1 092 1/16 印张: 12.5 字数: 320 千字

印 次: 2009 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 36.00 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 zlts@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

随着无线互联网中多媒体通信的快速发展, 宽带高速数据通信服务的需求正在日益增长。常规单天线收发通信系统的容量已远远不能满足实际使用的需要, 而且可靠性亟待提升。信息论近期的研究表明, 在无线链路两端使用多根天线发送和多根天线接收 (MIMO), 无需增加频谱资源和发射功率, 可以成倍地提升通信系统的传输速率。MIMO 无线通信是当前无线通信领域中的一项重要技术突破, 也是实现未来高速宽带无线 Internet 接入网的关键技术之一, 无论在后三代(B3G)或第四代(4G)移动通信中, 还是在未来无线互联网多媒体通信中都有着广阔的应用前景。

自从西方学者 Telatar E.和 Foschini J.在 MIMO 无线通信系统中做出了开创性的工作以来, 有关 MIMO 技术理论和应用研究如雨后春笋般涌现。至 2005 年年底, IEEE 数据库收录该领域的研究论文已达数千篇, 论文涉及的内容从理论研究到实验验证, 再到商用化的各个方面。作者在攻读博士学位期间, 有幸从事“MIMO 无线通信系统的信道模型、信道容量、信道估计和实现算法”方面的研究工作, 回校后, 在博士研究工作的基础上, 申报了“基于 4G 构架的空时频三维编码研究”的博士启动基金项目, 继续进行 MIMO 无线通信系统的有关研究。在随后的博士后工作中, 又进行了 MIMO 技术在未来无线通信网络中应用研究。本书主要融入了作者在攻读博士学位和博士后研究工作期间, 以及科研项目中有有关 MIMO 无线通信方面的一些研究成果。本书还包括了一些未曾发表过的研究结果, 如基于最大似然 (ML) 信道估计准则的信道容量下限分析以及相应的最佳训练序列设计原则等。

本书适用对象为通信工程、信息工程、计算机应用及相关专业的研究生、工程师和科研人员, 要求读者熟悉数字通信、矩阵分析、概率论与随机过程方面的有关基础知识。

作者 康桂华

2009 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 传统单天线系统向多天线系统演进	1
1.3 MIMO 无线通信技术的研发现状和应用概况	2
1.4 MIMO 无线通信技术的发展趋势	5
第 2 章 MIMO 无线通信基础	9
2.1 引言	9
2.2 矩阵的有关知识	9
2.3 无线移动信道的主要特征	14
2.4 信号与系统的等效基带表示	16
2.5 信号检测方法	18
2.6 数字调制技术	21
2.7 分集技术	24
2.8 小结	27
第 3 章 MIMO 空时信道的理论模型和仿真	29
3.1 引言	29
3.2 确定性的 MIMO 信道模型	30
3.3 随机 MIMO 信道模型	32
3.3.1 信道衰落和信道扩展	32
3.3.2 随机 MIMO 信道的一般描述	34
3.3.3 基站和移动台天线相关系数	36
3.3.4 3GPP 有关 MIMO 信道模型方面的标准	40
3.4 MIMO 无线信道的仿真	41
3.5 小结	53
第 4 章 MIMO 信道的容量分析与仿真	55
4.1 平均分配发射功率的 MIMO 信道容量分析与仿真	55
4.2 自适应分配发射功率的 MIMO 信道容量分析与仿真	62
4.3 MIMO 仿真信道的容量分析与比较	66
4.4 小结	69
第 5 章 MIMO 信道传输系数估计与仿真	70
5.1 引言	70
5.2 基于信道估计的 MIMO 无线系统的数学模型	71
5.3 最大似然比和最小均方误差估计的仿真性能及其比较	73
5.4 基于信道估计的信道容量下限的估计	79
5.5 最佳训练序列的设计	81
5.6 最佳序列设计和基于信道估计的信道容量的仿真结果	86

5.7	信道系数估计误差对系统性能的影响分析	89
5.8	小结	93
第 6 章	MIMO 空时实现算法分析与仿真	95
6.1	算法概述	95
6.2	发射端空时处理的几种典型算法分析及其推广	97
6.2.1	空时分集处理技术	97
6.2.2	分层处理技术	99
6.3	接收端的空时处理算法分析	101
6.4	几种先进的空时处理综合方法	103
6.5	仿真结果及性能分析比较	113
6.6	小结	121
第 7 章	MIMO 宽带无线通信技术	122
7.1	引言	122
7.2	单用户 MIMO-OFDM 宽带传输技术	123
7.3	多用户 MIMO-CDMA 宽带传输技术	128
7.4	多用户 OFDM-CDMA 宽带传输技术	134
7.5	多用户 MIMO-OFDM-CDMA 宽带传输技术	140
7.6	小结	151
第 8 章	虚拟 MIMO 无线通信技术	153
8.1	引言	153
8.2	虚拟 MIMO 技术基础	154
8.3	基于合作中继的虚拟 MIMO 技术	158
8.3.1	理论分析基础	158
8.3.2	基本的合作中继协议	160
8.3.3	基本的合作中继协议比较	162
8.3.4	中断性能分析	162
8.4	基于编码合作的虚拟 MIMO 技术	167
8.5	小结	173
附录 A	MIMO 信道最大似然比估计值及其误差的证明	175
附录 B	MIMO 信道线性最小均方误差估计值的证明	177
附录 C	最差噪声影响下, 基于训练序列的信道容量下限的证明	179
附录 D	数学运算符对照表	181
附录 E	英语缩略语对照表	182
参考文献		184
致谢		194

