



现代通信信号处理丛书

通信中的 智能信号处理

Intelligent Signal Processing
for Communications

焦李成 慕彩红 王伶 著
Jiao Licheng Mu Caihong Wang Ling



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

通信中的智能信号处理

Intelligent Signal Processing for Communications

焦李成 慕彩红 王 伶 著

Jiao Licheng Mu Caihong Wang Ling

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书着重介绍智能信号处理技术在移动通信关键技术(如多用户检测、智能天线、高性能的接收机等技术)中的应用。全书共分16章,第1章为绪论;第2到第15章分别介绍自适应子波神经网络、支撑矢量机、递归神经网络、独立分量分析算法、最大特征向量学习机、Volterra级数、多子波神经网络、基于正交码的多子波、多子波CDMA、基于子波包变换的CDMA和子波包优化、免疫算法、免疫策略RBF网络、免疫克隆算法、量子进化算法等智能方法在DS-CDMA移动通信系统中的应用;第16章简单介绍了智能技术在MIMO通信系统中的应用现状和前景。

本书内容丰富,方法新颖,反映了智能通信信号处理的新理论、新技术、新方法和新应用。本书也是作者在智能信号处理和通信信号处理领域多年教学与科研工作的积累和总结。

本书条理清晰,论证缜密,理论联系实际,可以指导读者尽快地学习和跟踪智能通信信号处理的最新进展。本书适用于智能信息处理、信号与信息处理、通信与信息系统及相关专业的研究生、工程师和科研人员阅读和参考。

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

通信中的智能信号处理/焦李成,慕彩虹,王伶著. —北京:电子工业出版社,2006.5

(现代通信信号处理丛书)

ISBN 7-121-02455-1

I. 通… II. ①焦…②慕…③王… III. 通信系统—信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第031402号

责任编辑:王春宁

印 刷:北京天宇星印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:20 字数:500千字

印 次:2006年5月第1次印刷

印 数:4000册 定价:32.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010) 68279077。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。

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,但我们会一直努力地把此套丛书很好地维护下去。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
通信与电子技术图书事业部

前言

19 世纪初期, 丹麦物理学家奥斯特和英国物理学家法拉第发现了电磁感应现象, 麦克斯韦以数学的方式将他们的研究成果表达出来, 并将电磁感应理论推广到了空间; 1864 年, 麦氏发表了电磁场理论; 1887 年, 赫兹的试验证明, 电磁能量可以越过空间进行传播, 这个具有划时代意义的试验, 不仅证明了麦克斯韦理论的正确性, 还直接导致了无线电技术的诞生。可以说, 它是整个移动通信的发源点, 从这时开始, 人类进入了无线通信的新纪元。1897 年 5 月 18 日, 马可尼用自己的无线电传送和接收设备, 在布里斯托尔海峡进行无线电通信取得成功, 把信息传播了 12km, 揭开了无线通信蓬勃发展的序幕。

随着最早的模拟移动电话在 20 世纪 80 年代的投入使用, 以无线通信为基础发展起来的移动通信便以惊人的速度飞速发展。预计到 2007 年左右, 全球的移动电话用户数将达到 20 亿。随着 Internet 深入我们的生活, 移动通信和固定无线接入对高速数据业务提出了强烈需求。按照国际电信联盟在 IMT-2000 框架中颁布的指导原则: 3G 设备在室内应具有 2Mb/s 的传输速率, 4G 标准则希望支持 20Mb/s 的传输速率。高速业务和用户数的激增使得对频谱的需求量急剧增加, 而频谱资源却是有限的, 因此追求尽可能高的频谱利用率成为无线通信倍受关注的课题。

