



现代通信信号处理丛书

移动通信中的 空时信号处理

Space-Time Signal Processing for
Mobile Communications

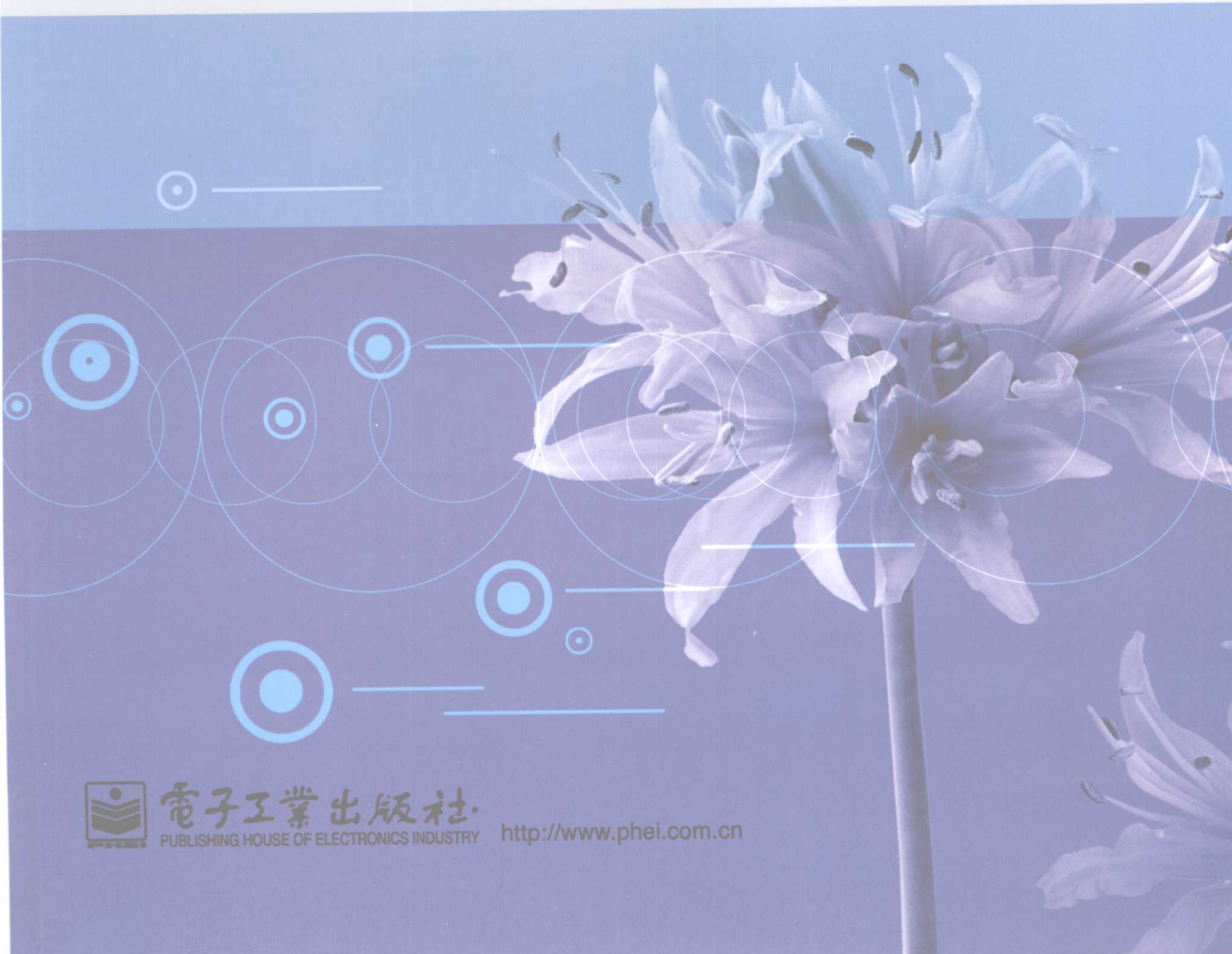
|| 谢显中 雷维嘉 编著 ||



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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



现代通信信号处理丛书

移动通信中的空时信号处理

Space-Time Signal Processing for Mobile Communications

谢显中 雷维嘉 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书探讨移动通信中的空时信号处理,首先介绍了空时信号处理概念和与之密切相关的移动通信发展情况,然后分别探讨了空时信道与空时信道估计、空时信道容量、空时接收处理、空时传输处理和盲空时处理五个方面,基本涵盖了空时信号处理的主要内容和最新进展。

本书适用对象为通信、电子、自动化、计算机及相关专业的研究生、教师、科研和工程技术人员,还可作为研究生第一学期的教学用书。

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

移动通信中的空时信号处理/谢显中等编著. —北京:电子工业出版社, 2008.8

(现代通信信号处理丛书)

ISBN 978-7-121-06433-3

I. 移… II. 谢… III. 移动通信—信号处理 IV. TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 055570 号

责任编辑:王春宁

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

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:16.5 字数:416 千字

印 次:2008 年 8 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:39.00 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。

出版说明

随着通信技术的发展，特别是第三代移动通信技术的发展，宽带无线通信网、高速通信网、新一代信息网技术、光通信技术、个人通信技术和智能信息处理技术等已经进入了一个新的高速发展时期，对各种信号处理技术有了更高的要求。为了适应各种现代通信信息传输网络的技术要求，除了继续采用传统的数字信号处理技术外，还应在此基础上提出新的信号处理技术、算法和模型，以满足应用的需求。

