



当代
杰出青年
科学文库

信号处理的 自适应理论

谢胜利 何昭水 高鹰 著



科学出版社
www.sciencep.com

当代杰出青年科学文库

信号处理的自适应理论

谢胜利 何昭水 高 鹰 著

本专著获得如下基金资助：

国家杰出青年科学基金(60325310)

科技部重大基础研究前期专项(2005CCA04100)

广东省自然科学基金创新团队研究项目(04205783)

国家自然科学基金(60274006,60505005)

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以作者及其研究团队近年来在自适应信号处理方面的研究成果为主线,结合国内外相应的发展动态,较全面地介绍了信号处理自适应的基本理论和近年来的新方法和新成果。书中对自适应滤波基本理论和算法、自适应回波消除理论及算法、自适应信道均衡理论、盲信号分离理论与算法、智能图像处理等进行了较详细的阐述。

本书可作为信号处理领域或数学领域高年级本科生、研究生的参考教材,也可供相关领域的科研及工程技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

信号处理的自适应理论/谢胜利,何昭水,高鹰著. —北京:科学出版社, 2006. 3

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 7-03-016471-7

I. 信… II. ①谢…②何…③高… III. 自适应控制-信号处理
IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 134750 号

责任编辑:吕虹/责任校对:张怡君

责任印制:安春生/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2006年3月第一次印刷 印张:18 1/2

印数:1—3 000 字数:352 000

定价:52.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

《当代杰出青年科学文库》编委会

主 编 白春礼

副主编 (按汉语拼音排序)

程津培 李家洋 谢和平 赵沁平 朱道本

编 委 (按汉语拼音排序)

柴玉成 崔一平 傅伯杰 高 抒 龚健雅

郭 雷 赫吉明 何鸣鸿 洪友士 胡海岩

康 乐 李晋闽 罗 毅 南策文 彭练矛

沈 岩 万立骏 王 牧 魏于全 邬江兴

袁亚湘 张 杰 张 荣 张伟平 张先恩

张亚平 张玉奎 郑兰荪

前 言

信号处理的主要目标是增强和提取期望信号,而且在增强和提取的同时过滤掉干扰信号。信号处理学科从 Fourier 分析面世迄今有半个世纪,从最早的 DSP 芯片面世算起也有 20 多年的历史,它对物理学、生物科学、工程科学等领域的发展起到了巨大的推动作用。随着信号处理的理论与技术的迅速发展,自适应信号处理作为一个新的学科分支也应运而生,至今已有许多公认的新研究的方法与发展的新方向。

近年来,对自适应信号处理的研究,无论是在方法上还是应用上都在不断地涌现和扩展,作者感到很有必要向读者及时地介绍该领域涌现出来的新的研究成果。但是,由于自适应信号处理的理论与应用范围很广,作者在本书中只能以介绍作者的研究团队近年来的相关研究成果为主线,同时穿插介绍一些国内外的相关发展情况,以此抛砖引玉,供同行参考。由于作者的水平和研究范围有限,书中缺点和不足在所难免,作者真诚地欢迎读者批评指正。

在本书撰写中,周智恒做了大量的工作,他不仅参与了第六章的编写,还协助谢胜利教授负责全书的统稿工作。本书中作者的成果分别获得了国家杰出青年科学基金(60325310)、科技部重大基础研究前期专项(2005CCA04100)、广东省自然科学基金创新团队研究项目(04205783)和国家自然科学基金(60274006,60505005)的资助。这些对本书的形成奠定了坚实的基础,作者对此表示衷心的感谢。