4G 系统对接收机提出了特别高的要求。按照 Shannon 定理, 对于 3G 系统, 如果信道带宽为 5MHz, 而数据速率为 2Mb/s, 则所需的 SNR 为 1.2dB; 而对于 4G 系统, 要在 5MHz 的带宽上传输 20Mb/s 的数据, 则所需要的 SNR 为 12dB。可见, 对于 4G 系统, 由于速率很高, 因此对接收机的性能要求也要高得多。随着多用户检测技术的不断发展, 多用户检测器将会在 4G 系统的基站和终端中得到应用。多用户检测器可以提高系统的容量, 因此将是 4G 系统必然采用的技术。随着多用户检测器研究的不断深入, 各种高性能算法中的不是特别复杂的多用户检测器算法不断被提出来, 因此在实际系统中采用多用户检测技术将是切实可行的。

多用户检测 (Multiuser Detection, MUD) 是抑制多址干扰、对付“远近”效应的一种强有力手段, 又称为联合检测或干扰抵消方法。多用户检测技术与其他抗衰落技术相结合可以大大提高系统的性能, 可在上(下)行链路实现。1986 年, Verdu 首先提出了多用户检测思想, 认为多址干扰是具有一定结构的有效信息; 理论上证明, 采用最大似然序列检测 (MLSD) 可以逼近单用户接收性能并有效地克服了“远近”效应, 大大提高了系统容量; 但是, MLSD 结构是匹配滤波器组加上 Viterbi 算法, 其复杂度随用户数呈指数增加, 在实际中基本无法实现。Verdu 的工作为进一步的研究奠定了理论基础, 激励了对多用户检测的广泛研究, 促使人们去寻找复杂度低、性能比传统检测器优越的各种次优多用户检测和抗干扰技术。

目前, 各国的研究人员已广泛地展开了对多用户检测技术的研究, 并已取得了许多可喜的成绩。已提出的基本次优检测有: 线性检测、多级干扰抵消检测、非线性类概率检测等。其中, 线性检测主要包括 MMSE 检测、解相关检测和子空间检测; 非线性类概率检测包括序列检测、分组检测、基于支持向量机的检测以及基于进化算法的检测等。

多用户检测与空时接收机理论在近十多年来得到了通信及信号处理领域科学家和工程师的极大关注, 取得了大量重要的研究成果。但是, 多用户检测技术、智能天线以及两者相

结合的空时接收机能否真正在即将全面商用的 3G 以及未来的后 3G 或 4G 系统中采用还有待进一步研究和探索,多用户检测和空时处理问题仍将是移动通信研究的一大热点和极具诱惑力的研究方向。主要原因有以下几点:

(1) 用户通信及多用户检测本身是通信中的一个基本问题,具有重要的理论和应用的意义;针对各种通信应用及其发展,需要对有关的理论和技术进行深入研究;

(2) 当前,宽带 CDMA 系统的应用仍面临着一些技术困难,多址干扰的降低和抵消是 CDMA 的基本课题,也是提高宽带 CDMA 系统容量,发挥宽带 CDMA 系统特长的重要课题,3G 的增强系统以及未来的 4G 系统对高传输速率和高性能多媒体业务的不断追求必将使嵌入先进信号处理技术的多用户检测和空时接收机得到重大的发展;

(3) 在当前的硬件技术水平下,高复杂度算法还难以应用于实际系统;

(4) 与 OFDM 调制、空时编码、信道编码、分集、多址接入和链路控制协议、无线资源管理等其他关键技术的最优结合方式还有待进一步研究;

(5) 当前的大多数多用户检测技术以及空时接收机只能消除小区内干扰,而消除来自小区外的干扰能力较弱;

(6) 当前提出的大部分的多用户检测以及空时接收机对复杂移动通信环境的稳健性还远远不够,限制了在实际系统中的应用。

从 1997 年开始,在国家“863”计划、国家自然科学基金等的支持下,我们对智能多用户检测和空时处理技术的理论及应用进行了研究,本书正是这近十年来工作的一个小结。