随着通信智能化、大数据量、高速实时的多媒体应用需求的不断增多，处理信号的类型已经不仅仅局限于对常规数据的处理，还要处理大量的语音信号和视频信号等。这类信号的特点是数字化、宽频带、大数据量。信号处理技术在通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术、光信息科学与技术、测控技术与仪器、移动通信、无线通信、卫星通信、光通信、网络通信、智能信息系统以及多媒体通信等领域获得广泛的应用，已经成为应用工程的关键技术之一。而目前，国内市场有关通信应用领域信号处理技术系列化的图书种类还非常匮乏，而市场对这方面的需求量又较大。因此，从这个角度出发，我们依托中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会，在专业委员会专家、教授的大力支持下，组织出版一套面向 21 世纪的《现代通信信号处理丛书》。

这套丛书从我国现代通信信号处理技术应用现状与发展情况出发，以应用为中心，全面、系统地介绍了信号处理领域所涉及的有关关键技术与热点技术，如通信中的智能信号处理、通信中的阵列信号处理、通信中的自适应信号处理、通信中的光信号处理、超宽带技术、通信中的信号检测与估值、量子通信中的量子信号处理、网络信号处理和信号处理算法的实时 DSP 实现等内容。虽然所涉及的领域还不够全面，但我们会一直努力。在确保丛书质量的前提下，不断丰富，不断完善，力求内容的先进性、实用性和系统性，突出理论与应用实践的紧密结合，引导读者将信号处理的原理、技术与应用有机地结合，力争为读者奉献一套可读性与可操作性强的系列丛书。

这套丛书将从 2006 年初陆续推出，主要读者对象是广大从事通信信号处理技术工作的科技研发人员和工程技术人员，也适合高等院校相关学科各专业在校师生及刚刚走上工作岗位的毕业生阅读参考。

在编辑出版这套丛书的过程中，得到了中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会的大力支持，参与编著和审定的各位专家都为此付出了大量的心血，可以说，没有他们的支持和帮助，就没有这套丛书的出版，对此，我们表示衷心的感谢。希望广大读者对这套丛书提出宝贵意见和建议，以便今后我们加以改进，为广大读者奉献更多、更好的优秀通信类图书。联系信箱：wchn@phei.com.cn。

电子工业出版社
通信分社

前 言

在刚刚过去的 2007 年，大家已经注意到我国有这样一些统计信息：移动电话用户数达到 6.3 亿（含小灵通用户 8000 万），且每月以超过 700 万用户的速度递增；固定电话用户数为 2.9 亿（不含小灵通用户 8000 万），且全年减少 800 万用户；移动数据业务用户数约 1.5 亿，且全年增长 1200 万用户；上海、北京、广州、成都等正在实施建设无线城市计划。不仅中国是这样，其他国家大体上也呈上升趋势，且已经持续多年。这些信息说明，移动通信用户正在快速增长，移动通信业务需求正在高速发展，移动通信逐渐成为人们首选的通信手段和通信方式。这也表明，移动通信也必须要更大的系统容量、更高的传输速率、更多的业务类型、更好的服务质量，才能满足社会对移动通信的巨大需求，这是移动通信的光荣使命，但更是严峻的挑战。

除了上面来自社会 and 用户需求的挑战外，与有线通信和其他无线通信（如微波接力通信、无线本地环路 / 接入、卫星通信等）比较，在这些系统中需要克服的问题移动通信也必须解决，同时，移动通信还面临多径传播、用户随机移动、用户量大、频谱有限等各种因素于一体的特殊挑战，这些因素的共同作用使得移动通信系统的信号质量受到严重的衰落和干扰的影响。

克服这些挑战是移动通信理论研究和设备开发所面临的紧要问题，除需要相关的 RF 技术、无线资源调度、移动性管理和移动组网技术发展外，更需要移动通信信号处理技术的突破，为此，发展了一系列通信信号处理技术来解决这些问题，其中空时信号处理技术就是其中最重要的创新之一，本书将系统地讨论移动通信中的空时信号处理技术。

空时处理能很好地结合单时域处理和单空域处理各自的优势，充分地利用信号和信道的空间与时间特性，具有同时抑制 CCI 和 ISI、改善接收信噪 / 信干比、提高天线阵列处理 / 分集增益、增加频谱效率和系统容量、扩展小区覆盖范围等优点。从算法与实现的角度看，空时处理技术包括空时信道与空时信道估计、空时信道容量、空时接收处理、空时传输处理、盲空时处理五个方面的研究内容。空时信道与空时信道估计是空时处理的基础，但研究难度较大，所获结果不太多。由于 MIMO 技术的促进，近年来，空时信道容量研究引起高度重视，已获得部分成果，但还有很多工作要做。空时接收处理包括空时均衡、空时 RAKE 接收、空时多用户检测等，目前研究成果非常丰富。空时传输处理可以减少接收机的处理复杂度和提高系统性能，是目前通信信号处理的研究热点之一，但刚刚起步。盲空时处理不需要发送附加的训练序列和导频信号，可以提高传输效率，是一个很有吸引力的研究方向。

本书得以顺利出版得到不少专家的帮助，在此，感谢电子工业出版社王春宁博士和竺南直博士的帮助和大力支持；作为通信信号处理丛书之一，感谢中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会，特别是专委会主任郑宝玉教授的鼓励和帮助；感谢国家自然科学基金项目（60572089）对本书出版的资助。