作 者

2005 年 10 月于华南理工大学

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 自适应信号处理的主要应用	2
1.3 本书的内容安排	9
参考文献	10
第二章 自适应滤波基本理论和算法	13
2.1 自适应滤波的基本概念.....	13
2.2 基本的自适应滤波算法.....	14
2.3 一种修正 LMS Newton 算法	22
2.4 变换域自适应滤波算法.....	27
2.5 共轭梯度算法.....	28
2.6 基于子带分解的自适应滤波算法.....	29
2.7 累积量域自适应滤波算法.....	30
2.8 基于累积量误差准则的自适应滤波算法.....	40
2.9 基于几何分析的自适应滤波算法.....	48
参考文献	55
第三章 自适应回波消除理论及算法	60
3.1 自适应回波消除的概念和原理.....	60
3.2 单路自适应回波消除算法.....	61
3.3 多路回波消除问题及预处理方法.....	63
3.4 多路回波消除算法.....	66
3.5 回波消除中的双方对讲保护.....	73
3.6 基于模糊控制的预处理方法.....	76
3.7 基于盲信号分离模型的立体声回波消除结构.....	83
3.8 相关函数自适应滤波算法及其在回波消除中的应用.....	87
参考文献	99
第四章 自适应信道均衡理论	103
4.1 自适应均衡器的结构类型	103
4.2 最小均方算法横向滤波器	104
4.3 基于 LS 准则的自适应均衡算法	108

4.4	神经网络自适应均衡器及算法	110
4.5	递归神经网络自适应均衡器及算法	113
4.6	盲信道均衡自适应算法	116
4.7	小波变换的自适应均衡算法	118
4.8	基于遗传算法的盲信道均衡	124
	参考文献	128
第五章	盲信号分离的基本理论与算法	130
5.1	盲信号分离的基本概念及研究现状	130
5.2	线性混叠盲信号分离的基本理论	136
5.3	线性混叠盲信号分离算法	140
5.4	卷积混叠盲信号分离算法	171
5.5	稀疏表示及病态混叠的盲信号分离	182
5.6	非线性混叠盲信号分离算法	200
5.7	关于 Stone 猜想的讨论	203
	参考文献	217
第六章	智能图像处理	224
6.1	引言	224
6.2	模糊图像处理概述	224
6.3	模糊图像的滤波	229
6.4	模糊边缘检测	236
6.5	模糊图像插值	240
6.6	模糊色彩量化	247
6.7	基于自适应鲁棒性光流的差错掩盖	256
6.8	自适应消除块效应算法	264
6.9	智能图像处理系统	273
	参考文献	286

第一章 绪 论

目前,有关自适应信号处理的理论与应用研究成果已相当丰富,对于这些成果已有不少专著对其进行了总结,如专著[1]~[6]。但该学科也同其他学科一样,随着时间的推移在不断地发展,新的方法、理论和应用的研究成果不断涌现。本书以作者及其研究团队近年来在自适应信号处理方面的研究成果为主线,结合国内外相应的发展动态,介绍自适应处理的基本理论与方法。

1.1 引 言

信号处理的任务是增强和提取期望信号,同时滤掉干扰信号。随着信号处理学科领域理论与技术的迅速发展,自适应信号处理作为一门新的学科分支应运而生,自适应信号处理是在信号处理中引入了在任何时刻都被满足的最优准则。在设计任何一个系统时,都希望该系统在所处的环境条件下始终是最佳的,即使环境条件是随时间变化的。这就要求该系统具有自适应能力。因此任何一个自适应系统一定是智能系统,它具有下列特征:

(1) 对系统所处的环境条件具有识别能力,能感知环境条件的变化,能作出相应的判断;

(2) 能依据事先确定的某种最优准则,调节系统本身的状态和参数,使系统达到最佳性能;

(3) 具有自组织能力,无需人为的精心综合过程。

可以认为自适应过程是一个“学习”过程,是一个能在任何时候系统都趋于最佳性能的自动调整过程。

自适应信号处理系统,从基本结构形式上看,可分为开环系统和闭环系统两种。开环自适应信号处理(图 1.1.1)首先测量输入信号的特性,应用这些信息按

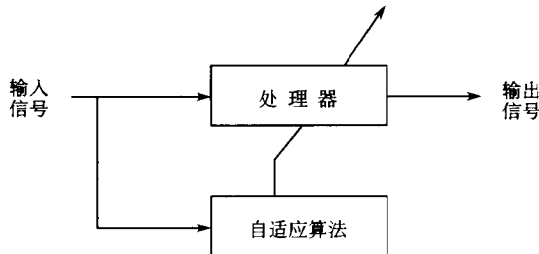


图 1.1.1 开环自适应信号处理

照某种最优准则下的自适应算法,算出并确定系统的参数,系统内不含反馈控制作用。闭环自适应信号处理(图 1.1.2)除了利用输入信号的特性外,还要利用输出性能的信息。如果系统输出性能偏离该输入条件下最优准则所确定的性能,则系统按自适应算法的规则调节系统的参数,一直达到最优性能为止。一般来说,闭环系统的自适应收敛速度要比开环系统低。

