

高等院校信息与通信工程系列教材

信号处理新方法导论

余英林 谢胜利 蔡汉添 等著

3

清华大学出版社



高等院校信息与通信工程系列教材

信号处理新方法导论

余英林 谢胜利 蔡汉添 等著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合作者长期的教学科研实践评述了信息处理学科在发展中的若干主要问题,论述了自适应信号处理中的盲混叠信号分离和自适应信道均衡等问题,介绍了信号的分解/合成理论、由不完整数据估计原信号的问题、盲信号恢复的几种方法、线性多分辨率分析理论及应用、非线性金字塔分析理论及应用、信号的分形分析理论及应用、信号的混沌理论及其潜在的应用。

本书可作为通信与信息系统、信号与信息处理学科相关专业高年级本科生、研究生的参考教材,也可供相关领域科研及工程人员参阅。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

信号处理新方法导论/余英林,谢胜利,蔡汉添等著. —北京:清华大学出版社,2004.11

(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 7-302-09423-3

I. 信… II. ①余… ②谢… ③蔡… III. 信号处理 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 090625 号

出版者:清华大学出版社

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

社总机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

组稿编辑:陈国新

文稿编辑:马幸兆

印刷者:北京密云胶印厂

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:17.75 字数:408千字

版 次:2004年11月第1版 2004年11月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-09423-3/TN·211

印 数:1~3000

定 价:25.00元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

序

有幸拜读余英林教授等合著的书稿,很高兴能有机会为本书作序。本书最鲜明的特点是充分反映了作者所在研究所的科研成果,针对信号处理学科发展中的几个研究热点问题进行了深入的阐述。

(1) 自适应信号处理理论。本书对混叠信号的盲分离以及信道盲均衡的理论技术及其应用进行了深入的研究,重点介绍了作者所在研究所取得的一些代表性研究成果。针对线性混叠情况,评述了现有文献涉及的一些算法及其存在的问题,系统地介绍了作者所在研究所近年来的研究成果,包括理论证明及在一维信号及二维图像情况下的实验结果。此外,还进一步探讨了非线性混叠情况的一些问题的解决方案。

(2) 信号恢复理论。书中对信号恢复中几个新的研究热点问题进行了全面的研究。针对不完全数据情况下信号重构恢复问题,作者研究了信号各子带间的相关性,给出了由已有子带预测丢失子带成分的理论分析及由此进行图像重构复原的实验结果,并研究了彩色图像重构的情况。关于超分辨率重构这一当前研究热点,此书系统论述了在空间域、频域以及压缩域中的超分辨率重构,并提出了解决方案。关于盲信号恢复问题,作者提出了远程匹配方法和应用神经网络及进化算法等恢复方法。

(3) 多分辨率分析理论。此书系统研究了多尺度分析、多分辨率分析、线性金字塔及非线性金字塔理论,包括形态小波、形态金字塔、金字塔条件、理想重构条件等,并介绍了这些理论方法在图像分析中的应用以及作者的一些实验结果。

(4) 非线性信号处理理论。书中系统研究了非线性信号处理中的几个研究热点。针对分形分析在信号处理中的应用,系统深入地分析了分形分析理论,包括多重分形分析问题;针对混沌理论及其在信号处理、保密通信中的应用,运用混沌的理论体系、混沌的形成、混沌同步的基本理论,进一步介绍了混沌理论在脑电分析中的应用以及混沌神经网络模型。

作者能写出这样一本著作,与作者及其团队多年的研究是分不开的。余教授等多年来一直在对信号处理学科的基本理论和基本方法进行着全面深入的研究,取得了丰硕的研究成果,并在书中对这些研究成果进行了详细的介绍,因此本书具有很重要的参考价值。本书历时 20 个月完成,凝聚了作者所在研究所几代人的成果,本书的出版必将对信号处理学科的发展起到推动作用。

本书既可作为教学参考书,又是一本专著,可供相关专业研究生、高年级本科生和有关的科技人员使用。



2003.12

前 言

信号处理学科从 Fourier 分析面世迄今已有半个世纪,从最早的 DSP 芯片面世算起也有 20 年以上的历史,它对物理学、生物科学、工程科学等领域的发展起了巨大的推动作用,现已有许多公认的研究新方法与发展的新方向。作者所在的华南理工大学通信与信息系统及信号与信息处理博士点及其实验室经过两代人的努力,对信号处理与信号分析的研究已超过 20 年,取得了一些研究成果。承蒙清华大学出版社约稿,特把我们的教学及科研成果整理成书,抛砖引玉,供同行参考。