本书着重介绍智能信号处理技术在多用户检测、智能天线、高性能的接收机等关键技术中的应用,希望本书所介绍的应用在通信中的丰富多样的智能技术能对读者起到一定的启发作用。本书各章的内容安排如下:第 2 章论述自适应子波网络多用户检测技术,基于神经网络的强并行处理和自组织学习能力以及子波在信号逼近和分类方面表现出的优异性能,提出了异步和频率选择性衰落信道下 DS-CDMA 系统中自适应子波神经网络实现的单用户检测器、多用户检测器、空时多用户检测器以及自适应子波网络的 MMSE 检测器;第 3 章着重论述支持矢量机在多用户检测中的应用;第 4 章将递归神经网络盲自适应多用户检测推广至更一般的异步 CDMA 系统,并较深入地定量分析了输出信干比、渐进多用户有效性与抗“远近效应”能力、复杂度、运算时间以及失配影响等性能;第 5 章将 ICA 算法应用到多用户检测中来,提出了两类具有良好抗多址干扰和抗噪声能力的多用户检测方法,这些方法计算量小、不需要训练序列、只需利用少量的用户及信道信息、结构简单易于电路实现;第 6 章主要研究了一类信号处理神经网络,然后将其应用到 CDMA 盲波束形成和自适应连续干扰抵消接收机中,并做了详细的数学推导和大量的计算机仿真实验,来证明这些算法的有效性和可行性;第 7 章讨论了一般 MIMO 非线性系统的 Volterra 级数表示,给出并证明了 Volterra 核矩阵存在的条件,然后给出了两种辨识 Volterra 核矩阵的方法;第 8 章利用 p 阶逆方法研究了一大类非线性均衡器的收敛性问题。利用本章所提方法设计的非线性均衡器仅需要较少的非线性阶数,且 Volterra 核的长度也较小;第 9 章论述了基于多子波神经网络的多用户检测器与基于正交码的多子波 CDMA;第 10 章研究了多子波 CDMA 理论和多子波 CDMA;第 11 章论述了基于子波包变换的 CDMA 和子波包优化;第 12 章论述了基于免疫算法的多用户检测;第 13 章在分析 RBF 网络及其各方面特点的基础上,讨论了采用免疫策略算法来构造和训练 RBF 网络的可能性和有效性;第 14 章基于人工免疫系统中的克隆选择算法,提出了一种新的基于智能算法的多用户检测方案——免疫克隆算法多用户检测器 (CAMUD);第 15 章讲

述了量子进化算法在 CDMA 中的应用；第 16 章简要介绍了作为未来 4G 系统核心技术之一的 MIMO 技术的基本原理，并分析了智能技术在其中的应用现状和前景。

感谢潘进、方洋旺、陈俊丽、郑建忠、杨新星、钟桦、侯彪，张小华，周伟达，张莉、李映、岳博、钟伟才、薛明志、李洁、李小平、杨淑媛、刘若辰、薄列峰、公茂果、马文萍、尚荣华、黄文涛、侯翠琴、朱明明、柯艳荔、辛芳芳、戚玉涛、李阳阳、王爽、张向荣、潘晓英、王玲、杨海潮、谢银祥、冯小军等同志所付出的辛勤劳动。感谢电子工业出版社的领导和王春宁博士的大力支持和所付出的辛勤劳动。

感谢作者家人的大力支持和理解。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者
2005 年 12 月于西安

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 CDMA 移动通信系统研究背景及意义	(1)
1.2 第三代移动通信系统及其关键技术	(2)
1.2.1 3G 系统及其展望	(2)
1.2.2 3G 系统中的关键技术	(5)
1.3 第四代移动通信系统的研究目标与现状	(7)
1.3.1 4G 系统研究目标	(7)
1.3.2 4G 系统的研究现状及其关键技术	(8)
1.4 3G 与 4G 系统中的 DS-CDMA	(10)
1.5 空时信号处理与多用户检测	(11)
1.5.1 使用阵列天线的必要性	(11)
1.5.2 空时信号处理	(11)
1.5.3 多用户检测	(12)
1.6 通信中的智能信号处理	(14)
1.7 本书的主要内容	(15)
参考文献	(15)
第 2 章 自适应子波网络多用户检测	(23)
2.1 引言	(23)
2.2 自适应子波神经网络	(24)
2.2.1 子波变换、逼近以及分类	(24)
2.2.2 自适应子波神经网络	(25)
2.3 自适应子波神经网络检测	(26)
2.3.1 自适应子波神经网络单用户检测	(26)
2.3.2 自适应子波神经网络多用户检测	(27)
2.3.3 自适应子波神经网络学习算法和实现考虑	(28)
2.3.4 仿真实验与性能分析	(29)
2.3.5 评述	(34)
2.4 自适应子波神经网络空时多用户检测	(34)
2.4.1 多天线接收时的空时信号模型	(35)
2.4.2 空时匹配滤波与最大比多径合并	(36)
2.4.3 空时最佳多用户检测与自适应子波神经网络实现	(38)
2.4.4 仿真实验与性能分析	(39)
2.4.5 评述	(42)
2.5 基于自适应子波网络的 MMSE 检测器	(42)
2.5.1 MMSE 线性多用户检测	(42)