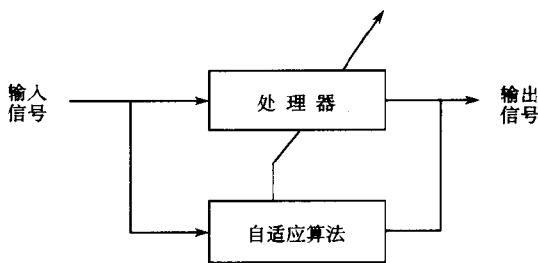


图 1.1.2 闭环自适应信号处理

自适应信号处理在近 30 年得到了迅速发展,其主要原因是:第一,硅片技术的高速发展,特别是大规模集成电路和超大规模集成电路的发展,使得自适应信号处理器能以较低的价格来实现;第二,高速发展的数据通信和雷达技术要求采用自适应信号处理来克服自身的缺陷,以提高通信质量和性能。

1.2 自适应信号处理的主要应用

近几十年来,在自适应信号处理的理论、方法与应用技术方面的研究已取得了丰硕成果,自适应信号处理广泛应用于通信、雷达、工业控制、地震勘探及生物医学工程等领域。下面仅介绍几种通常应用情况的基本原理。

1.2.1 自适应干扰对消

自适应干扰对消的基本原理如图 1.2.1 所示。自适应干扰对消器由自适应滤波器与求和器组成,它有两个输入,即主输入 U_p 和基准输入 U_r 。设 U_I 为干扰信号, U_Y 为有用信号。

当自适应滤波器的输出信号 U_Y 与 U_I 等幅同相(平衡条件)时,则干扰完全对消。当平衡破坏时,则有干扰输出,这时在误差信号 $\epsilon = U_I - U_Y$ 的控制下,按照最小均方误差准则改变自适应滤波器参数使平衡条件再次恢复达到干扰对消的目的。

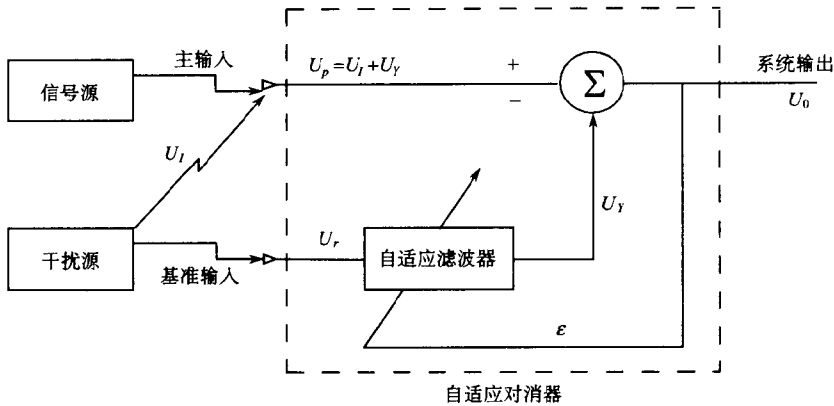


图 1.2.1 自适应干扰对消原理

1.2.2 自适应波束形成

现代的雷达和通信系统常常遇到敌人施放的无线电干扰,这种干扰一般要比接受的信号强得多。一种有效地抑制这种干扰的方法就是自适应波束形成系统,其原理见图 1.2.2。这种系统从原理上讲属于空间自适应滤波。自适应波束形成系统由三大部分组成,它们是天线单元、方向性图形成网络和自适应处理器,而自适应处理器又包括自适应算法控制器和信号处理器两部分。其工作原理是诸天线单元排成一线性阵列或圆形阵列,称之为阵列传感器。我们可以把阵列传感器看成