本书绪论由余英林编写,第 1 章由谢胜利、何昭冰编写,第 2 章由余英林、杜娟编写,第 3、4 章由蔡汉添编写,第 5 章由余英林、戴青云编写,第 6 章由谢胜利、周元健编写。余英林教授负责统稿工作。

本书可作为通信与信息系统、信号与信息处理学科研究生及相关专业高年级本科生的教材或教学参考书,也可供相关领域科研人员和工程技术人员参考。

本书承蒙著名学者中山大学校长黄达人教授(博导)热情作序,在此表示衷心感谢。华南理工大学电信学院领导、有关教师和一些研究生在书稿排版、打印和校对工作中做了大量的工作,笔者也深表感谢。

本书工作受下列国家自然科学基金项目及广东省自然科学基金项目资助,特此说明。

国家自然科学基金项目:

- (1) 几种图像分析新方法研究 #69772026;
- (2) 基于非线性控制技术的盲信号分离的理论研究 #60274006;
- (3) 国家杰出青年科学基金 #60325310 盲信号分离的可分性基本理论。

广东省自然科学基金项目:

盲图像恢复重构理论及技术的研究 #011628。

作 者

2003 年 11 月于广州

华南理工大学

目 录

绪论	1
第 1 章 自适应信号处理	5
1.1 引言	5
1.2 自适应信号分离理论及算法	10
1.2.1 自适应回波消除理论	10
1.2.2 自适应噪声消除理论	16
1.2.3 盲信号分离的基本理论与算法	21
1.3 自适应信道均衡理论	33
1.3.1 自适应均衡器的结构类型	33
1.3.2 自适应均衡算法	34
1.3.3 盲均衡	39
1.3.4 小波变换的自适应均衡器算法	42
1.3.5 自适应均衡器在全数字 HDTV 中的应用	48
1.3.6 自适应均衡器在离散多音频调制技术中的应用	50
参考文献	52
第 2 章 信号估计理论	61
2.1 引言	61
2.1.1 一般回顾	61
2.1.2 由多幅低分辨率图像重构成一幅高分辨率图像的理论及方法	64
2.2 半盲及盲图像超分辨率恢复	65
2.2.1 缺损图像“远程匹配”方法	66
2.2.2 神经网络方法和进化算法方法	67
2.2.3 盲图像恢复方法回顾	69
2.3 视频图像的超分辨率重构	72
2.3.1 问题描述	73
2.3.2 超分辨率重构的频域方法	74
2.3.3 超分辨率重构的空间域方法	76
2.3.4 超分辨率重构算法的比较	84
2.4 基于压缩域的视频图像超分辨率重构	85

2.4.1	视频和图像压缩后出现的新问题	85
2.4.2	问题描述	86
2.4.3	基于压缩域的超分辨率重构算法	87
2.5	盲图像的复原	91
2.5.1	确定性分析方法	92
2.5.2	随机性分析方法	95
2.5.3	对于图像复原中信息量的一些讨论	98
2.5.4	结论	98
	参考文献	99
第3章	多分辨率分析理论	102
3.1	引言	102
3.2	高斯塔式分解和拉普拉斯塔式分解	104
3.3	小波变换的基本概念	107
3.3.1	连续小波变换	107
3.3.2	离散小波变换	111
3.4	基于小波的多分辨率分析	113
3.4.1	尺度函数和信号逼近子空间	113
3.4.2	小波函数和细节空间	116
3.4.3	多分辨率信号分解小波表达式	119
3.4.4	二维多分辨率信号分析	122
3.5	多分辨率分析理论在信号处理中的应用	125
3.5.1	信号奇异性和图像多尺度边缘分析	125
3.5.2	小波域信号去噪	136
3.5.3	多分辨率图像复原	142
	参考文献	150
第4章	信号的分形分析理论	153
4.1	引言	153
4.2	分形理论基础	154
4.2.1	分形维数	154
4.2.2	迭代函数系统 IFS	157
4.2.3	分数布朗运动	163
4.3	分形信号模型与分形插值	165
4.3.1	IFS 分形插值	166
4.3.2	FBM 分形插值	173
4.4	信号分形分析及处理	175
4.4.1	基于分形维数的分形信号分析	176