第1章 绪 论



本章内容提要

首先概述了无线通信系统中引入 MIMO 技术的必要性, 以及提高无线移动通信传输速率的方法和途径; 其次简要介绍了传统单天线系统向多天线系统演进的过程, 并阐述了 MIMO 技术在提高无线传输速率和频谱使用效率方面的作用; 然后对目前 MIMO 无线通信技术的研究现状和应用概况做了简要的回顾, 并指出了 MIMO 无线通信技术的未来发展趋势; 最后概括了本书的章节安排和主要内容。

1.1 引言

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 (SISO, Single Input Single Output) 系统。对于这样的系统, Shannon C. E. (1916-2001) 于 1948 年在“通信的数学理论^[1]”一文中提出了一个信道容量的计算公式: $C = B \log_2(1 + S/N)$, 其中 B 代表信道带宽, S/N 代表接收端的信噪比, 它确定了在有噪声的信道中, 进行可靠通信的上限速率。用 B 归一化后, 得到带宽利用率为 $\eta = \log_2(1 + S/N)$ 。以后的电信科研工作者无论使用怎样的信道编码方法和调制方案, 只能一点一点地接近它, 却无法超越它, 这似乎成了一个公认的、不可逾越的界限, 也成了现代无线通信发展的一大瓶颈。

随着目前移动通信的普及和广泛应用, 加上未来 Internet 要求无线接入, 用户要求大幅度地提高无线通信速率的愿望变得越来越强烈, 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三种方法: ① 设置更多的基站; ② 拓宽已使用的频带; ③ 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, 为此付出的代价较高。为了便于提高无线通信的传输速率, 也有人建议把目前使用的频带拓展到毫米波段, 因为在毫米波段有更宽的频带可供使用, 但是就目前的技术水平来说, 这样做的代价还相当昂贵, 而且目前无线通信市场迫切需求的是介于 UMTS (通用移动通信系统) 和 WLAN (无线局域网) 之间设备, 它们使用的是微波波段。对于 UMTS 和 ISM (工业、科研和医疗) 使用的频率在 2GHz 附近, 而 WLAN 使用的频率在 2GHz 到 5GHz。由此看来, 合理的选择是设法提高频谱的使用效率。

1.2 传统单天线系统向多天线系统演进

依据 Shannon C. E. 给出的信道容量公式, 在传统的无线系统中, 增加信噪比 (SNR) 可

以提高频谱的使用效率,信噪比每增加 3 dB,信道容量每秒每赫兹增加 1 比特。对于单用户方案,信噪比主要与系统的热噪声有关,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,接收端的信噪比便随之增加,然而,不仅是因为人的健康原因不推荐使用这种方法,而且还因为要设计一个能在很宽的线性范围内和很高的发射功率上工作的功率放大器,是件很困难的事情,而且当发射功率很高时,器件的散热也成问题。另外在蜂窝(多用户)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使用分集技术。如果发射端使用单根天线,接收端使用多根天线,这种分集通常称为接收分集,也称之为单输入多输出(SIMO, Single Input Multiple Output)系统,采用最佳合并的接收分集技术通常能改善接收端的信噪比,从而提高信道的容量和频谱的使用效率。如果发射端使用多根天线,接收端使用单根天线,这种分集通常称为发射分集,也称之为多输入单输出(MISO, Multiple Input Single Output)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^①技术,即在无线链路的两端都使用多根天线, Telatar E.^[3]和 Foschini J.^[4]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,该信道容量突破了传统的单输入单输出信道容量的瓶颈,是 Shannon C. E.信道容量公式在多天线系统中的推广应用。与目前已实现的信道容量相比,有望提高几个数量级。因此 MIMO 无线通信技术在第三代(3G)乃至三代以后(B3G)的移动通信系统中有着广阔的应用前景。目前, MIMO 技术已成为无线通信领域的一大研究热点。粗略地说,使用 MIMO 技术的好处在于能创建多个并行的子信道、能综合使用发射分集和接收分集技术、能较大地提高天线的增益等。

1.3 MIMO 无线通信技术的研究现状和应用概况

MIMO 无线通信是一个崭新的、富有挑战性的研究领域。信息论预示了 MIMO 无线系统具有潜在的巨大的信道容量,但在实际应用中是获得这个容量的全部还是部分以及为此需要花费多大代价等,都值得深入、仔细地研究。因此,目前全世界有许多学术机构、大公司(主要分布在欧洲和北美国家)正在对 MIMO 技术展开更深入的研究,推动着这项技术日益朝实用化方向发展。目前 MIMO 无线通信技术已从理论研究、实验验证,逐步走向商用化。

