

信号与信息处理丛书

小波滤波方法及应用

潘 泉 张 磊 孟晋丽 张洪才 著

清华大学出版社

信号与信息处理丛书



小波滤波方法及应用

潘 泉 张 磊 孟晋丽 张洪才 著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

十年来,作为小波理论与应用的重要分支,小波滤波得到了很大的发展,标志着一种新的信号滤波方法的出现。本书是一本全面系统总结该领域研究成果和前沿进展的学术专著,具有较为完整的理论体系和科学的研究方法分类。

全书共9章,内容分为三个部分:第一部分,对本书涉及的小波分析基础理论进行了介绍;第二部分,阐述了小波滤波原理与前沿动态,对作者十年来取得的有价值的研究成果和国内外这一领域的研究进展进行了全面系统总结,力求反映这一领域迅速发展的研究概貌和最新前沿;第三部分,给出了一些小波滤波软件和应用实例。这三部分独立成篇,可以根据需要选读。

本书的读者对象是从事小波理论及应用研究的大学高年级学生、研究生和科研人员。对从事这一领域的研究者来说,本书不失为一本有价值的参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

小波滤波方法及应用/潘泉等著. —北京:清华大学出版社,2005.9

(信号与信息处理丛书)

ISBN 7-302-11093-X

I. 小… II. 潘… III. 小波分析—滤波理论 IV. ①0177 ②0211.64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 052524 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

责任编辑:陈国新

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:12.5 字数:321千字

版 次:2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11093-X/TN·255

印 数:1~3000

定 价:25.00元(含光盘)



丛书出版说明

FOREWORD

信号与信息处理可以说是信息技术中的核心部分。随着信息科学与技术的飞速发展,随着信息技术深入到各个领域而得到广泛的应用,信号与信息处理也作为前沿技术而发生着重大的变化。编辑出版“信号与信息处理丛书”正是为了反映这种变化,为了加速培养这方面的人才,也为了进一步推动这一领域的发展。本丛书的内容力求能反映信号与信息处理技术的前沿内容,具有高的学术意义与应用价值。入选的书稿可以是创作的专著,也可以是高水平的译作。

这套丛书不仅适合于作研究生教学参考之用,可作为高校教师与有关领域研究人员学习与参考书。

从历史来看,真正影响着生活的是不断增长的知识与技术的积累和经反复探索所形成的观念。相信这套丛书的出版,会增加正在成长中的信号与信息处理技术的积累,而它对生活的作用则是显而易见的。

李衍达

2004年8月24日

前言

FOREWORD

小波的出现数学界引起了广泛的关注,其理论与应用得到了空前的发展,已经成为信号处理领域一个重要的研究方向。作为小波理论与应用的重要分支,十年来,小波滤波的理论及应用也得到了很大的发展,标志着一种新的信号滤波方法的出现。小波滤波研究主要集中在三个方向,包括基于信号奇异性的模极大值重构滤波、基于信号尺度间相关性的空域相关滤波和基于小波变换解相关特性的小波域阈值滤波,并且在医学图像和 SAR 图像滤波等领域得到了较为成功的应用。目前,有关小波滤波的研究成果散布于国内外各种学术期刊及书籍,尚未见到国内外在这一领域有比较全面系统的研究专著。究其原因,一方面是由于小波滤波的理论框架尚不完善,对小波滤波机理的认识也有待深入;另一方面,目前与小波在图像压缩等领域的应用相比,小波滤波应用的广泛性和有效性仍有很大的发展空间,可以说小波滤波的研究正处于方兴未艾之中,有很多问题亟待解决。从事小波理论及应用研究的大学高年级学生、研究生和科研人员,十分需要一本全面系统反映小波滤波研究进展,具有较为完整的理论体系和科学的研究方法分类的专著。本书作者旨在弥补这一不足。

小波滤波的机理是基于信号与噪声的小波系数在尺度上的不同性质,采用相应规则,对含噪信号的小波系数进行取舍、抽取或切削等非线性处理,以达到去除噪声的目的。例如模极大值重构滤波法,就是利用信号与噪声具有不同 Lipschitz 指数的性质,对含噪小波系数进行取舍。需要指出的是,这一领域目前用得较多的术语包括去噪(denoising)、降噪(noise reduction)或滤波(filtering)等。这些术语在国内外的文献中均有使用,目前尚无统一标准。本书作者选择滤波,认为滤波的含义更为广泛,因为在用小波对信号处理时,除去噪外,还有平滑等功能,同时考虑到小波分析所具有的时频分析特性,“小波滤波”更能反映这一处理方法的本质。