鉴于时间仓促，作者水平有限，加之空时信号处理技术的发展日新月异，书中难免有疏漏甚至不当之处，恳请读者批评指正。

编著者
2008 年 1 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 空时信号处理概念	(1)
1.1 移动通信的发展	(1)
1.2 一维通信信号处理的局限	(4)
1.3 空时信号处理概念	(5)
1.4 本书内容安排	(6)
参考文献	(7)
第 2 章 空时信道与信号模型	(9)
2.1 移动通信信道的基本特征	(9)
2.1.1 阴影衰落	(9)
2.1.2 多径效应与小尺度衰落	(10)
2.2 空时信道	(13)
2.2.1 SISO 信道	(13)
2.2.2 SIMO 信道	(13)
2.2.3 MISO 信道	(14)
2.2.4 MIMO 信道	(15)
2.2.5 多用户 ST 信道	(17)
2.3 离散空时信号模型	(18)
2.3.1 SISO 离散信号模型	(18)
2.3.2 SIMO 离散信号模型	(20)
2.3.3 MISO 离散信号模型	(21)
2.3.4 MIMO 离散信号模型	(21)
2.3.5 信道矩阵的奇异值分解	(23)
参考文献	(23)
第 3 章 空时信道容量	(25)
3.1 概述	(25)
3.2 信道系数确定的单用户空时信道的容量	(25)
3.2.1 发射机不知信道状态接收机确知信道状态	(25)
3.2.2 发射机和接收机都确知信道状态	(28)
3.3 信道系数随机时单用户空时信道的容量	(30)
3.3.1 在 M 足够大的情况下 H_w 信道的容量	(30)
3.3.2 信息速率的统计描述	(30)
3.4 单用户频率选择性空时信道的容量	(33)
3.5 空间相关下的信道模型与容量	(35)

3.5.1	发射机不知信道状态接收机确知信道状态	(35)
3.5.2	发射机和接收机都不知信道状态	(38)
3.6	多用户空时信道的容量	(40)
3.6.1	发射机和接收机都已知信道状态	(40)
3.6.2	发射机不知信道状态而接收机确知信道状态	(42)
参考文献		(43)
第 4 章	空时信道估计	(45)
4.1	空域和时域处理的等效性	(45)
4.2	空时二维谱估计	(47)
4.3	联合角度—时延估计	(50)
4.4	时延和空间特征估计	(54)
4.5	结合 DOA 的空时信道估计	(60)
4.6	通用 MIMO 信道估计	(65)
参考文献		(68)
第 5 章	空时均衡技术	(71)
5.1	概述	(71)
5.2	空时 MLSE 均衡	(72)
5.3	空时 MMSE 均衡	(74)
5.4	空时 ZF 均衡和性能比较	(76)
5.5	空时 DFE 均衡	(78)
5.6	基于子空间的算法	(82)
5.7	空时两段处理方法	(85)
参考文献		(89)
第 6 章	空时 RAKE 接收机和多用户检测	(93)
6.1	概述	(93)
6.2	基于波束成形的空时 RAKE 接收机	(94)
6.3	基于匹配滤波的空时 RAKE 接收机	(97)
6.4	基于 RLS-Kalman 算法的空时 RAKE 接收机	(101)
6.5	最优空时联合检测	(103)
6.6	线性空时联合检测	(108)
6.7	空时干扰抵消	(109)
参考文献		(113)
第 7 章	盲空时处理	(117)
7.1	概述	(117)
7.2	盲空时信道估计	(118)
7.2.1	基于子空间方法的盲信道估计	(118)
7.2.2	有色信道环境下的去相关盲估计方法	(122)

7.2.3 基于线性预测的盲信道估计	(127)
7.3 盲空时均衡	(131)
7.3.1 基于恒模的盲空时均衡器	(131)
7.3.2 基于盲波束成形的盲自适应均衡	(133)
7.3.3 基于序贯蒙特卡罗法的盲自适应均衡	(136)
7.4 盲空时 RAKE 接收机	(139)
7.4.1 信号模型	(139)
7.4.2 盲空时 RAKE 接收机设计	(140)
7.4.3 仿真实例及性能分析	(141)
7.5 盲空时联合检测	(142)
7.5.1 同步 CDMA 中盲空时联合检测器	(142)
7.5.2 异步多径 CDMA 中盲空时联合检测器	(144)
参考文献	(148)

第 8 章 空时传输分集 (153)

8.1 概述	(153)
8.2 正交空时分组编码	(154)
8.2.1 正交空时分组码的原理	(154)
8.2.2 Alamouti 空时分组码	(155)
8.2.3 基于正交设计的空时分组码	(158)
8.3 差分空时分组码	(159)
8.3.1 差分编码	(159)
8.3.2 差分解码	(161)
8.4 空时 Trellis 码	(163)
8.4.1 慢衰落信道下空时 Trellis 码的设计准则	(163)
8.4.2 快衰落信道下空时 Trellis 码的设计准则	(164)
8.4.3 空时 Trellis 码的编码方案	(165)
8.4.4 空时 Trellis 码的译码和性能	(167)
8.5 空时编码在 3G 中的应用	(169)
8.5.1 空时编码在 WCDMA 系统中的应用	(169)
8.5.2 空时编码在 cdma2000 系统中的应用	(170)
8.5.3 空时格码在 TD-SCDMA 系统中的应用	(170)
8.6 空时协作分集	(176)
8.6.1 协作分集的原理	(176)
8.6.2 协作传输方式	(177)
8.6.3 协作分集的优点及问题	(181)
参考文献	(183)

第 9 章 空分复用 (187)

9.1 概述	(187)
9.2 空分复用方法	(188)