1. 研究现状

自从 Telatar E.和 Foschini J.在 MIMO 无线系统中做出了开创性的工作以来,目前在蜂窝无线通信、固定接入系统方面,已提出了各种实验性的 MIMO 系统,在无线局域网方面,已制定了有关标准,而且已有相应的产品。在蜂窝移动通信中,目前还没有商用化的 MIMO 产品。尽管在这方面已取得了较大的进展,但是距离 MIMO 技术大规模投入商用的时间,专家估计还要几年,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

^① 目前有些文献中也将多个载波频率、多个时隙或多个用户的通信技术称为 MIMO 技术^[2],在本书中, MIMO 主要指采用多根发射和接收天线的无线通信技术。

天线的数量和各天线之间距离是 MIMO 系统设计的关键参数, 如果要想实现 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水平, 例如 4 根, 它们之间的距离一般选择为 10 个波长, 这个距离稍微偏大, 之所以要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。如果使用双极化天线, 在 2GHz 的频率上, 10 倍波长的间隔, 4 根天线占据的空间约为 1.5 米。对于终端, 选择半个波长的天线间距足以保证有相当数量的不相关衰落, 因为终端一般处于本地散射体之间, 而且不存在直接传播路径, 终端天线的最大数量预计为 4 根, 但是实际实现时, 一般选择最小的数目: 2 根。据计算, 4 根双极化天线要占据 7.5cm 的空间, 这 4 根天线可以非常容易地嵌入诸如笔记本电脑的外壳中, 然而对于蜂窝手机, 即使是安装 2 根天线也成问题。因为手机目前的设计趋势是把天线嵌入到机壳中, 目的是为了改进外观和增加产品的吸引力, 这使得天线间距要求成为一个非常严重的问题。

(2) 接收机的复杂性

MIMO 接收机与单天线接收机相比, 复杂性明显要增加, 具体原因表现在以下几个方面:

- 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, 例如采用 (4, 4) 天线结构的 MIMO 接收机与单天线接收机相比, 复杂性要增加约 2 倍。
- ②由于 MIMO 接收机受周围环境的散射影响, 存在角度扩展和时延扩展, 在均衡和干扰抵消方面需要增加一些附加的处理。
- ③MIMO 信道估计也要导致复杂性的增加, 因为整个信道矩阵的每一条路径时延, 都需要及时跟踪和更新, 而不是只跟踪和更新单个信道系数。
- ④额外的复杂性还来自增加的射频 (RF) 链 (与接收天线的数目相等) 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, 电池的寿命长短也跟接收机的复杂性有关。

(3) MIMO 无线信道模型

MIMO 无线系统的性能, 在很大程度上跟所处环境的多径信号的性质有关, 特别要受各条路径之间的相关度、时延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 MIMO 无线信道的特性, 对实现潜在的巨大信道容量、取得预期的性能、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 无线信道的静态模型, 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性能的, 同时为适应这些更具体的模型要求, 是否能提出一些新的算法。传统的无线系统的传播模型已成为了标准^[5], 不过到目前为止, ITU (国际电信联盟) 还未制定相应的 MIMO 无线信道模型标准, 3GPP (第三代移动通信合作伙伴计划) 已制定出了有关 MIMO 的无线信道模型标准^[6]。

(4) 信道状态信息获取和利用

如何准确地获取信道的状态信息 (CSI) 并及时地反馈给发射机是 MIMO 无线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, MIMO 无线信道容量的实现将得益于知道信道状态信息的发射机, 因为发射端可以利用信道的状态信息或部分反馈信息依据注水原理而不是平均分配发射功率。而且, 如果已知信道的相关矩阵, 还可以使信道编码、每一支路的比特分配和放大器的功率管理做到最佳。在文献[7]中讨论了各种功率分配算法, 它们能在不同的信道条件下做到最佳。

(5) 系统的集成和信号设计

MIMO 无线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。为此, MIMO 的信号设计可以从特殊的无线资源控制(RRC)消息中,获得支持和帮助。例如,终端可以通过下行链路的广播信令来知道基站是否处在 MIMO 模式,同时,基站也需要知道终端是处在 MIMO 模式,还是非 MIMO 模式, MIMO 通信链路可以在呼叫期间确立。另外,在非 MIMO 模式通信中,终端也需要给基站提供反馈信息,随时报告信道的质量情况,如果信道条件许可,基站便可安排 MIMO 传输,这些下行和上行的 RRC 消息一般放在信令消息的第二层。

(6) MIMO 集成芯片的研发

随着 MIMO 技术日趋成熟,诸多无线产品厂商共同合作,提出了各种以 MIMO 技术为基础的高速数据传输方案,并进行相应的 MIMO 芯片的研发,但由于相关标准还未最终确定,因此目前研发的芯片不适合大规模推广应用。几年前,朗讯(Lucent)通信技术公司已做了 MIMO 系统的早期实验,并于最近成功地测试了两款 BLAST(贝尔分层空时编码)芯片,芯片的最高速度达到了 19.2Mbps,而且 BLAST 研究小组最近取得了以前难以想象的无线频谱效率:20~40bps/Hz,比较而言,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 1~5bps/Hz,对于点对点的微波通信系统取得的频谱效率为 10~12bps/Hz,而且在 30KHz 的带宽内,Bell 实验室在上述的频谱效率上实现了 0.5Mbps~1Mbps 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 50Kbps。