作者自 20 世纪 90 年代初期就将小波滤波理论和应用作为重要的研究方向,在国家自然科学基金、国防预研基金、航空科学基金以及国家重点实验室基金等众多项目的支持下,培养了许多硕士、博士研究生,发表了一系列的学术论文,取得了不少有价值的研究成果,并获得了较好的应用效果。本书将反映作者自己的研究成果,此外,还参考国内外有关书籍和大量的文献资料,尝试对这一领域的研究成果进行尽可能全面系统的总结,并反映该领域迅速发展的最新前沿。作者相信,这将对小波滤波领域的研究工作起到促进作用,也将对从事小波

分析与信号处理工作的科技人员和高等院校师生有所裨益。

本书的内容分为三个部分。首先,对本领域所需要的基础知识进行了介绍;然后分析了小波滤波的基本原理,对作者十年来取得的有价值的研究成果和国内外这一领域的研究进展进行了全面系统的总结;最后给出了小波滤波的一些软件和应用实例。这三部分独立成篇,可以根据需要单独选读。各部分使用的符号与术语是统一的。全书共分9章:第1章对全书内容作概述;第2章对小波变换的基本理论进行了介绍;第3章引入了多分辨率分析和多分辨率滤波器组的概念,并给出了小波变换的快速算法——Mallat算法;第4章系统研究了三种小波滤波方法,并对这三种方法作了分析比较;第5章首先给出了空域相关滤波中不同尺度噪声方差的估计和阈值参数的选取方法,其次给出了小波域阈值滤波中阈值确定的方法,最后将这两种滤波方法的优点结合起来,提出了一种新的基于空域相关的阈值滤波方法;第6章对小波域阈值滤波算法进行了全面的分析讨论;第7章介绍了其他小波滤波方法;第8章介绍了作者所在课题组的“小波软体”软件开发和其他常用的一些小波软件;第9章给出了小波滤波的几个应用实例。

本书的读者对象是从事小波分析,特别是小波理论及应用研究的大学高年级学生、研究生和科研人员等。读者应具备信号与系统、信号处理、随机过程以及数理统计等基础知识。

在本书写作过程中,作者得到了很多同仁的帮助。其中,张学帅参与了第2章的整理,并负责完成了第8章的写作。本书的部分内容还来自吴锦涛、王博、魏来、蔡云泽等研究生所在课题组的研究工作。本书所附软件“小波软体”由张学帅、宁冬子和任杰等三位研究生共同开发,最后由张学帅负责完成。作者对他们的工作深表谢意。

清华大学的杨福生教授对本书的完成提出了很好的建议,并对本书的出版给予了极大的关注和支持,作者在此向杨福生教授深表谢意。作者同时要感谢清华大学出版社的工作人员,特别是清华大学出版社的蔡鸿程总编辑和陈国新编辑,正是他们的大力支持才保证了本著作如期出版。书中参考和引用的研究成果、著作和论文均在各章后的参考文献中列出,在此,作者对这些文献的著作者表示感谢。

本书完成历时三年。尽管作者竭尽全力,但是由于时间和水平有限,不当甚至错误之处在所难免,恳请同行专家和广大读者批评指正。

作 者

2005年3月于西安

符号及中英文对照

ϕ ——尺度函数

ψ ——小波函数

$L^2(R)$ ——平方可积空间

$f = g + \varepsilon$ ——观测数据模型

$w = \theta + \eta$ ——小波域模型

t ——阈值

discrete Cosine transform, DCT——离散余弦变换

mother wavelet——母小波

wavelet transform, WT——小波变换

continuous wavelet transform, CWT——连续小波变换

discrete wavelet transform, DWT——离散小波变换

orthogonal wavelet transform, OWT——正交小波变换

translation invariant discrete wavelet transform, TIDWT——平移不变小波变换

wavelet packet——小波包

multiresolution analysis, MRA——多分辨率分析

spatially selective noise filtration, SSNF——空域相关滤波

hard-thresholding——硬阈值滤波

soft-thresholding——软阈值滤波

semisoft shrinkage——半软阈值滤波

universal method——通用阈值

mean square error, MSE——均方差

SURE——Stein's unbiased risk estimator

cross-validation, CV——交叉验证

generalized cross-validation, GCV——广义交叉验证

false discovery rate, FDR——错判率

lifting scheme——提升框架

signal to noise ratio, SNR——信噪比

linear minimum mean square estimator, LMMSE——线性最小均方差估计
generalized Gaussian distribution, GGD——广义高斯分布
maximum a posteriori estimator, MAP——极大后验估计
Laplacian-of-Gaussian, LOG——高斯拉普拉斯算子