4.4.2	信号多重分形分析	183
4.5	分形理论在语音和图像信号分析中的应用	190
4.5.1	语音分割和语音识别分形方法	191
4.5.2	图像纹理分形分析	193
4.5.3	图像边缘检测的多重分形方法	196
4.6	基于远程相关性的图像处理技术	198
4.6.1	基于远程相关性的图像恢复基本方法	198
4.6.2	匹配映射算法参数求解	200
	参考文献	200
第5章	子带分解与合成理论	205
5.1	引言	205
5.2	子带信号重构原信号的理论	206
5.2.1	分解滤波器的设计原则	207
5.2.2	子带间相关性的讨论	207
5.2.3	子带预测及信号重构	208
5.2.4	实验实例	210
5.2.5	一些问题的讨论	212
5.2.6	子带信息讨论	213
5.3	形态金字塔与形态小波	215
5.3.1	数学形态学	216
5.3.2	形态金字塔	217
5.3.3	金字塔变换	219
5.3.4	形态金字塔理论	220
5.3.5	形态小波	224
5.3.6	小结	229
	参考文献	229
第6章	混沌及其应用	233
6.1	引言	233
6.1.1	混沌的历史和数学定义	233
6.1.2	混沌理论体系	234
6.1.3	混沌的特征、产生途径与应用	234
6.2	混沌信号的通信	237
6.2.1	混沌通信原理	237
6.2.2	混沌同步原理	238
6.2.3	基于混沌同步的保密通信	240
6.2.4	非同步的混沌通信	251

6.3 脑电信号的混沌分析	255
6.3.1 脑电图简介	255
6.3.2 脑电信号的提取	256
6.3.3 脑电信号的混沌性	257
6.3.4 脑电信号的混沌分析	258
6.4 混沌神经网络简介及其应用	263
6.4.1 混沌神经网络简介	263
6.4.2 混沌神经网络模型	264
6.4.3 混沌神经网络在通信中的应用	269
6.4.4 混沌神经网络的研究进展与展望	272
参考文献	273

绪 论

1. 发展回顾

Fourier 分析理论开创了信号处理、信号分析学科的新纪元。在线性系统的框架下,人们深入研究任意形状的信号通过线性系统的传输特性及传输结果。这套理论已经成熟,已成为解决工程设计问题的有力工具。

实际上,由于人们所能采集并供处理用的数据往往是无穷数据序列中的一段,因此在原来的 Fourier 分析基础上发展了加窗 Fourier 变换技术,它能够解决更多的问题,用来深入分析研究数据中感兴趣段的特性。由此,发展出时频分析理论。就像人们用放大镜、显微镜研究一个物理对象的情况一样,人们对感兴趣的数据段按需进行坐标的扩大及缩小,以便提取其在不同坐标大小范围内的信号特征参数。进一步引入尺度的概念,人们可在不同的时间及频域尺度下,对信号进行详细分析,并提取它在不同尺度下的参数。这套理论称为多分辨率分析(multi-resolution analysis, MRA)。目前, MRA 已广泛用于信号处理的几乎所有领域。也有专著提出把尺度作为信号的一个特征,并在特征空间中把它作为单独的一维来研究,从而得出信号的尺度维特性。

由此,人们进一步提出信号处理的金字塔理论(pyramid theory)。最初,只有线性金字塔结构。最近,已发展出非线性金字塔结构。目前,已有严格的金字塔分解和重构条件。金字塔的每一层相当于不同的时域和频域尺度,它实际上是在不同尺度下的信号特征分析。通过线性系统的信号处理理论已很成熟,可将已知的信号通过已知的线性系统,加入已知特性的随机噪声,求得其输出结果,并且这个系统一般可用线性微分方程来描述。这称为正问题。已经有系统的理论和成熟的技术能解决这类问题。最近 20 年来,信号处理学科提出逆问题,概括地说,即要求从信号处理系统中输出的已知测量数据中反过来估计原来的输入信号及系统的特性。其实逆问题是从许多实际工程问题中提出来的。典型的例子是:从看到的带失真的视频画面还原出原来的视频画面,从听到的已失真的声音中求出原来说话人的声音;从测到的地震数据中估计推求原来地震源的状态;医学中的层析图(tomograph)技术就是从测量到的数据中推求人体组织的情况。因为逆问题能够解决更多的实际问题,所以 20 多年来,逆问题受到科研及工程人员的广泛重视,人们在努力寻求解决逆问题的方法。