2.5.2	基于自适应子波网络的 MMSE 检测器	(43)
2.5.3	算法分析	(44)
2.5.4	性能分析与仿真结果	(44)
2.6	本章小结	(47)
	参考文献	(47)
第 3 章	支持矢量机多用户检测	(51)
3.1	支撑矢量机算法	(51)
3.1.1	模式识别支撑矢量机	(51)
3.1.2	回归支撑矢量机	(53)
3.2	支撑矢量机多用户检测	(55)
3.2.1	支持矢量机多用户检测结构	(55)
3.2.2	空时联合多用户检测	(55)
3.2.3	仿真实例	(56)
3.3	自适应支撑矢量机多用户检测	(57)
3.3.1	自适应支撑矢量机	(57)
3.3.2	试验仿真	(60)
3.4	小结与讨论	(63)
	参考文献	(64)
第 4 章	递归网络盲自适应多用户检测	(66)
4.1	引言	(66)
4.2	以码片速率采样的异步传输信号模型	(67)
4.3	递归神经网络盲自适应多用户检测	(67)
4.3.1	递归神经网络盲自适应多用户检测	(67)
4.3.2	盲最小均方误差多用户检测	(69)
4.3.3	递归神经网络盲自适应多用户检测	(69)
4.4	性能分析	(69)
4.4.1	输出信干噪比	(69)
4.4.2	渐进多用户有效性与抗“远近”效应能力	(70)
4.4.3	计算复杂度比较	(71)
4.4.4	计算时间比较	(71)
4.4.5	失配对性能的影响	(72)
4.5	仿真实验	(73)
4.6	基于 GRNN 的自适应 MMSE 多用户检测器	(80)
4.6.1	MMSE 多用户检测器	(80)
4.6.2	自适应 MMSE 多用户检测器	(80)
4.6.3	基于 GRNN 的自适应 MMSE 多用户检测器	(82)
4.6.4	性能分析与仿真结果	(83)
4.7	本章小结	(84)

参考文献	(84)
第5章 独立分量分析算法在 CDMA 中的应用	(87)
5.1 引言	(87)
5.2 盲信号分离	(87)
5.2.1 盲信号分离的数学模型	(88)
5.2.2 求解原理	(89)
5.2.3 盲信号分离的神经网络结构	(89)
5.3 独立分量分析的基本算法	(90)
5.3.1 去相关算法	(91)
5.3.2 自然梯度算法	(91)
5.3.3 迭代求逆算法	(91)
5.3.4 EASI 算法	(92)
5.3.5 ICA 算法的收敛性	(92)
5.4 基于 ICA 算法的多用户检测	(92)
5.4.1 匹配滤波器级联神经网络的多用户检测	(92)
5.4.2 按码片速率采样的 ICA 多用户检测	(92)
5.4.3 仿真结果	(93)
5.5 基于独立分量分析的 CDMA 系统信道估计方法	(96)
5.5.1 系统模型	(96)
5.5.2 仿真试验	(98)
参考文献	(99)
第6章 基于最大特征向量学习机的盲波束形成	(101)
6.1 引言	(101)
6.2 极大特征向量算法	(101)
6.2.1 Oja 算法	(101)
6.2.2 一类求解最大特征值问题的神经网络模型	(102)
6.2.3 求解复矩阵特征值问题的神经网络方法	(103)
6.3 求解广义特征值问题的神经网络	(103)
6.3.1 网络模型	(103)
6.3.2 网络性态分析	(104)
6.4 CDMA 的阵列信号模型	(107)
6.4.1 基本假设	(107)
6.4.2 阵列信号模型分析	(107)
6.5 基于最大特征矢量学习机的盲波束形成	(109)
6.5.1 求解最大特征向量的复数神经网络 (CNN) 模型	(109)
6.5.2 求解最大特征向量的 MEVA 迭代算法	(111)
6.6 多径衰落情况下的盲波束形成	(111)
6.7 仿真实验	(112)