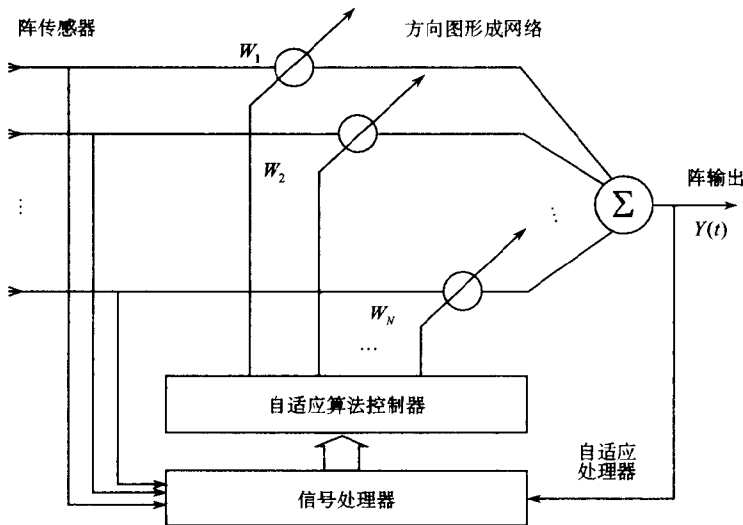


图 1.2.2 自适应波束形成系统原理图

空间分布的抽样器,这时的采样信号相当于在特定时刻横向滤波器的一组连续抽头输入。自适应波束形成系统根据信号与干扰传来方向的不同,再按照最小方差无失真响应条件,自动地调整权系数,改变天线方向性图的形状。使方向图主波束对准信号方向,方向图零点对准干扰方向,达到对消旁瓣抑制干扰的目的。特别是当信号和干扰传来的方向随时间变化时,自适应波束形成系统能动态地从空间检测和强化信号并抑制干扰。

1.2.3 自适应语音编码

数字化通信系统由于明显的优越性而广泛地应用于各类通信网中。要实现数字化通信首先要将模拟信号转换成数字信号,对电话实现这种变换叫语音编码,对传真和图像实现这种变换叫图像编码。在语音编码技术上,第一类为波形编码,第二类为参量编码。但是数字通信系统与模拟通信系统相比,占用的频带较宽。长期以来人们一直致力于压缩数字化语音占用频带的工作,也就是在相同质量指标的条件下,努力降低数字化语音的码速率以提高数字通信系统的频带利用率。自适应技术在语音编码中的典型应用是自适应脉冲编码调制和自适应增强调制。

1.2.4 自适应回波消除

一个数字通信终端接入综合业务数字网或野战通行网内有两种方法:一种是四线双工制,即正反两个方向上的数据各占一对线路进行数据传输;另一种是二线双工制,即通信双方同时发送的数据在同一对线路内传输。四线入网方法不会引入信息的串扰,但线路费用昂贵,经济效果差,尤其野战通信网中四线双工制给系统的灵活性带来很多限制。二线入网方法最大的优点是经济性及灵活性好,虽然会引起收发信息的串扰,但这是可以解决的。二线双工数据通信系统如图 1.2.3 所示。实现全双工数据通信,通常将收发信号通过线圈接入线路。由于线路和设备与混合线圈的阻抗失配及混合线圈反向阻隔不理想,相应地造成干扰回波,它们与远端站的发送信号加在一起形成所谓接受信号。在接受端干扰回波可通过回波

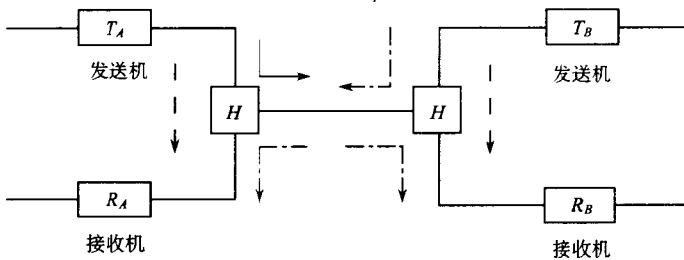


图 1.2.3 二线双工数据通信系统

消除器来消除。回波消除器的基本结构如图 1.2.4 所示。回波信号可看作位于发端和收端之间的设备,它通过自适应滤波器自动形成回波的一个复制信号,它们在求和器中相减从而消除接受信号中的回波。采用回波消除器的一种实际二线双工数据通信系统的框图如图 1.2.5 所示。