信号处理的逆问题,也称信号重构与复原(恢复)问题,是病态问题(ill-posed problem)。对于线性系统而言,未知数的个数多于方程式的个数,因此只能先在某个约束条件下,求得近似解或求出一个解空间,然后再设法根据附加条件逼近真正的解。

在信号估计重构问题中,最近一个重要的发展是盲估计问题。所谓“盲”或“半盲”是

指在求解逆问题时,对原来的信号或传输通道特性、噪声特性等一无所知或部分已知。这类问题通称为盲估计问题。其中包括两方面问题:一是盲估计本身的理论,二是盲估计结果的评价。在线性系统框架下,对第一个问题目前已有一些进展;而对于非线性系统则尚无有效方法。对于第二个问题,仍待努力求解。

随着物理学、数学、天体力学、生物学等基础学科的发展,在非线性科学、分形理论、混沌理论方面的研究取得了很多成果。它们推动着近代科学的发展,同时对信号处理学科有着深刻的影响,由此出现了一些重要的研究领域。其中较重要的研究领域说明如下:

(1) 信号的分形分析

朴素的分形思想可在中外的古老哲学著作中找到。在物质微观结构、生物微观结构、大地宏观结构、古老及现代的建筑模式(如印度教神庙、中国古建筑等)中,人们发现有許多分形结构存在。有“分形宇宙”(fractal universe)之说。据研究,人们发出的语音、各种各样的图像以及生物的脑电图、心电图等,均含有分形性质。因此,最近 20 年来许多研究者致力于信号处理分形理论的研究,并取得一批成果。信号的分形特点可归纳为自相似性、自重复性、压缩映射以及迭代系统(iterated system)等性质。信号的分形参数可以刻画出信号的某些重要特征。

除了简单的分形分析以外,还有多重分形理论。有人似乎找到分形分析与子波分析之间的某种形式上的关系;也有人找到分形结构分析与句法模式识别之间的一些关系;还有人利用分形结构方法产生出各种逼真的自然景物图案。由此出现一门计算机艺术绘画学科。

(2) 信号的混沌分析

人们在研究非线性动力学系统中发现了一种对初始条件极其敏感的振荡存在,它看似随机、无规,其实可根据某种规则无穷迭代演化而来。它称为混沌振荡。不少研究者已在相平面对它的相轨迹进行了详尽的研究,对其吸引子、吸引域等也进行了相应的研究。

信号的混沌特性分析的前提是:认为所研究的信号(包括人的声音、自然景物图像、一般视频画面、地震记录、生物电等)是由一个非线性动力学系统产生的。因此,分析这些信号(数据)的混沌参数,可以描述该非线性动力学系统的某些局部性质,从而揭示这些信号的一些深层特性。现有的方法是在 x_n 及 x_{n+1} 相平面上求得其相轨迹以及吸引子、吸引域,并对该非线性系统进行建模,求得其李雅普诺夫指数(Liapunov exponent)等(上面的 x_n, x_{n+1} 是 n 时刻及 $n+1$ 时刻收得的数据)。

已经有人研究两个非线性动力学系统的混沌相轨迹的同步理论,并提出解决同步问题的方法。由此,进行混沌通信的研究。在理论上已有一些成果,但走向实用仍需要做更多的工作。

(3) 人工神经网络信号分析(处理)方法

人工神经网络实质上是一个非线性动力学系统。在 1970—1980 年期间,著名的 PG 模型已被提出,它是在当时人工智能及仿生物脑的基础上提出来的。由于当时人工智能正方兴未艾,因此 PG 模型的提出没有引起重视。直到 1980—1990 年,由于 Rumerhart, Rosenblatt 等人的突破性工作,出现了多层神经网络的 BP 算法(误差反传算法),解决了多层神经网络的训练问题。后来又出现了 Kohonnen 的自组织网络以及 winner-take-all