目前,主要的 MIMO 芯片制造商有 Airgo、Atheros、Metalink 与 Ralink,一些设备制造商已将研发的芯片用于自己的 MIMO 产品,如无线路由器或笔记本网卡。Airgo 的第三代 True MIMO 芯片数据传输速率可达 240Mbps,并同 Linksys 公司一起研发第四代产品。总之,全球的 MIMO 芯片市场日益壮大,为 MIMO 技术的大规模商用化奠定了一定的基础。

除上述因素外,还有其他一些因素也会使 MIMO 无线系统的性能退化,例如信道估计的准确性、天线单元之间的相关性、较大的多普勒频移等。

2. 应用概况

(1) 3G 与 B3G 方面

目前 ITU 和 3GPP 已制定了在 3G 和 B3G(3G 以后)移动通信中使用 MIMO 技术的有关标准。3G 标准中的 WCDMA 和 cdma2000 方案均使用了 MIMO 技术,例如:WCDMA 方案^[8]中,各信道都可使用基于空时编码的开环发送分集技术(TSTD)。而专用物理信道(DPCH)和下行共享信道(PDSCH)可利用闭环 TSTD 技术。cdma2000 方案^[9]中,通过空时扩频和正交发射分集可获得更大的空间分集增益,基站还可根据移动台的反馈信息来选择信道条件较好的天线发送信息。对于 3G, 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补充,目前在移动通信产业界具有很强的吸引力。与此相关的技术包括自适应调制和编码、混合 ARQ(自动重发请求)和快速蜂窝选择等。由于 MIMO 技术能够在不增加带宽的情况下成倍提高通信系统的容量和频谱利用率。因此,无论哪种 B3G 方案^[10,11]基本上都采用了 MIMO 的设计理念,从而可大大提高通信系统的传输性能。

对于 3GPP,表 1.1 给出了在平衰落条件下,2GHz~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^[12]。

表 1.1 各种 MIMO 结构的峰值数据速率

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

(2) 无线网络方面

由于 MIMO 技术在通信距离、吞吐量和可靠性方面较单天线技术具有明显的优势，因此，无线局域网、无线城域网和移动电话的制造商们都乐于在他们的设备中采用 MIMO 技术。目前 MIMO 技术在支持 IEEE 802.11n 标准草案的无线局域网中已得到了具体应用^[13]，该标准草案充分地利用了 MIMO 系统的多天线分集和空分多路复用两种特性，实现时分别采用了空时编码和分层数据结构两种技术，最多支持 4 发射天线和 4 接收天线，预计物理层的最高传输速率可达 600Mbps，目前在物理层的传输速率已达到 300Mbps，使用了两个空分数据流，每个数据流的信道带宽为 40MHz。另外，目前 IEEE 802.11n 标准的制定已取得了重大进展，预计最终版本将在 2009 年 11-12 月颁布^[14]，但支持该标准草案的芯片已问世^[13]，采用该芯片的无线路由器和笔记本网卡已在市场上销售，最高传输速率可达 240Mbps。在 MIMO 技术的商用化方面，目前采用 IEEE 802.11n 标准草案的系列产品处于领先地位。在无线城域网方面，IEEE 于 1999 年成立了 IEEE 802.16 工作组，基于 MIMO 和 OFDM（正交频分多路复用）技术，先后发布了 802.16、802.16a、802.16d、802.16e 等系列标准。目前 IEEE802.16 系列芯片已全部推出。通信距离可达 50Km，数据传输速率最高可到 75Mbps，基本能满足城域网的性能要求。

上述内容只是目前 MIMO 无线通信技术在应用方面的简要回顾，实际上可能远不止这些。

1.4 MIMO 无线通信技术的发展趋势

自从 Bell 实验室的研究人员 Telata E.和 Foshini J.独立发现 MIMO 无线系统蕴涵着巨大的信道容量以来，世界上有许多学术机构、大公司不惜投入大量的人力和物力，对此展开了许多研究，经过几年的不懈努力，目前无论在学术上，还是在商业应用领域，已取得了许多举世瞩目的成绩，而且这一趋势有增无减，目前仍有若干学术机构、公司立足于这一研究领域，对 MIMO 无线通信及相关技术展开更深入的研究，使这项技术日趋成熟，并不断朝着实用化方向发展。

一般来说，MIMO 无线系统性能的优劣在很大程度上取决于对发射和接收信号处理算法的合理设计，而一种性能优异算法的提出和有效实现与实际的通信环境密切相关，为此在信道模型方面进行一些细致的研究是十分必要的，因为在 MIMO 系统的理论研究中往往要把实际的测量数据转变成易处理的数学公式，以便于根据实际的传播环境，对 MIMO 实现算法的性能做出有效的估计和判断，而且这些公式还可用于分析所选择的天线拓扑结构或传播参数对实际信道容量的影响，从而以一种最佳途径去修改原来的系统设计方案。另外，在研