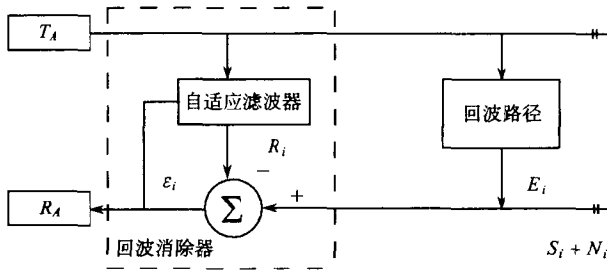


图 1.2.4 回波消除器的基本结构

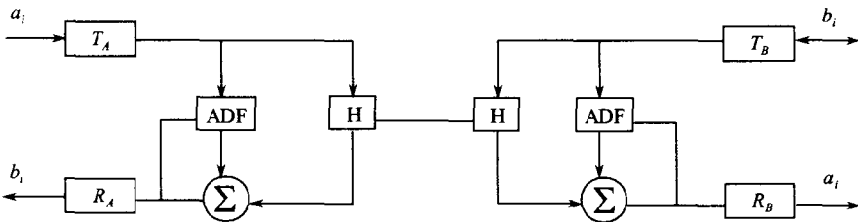


图 1.2.5 一种实际二线双工数据通信系统

1.2.5 自适应信道均衡

在数字通信中所遇到的是变参编码信道,通信的质量主要取决于信道特性。信道衰落、多径传输干扰和加性噪声是影响通信质量的主要因素。对于数字通信,这些因素的主要影响表现为码间干扰。码间干扰是在有限带宽的数字通信系统中,信号在色散信道传输的结果是每个码位占用的时间被展宽,且受到一定间隔上前后码位的干扰,产生波型畸变,从而引起接受到的码位之间的重叠,造成判决错误,使误码率增加。为了减少码间干扰,必需采用信道均衡技术。

信道均衡器是信道的一个逆滤波器,用于抵消有限带宽信道失真引起的码间干扰,消除信道的频率选择性和时间选择性。均衡可分为两种:第一种是频域均衡,借助于修改系统的频率特性,使均衡器和信道的合成频率特性满足无码间干扰的条件。第二种是时域均衡,借助于修改系统的脉冲特性,使均衡器和信道的合成冲激脉冲响应满足无码间干扰的条件。目前高于 2400bit 的中速调制解调器也采

用自适应均衡。自适应均衡的优点是：1)从接受信号本身提取抽头增益的信息，不影响正常通信；2)能按信道变化及时调整系统参数，均衡效果好；3)在多电平或多相位传输系统中，在信道有非线性或判决电路有误差时，能调节到较好的工作状态。4)调整速度快，这对目前用模拟话路信道传送高速数据特别重要。自适应均衡器可分为两大类：一类是线性滤波均衡器，另一类是非线性判决反馈均衡器。均衡器的结构可采用横向或格型滤波器结构等。线性滤波均衡器能消除由于滤波特性不良造成的码间干扰，但同时又会引入加性噪声，使信道有效的信噪比降低，而非线性判决反馈均衡器在差错率很低时，只引入少量的加性噪声，能更有效地消除码间干扰，且具有收敛速度快、均衡精度高和稳定性能好等优点，而且对舍入误差的影响不敏感。自适应均衡器可以在中频上实现，也可以在基带上实现。在所有的自适应均衡器结构中线性横向均衡器是最简单的，常用来构成其他形式的均衡器，其原理图如图 1.2.6 所示。图 1.2.7 是用判决导引法调节抽头增益的自适应横截均衡器。图 1.2.8 是自适应判决反馈均衡器框图。