6.8 小结	(116)
参考文献	(116)
第 7 章 非线性信道的 Volterra 级数模型及其辨识算法	(118)
7.1 MIMO 非线性系统的 Volterra 级数模型	(118)
7.2 MIMO 非线性系统辨识	(120)
7.2.1 随机响应法	(120)
7.2.2 脉冲响应法	(122)
7.3 仿真研究	(122)
7.4 结论	(124)
参考文献	(124)
第 8 章 非线性系统的均衡器设计	(125)
8.1 引言	(125)
8.2 SISO 非线性系统的均衡器设计	(126)
8.2.1 Volterra 滤波均衡器	(126)
8.2.2 Volterra 滤波器的局部 l^2 稳定性	(127)
8.2.3 存在性及误差分析	(127)
8.2.4 Volterra 预滤波及后滤波均衡器的存在性	(128)
8.2.5 有限阶 Volterra 预滤波及后滤波均衡器误差	(129)
8.3 MIMO 非线性系统的均衡器设计	(130)
8.3.1 Volterra 滤波器的局部 l^2 稳定性	(130)
8.3.2 Volterra 滤波均衡器的存在性及误差分析	(131)
8.3.3 Volterra 滤波均衡器的存在性	(132)
8.3.4 有限阶 Volterra 滤波均衡器误差分析	(133)
8.4 仿真研究	(134)
8.4.1 SISO 非线性 Volterra 滤波均衡器仿真	(134)
8.4.2 MIMO 非线性 Volterra 滤波均衡器仿真	(139)
8.5 结论	(144)
参考文献	(144)
第 9 章 基于多子波神经网络的多用户检测器与基于正交码的多子波 CDMA	(146)
9.1 基于多子波神经网络模型的多用户检测	(146)
9.1.1 多子波网络模型	(146)
9.1.2 应用理论	(147)
9.1.3 学习算法	(151)
9.1.4 降维预处理	(154)
9.1.5 多子波神经网络多用户检测器	(160)
9.2 基于正交码的多子波 CDMA	(161)
9.2.1 引言	(162)
9.2.2 多子波	(162)

9.2.3 多子波 CDMA	(163)
9.2.4 理想信道情况下的仿真	(164)
9.2.5 抗白噪声干扰的分析与仿真	(165)
参考文献	(166)
第 10 章 多子波 CDMA 理论和多子波 CDMA	(168)
10.1 多子波 CDMA 理论与框架	(168)
10.1.1 引言	(168)
10.1.2 多子波分析滤波器	(168)
10.1.3 多子波 CDMA 框架	(170)
10.1.4 仿真	(172)
10.1.5 结论	(172)
10.2 基于 Haar 子波低通滤波器的多子波 CDMA	(172)
10.2.1 引言	(173)
10.2.2 多子波分析滤波器	(173)
10.2.3 基于 Haar 子波低通滤波器的多子波 CDMA	(174)
10.2.4 仿真	(177)
10.2.5 结论	(177)
参考文献	(178)
第 11 章 基于子波包变换的 CDMA 和子波包优化	(180)
11.1 引言	(180)
11.2 单子波包的基本概念	(181)
11.3 多子波包的基本概念及其性质	(182)
11.4 最优基的选择	(187)
11.5 双正交多子波	(187)
11.6 双正交多子波包的基本概念及其性质	(189)
11.7 WPT-CDMA 系统模型	(195)
11.7.1 系统的频谱特性分析	(198)
11.7.2 仿真实验	(199)
11.8 基于多子波包变换的 CDMA	(202)
11.8.1 MWPT-CDMA 系统模型	(202)
11.8.2 MWPT-CDMA 系统性能分析	(204)
11.8.3 MWPT-CDMA 性能仿真	(206)
参考文献	(207)
第 12 章 基于免疫算法的多用户检测	(209)
12.1 基于遗传算法的多用户检测	(209)
12.1.1 标准遗传算法	(209)
12.1.2 基于遗传算法的多用户检测	(210)
12.2 免疫算法	(210)