(WTA)算法,使得对人工神经网络的研究兴起了新热潮,陆续出现了 Oja 等人的主分量分析法、Kosko 的联想记忆网模型、Freeman 的混沌神经元及混沌神经网络模型,以及在 BP 网络基础上提出的径向神经网络模型等,把人工神经网络模型的研究推向新的高潮。

人工神经网络的研究很快与信号分析、模式识别相结合。借助于人工神经网络,可以进行信号特征提取、信号分类、由残缺信号模式“回忆”原来的信号模式、语音及图像处理等许多工作。人工神经网络信号分析方法很快应用于许多涉及信号处理、数据分析的其他学科领域。

由于人工神经网络方法在理论上迄今没有统一和严格的评估准则,因此对于现存的多种模型缺乏理论上的分析比较,从而尚未建成严格的理论体系。另一方面,由于尚未开发出实用的硬件,许多工作只停留在模型阶段,尚未能在解决实际工程问题时发挥作用,因此严重制约了人工神经网络技术的进一步研究及应用。因而在 20 世纪 90 年代末至今,人工神经网络的研究工作在世界范围内处于一个新的低潮期。

然而,不管将来怎样,人工神经网络信号分析方法已成为信号处理领域的一种新方法。由于人工神经网络的自学习、自组织特性,从学科发展的角度看,它已成为一个充满希望的新研究方向,它在某些方面毕竟比传统的人工智能进了一大步。

以上简述了非线性科学对信号处理学科产生的深刻影响,并由此产生了几个公认的重要的新学科分支。另一方面,非线性科学也引入了多种重要的非线性滤波器(non-linear filter)。其中较有代表性的是中值滤波器族。中值滤波器自从被提出以后,因其具有的优越性能而受到广泛重视,并得到许多应用。中值滤波器已出现多种变种形式,其中重要的有形态滤波器(morphology filter)等。人们用中值滤波器族构成的非线性金字塔,在信号分析中有重要的应用。

信号恢复(重构)理论一直是信号处理中重要的学科分支。完整的信号分解/重构理论已经完备,现在的发展方向是研究从部分信号重构原来信号。这是由于传输原因而使信号的一些分量受到损害或丢失。因此如何从这些不完整的数据中估计或重构(恢复)原来的信号,是目前一个重要的研究热点。早在 20 世纪 80 年代已有人对从部分幅度谱或相位谱重构原信号的问题进行了深入的研究。随着近代多分辨率分析、小波分析、金字塔理论以及子带分解与子带编码技术的发展,在丢失部分子带的情况下如何恢复原信号,成为新的课题。现在仍没有解决这个问题的一般算法。

自适应信号处理一直是信号处理学科领域的重要学科分支。自从 Widrow 的《自适应信号处理》一书问世后,这个分支备受重视,并已取得很多理论及应用成果。自适应信号处理是源于解决实际问题的需要。最初是要解决接收机自动寻找并对准信号来的方向(direction of arrival, DOA),这在公安、国防中有很重要的应用。后来是要研究解决通信中的自适应信道均衡、自动回波消除以及噪声的自动抵消等重要工程问题。这些问题至今仍是研究的热点。自适应信号处理中的基本单元——自适应滤波器的理论及工程设计已日趋完善。它实际上是通信与自动控制理论、人工智能领域的交叉学科。前述的人工神经网络中许多重要模型的基本构成单元就是自适应滤波器。

自适应滤波器的一个重要发展方向是解决混叠信号的分离问题。这个问题最初源于语音的混叠分离,要求估计多混叠语音成分的功率及频率。后来,许多研究者致力于解决

混叠图像的分离问题。在地震、地质探索的信号分析中也需要把有用信号从混叠信号中分离出来。现在,在线性混叠条件及一定约束条件下,该研究已取得一定进展,但许多问题仍需要进一步研究解决。

以上对信号处理学科的发展历程作了一个简单的回顾,可归纳为以下几点:

(1) 虽然出现了许多信号分析和处理的新方法、新的学科分支,但从信号处理的基本理论体系而言,至今并无新的性质上的突破性发展。

(2) 解决信号处理中的逆问题是目前学科发展中的难点和热点。

(3) 非线性信号处理方法有可能揭示信号的一些深层次性质,这也是现今的研究难点和热点。

(4) 现今绝大多数的信号处理、信号分析方法完全是一个客观理论体系,它与人认识信号、分析信号的过程基本脱节。尽管有功能强大的计算机分析平台,信号处理及信号分析结果仍需要由人来评价并作出最后的判断。因此,结合人的认知信号的主观过程来作信号处理及分析;即将人对信号认识的主观过程与原来的客观理论结合起来,是目前本学科发展的难点和热点。

(5) 信号是信息的载体,无论是语音、图像还是文字,信号无一不携带着语义信息。因此,研究信号所具有的语义信息问题是本学科的重要方向。这是信息科学、人工智能、现代自动控制系统、应用数学、生物控制等各个学科领域的交叉点。

2. 本书安排

本书结合笔者已有的科研成果,详细介绍信号处理学科在发展中的若干主要问题。内容安排如下:

第1章 介绍自适应信号处理中的盲混叠信号分离和自适应信道均衡等问题。

第2章 介绍信号的分解/合成理论,讲述在部分子带丢失,即在传输过程中有信号损失时,如何利用已有信号数据估计丢失数据并重构信号的问题,并介绍盲信号恢复的(包括图像、视频等信号)几种方法。

第3章 介绍线性多分辨率分析的基本理论,包括高斯塔式分解、拉普拉斯塔式分解以及基于小波的多分辨率分析,并介绍多分辨率分析理论在信号分析及处理中的几个典型应用。

第4章 介绍信号的分形与多重分形理论及其在语音和图像分析中的一些应用。

第5章 介绍非线性信号滤波器及非线性金字塔理论,并介绍一些应用成果。

第6章 介绍信号的混沌性质,分析混沌参数及混沌同步等问题,并介绍混沌通信原理及成果。

1.1 引言

随着信号处理理论和技术的迅速发展,自适应信号处理理论和技术已发展成这一领域里的一个新的分支,并且在通信、雷达、工业控制、地震预报及生物医学电子学等领域获得越来越广泛的应用。对自适应滤波算法的研究是当今自适应信号处理中最为活跃的研究课题之一^[1,2]。自适应信号处理是研究一类结构可变或可调整的系统,它可以通过自身与外界环境的接触来改善自身对信号处理的性能。滤波器的设计方法对滤波器的性能影响很大。当输入信号的统计特性未知,或者输入信号的统计特性变化时,自适应滤波器能够自动地迭代调节自身的滤波器参数,以满足某种准则的要求,从而实现最优滤波。因此,自适应滤波器具有“自我调节”和“跟踪”能力。一般地,我们把自适应滤波器分为线性自适应滤波器和非线性自适应滤波器。非线性自适应滤波器有 Volterra 滤波器^[1]、基于神经网络的自适应滤波器^[1,3]等。虽然非线性自适应滤波器具有很强的信号处理能力,但由于其计算复杂度高,它在实际应用中受到限制。用得最多的仍然是线性自适应滤波器。下面的讨论仅限于线性自适应滤波器及其相应的自适应滤波算法。图 1.1 为自适应滤波器原理框图。

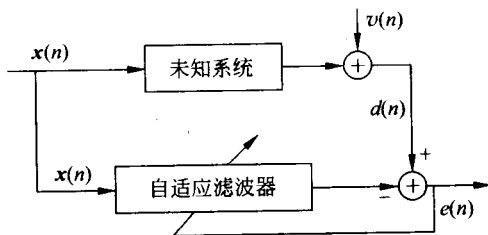


图 1.1 自适应滤波器原理框图

设 $w(n)$ 为自适应滤波器在时刻 n 的权矢量, $x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T$ 为时刻 n 的输入信号矢量, $d(n)$ 为期望输出值, $v(n)$ 为干扰信号, $e(n)$ 是误差信号, L 是自适应滤波器的长度。自适应滤波算法根据其采用的优化准则的不同,通常分为两类最基本的算法^[1,2,4,5]: 最小均方误差(LMS)算法和递推最小二乘(RLS)算法。基于最小均方误差准则,LMS 算法使滤波器的输出信号与期望输出信号之间的均方误差 $E[e^2(n)]$ 最小。基于最小二乘准则,RLS 算法决定自适应滤波器的权系数向量 $w(n)$,使估计误差的加权平方和 $J(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2$ 最小。其中 λ 为遗忘因子,且 $0 < \lambda \leq 1$ 。由这两个准则衍生出许