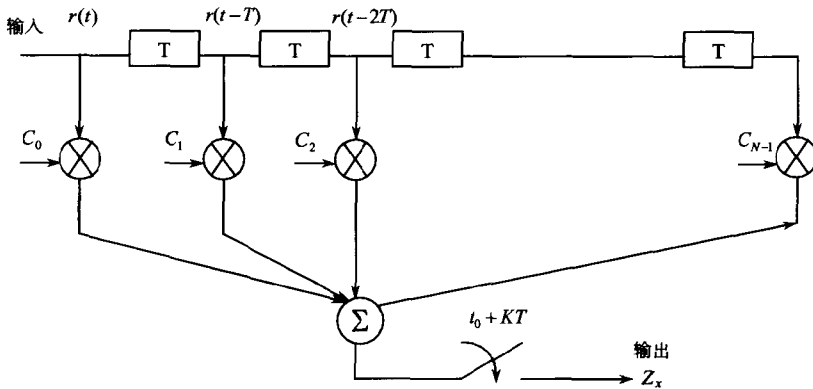


图 1.2.6 线性横向均衡器

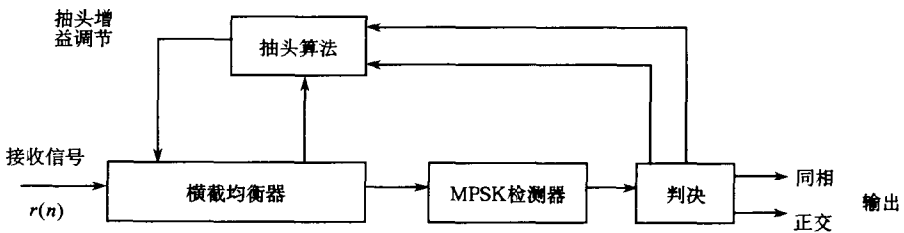


图 1.2.7 自适应横截均衡器

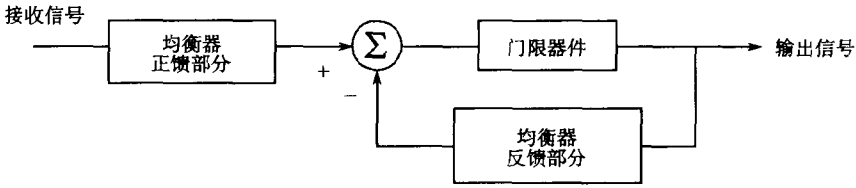


图 1.2.8 自适应判决反馈均衡器框图

1.2.6 盲信号分离

近几年来,盲信号分离已成为信号处理学界和神经网络学界共同感兴趣的研究热点领域,并获得了迅速的发展。简而言之,盲信号分离就是根据观测到的混合数据向量确定一变换,以恢复原始信号或信源。典型情况下,观测数据向量是一组传感器的输出,其中每个传感器接收到的是源信号的不同组合。术语“盲的”有两重含义:1)源信号不能被观测,2)信道特征是未知的。显然,当从信源到传感器之间的传输很难建立其数学模型,或者关于传输的先验知识无法获得时,盲信号分离是一种很自然的选择。盲信号分离的核心问题是分离(或解混合)矩阵的学习算法,它属于无监督的学习,其基本思想是抽取统计独立的特征作为输入的代表,而又不丢失信息。当混合模型为非线性时,一般是无法从混合数据中恢复源信号的,除非对信号和混合模型有进一步的先验知识可资利用。因此,在大多数的研究中,只讨论线性混合模型。由于盲信号分离在阵列处理、多用户通信,以及生物医学工程等中都有着重要的应用,近几年的发展极为迅速。

盲信号分离可以用下面的混合方程描述

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t),$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t),$$

其中 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t)$ 为混叠模型, $\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t)$ 为分离模型; $\mathbf{s}(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t))^T$ 为源信号矢量, $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))^T$ 为观测信号矢量, \mathbf{A} 为未知的 $m \times n$ 的混叠矩阵,式 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t)$ 的含义是 n 个源信号通过混合得到 m 维观测数据向量。盲信号分离问题的提法是:在混合矩阵 \mathbf{A} 和源信号未知的情况下,只根据观测数据向量 $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))^T$ 确定分离矩阵 \mathbf{W} ,使得变换后的输出 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t)$ 是源信号向量 $\mathbf{s}(t) = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t))^T$ 的拷贝或估计。

作为混合矩阵 \mathbf{A} 结构信息未知的一种补偿,必须有关于源信号的某些附加假设。最基本的假设是源信号中至多只能有一个 Gauss 信号,因为两个 Gauss 信号是不能盲分离的。由于信号传输(即信道)以及源信号知识的缺乏,盲信号分离存在两种不确定性或模糊性:分离后信号顺序排列和复振幅(幅值和初始相位)的不

确定性。盲信号分离的不确定性主要表现为混合矩阵 A 的非完全辨识。既然 A 具有不确定性,不失一般性,假定源信号具有单位方差,即把源信号振幅的动态变化归并到混合矩阵 A 相应列的元素中。归一化只是解决了混合矩阵 A 各元素的幅值的不确定性,各列的排列顺序和初始相位仍然保持不确定性。