9.3	空分复用接收技术	(190)
9.3.1	迫零 (ZF) 检测算法	(191)
9.3.2	最小均方误差 (MMSE) 检测算法	(192)
9.3.3	最大似然 (ML) 检测算法	(194)
9.3.4	基于 QR 分解的串行干扰反馈抵消	(195)
9.3.5	性能仿真	(197)
9.4	空时传输分集和空分复用的选择	(201)
9.4.1	基于差错概率的空时编码传输方案选择	(201)
9.4.2	空时传输分集和空分复用的折中	(202)
9.4.3	空时传输分集和空分复用的结合	(203)
	参考文献	(205)
第 10 章	空时传输预处理	(209)
10.1	概述	(209)
10.2	空时预 RAKE	(211)
10.2.1	Pre-RAKE 技术原理	(211)
10.2.2	Pre-RAKE 仿真与讨论	(212)
10.3	空时联合传输	(214)
10.3.1	空时联合传输的优点	(214)
10.3.2	JT 的基本原理	(215)
10.3.3	联合传输的简化算法	(218)
10.3.4	JT 在 TD-SCDMA 系统中的应用	(224)
10.4	空时线性预均衡和预编码	(229)
10.4.1	一般的线性发送系统	(229)
10.4.2	基于匹配滤波器的预编码 (TxMF)	(230)
10.4.3	发送迫零预编码 (TxZF)	(231)
10.4.4	发送维纳/MMSE 预编码 (TxWF/TxMMSE)	(231)
10.4.5	线性预编码性能比较	(233)
10.5	空时非线性预均衡和预编码	(234)
10.5.1	“脏报纸”预编码 (DPC)	(234)
10.5.2	THP 预编码	(236)
10.5.3	网格预编码 (Trellis 预编码)	(239)
10.5.4	非线性发送迫零预编码 (TxNZF)	(241)
10.5.5	格型简化辅助预编码 (LRAP)	(243)
	参考文献	(246)

第1章 空时信号处理概念

1.1 移动通信的发展

现代无线通信起源于 19 世纪 Hertz 的电磁波辐射试验,使人们认识到电磁波和电磁能量是可以控制发射的,其后 Marconi 的跨大西洋无线电通信证实了电波携带信息的能力,而理论基础由 Maxwell 的电磁波方程组奠定。

但是真正的移动通信技术的发展应从 20 世纪 20 年代开始,其代表是工作于 2 MHz 的美国底特律警察局使用的专用移动通信(车载)系统。20 世纪 30 年代初,移动发射机出现,第二次世界大战极大地促进了移动通信的发展,各国武装部队采用了大量的无线电通信系统。第二次世界大战结束后开始了建立公众移动通信系统阶段,1946 年美国在圣路易斯建立了世界第一个公用汽车电话网,其后加拿大、前西德、荷兰等国陆续开设了公用汽车电话业务,采用大区制,可以实现人工交换与公众电话网的接续。20 世纪 60 年代中期开始了自动交换与公众电话网的接续,并且由于频率合成器的出现,信道间隔缩小,信道数目增加。到目前为止,公众陆地移动通信经历了从第一代模拟移动通信系统到第二代数字移动通信系统再到第三代准宽带移动通信系统阶段,正在向第四代宽带移动通信系统发展。

第一代模拟移动通信系统的发展大致从 20 世纪 70 年代中期到 90 年代初期,主要是解决用户增加而频道有限的情况下,如何提高频谱利用率的问题。Bell 实验室提出了蜂窝系统概念,进而发展了小区制大容量系统,这就是目前还在商用的第一代模拟移动通信系统。典型代表有:美国的 AMPS、英国的 TACS、北欧的 NMT-450/900、德国的 C-450/900 和日本的 NAMTS 等。存在的主要问题是:各系统间没有公共接口,频谱利用率低,无法与固定网向数字化推进相适应。

为了解决第一代模拟移动通信系统存在的缺陷和市场对移动通信容量的需求问题,20 世纪 80 年代初期,欧洲电信管理部门成立了一个被称为 GSM(移动特别小组)的专题小组研究和发展泛欧各国统一的数字移动通信系统技术规范。1988 年确定了采用以 TDMA 为多址技术的主要建议与实施计划,1990 年开始试运行,然后进行商用,到 1993 年中期已经取得相当成功,吸引了全世界的注意,现已成为世界上最大的移动通信网。美国于 1990 年确定了采用以 TDMA 为多址技术的数/模兼容的数字移动通信系统 D-AMPS(IS-54/136);1992 年美国 Qualcomm 公司发展了基于 CDMA 多址技术的 IS-95 数字移动通信系统,该系统不仅数/模兼容,而且系统容量是模拟系统的 20 倍,数字 TDMA 系统的 4 倍,IS-95 现已成为仅次于 GSM 的第二大移动通信网。日本也于 1993 年发展了自成一体采用 TDMA 为多址技术的数字移动通信系统 JDC,但该系统仅在日本国内使用。虽然第二代数字移动通信系统较第一代模拟移动通信系统有很大的改进,但是也存在许多问题:没有统一的国际标准,频谱利用率较低,不能满足移动通信容量的巨大要求,不能提供高速数据业务,不能有效地支持 Internet 业务。