12.2.1	免疫概念	(211)
12.2.2	免疫算法	(213)
12.2.3	免疫算法的收敛性	(213)
12.2.4	免疫疫苗	(214)
12.2.5	免疫算子	(216)
12.2.6	仿真实验	(217)
12.2.7	结论与讨论	(219)
12.3	基于免疫算法的多用户检测	(219)
12.3.1	实现结构	(219)
12.3.2	计算复杂度分析	(220)
12.3.3	仿真结果	(221)
	参考文献	(221)
第 13 章	免疫策略 RBF 网络多用户检测	(224)
13.1	引言	(224)
13.2	空时二维 CDMA 系统	(224)
13.2.1	空时信号模型	(224)
13.2.2	空时二维接收机	(226)
13.3	基于免疫策略的 RBF 网络	(229)
13.3.1	RBF 网络的基本形式	(229)
13.3.2	RBF 网络与多层感知器的比较	(229)
13.3.3	免疫策略算法	(230)
13.3.4	RBF 网络的学习策略	(231)
13.3.5	基于免疫策略的 RBF 网络	(233)
13.4	免疫神经网络的学习算法	(234)
13.4.1	网络激励函数的选取方法	(234)
13.4.2	网络的自学习算法	(235)
13.4.3	免疫神经网络的设计实例	(236)
13.5	基于免疫 RBF 网络的 CDMA 多用户检测判决器	(238)
13.6	仿真结果与分析	(239)
13.7	结论与讨论	(242)
	参考文献	(242)
第 14 章	免疫克隆算法	(244)
14.1	用于 CDMA 多用户检测的免疫克隆算法	(244)
14.1.1	算法收敛性分析	(246)
14.1.2	算法复杂度分析	(247)
14.1.3	算法参数影响分析	(248)
14.2	基于免疫克隆算法的多用户检测器的仿真结果与分析	(249)
14.2.1	与最佳多用户检测器的比较	(250)

14.2.2	同步 CDMA 系统下的仿真	(250)
14.2.3	异步 CDMA 系统下的仿真	(251)
14.2.4	瑞利衰落信道多径 CDMA 系统下的仿真	(253)
14.3	小结	(256)
	参考文献	(256)
第 15 章	量子进化算法在 CDMA 中的应用	(257)
15.1	量子计算原理	(257)
15.1.1	状态的叠加	(257)
15.1.2	状态的相干	(258)
15.1.3	状态的纠缠	(258)
15.1.4	量子并行性	(258)
15.1.5	目前的研究重点	(258)
15.2	量子计算智能的几种模型	(259)
15.2.1	量子人工神经网络	(259)
15.2.2	基于量子染色体的进化算法	(260)
15.2.3	基于量子特性的优化算法	(260)
15.2.4	量子聚类算法	(261)
15.2.5	量子模式识别算法	(261)
15.2.6	量子小波与小波包算法	(261)
15.2.7	量子退火算法	(262)
15.2.8	其他	(262)
15.3	量子进化算法的提出	(262)
15.4	量子进化算法中用到的一些基本概念	(264)
15.4.1	量子比特	(264)
15.4.2	量子染色体	(264)
15.5	量子进化算法	(264)
15.5.1	算法描述	(265)
15.5.2	量子染色体的机理和优点	(265)
15.5.3	量子变异	(266)
15.5.4	量子交叉	(267)
15.5.5	量子进化算法的结构框架	(268)
15.5.6	量子进化算法的收敛性	(270)
15.6	量子进化算法用于最佳多用户检测	(272)
15.7	结论和讨论	(274)
	参考文献	(275)
第 16 章	智能信息处理技术在 MIMO 通信系统中的应用	(280)
16.1	引言	(280)
16.2	MIMO 系统基本原理	(280)