盲信号分离已有许多的算法,这些算法大致可分为以下三类:1)信号经过变换后,使不同信号分量之间的相依性(dependency)最小化。这类方法称为独立分量分析,该方法由 Comon 于 1994 年提出。2)利用非线性传递函数对输出进行变换,使得输出分布包含在一个有限的超立方体中;然后熵的最大化将迫使输出尽可能在超立方体中均匀散布。这类方法称为熵最大化方法,是 Bell 与 Sejnowski 于 1995 年提出的。3)非线性主分量分析是线性主分量分析方法的推广,由 Oja 与 Karhunen 等人于 1994 年提出。最近,作者及其研究团队在盲信号分离方面也做了相应的研究工作,并取得了一些可喜的成果。

虽然盲信号分离在最近几年已获得了长足的发展,和任何一种信号处理和神经网络的新技术一样,盲信号分离的发展也离不开实际的应用。事实上,盲信号分离已经获得了一些重要应用,下面是一些主要应用范例。

(1) 在脑磁图(MEG)中分离非自然信号 脑磁图是一种非扩散性的方法,通过它,活动或者脑皮层的神经元有很好的时间分辨率和中等的空间分辨率。作为研究和临床的工具使用 MEG 信号时,研究人员面临着在有非自然信号的情况下提取神经元基本特征的问题。干扰信号的幅度可能比脑信号的幅度要高,非自然信号在形状上像病态信号。试验结果表明,盲信号分离技术能很好地从 MEG 信号里分离出眼运动及眨眼时的信号,还能分离出心脏运动、肌肉运动及其他非自然信号。

(2) 在金融数据中找到隐藏的因素 将盲信号分离技术用于金融数据中是一个探索性的工作。在这个应用中存在许多情况(并行的时间序列),例如流通交易率或每日的股票成交量,这里存在一些基本的因素,盲信号分离技术可以揭示一些仍隐藏着的驱动机制。

(3) 图像分离 盲分离在图像处理方面有着许多成功的应用。Olshausen 和 Field 等^[7]揭示了稀疏编码和自然图像的独立元成分之间的密切关系,利用 ICA 对图像进行分解,可以实现对图像稀疏编码(sparse coding);Hyvarinen 和 Oja 等^[8]通过稀疏编码和 ICA 分析进行图像特征提取。斯华龄教授提出一种多通道、单像素无监督学习盲分离方法,将其应用于医学和遥感图像处理,获得巨大成功^[9]。斯华龄和张立明^[9]编著的《智能视觉图像处理》一书详细介绍了 ICA 在图像的获取与传输、图像纹理分割、人脸识别、数字水印、语音识别、早期乳房癌检测和遥感图像处理中的成功应用。

(4) 语音信号处理 盲信号分离技术最经典的应用是“鸡尾酒会”问题。在 n

个麦克风记录的 n 个声音源中,通常仅仅希望得到其中感兴趣的一个声音源,而把其他的声音源视为噪声。如果仅一个麦克风,我们可以用普通的去噪声方法去噪声,例如,线性滤波,小波或稀疏码收缩方法。当然,这种去噪声的方法不是很令人满意。我们能利用多个麦克风来收集更多的数据,以便更有效的去噪声。因为在现场麦克风的位置是任意的,而且混合过程也未知,为此必须实行盲估计。采用的方法就是,盲源信号分离中的一种。

(5) 远程通信 实时通信的应用例子是,在 CDMA 移动通讯里,从有其他用户干扰的信号里分离用户自己的声音。这个问题从某种意义上说,在 CDMA 数据模型中预先给出了一些优先信息。但是需估计的参数数目很大,因此选定某种合适的信号分离方法,它考虑了这种优先信息,从而产生了比传统估计方法更优越的性能。

1.2.7 智能图像处理

传统的图像处理技术主要集中在图像的获取、变换、增强、恢复(还原)、压缩编码、分割与边缘提取等方面。随着信息技术的发展,图像特征分析、图像配准、图像融合、图像分类、图像识别、基于内容的图像检索与图像数字水印等技术都取得了长足的进展。这些图像处理技术反映了人类的智力活动,它在计算机上模仿、延伸和扩展了人的智能,具有智能化处理的功能,因而称之为智能图像处理技术。