为了适应数据业务、多媒体业务和移动 Internet 业务的发展需要,第三代移动通信系

统（简称 3G）于 1985 年由 ITU（国际电信联盟）首次提出，当时称为未来公众陆地移动通信系统（FPLMTS）。1991 年 ITU-R 成立了 TG8/1 任务组，负责 FPLMTS 标准的制定工作；1992 年 ITU 召开了世界无线电行政大会（WARC），对 FPLMTS 的频谱进行了划分，分配了 1885~2025 MHz 和 2110~2200 MHz 共 230 MHz 的频段给 FPLMTS。1994 年 ITU-T 和 ITU-R 正式携手研究 FPLMTS，ITU-T 负责网络方面的工作，ITU-R 负责无线接口方面的标准化工作。1996 年更名为 IMT-2000，意思是该系统使用 2000 MHz 左右频段，提供业务速率高达 2000 kbps，计划在 2000 年左右试运行。与第二代数字移动通信系统相比有下面特点^[2]：

（1）系统的国际性。提供全球无缝覆盖和漫游，世界范围设计的高度一致性。

（2）业务的多样性。提供语音、数据和多媒体业务，车载通信速率为 144 kbps；步行通信速率为 384 kbps；室内通信速率为 2 Mbps。

（3）高质量的业务。满足通信质量能达到与固定网相比拟的高质量业务要求。

（4）高度的灵活性。按需分配带宽，支持大范围、可变速率的信息传送。

（5）频谱利用率高、通信容量大。

（6）核心网与无线接入独立发展。

（7）袖珍、多频、多模和通用移动终端。

（8）满足通信个人化的要求。

（9）系统初始配置能充分利用第二代数字移动通信系统设备和设施，可以实现平滑升级。

（10）低的费用。包括设备和服务两方面。

1998 年 6 月 30 日，ITU 向各个地区、国家、公司和标准化组织共征集到 10 个 IMT-2000 无线接口技术方案，包括欧洲的 UTRA-FDD、UTRA-TDD 和 E-DECT；北美的 cdma2000、UWC-136 和 WIMS；日本的 WCDMA；韩国的 CDMA1 和 CDMA2；中国的 TD-SCDMA，共计 10 个公众陆地移动通信系统标准。然后开始了对 10 个候选标准的技术评估和融合工作。2000 年 5 月，ITU 全会通过了 5 个正式的第三代移动通信系统（IMT-2000）无线接口标准：IMT-DS（即 WCDMA/ UTRA-FDD）、IMT-MC（即 cdma2000）和 IMT-TD（包括 UTRA-TDD 作为高码片速率选项和 TD-SCDMA 作为低码片速率选项）、IMT-SC（即 UWC-136）和 IMT-FT（即 E-DECT）。

其中 UWC-136 和 E-DECT 将只作为区域性标准，用于 IS-136 和 DECT 系统的升级。被公认为世界各国会在商用中采用的主流标准为：WCDMA、cdma2000 和 TD-SCDMA 三种^[3]。三种主流标准都采用了 CDMA 技术，但 WCDMA 和 cdma2000 并没有本质上的差别，基本上是 IS-95 技术的改进；而 TD-SCDMA 则是新的，采用了 TDD 双工方式、基于智能天线的同步 CDMA 技术。相对其他第三代移动通信标准，TD-SCDMA 具有更高的频谱利用率和更低的成本。我国在第一代和第二代移动通信系统中都是空白，现在提出的 TD-SCDMA 系统能作为国际第三代移动通信系统的主流标准，是我国移动通信历史上的重大突破，标志着我国在移动通信技术领域已经进入世界先进行列。

到 2007 年 12 月底，全世界已有 60 多个国家的 125 个运营商开始 3G 系统的商用和预商用，cdma2000 1X 用户数约 2 亿；cdma2000 EV-DO 用户数为 8000 多万；WCDMA 用户数已超过 1 亿。TD-SCDMA 第三代移动通信系统已形成完整的产业链，在中国北京、上海、广州等 10 个城市建立了规模预商用网，并在韩国建立了现场试验网。目前，提供 2G 设备的公司基本都可以提供性能稳定的 3G 设备，商用 3G 手机已超过 400 多款，还有大量的笔记本电脑使用的数据卡。3G 手机的性能和售价已与初期 GPRS 手机相当，并且功能更加强大，大部分

3G 手机都具有 PDA、照相机 / 摄像机、收音机、MP3/MP4、U 盘和蓝牙等功能，3G 手机就是一个多功能通信器^[4]。可以说 3G 技术已相当成熟，3G 正在向我们走来。

WCDMA 和 TD-SCDMA 系统已经发布了从 Release99 (基于 GSM 的过渡版本)、Release 4 (正式 3G 版本)、Release 5 (引入高速下行分组接入 HSDPA 和 IP 多媒体子系统 IMS 等)、Release 6 (引入高速上行分组接入 HSUPA 和多媒体广播多播业务 MBMS 等) 和 Release 7 (发展增强高速分组接入 E-HSPA 和多天线系统 MIMO 等) 五个标准版本，并与第二代的 GSM 移动通信系统标准结合成为一个统一的整体，目前正在发展基于 OFDM 技术的第三代移动通信长期演进计划 (LTE) 标准。如果我们把引入 HSDPA、HSUPA、IMS 和 MBMS 等技术的第三代移动通信系统称为 3.5G 移动通信系统 (3G Plus, 改进 3G 系统)，那么增加 E-HSPA 和 MIMO 技术的第三代移动通信系统也称为 3.75G 移动通信系统 (Enhanced 3G/E3G, 增强 3G 系统)，则第三代移动通信长期演进计划发展的移动通信系统 (LTE) 可以称为 3.9G 移动通信系统 (Super 3G/S3G, 超 3G 系统)。超 3G 系统将来还会向第四代移动通信系统 (4G) 发展^[5]。