究 MIMO 系统的具体实现方案时,常常需要对真实信道的状态信息进行合理的估计,而估计的效果或精度,将直接影响系统的真实性能。

结合本书对 MIMO 无线通信技术所进行的一些研究,作者认为后续的工作应从以下几方面展开。

1) 在信道模型方面,本书中所建立的信道模型只适用于基站和移动台之间的信道,即一方静止,另一方移动,如果双方都移动,就必须对其加以改进。依据已建立的仿真平台,只要在预留的两个外部数据输入通道上,外加实测的多普勒谱数据。另外,为了适应无线传播信道的时变特性,信道模型中应考虑信道的动态特性,引入信道跟踪机制。随着对无线通信环境认识的不断深入, MIMO 信道模型将逐渐趋于完善,认知无线电^[15]对此将发挥重要的作用。

2) 在信道容量方面,除本书中考虑的一些实际因素外,是否还存在其他一些因素制约着实际信道容量的提高。目前考虑的 MIMO 系统,收发两端大多使用的是直线型天线阵,如果收发两端使用的是平面型天线阵或其他型天线阵,信道容量的计算问题。还有多用户的 MIMO 信道容量计算问题,以及进一步提高信道容量的空间分集方法等。

3) 在信道估计方面,主要是信道状态信息(CSI)获取和有效利用问题。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。另外,如果由于信道的快速衰落,在信道的相干时间内,无法进行信道估计时,而又不想使用“盲”技术,是否存在其他解决办法?

4) 在实现算法方面,主要是要解决接收机的复杂性问题,在具体实现 MIMO 的容量时,有时不得不在性能和复杂性之间进行“折中”。如何使“折中”恰到好处,是一个值得深入探讨的问题,这往往需要具体问题具体分析,有时可能牵涉到整个通信系统,需要进行系统级的算法仿真等。

MIMO 无线通信技术的未来发展趋势主要表现为:

1) 对于单用户情形,由于传输的数据都来自于单个用户,为实现更有效的接收,在发送端可进行更智能化的信号设计,根据信道的特征和系统的要求,可采用多种方式充分利用多根天线。与此同时, MIMO 技术还将与一些高效编码和/或调制技术紧密结合,如 LDPC(低密度校验码)、OFDM、CDMA 等技术,进一步提高系统的传输性能,如传输速率、频谱利用率或系统可靠性等。

2) 对于网络环境,充分利用多用户、多天线、多载波和多时隙等设计参数,并有效运用功率分配和控制技术,寻找有效实现发送和接收的最优算法,使系统的综合性能指标达到最佳,同时降低系统设计的复杂性。另一方面,根据系统的总体性能,如系统的服务质量(QoS),包括吞吐量、时延等,并围绕网络的多层协议模型,在物理层优先采用 MIMO 技术的前提下,对其他层进行跨层优化设计。

3) 随着 MIMO 技术日趋成熟,并不断朝实用化方向迈进,国际上很多研究机构积极推动 MIMO 技术的标准化进程,相关的通用技术标准将相继颁布,如 MIMO 无线信道的标准模型以及有效实现发送和接收的标准算法等,总之 MIMO 技术的应用将更加规范化。

4) 由于未来的通信设备要求体积小,重量轻,因此实现 MIMO 技术的一些成熟算法将以专用芯片的形式出现。随着大规模和超大规模集成电路设计制造工艺水平的不断提高,专用芯片的功能将越来越完善,性价比逐步趋向合理化。

5) 随着 MIMO 技术实用化进程步伐的加快,这项技术将在实际通信系统中得到广泛应

用。摆在研究和设计人员面前的一个首要问题是：如何使采用 MIMO 技术的新设备与以往未采用这项技术的老设备互联互通？未来的 MIMO 通信机可能是双模式或多模式的，为此需要研究制式的兼容性和系统的集成设计问题。

1.5 本书的结构及内容安排

本书共分 8 章，每章的主要内容概括如下：

第 1 章首先简要说明了在无线通信系统中引入 MIMO 技术的背景，以及提高无线移动通信传输速率的方法和途径。其次简要介绍了传统单天线系统向多天线系统演进过程，同时阐述了 MIMO 技术在提高无线传输速率和频谱使用效率方面的作用。然后对目前 MIMO 无线通信技术的研究现状和应用概况做了简要的回顾，并指出了 MIMO 无线通信技术的未来发展趋势，最后给出了本书的章节安排和主要内容。

第 2 章归纳了与 MIMO 无线通信技术有关的一些基础理论，包括矩阵和线性代数的相关知识、信号和系统的等效基带表示法、无线移动信道的基本特征和基本模型、线性数字调制技术的原理和实现方法、信号的检测方法和分集技术等。

第 3 章在对最近文献中提出的一些空时信道模型理论进行详细研究的基础上，根据发射信号的离开角及其扩展角、接收信号的到达角及其扩展角、功率方位谱、多普勒谱和收发两端天线的拓扑结构，综合了一个多抽头的宽带 MIMO 信道模型，而且创建了一个 MIMO 无线信道仿真平台，并以 3GPP 标准 R1-02-0181 所规定的具体参数为依据，对理论上建立的信道模型进行了计算机仿真，得到的仿真结果与实际情形基本吻合。同时还研究了多天线的位置误差对天线阵列的相关函数的影响，并给出了有关仿真结果。