多不同的自适应滤波算法。人们从算法的收敛精度、收敛速度、跟踪能力、计算复杂度和数值稳定性等方面对 LMS 算法和 RLS 算法进行了研究和改进。

由 Widrow 和 Hoff 提出的最小均方误差(LMS)算法^[6],因其具有计算量小,易于实现等优点而在实践中被广泛采用。基于最速下降法的最小均方误差(LMS)算法的迭代公式为

$$e(n) = d(n) - \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n) \quad (1-1)$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu e(n)\mathbf{x}(n) \quad (1-2)$$

其中 μ 是步长因子。LMS 算法收敛的条件为 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$, λ_{\max} 是输入信号自相关矩阵的最大特征值。在 LMS 算法中,若步长因子 μ 用下列步长代替,则可得到以下 NLMS 算法^[1]:

$$\mu = \frac{\alpha}{\mathbf{x}^T(n)\mathbf{x}(n)}, \quad 0 < \alpha < 2 \quad (1-3)$$

NLMS 算法可看作是一种变步长的 LMS 算法。初始收敛速度、时变系统跟踪能力及稳态失调是衡量自适应滤波算法优劣的 3 个最重要的技术指标。文献[1,7]分析了最小均方误差(LMS)算法的收敛性能。由于主输入端不可避免地存在干扰噪声,自适应滤波算法将产生参数失调噪声。干扰噪声 $v(n)$ 越大,引起的失调噪声就越大。减少步长因子 μ ,可减少自适应滤波算法的稳态失调噪声,提高算法的收敛精度。然而,步长因子 μ 的减少将降低算法的收敛速度和跟踪速度。因此,固定步长的自适应滤波算法在收敛速度、时变系统跟踪速度与收敛精度方面对算法调整步长因子 μ 的要求是相互矛盾的。为了克服固定步长的自适应滤波算法这一矛盾,人们提出了许多变步长自适应滤波算法。R. D. Gitlin^[8]曾提出了一种变步长自适应滤波算法,其步长因子 μ 随迭代次数 n 的增加而逐渐减小。Yasukawa^[9]曾提出了使步长因子 μ 正比于误差信号 $e(n)$ 的大小。而文献[10]提出了一种时间平均估值梯度的自适应滤波算法。叶华^[11]等提出了另一种变步长自适应滤波算法,即步长因子 μ 与 $e(n)$ 和 $x(n)$ 的互相关函数的估值成正比。吴光弼等在文献[12]中指出:对最速下降法的梯度优化估值和对误差信号非线性处理,是改善 LMS 算法性能的等同措施,对误差信号进行的非线性处理等效于变步长措施。通过对误差信号的非线性处理,该文得到了 L. E-LMS 算法。在分析了上述变步长自适应滤波算法之后,覃景繁等^[7]根据变步长自适应滤波算法的步长调整原则(即在初始收敛阶段或未知系统参数发生变化时,步长应比较大,以便有较快的收敛速度和对时变系统的跟踪速度;而在算法收敛后,不管主输入端干扰信号 $v(n)$ 有多大,都应保持很小的调整步长,以达到很小的稳态失调噪声),给出了 Sigmoid 函数变步长 LMS 算法(SVSLMS),其变步长因子 μ 是 $e(n)$ 的 Sigmoid 函数,即

$$\mu(n) = \beta \{1/[1 + \exp(-\alpha |e(n)|)] - 0.5\} \quad (1-4)$$

该算法能同时获得较快的收敛速度、跟踪速度和较小的稳态误差。然而,该 Sigmoid 函数过于复杂,且在误差 $e(n)$ 接近零处变化太大,不具有缓慢变化的特性,使得 SVSLMS 算法在自适应稳态阶段仍有较大的步长变化,这是该算法的不足。高鹰和谢胜利^[13]给出了另一种满足步长调整原则的函数,即变步长因子 μ 是 $e(n)$ 的函数:

$$\mu(n) = \beta [1 - \exp(-\alpha |e(n)|^2)] \quad (1-5)$$

其中,参数 $\alpha > 0$ 控制函数的形状,参数 $\beta > 0$ 控制函数的取值范围。该函数比 Sigmoid 函数简单,且在误差 $e(n)$ 接近零处具有缓慢变化的特性,克服了 Sigmoid 函数在自适应稳态阶段步长调整过程中的不足。

在变步长自适应滤波算法中,要求用户选择附加常数和初始步长来控制步长序列的自适应状态,并且需采取措施防止步长超过它们的最大和最小界限。另外,所有这些步长调整算法均基于某些语义规则,需要将步长调整转换成数学公式。文献[14,15]用一个模糊逻辑系统来实现输入数据向量到一个标量步长值之间的映射,从而给出模糊 LMS 自适应滤波算法的一般表达形式。输入数据向量到标量步长值之间的映射为

$$\mu(n) = \text{FIS}(e^2(n), n) \quad (1-6)$$

或者

$$\mu(n) = \text{FIS}(e^2(n)) \quad (1-7)$$

这里 FIS 表示模糊推理系统。对于 FIS 所表示的模糊系统, Gan 采用了如下形式的 IF-THEN 模糊规则^[14]: IF the squared error is small, THEN the step size is small。由于这些方法只采用了 THEN 规则,不可避免地会导致一些不可预测的结果。文献[16]提出了一个受 ELSE 规则支配的模糊 LMS 算法,其中受 ELSE 规则支配的模糊推理系统是一个基于 IF-THEN-ELSE 推理的特殊模糊系统。由于 ELSE 规则的存在可以确保至少有一个规则能得到满足,所以在任何输入数据条件下推理机制都能被成功地执行。因此,该方法能避免一些不确定的结果,而且能提供更好的收敛性能。

在一些自适应滤波应用中,即使简单的 LMS(NLMS)算法实现起来也较复杂,为此,系数部分更新自适应滤波算法被提出。该算法的主要思想是在自适应滤波算法的每次迭代中,仅仅自适应滤波器的部分系数被更新,这使得整个自适应滤波算法的计算量有所降低。这类算法主要有: Scott^[17] 提出的 periodic LMS 算法、Aboulnasr^[18] 提出的 M-Max-NLMS 算法和 Douglas^[19] 提出的 Max-NLMS 算法。

为改善 LMS 算法的性能, Mayyas^[20] 提出了 Leaky-LMS 算法,其权系数更新等式是

$$\mathbf{w}(n+1) = (1 - \mu\gamma)\mathbf{w}(n) + \mu e(n)\mathbf{x}(n) \quad (1-8)$$

其中 μ 为步长因子, γ 是泄漏因子。Leaky-LMS 算法等效于在自适应滤波器的输入端叠加白噪声。Douglas^[21] 对 Leaky-LMS 算法的分析和比较结果显示, Leaky-LMS 算法的直接实现方式优于在自适应滤波器的输入端叠加白噪声的实现方式。

1984 年, Walach^[22] 从最小化 $E[e^4(n)]$ 的角度给出了 LMF 算法,其权系数迭代公式为

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu e^3(n)\mathbf{x}(n) \quad (1-9)$$

1996 年, Zerguine^[23] 把 LMS 算法和 LMF 算法结合在一起,给出了混合 LMS-LMF 算法,并将其应用于回波消除中。该算法对噪声的变化显示了良好的稳定性。

对于强相关的信号, LMS 算法的收敛性能降低,这是由于 LMS 算法的收敛性能依赖于输入信号自相关矩阵的特征值发散程度,输入信号自相关矩阵的特征值发散程度越小, LMS 算法的收敛性能越好。Dentino 等人^[24] 经过研究发现,对输入信号作某些正交变换后,输入信号自相关矩阵的特征值发散程度会变小,并于 1979 年首先提出了变换域自适应滤波的概念,其基本思想是把时域信号转变为变换域信号,在变换域中采用自适应算