移动通信系统的发展和演进大致可以用图 1-1 描述。通信和交通在英文中是同一个单词 “Communication”，把它们做类比是很有意思的^[1]。交通是运输各种人们所需要交换的货物，为了运输货物，人类在不断地建设各种路网，包括公路、铁路、水路和航空等。通信是传递人们需要交流的各种信息，为了传递信息，人类在不断地建立各种通信系统和网络，包括移动通信系统、宽带本地接入网、固定无线接入 / 无线环路系统、卫星通信系统、广播 / 电视系统、光纤通信系统、有线接入系统 (双绞线、同轴线和 xDSL) 等。因此，可以把各种通信系统和网络比做路网。若将移动通信比做公路，则第一代移动通信系统就是普通公路，给人们开辟了移动通信的崭新天地；第二代移动通信系统就是一般高等级公路，让普通人享受到移动通信的方便和益处；第三代移动通信系统是准高速公路，可以提供基本的多媒体和移动 Internet 业务；第四代移动通信系统就是高速公路，可以在移动网络上提供今天几乎所有固定网络所能提供的业务。随着人们的物质和文化生活水平的进一步提高，对移动通信业务的需求还会越来越大，第二代移动通信系统正在被第三代移动通信系统取代，必将快速向第四代移动通信系统发展。

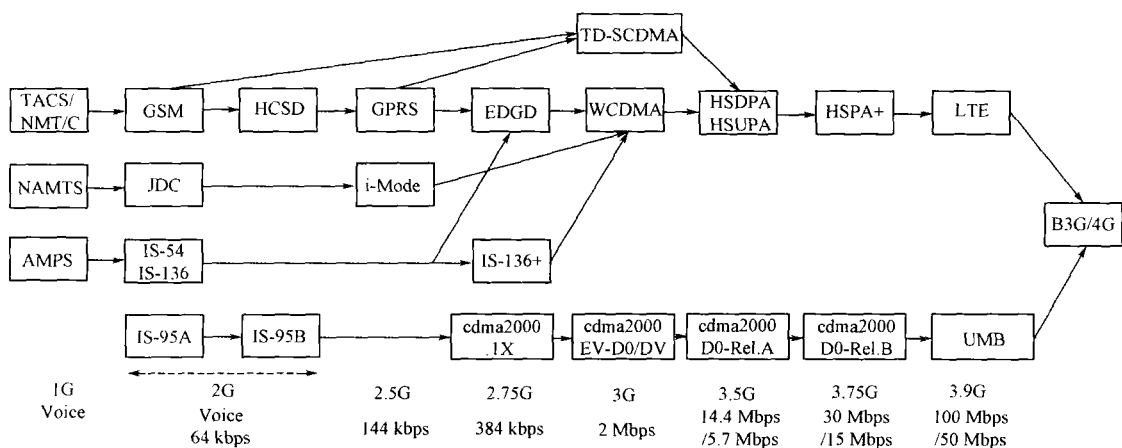


图 1-1 移动通信系统的发展和演进

1.2 一维通信信号处理的局限

与有线通信和其他无线通信（如微波接力通信、无线本地环路 / 接入、卫星通信等）比较，移动通信面临的主要挑战是：集多径传播、用户随机移动、用户量大、频谱有限等各种因素于一体，这些因素的共同作用使得移动通信系统的信号质量受到严重的衰落和干扰的影响，从而需要减少对信号恶化和提高信号质量的技术来解决这些问题。

多径传播使传输信号在时间和空间上产生扩散，导致了接收信号的频率选择性衰落（时间扩散）和空间选择性衰落（空间扩散），引起各路径信号的相互干扰。用户的随机移动，特别是高速移动，使传输信号在频域上产生 Doppler（多普勒）频移，导致接收信号在时域上的时间选择性衰落；用户的随机移动也产生远近效应，使得离基站近的用户强信号干扰甚至阻塞离基站远的用户的弱信号。用户量大，要求系统的容量也要大，但这会产生多用户（多址）干扰。由于频谱资源有限，要求移动通信必须采用抑制各种干扰和衰落能力强，同时频谱效率高的技术。

克服这些挑战是移动通信理论研究和设备开发所面临的严重问题，为此，发展和增加了一系列通信信号处理技术来解决这些问题。

广义地讲，通信信号处理包括通信过程中对通信信号的所有处理和操作技术，但由于传统习惯和相对独立性，一般在通信信号处理中不包括调制、双工方式、多址与复用方案、信源编码、信道编码、密码、资源分配管理 / 控制、切换和移动性管理、网络相关的交换和信令等技术。目前移动通信系统采用的主要信号处理技术总结如下：

第一代移动通信系统：采用滤波、同步、接收分集、频率再用和跳频等信号处理技术^[6]；

第二代移动通信系统：除继续采用滤波、同步、接收分集、频率再用和跳频等技术外，为改善接收信号质量和提高系统容量，还增加了信道估计、均衡、扩频、RAKE 接收和小区扇区化等信号处理技术^[7]；

第三代移动通信系统：在第二代移动通信系统采用的信号处理技术基础上，引入了多用户检测^[8]（包括联合检测、干扰抵消）、智能天线或阵列天线^[9]、传输分集^[10]（包括空时传输分集、时间切换传输分集、空时扩频传输分集、正交传输分集、选择式传输分集和传输分集天线阵列等），以及多载波 CDMA^[11]等信号处理技术。

在目前正在研究和标准化的 LTE、UMB 和 B3G/4G 系统中^[12, 13]，除了第三代移动通信系统的信号处理技术外，还采用了 MIMO 技术^[14]、OFDM/OFDMA 技术^[15]、空时传输处理^[16]和分布式天线^[17]等信号处理技术。