第 4 章着重分析了收发两端的多天线单元之间存在相关性、同时存在直射分量（LOS）和散射分量的传播环境、已知和未知信道的状态信息等因素对 MIMO 信道容量的影响，给出了有关仿真结果。并对两类特殊的 MIMO 信道（全 1 信道和正交信道）的容量进行了特殊分析，得到了容量的具体计算公式，并做了物理解释。同时创建了一个 MIMO 无线信道容量的仿真平台，并以 3GPP 标准 R1-02-0181 所规定的具体参数为依据，在该仿真平台上计算出了仿真信道的信道容量的累计分布，并和相应条件下的理论容量进行了分析比较，得到了有关结论。

第 5 章首先基于训练序列估计的 MIMO 无线传输帧结构和数学模型，分别使用最小均方误差（MMSE）估计法和最大似然（ML）估计法估计出了信道的各个系数，在小信噪比和大信噪比时，比较了两种估计方法的估计误差的方差。其次进行了采用最大似然（ML）估计法的最佳训练序列设计的理论分析，分别得到了有关结果，并和其他文献中采用最小均方误差估计法的设计结果进行了分析比较，得到了有关结论。最后分析了信道估计误差对系统性能的影响，推导出了 MIMO 无线信道系数估计误差的 Cramer-Rao 界，而且采用 Monte-Carlo 仿真证实了在所推出的 Cramer-Rao 界内引起系统的误码性能损失最小。同时创建了一个 MIMO 无线信道系数估计和误差分析的仿真平台，在该仿真平台上，计算出了采用最大似然估计法的最佳训练序列设计的有关结果和与之对应的信道容量。

第 6 章对 MIMO 无线系统目前业已提出的一些主要算法进行了研究，以分集和分层两条线索归纳了发射端的一些处理算法，分析比较了以线性空时均衡算法、非线性最大似然算法

和 Turbo 空时译码算法为主的接收端处理算法,着重分析了新近出现的一些综合算法的实现原理,同时对这些算法进行了大量的计算机仿真,给出了一些代表性的仿真结果,并且创建了一个 MIMO 无线系统实现算法的仿真平台。在该仿真平台上可以进行:①空时分组码(STBC)的编译码算法;②空时网格码(STTC)的编译码算法;③线性最小均方误差(LMMSE)空时均衡算法和非线性最大似然(ML)算法;④连续干扰对消接收垂直-贝尔分层空时(V-BLAST)算法;⑤高速线性空时扩展码(LDC)的编译码算法;⑥正交空时分组编码和传统波束形成的联合设计算法;⑦串联和并联结构的 Turbo 空时编译码算法;⑧高速线性扩展空时码和 Turbo 编码的组合设计算法等仿真。

第 7 章对 MIMO 技术应用于宽带无线通信中的主要问题进行了分析和研究。结合目前能够有效对抗信道频率选择性衰落的 OFDM(指抗码间串扰)和 CDMA(指频率分集)技术,论述了 MIMO 宽带无线通信系统中,信号发送和接收的具体实现方案,给出了 MIMO-CDMA 系统中采用空时匹配滤波器、空时 MMSE 检测器和迭代 MMSE 检测器的三种接收机具体实现的结构形式。着重论述了单用户 MIMO-OFDM 系统的基本实现原理,并分析了系统的信道容量和误码性能。在 CDMA 基带信号发送和接收系统设计的基础上,论述了多用户 MIMO-CDMA、CDMA-OFDM 系统发送和接收信号设计中的一些理论和实际问题,给出了单用户和多用户检测方法。结合未来高速宽带无线通信技术的发展趋势,引入多用户 MIMO-CDMA-OFDM 系统,以 Alamouti 编码方案为例,详细阐述了 MIMO-CDMA-OFDM 系统的基本组成,以及发送信号的设计和接收信号处理的具体实现方法,并对所设计系统的性能做了初步评估。

第 8 章首先介绍了虚拟 MIMO 无线通信技术提出的背景,多用户合作通信的基本概念,虚拟 MIMO 技术的基本实现原理。然后基于虚拟 MIMO 通信系统模型,概括了目前合作信号三种基本的处理方法。其次系统地阐述了基于合作中继的虚拟 MIMO 通信技术,包括合作信道的划分、等效的信道模型以及描述合作通信系统性能的两个重要参数。在此基础上归纳了基本的合作中继协议,并在性能上进行了比较。结合中继协议,着重分析了基于合作中继的虚拟 MIMO 通信系统的中断性能,并与直接传输进行了比较。最后论述了基于编码合作的虚拟 MIMO 通信技术实现原理,给出了基于卷积码的编码合作实现方法,分析了基于空时码的编码合作的系统模型和实现结构,并就信道慢衰落和快衰落给出了成对错误概率的估算公式。结合 Turbo 码和空时码,给出了性能更好编码合作系统的实现方案。