智能图像处理技术是在传统的图像处理技术基础上发展起来的,并以传统的图像处理技术作为预处理技术。智能图像处理技术是图像处理智能化发展的必然趋势,它们能够更好地满足人类的信息处理需求。

1.3 本书的内容安排

本书是在作者及其研究团队参加科研工作及教学工作的基础上撰写完成的,以作者们的研究结果为主线并结合国内外相应的发展动态,介绍了自适应信号处理的基本理论与方法。其主要内容可概括如下:

第二章较全面地介绍了自适应滤波的基本理论和基本算法,对目前国内外有代表性的成果进行了分析与阐述,比较了它们各自的优缺点。而且较详细地介绍了作者及其研究集体在这方面所做的工作^[10~16]。在第三章里,首先对单路回波消除的基本概念及目前具有代表性的结果进行了介绍,然后用了相当的篇幅对多路回波的自适应消除问题进行了较深入的阐述,包括有代表性的成果及所存在问题的分析,其中也介绍了作者的相关工作^[17~31]。第四章对自适应信道均衡理论进行了简约的讨论,只是对基本概念和主要研究方法做了介绍,其中也包括了作者最近的有关工作^[32]。在第五章里,用了相当的篇幅对盲信号分离的基本理论与算法进

行了详细的介绍,不仅对目前国内外有代表性的研究成果进行了较系统的分析,而且着重介绍了作者及其研究集体在这方面所取得的研究结果^[33~45]。在最后一章里,介绍了作者在智能图像处理领域中所做的一些探索性研究工作,这些工作包含在文献[46]~[56]中。

参 考 文 献

1. Haykin S. Adaptive Filter Theory. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002
2. Manolakis G. D., Ingle V. K., Kogon S. M. Statistical and Adaptive Signal Processing. Beijing: Tsinghua University Press, 2003
3. 何振亚. 自适应信号处理. 北京:科学出版社,2002
4. 张贤达, 保铮. 通信信号处理. 北京:国防工业出版社,2000
5. 余英林,谢胜利,蔡汉添. 信号处理新方法导论. 北京:清华大学出版社,2004
6. 韦岗,邱伟. 现代信号处理理论与技术. 广州:华南理工大学出版社,1994
7. Olshausen B. A., Field K. J. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images. *Nature*, 1996,381: 607~609
8. Hyvarinen A., Oja E., Hoyer P., Hurri J. Image feature extraction by sparse coding and independent component analysis. *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, Brisbane, Australia, 1998,1268~1273
9. 斯华龄,张立明. 智能视觉图像处理. 上海:上海科学技术出版社,2002
10. 高鹰,谢胜利. 一种变步长 LMS 自适应滤波算法及分析. *电子学报*, 2001, 29(8): 1094~1097
11. 余庆军,谢胜利. 一个受 ELSE 规则支配的模糊 LMS 算法. *控制理论与应用*(待发表)
12. 高鹰,谢胜利. 一种修正 LMS 牛顿算法. *电路与系统学报*, 2004, 19(3): 80~82
13. 高鹰,谢胜利. 基于矩阵广义逆递推的自适应滤波算法. *电子学报*, 2002, 30(7): 1032~1034
14. 高鹰,谢胜利. 一种基于三阶累积量的准则及自适应滤波算法. *电子与信息学报*, 2002, 24(9): 1197~1201
15. 高鹰,谢胜利. 梯度向量正交的相关函数自适应滤波算法. *电子与信息学报*, 2004, 26(2): 318~321
16. 谢胜利,田森平,柳书棠. 基于向量图分析的自适应滤波快速算法. *控制理论与应用*, 2003, 20(6): 838~842
17. Zhou Y. J., Xie S. L. Study on stereo acoustic echo canceller with nonlinear pre-processing units. *Intelligent & Complex Systems*, 2003, 1: 66~73
18. Zhou Y. J., Xie S. L. A NLMS-like adaptive filtering algorithm of decorrelating stereophonic signal. *Proc. ISIMP*, 2001, 429~432
19. 高鹰,谢胜利. 基于相关函数的递推最小二乘算法及其在回波消除中的应用. *通信学报*, 2002, 23(9): 114~119
20. 高鹰,谢胜利. 带旋转因子的多路回波消除自适应滤波算法的简化. *系统工程与电子技术*,