可见，移动通信和信号处理是密不可分的，移动通信中包括了大量的信号处理技术，同时也正是移动通信的蓬勃发展促进了这些信号处理技术的大力发展；反之，信号处理技术解决了移动通信所面临的一些挑战和问题，改善了移动通信的性能和容量。

从每一代移动通信系统所采用的信号处理技术可以看出这样一些趋势：从早期的时域或频域处理向空域处理发展；从单纯一维处理向空时处理、空时频处理等多维处理发展；从单用户处理到多用户处理发展；从单天线向多天线和分布式天线的处理发展；从单载波向多载波处理发展；从面向接收优化为主向传输接收联合优化处理发展。本书主要讨论移动通信中的空时处理技术。

在上面介绍的移动通信中采用的通信信号处理技术中，频域滤波、频域同步、频域信道

估计、频域均衡、扩频、OFDM 和跳频等可以视为频域处理技术,除个别地方涉及外,本书不单独讨论频域处理技术。时域滤波、时域同步、时域信道估计、时域均衡、RAKE 接收和多用户检测等可以看做单时域处理技术;而智能天线、阵列天线、分布式天线、频率再用和小区扇区化等可以看做单空域处理技术。

从干扰抑制的角度看,单时域处理技术对时域引起的干扰(如码间串扰)的效果较好,而对同道干扰的抑制很有限;单空域处理技术对付同道干扰是相当有效的,但对受多径角度扩展影响的码间串扰不理想^[18]。另外,智能天线和阵列天线等空域处理技术还会受到天线数和窄带假设的限制。这样,结合空域处理与时域处理是必然的选择,由此产生了空时处理技术。

1.3 空时信号处理概念

将智能天线和阵列天线技术引入现代移动通信,实质上是引入了空间维的信息,增加了消除干扰的能力。对空域和时域信息的充分利用,可以提高接收机的检测性能和改进发射机的信号设计。空时处理能很好地结合单时域处理和单空域处理各自的优势,充分地利用信号和信道的空间与时间特性,成为近年来通信领域和信号处理领域共同研究的热点。与单空间处理和单时间处理比较,空时处理具有如下优势^[19]:

- 同时抑制同道干扰(CCI)和码间串扰(ISI);
- 改善接收信噪/干比;
- 提高天线阵列处理和分集增益;
- 增加频谱效率和系统容量;
- 增加小区覆盖范围。

从算法与实现的角度看,空时处理技术包括空时信道与空时信道估计、空时信道容量、空时接收处理、空时传输处理和盲空时处理五个方面的研究内容^[20]。但目前对盲空时处理的研究主要集中在空时接收处理方面,因此,本书将其放在空时接收处理部分讨论,这样就形成了本书的空时处理技术4个方面的内容体系。空时信道与空时信道估计是空时处理的基础。由于MIMO技术的促进,空时信道容量研究近年引起高度重视,已获得部分成果,但还有很多工作要做。空时接收处理包括空时均衡、空时RAKE接收和空时多用户检测,目前研究成果非常丰富。空时传输处理可以减少接收机的处理复杂度和提高系统性能,是目前通信信号处理的研究热点之一,但刚刚起步。盲空时处理不需要发送附加的训练序列和导频信号,可以提高传输效率,是一个很有吸引力的研究方向。

空时处理技术具有广泛的应用领域,除应用于移动通信系统外,还应用于卫星通信、无线本地环路/接入、无线局域网(WLAN/WiFi)、无线城域网(WMAN/WiMAX),以及在雷达、声纳、导航、水声通信、地下物探、生物医学信号、地震信号处理等系统中起重要作用,但本书介绍的重点是在移动通信系统中的应用,相关模型的分析均以此为基础,但原理是相同的,简单修改即可应用到其他系统。

空时处理技术与移动通信采用的多址方式有关^[21],在TDMA中,各用户信号在时间或频率上严格分离,CCI主要是由于频率再用产生的,当距离较远时很弱,但ISI较严重。对于CDMA,由于各用户信号可以在相同的频率和时间传输,系统中的CCI即是多用户/多址干扰(MAI),一般CCI较严重,但ISI的影响较小。若CDMA的功率控制和同步较好,则

每个 CCI 并不太强。因此, 在 CDMA 系统中主要采用空时 RAKE/匹配滤波接收、空时联合检测 (JD) 和空时干扰抵消 (IC) 等空时处理方案, 而 TDMA 系统中较多采用空时均衡技术。

双工方案也对空时处理技术产生影响^[22, 23], 在 TDD 系统中, 基站到用户设备的上、下行链路信道都用同样的频率, 上、下行链路的传播特性基本相同, 这样上、下行信道的信道参数也基本相同, 可以将基站上行接收估计的信道冲激响应直接应用于下行方向的发送处理, 反之亦然, 即上、下行信道具有互惠性。FDD 系统中, 另一方主要通过反馈方式获得对方估计的信道信息。一般, 空时传输预处理技术需要知道传输信道的传播特性, 在 TDD 系统中由于上、下行信道的互惠性, 这是很容易实现的。对于 FDD 系统, 则需要增加反馈信道和其他复杂的处理才能获得, 同时性能也不如 TDD 系统好。