第2章 MIMO 无线通信基础



本章内容提要

本章主要对 MIMO 技术所涉及的一些基础理论进行概括和总结。MIMO 技术离不开通信及相关学科的一些基础理论的支撑,这些理论是 MIMO 技术不可分割的组成部分,也是正确理解和系统掌握 MIMO 理论和实现方法的前提。2.1 节简要说明了通信系统的研究与基础理论的联系。2.2 节简要介绍了矩阵的有关知识,这些知识在后续章节中需要使用。2.3 节描述了无线衰落信道的主要特征和基本模型。2.4 节给出了信号与系统的等效基带表示。2.5 节概括了信号检测的基本原理。2.6 节讨论了数字调制的原理和实现方法。2.7 节概述了现代无线通信中广泛使用的分集技术。2.8 节对本章做了简要的回顾。

2.1 引言

一般来说,无线通信系统的研究主要是围绕通信信号的有效发送和接收展开的。通信信号发送的研究主要集中在信源编码、信道编码和调制技术上,其中通信信号的设计显得格外重要。接收则是发送的逆过程,主要表现在信号的解调、信道译码和信源译码等技术上。无线信号的传输是极其复杂的,这主要是因为无线信道是一个开放的环境,特别是在大中型城市,很多用户同时在发射和接收,相互之间不可避免地产生相互干扰。加上市区高层建筑物等各种散射体,移动用户又处于不断的运动之中,这些因素使得信道产生衰落、扩展及多径现象,对通信信号的传输要产生严重的影响,而且这种影响是随时间变化的。正是由于信道的动态特性极其复杂、加之用户对通信信号接收质量的高标准要求,使得通信信号的发送和接收理论与方法的研究充满了挑战性。当这种挑战性受到市场前景的广阔性与市场需求的紧迫性驱动时,相关研究更显得异常活跃。

先进的无线通信技术发展离不开基础理论,其中数学工具发挥着重要的作用。同时新技术推广和应用也离不开一些成熟技术的支撑。为便于读者理解 MIMO 技术中的一些重要概念和方法,以及叙述方便,本章把本书中涉及的一些主要数学知识、基本的通信理论进行了归纳整理,包括线性代数、概率统计和随机过程等基本概念,以及信息传输、信号设计和信号处理中的基本原理和方法。

2.2 矩阵的有关知识

在 MIMO 技术的理论分析和性能评估中,经常会遇到求解矩阵方程问题。矩阵是描述和

求解线性方程组最基本和最有用的数学工具。以下将介绍与 MIMO 技术有关的一些矩阵运算和求解问题。

1. 矩阵特征值问题

(1) 特征值与特征向量

若 $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$, $u \in \mathbb{C}^n$, 且标量 λ 和非零向量 u 满足方程

$$Au = \lambda u, u \neq 0 \quad (2.1)$$

则称 λ 是矩阵 A 的特征值, u 是与特征值 λ 对应的特征向量。特征值与特征向量总是成对出现的, 所以 (λ, u) 又称为矩阵 A 的特征对。虽然特征值可能为零, 但特征向量一定是非零向量。

(2) 广义特征值与广义特征向量

广义特征分解是指两个矩阵组成的矩阵束之间的特征分解问题。若 $A, B \in \mathbb{C}^{n \times n}$, $u \in \mathbb{C}^n$, 且标量 λ 和非零向量 u 满足方程

$$Au = \lambda Bu, u \neq 0 \quad (2.2)$$

则称 λ 是矩阵 A 相对于矩阵 B 的广义特征值, u 是与 λ 对应的广义特征向量^[16]。如果矩阵 B 非满秩, 则 λ 有可能取零或任意值, 有无穷多个特征值。

2. 矩阵的广义求逆问题

对于正方形矩阵 $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$, 若 $\det A \neq 0$, 则必存在唯一的方阵 B 使下式:

$$AB = BA = I$$

成立, 则称 B 是 A 的逆矩阵, 记为 A^{-1} 。但当 A 不是正方形或者 A 虽是正方形但其 $\det A = 0$ (奇异矩阵) 时, 则上述的逆矩阵就不存在。因此必须将正方矩阵的求逆方法推广到长方形矩阵或奇异的正方形矩阵, 得到所谓的广义逆矩阵。

对于任意矩阵 $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$, 如果存在矩阵 $G \in \mathbb{C}^{n \times m}$ 满足 Moore-Penrose 条件^[17]:

$$\begin{aligned} AGA &= A \\ GAG &= G \\ (AG)^H &= AG \\ (GA)^H &= GA \end{aligned} \quad (2.3)$$

则称 G 为 A 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵, 符号 A^+ 表示 A 的广义逆矩阵。

如果 G 不满足式 (2.3) 中全部条件, 只满足其中的一个或几个条件, 则 G 的解不唯一, 每一种解代表一类矩阵。如果 G 同时满足式 (2.3) 中的四个条件, 则此广义逆矩阵具有唯一性。

特别地, 如果 $\mathbb{C}_r^{m \times n}$ 表示秩为 r 的 $m \times n$ 复矩阵的集合, 若 $A \in \mathbb{C}_r^{m \times n}$, 容易验证 $A^+ = (A^H A)^{-1} A^H$ 满足式 (2.3) 中四个条件, 因此它是一种 Moore-Penrose 广义逆矩阵, 由于 $(A^H A)^{-1}$ 处于左乘位置, 也称左伪逆矩阵。若 $A \in \mathbb{C}_r^{m \times n}$, 不难验证 $A^+ = A^H (A^H A)^{-1}$ 也满足式 (2.3) 中所有条件, 因此它是另一种 Moore-Penrose 广义逆矩阵, 由于 $(A^H A)^{-1}$ 处于右乘位置, 也称右伪逆矩阵。