16.3 MIMO 技术的研究进展	(281)
参考文献	(281)
附录 A 多用户检测基本原理	(283)
附录 B 命题 8.1 的证明	(290)
附录 C 引理 8.1~引理 8.3 的证明	(291)
附录 D 定理 8.1~定理 8.3 的证明	(294)
附录 E 式 (8.6) 与式 (8.7) 的推导过程	(296)
附录 F 定理 9.3 的证明	(298)
附录 G 定理 11.1~定理 11.5 的证明	(300)
附录 H 定理 12.1 与定理 12.2 的证明	(303)

第1章 绪 论

1.1 CDMA 移动通信系统研究背景及意义

通信技术的进步对社会的文明与进步产生着深刻的影响,个人通信则是人类通信的最高目标,它是用各种可能的网络技术,实现任何人在任何时间、任何地点与任何人进行任何种类的信息交换,是一种全时空的通信业务。个人通信的实现,将使全球联网,人们可以使用袖珍个人终端实现全球漫游,并自由地享用网络提供的多媒体业务。要实现上述目标,必须具备以下条件:大容量、全覆盖、移动性、智能性与低费用,现代通信经过几十年特别是近十几年的飞速发展,初步具备了上述条件。特别是1985年第三代移动通信系统的提出,人们的眼光很快都聚焦于此项新技术。1996年正式确定了国际移动通信系统技术方案,即IMT-2000,它的主要技术特点就是宽频带、高速率、大容量、高服务质量以及全球无缝漫游等。这些就要求我们在无线通信及个人通信领域引入更多的新技术、新方法以满足这一要求^[1]。这些新技术包括:

(1) 能有效提高频谱效率,扩大用户容量的新技术,如CDMA技术、多用户检测技术。

(2) 实现蜂窝系统各种功能的新的信号处理技术,如智能信号处理技术(包括神经网络、进化计算及模糊推理)等。

(3) 改善无线信道的通信质量的新技术,如智能天线技术。

因此,对上述问题的研究就具有非常重要的意义,目前,这些技术已成为现代移动通信领域中争先研究的热点。

多址技术是无线个人通信的核心技术,也是争论的焦点之一。它可以被认为是一个滤波问题。许多用户可以同时使用同一频谱,然后采用不同的滤波器和处理技术,使不同用户信号互不干扰地被分别接收和解调。选用哪一种多址方式直接影响到系统的频谱利用率、系统容量、小区结构、设备的复杂度及成本等^{[2]~[4]}。目前用到的多址方式主要有FDMA(频分多址)、TDMA(时分多址)和CDMA(码分多址)三种。其中,FDMA是第一代模拟蜂窝系统(如AMPS系统)和无绳电话系统的核心技术。它把通信系统的总频带划分成若干个等间隔的频段,每个通话的用户占用其中一个频段进行通信。TDMA是第二代数字蜂窝系统(如GSM等)和无绳电话系统(如DECT、PACS等)的主流技术。在TDMA中,一个帧周期被划分为若干个时隙,移动台只在指定的时隙内发送和接收信息。CDMA是近年来用于数字蜂窝移动通信的一种先进的无线扩频通信技术,能够满足大容量、廉价、高效的移动通信的需求,将成为第三代数字蜂窝移动通信系统的主流技术。它具有通信容量大、平滑的越区切换和有效的宏分集、通信容量的软特性、低的信号功率谱密度以及廉价等明显优势。除此之外,CDMA还具有扩频技术本身所具有的固有优点,如抗干扰、抗多径衰落、保密性等优点,这些优点使DS-SS-CDMA成为第三代移动通信及未来个人通信中最具竞争力、最有发展前景的无线多址技术^[5]。而多用户检测技术是在CDMA技术的基础上发展起来的能明显抑制多址干扰,显著提高CDMA系统的容量和性能的一种正在兴起的技术。