1.4 本书内容安排

本书系统探讨移动通信中的空时信号处理问题, 其内容按照空时信号处理技术的 4 个方面展开, 具体结构如图 1-2 所示。

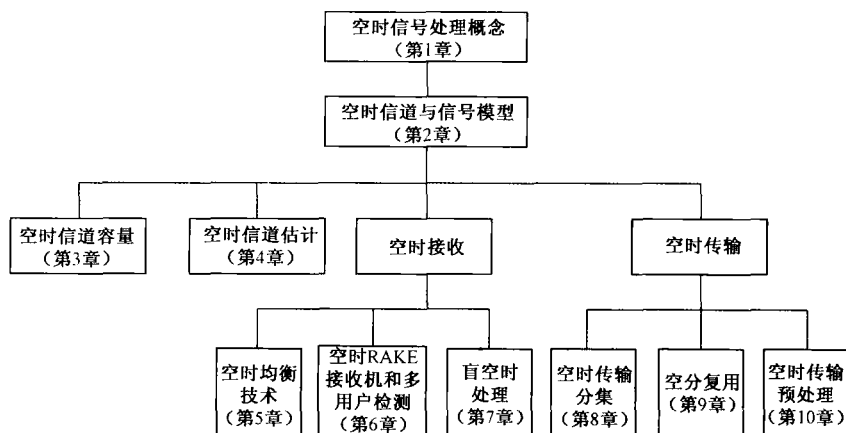


图 1-2 空时信号处理内容与章节结构

第 1 章简单讨论了空时信号处理概念和与之密切相关的移动通信发展情况; 第 2 章是空时信道和信号模型, 主要包括空时信道、空时信号模型等相关内容, 这部分形成了全书其他章节的基础。

空时信道容量是空时信号处理技术的一个重要方面, 近年来受到高度重视, 在第 3 章中, 从信道系数确定的单用户空时信道的容量、信道系数随机时单用户空时信道的容量、单用户频率选择性空时信道的容量、空间相关下的信道模型与容量、多用户空时信道的容量等方面系统描述和分析了空时信道容量潜力。

空时信道估计一直是空时信号处理技术的核心问题之一, 第 4 章探讨了典型的空时信道估计问题, 主要涉及空域和时域处理的等效性、空时二维谱估计、联合角度-时延估计、时延和空间特征估计结合 DOA 的空时信道估计, 以及通用 MIMO 信道估计等。

第 5 章至第 7 章是空时接收处理部分, 属于空时信号处理技术中比较经典的部分, 但始终是空时信号处理技术研究的重要方向。第 5 章论述了空时 ZF 均衡 (ST ZF)、空时 MMSE

均衡 (ST MMSE) 和空时 MLSE 均衡 (ST MLSE) 等空时均衡技术的内容, 第 6 章探讨了空时匹配滤波 (ST MF)、空时 RAKE (ST RAKE)、空时联合检测 (ST JD) 和空时干扰抵消 (ST IC) 等 CDMA 系统的空时接收方案, 第 7 章针对盲空时接收处理专门讨论, 包括盲空时信道估计、盲空时检测和盲空时均衡内容。

从第 8 章至第 10 章构成空时传输处理部分, 这些是近年来空时信号处理技术的研究热点。第 8 章是空时传输分集技术, 包括空时分组编码、空时 Trellis 码、差分分组码、空时协作分集, 以及空时编码在 3G 中的应用等。空时复用方案, 以及空时复用和空时传输分集的折中问题被安排在第 9 章进行。第 10 章探讨了当发送端具有信道信息时的空时传输预处理技术, 涉及空时预 RAKE、空时联合传输、空时线性预均衡和预编码、空时非线性预均衡和预编码内容。

参 考 文 献

- [1] 谢显中等. 基于 TDD 的第四代移动通信技术. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] 谢显中, 王新梅. 第三代移动通信的空中接口. 移动通信, 1999, Vol.23(1): 27~31.
- [3] 谢显中. TD-SCDMA 第三代移动通信技术. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [4] 谢显中, 聂能. 第三代移动通信手机特点与设计. 数字通信, 2000, Vol.(10): 89~90.
- [5] 谢显中. 第三代移动通信的长期演进计划方案. 电信科学, 2006, Vol.(2): 1~4.
- [6] 卢尔瑞, 孙儒石. 移动通信工程. 北京: 人民邮电出版社, 1998.
- [7] 郭梯云, 杨家玮, 李建东. 数字移动通信. 北京: 人民邮电出版社, 2000.
- [8] S.Verdu. Multiuser detector. University of Cambridge Press, 1998.
- [9] J.C.Liberti and T.S.Rappaport. Smart antennas for wireless communications. Pearson education Inc., Prentice hall PTR, 1999.
- [10] 吴伟陵. 移动通信中关键技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- [11] Hsiao-Hwa Chen and M.Guizani. Next generation wireless systems and networks. John Wiley and Sons Ltd, 2006.
- [12] 3GPP TS 36.211. Physical channels and modulation, Nov. 2007.
- [13] 3GPP2 TSG-C C.S0084-001. Physical Layer for Ultra Mobile Broadband (UMB) Air Interface Specification. Sept. 2007.
- [14] Mohinder Jankiraman. Space-Time Codes and MIMO Systems. ARTECH HOUSE, INC., 2004.
- [15] 佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [16] 海平, 谢显中. 联合发送技术及其算法简化. 通信学报, 2003, Vol.24(11A): 93~100.
- [17] Xiao-Hu You, Guoan Chen, Ming Chen, and Xiqi Gao. Toward Beyond 3G: The FuTURE Project in China, IEEE Communications Magazine, January 2005: 70~75.
- [18] 张贤达, 保铮. 通信信号处理. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [19] A.Paulraj, R.Nabar and D.Gore. Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge University Press, 2003.
- [20] 谢显中. 移动通信中的空时编码技术与接收机设计. 西安电子科技大学博士学位论文, 2000 年 9 月.