3. 几个特殊矩阵

(1) 正交矩阵与酉矩阵

已知 Q 为一实数正方形矩阵, 且 $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$, 若满足

$$\boldsymbol{Q}^T \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{Q} \boldsymbol{Q}^T = \boldsymbol{I}$$

则称 $\boldsymbol{Q}$ 为正交矩阵。

已知 $\boldsymbol{U}$ 为一复数正方矩阵，且 $\boldsymbol{U} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ ，若满足

$$\boldsymbol{U}^H \boldsymbol{U} = \boldsymbol{U} \boldsymbol{U}^H = \boldsymbol{I}$$

则称 $\boldsymbol{U}$ 为酉矩阵。事实上，正交矩阵就是实的酉矩阵。

酉矩阵具有下列主要性质。

- $\boldsymbol{U}$ 是非奇异的，且 $\boldsymbol{U}^H = \boldsymbol{U}^{-1}$ ；
- $\boldsymbol{U}^H$ 也是酉矩阵；
- $\boldsymbol{U}$ 的列组成标准正交组；
- $\boldsymbol{U}$ 的行组成标准正交组；
- 对所有 $\boldsymbol{x} \in \mathbb{C}^n$ ， $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{x}$ 的 Euclidean 长度与 $\boldsymbol{x}$ 的 Euclidean 长度相同，即 $\boldsymbol{y}^H \boldsymbol{y} = \boldsymbol{x}^H \boldsymbol{x}$ 。

(2) Toeplitz 矩阵

若矩阵 $\boldsymbol{A} = [a_{i,j}] \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 满足

$$a_{i,j} = a_{i-j}, \quad i, j = 1, \dots, n$$

则称 $\boldsymbol{A}$ 为 Toeplitz 矩阵。

该矩阵的特点是主对角线上的各元素彼此相等，平行于主对角线的各对角线上的元素也彼此相等。任何一条对角线取相同元素的矩阵是 Toeplitz 矩阵。

Toeplitz 矩阵的一些性质：

- Toeplitz 矩阵的线性组合仍然为 Toeplitz 矩阵；
- 若 Toeplitz 矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的元素 $a_{i,j} = a_{i-j}$ ，则 $\boldsymbol{A}$ 为对称 Toeplitz 矩阵；
- Toeplitz 矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的转置 $\boldsymbol{A}^T$ 仍为 Toeplitz 矩阵；
- Toeplitz 矩阵的元素相对于交叉对角线对称。

(3) Hermitian 矩阵

若矩阵 $\boldsymbol{A} = [a_{i,j}] \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 满足 $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{A}^H$ ，其中 $\boldsymbol{A}^H = (\boldsymbol{A}^*)^T = [a_{i,j}]^*$ ，符号“*”表示共轭，则

矩阵 $\boldsymbol{A}$ 称为 Hermitian 矩阵；若 $\boldsymbol{A} = -\boldsymbol{A}^H$ ，则 $\boldsymbol{A}$ 称为斜 Hermitian 矩阵或反 Hermitian 矩阵。

Hermitian 矩阵具有以下性质：

- 对所有 $\boldsymbol{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ ，矩阵 $\boldsymbol{A} + \boldsymbol{A}^H$ ， $\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^H$ 和 $\boldsymbol{A}^H\boldsymbol{A}$ 均是 Hermitian 矩阵；
- 若 $\boldsymbol{A}$ 是 Hermitian 矩阵，则 $\boldsymbol{A}^k$ 对所有 $k = 1, 2, 3, \dots$ 都是 Hermitian 矩阵。若 $\boldsymbol{A}$ 还是非奇异的，则 $\boldsymbol{A}^{-1}$ 也是 Hermitian 矩阵；
- 若 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 是 Hermitian 矩阵，则 $\alpha\boldsymbol{A} + \beta\boldsymbol{B}$ 对所有实数 α 和 β 均是 Hermitian 矩阵；
- 对所有 $\boldsymbol{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ ，矩阵 $\boldsymbol{A} - \boldsymbol{A}^H$ 是反 Hermitian 矩阵；
- 若 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 是反 Hermitian 矩阵，则 $\alpha\boldsymbol{A} + \beta\boldsymbol{B}$ 对所有实数 α 和 β 均是反 Hermitian 矩阵；
- 若 $\boldsymbol{A}$ 是 Hermitian 矩阵，则 $j\boldsymbol{A}$ （其中 $j = \sqrt{-1}$ ）是反 Hermitian 矩阵；
- 若 $\boldsymbol{A}$ 是反 Hermitian 矩阵，则 $j\boldsymbol{A}$ 是 Hermitian 矩阵。

(4) Hermitian 矩阵的谱定理

对于已知的 $\boldsymbol{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ ，当且仅当存在一个酉矩阵 $\boldsymbol{A} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 和一个实对角阵 $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 使得