CDMA 系统是一个自干扰系统,它的容量和性能主要受到小区内其他用户的干扰即多址干扰的限制。传统的 CDMA 系统将多址干扰作为加性噪声处理。它们靠扩频码之间的准正交性分离各用户信息,这可以采用单用户接收中的匹配滤波器实现。如果扩频码之间完全正交,则可以实现无多址干扰的最佳解调。但是在实际情况中,异步 CDMA 扩频码间的相关特性受 Welsh 界所限,不可避免地带来用户间的相互干扰(同步 CDMA 在多径衰落信道下也是如此)。随着用户数的增加,这种干扰将越来越严重,导致系统性能的急剧恶化^[6]。这种恶化问题无法用提高信噪比的方法解决。此外,在 CDMA 系统中还存在着众所周知的远近效应问题,即由于各用户到基站的距离或衰落深度不同,强信号将抑制弱信号,使得相对较弱的用户信号得不到正常的检测。

目前,在第二代 CDMA 移动通信系统中主要采用严格的功率控制技术来缓解多址干扰。但这种技术只能在一定程度上控制远近效应,而不能从根本上消除多址干扰的影响,因而对系统容量的提高是有限的^{[6]~[7]}。而多用户检测,又称为联合检测或干扰抑制方法,可以非常有效地抑制多址干扰,它通过对各用户做联合检测或从接收信号中减掉相互间的干扰,有效地消除了多址干扰和码间串扰,大大缓解了远近效应问题,明显地改善了系统的性能,提高了 CDMA 系统的容量。多用户检测技术真正引起人们极大兴趣是在 1986 年 Verdu 的最佳多用户接收机^[8]提出之后,该接收机不会受限于多址干扰而且具有抗远近效应。然而,该接收机的运算复杂度与用户数目呈指数关系增长,在用户数量很大的情况下难以使用。后来,人们提出了多种线性和非线性的次最佳多用户检测算法^{[9]~[17]}。这些算法基本上是在复杂度和性能之间求得平衡的,以期使用户检测技术达到实用化。为了提高信道的利用率,研究人员又提出了不需要训练序列的盲多用户检测技术,可有效地抑制多址干扰。近年来,随着智能信号处理技术与智能天线技术的快速发展,越来越多的研究人员已将这方面的技术引入到无线通信系统中,形成空时多用户检测以及基于智能信号处理的多用户检测技术^{[18]~[23]}。初步研究表明,这些技术具有很多优越性。目前,这些研究还很不成熟,对其进行深入的研究具有重要的意义。

1.2 第三代移动通信系统及其关键技术

1.2.1 3G 系统及其展望

移动通信,作为 20 世纪 90 年代通信行业最活跃、增长最快、商业前景最好的领域,得到突飞猛进的发展。实现了移动通信手机的重量从几千克到几十克,移动网络从地区覆盖到全球覆盖的梦想。自从 1968 年贝尔实验室提出蜂窝移动通信系统的概念以来,移动通信已经经历了两代系统的演变,正在向第三代移动通信系统(3G)全面实用化迈进^{[2][24]~[32]}。

第一代移动通信系统是模拟蜂窝系统,采用 FDMA(Frequency Devision Multiple Access, 频分多址)技术。典型系统包括北美的 AMPS(Advanced Mobile Phone System, 先进移动电话系统)、英国的 TACS(Total Access Communications System, 全接入通信系统)等。第一代系统在 20 世纪 80 年代初实现了蜂窝网的商业化,是移动通信发展历史上重要的里程碑。模拟蜂窝系统的缺点是容量小,业务种类单一,传输质量不高,保密性差,制式不统一,且设备难以小型化。第一代系统已经逐渐被第二代系统所取代。

第二代移动通信系统是窄带数字蜂窝系统,采用 TDMA(Time Devision Multiple Access,