目录

CONTENTS

第 1 章 引言	1
1.1 小波理论的发展	1
1.2 小波分析的应用	3
1.3 小波滤波问题、原理及方法	5
1.3.1 基本原理	6
1.3.2 小波滤波的数学模型及基本方法	7
1.3.3 小波域阈值滤波的基本问题	8
1.3.4 小波域系数模型	10
1.4 本书的内容安排	10
参考文献	11
第 2 章 小波变换基本理论	17
2.1 从傅里叶变换到小波变换	17
2.2 小波变换	19
2.2.1 连续小波变换	19
2.2.2 尺度函数 (scaling function)	20
2.2.3 二带小波变换	21
2.2.4 小波框架	23
2.2.5 正交小波	24
2.2.6 双正交小波	25
2.3 向量小波	25
2.3.1 向量小波的分解和重构算法	25
2.3.2 二维向量小波的分解和重构算法	26
2.4 提升框架	27
小结	29
参考文献	29
第 3 章 多分辨率分析与 Mallat 算法	31
3.1 预备知识	31

3.1.1	离散系统与冲激响应	31
3.1.2	多采样率信号处理的一些基本关系	32
3.2	多分辨率分析	34
3.2.1	多分辨率分析概念的引入	34
3.2.2	小波函数与小波空间	35
3.2.3	二维多分辨率分析	35
3.3	二尺度方程与多分辨率滤波器组	36
3.3.1	二尺度方程	36
3.3.2	滤波器组系数 $h(n)$ 和 $g(n)$ 的性质	37
3.4	由滤波器组系数构造小波基	38
3.4.1	由 $h(n)$ 求尺度函数 $\phi(t)$	38
3.4.2	正规性条件	39
3.4.3	Daubechies 小波	39
3.4.4	紧支撑小波的性质	40
3.4.5	双正交小波基	41
3.5	Mallat 算法	41
3.5.1	小波分解的快速算法	41
3.5.2	小波重构的快速算法	42
3.5.3	离散序列的小波变换	43
3.5.4	二维 Mallat 算法	44
	小结	45
	参考文献	45
第4章	小波域的三种滤波方法	46
4.1	信号和图像的小波域特性	46
4.1.1	Lipschitz 正则性	47
4.1.2	小波系数幅值对 Lipschitz 指数的度量	48
4.1.3	多尺度边缘检测	51
4.2	模极大值重构滤波	53
4.2.1	利用模极大值重构滤除噪声的原理	54
4.2.2	滤波算法及交替投影法	54
4.3	空域相关滤波	56
4.4	小波域阈值滤波	58
4.4.1	小波域阈值滤波算法	58
4.4.2	阈值函数的选取	59
4.5	三种滤波方法的分析与比较	60
4.5.1	算法比较	60
4.5.2	存在问题	61

小结	61
参考文献	62
第 5 章 空域相关和小波域阈值滤波算法的完善与改进	63
5.1 空域相关滤波算法	63
5.1.1 噪声在各个尺度上的方差 σ_j^2	63
5.1.2 噪声方差的估计	64
5.1.3 改进的空域相关滤波算法	65
5.2 小波域阈值滤波算法的完善与改进	73
5.2.1 平移不变小波变换	73
5.2.2 阈值参数 c 的自适应选取	78
5.2.3 图像中噪声方差的估计	81
5.3 基于空域相关的图像阈值滤波	83
5.3.1 小波域偏移相邻尺度积系数	84
5.3.2 基于空域相关的阈值滤波	85
5.4 小波基的选取	88
小结	92
参考文献	92
第 6 章 小波域阈值滤波的阈值确定方法	95
6.1 极小化风险的阈值确定	95
6.1.1 CV 算法	95
6.1.2 GCV 算法	99
6.2 统计方法的阈值确定	103
6.2.1 FDR 滤波算法	103
6.2.2 贝叶斯检验阈值滤波算法	106
小结	112
参考文献	112
第 7 章 其他小波滤波方法	113
7.1 V&M 滤波方法	113
7.1.1 小波系数的协方差结构	113
7.1.2 Daubechies 小波的协方差结构分析	114
7.1.3 V&M 滤波算法	117
7.1.4 改进的 V&M 滤波算法	118
7.2 小波谱滤波	120
7.2.1 小波谱基本概念	120
7.2.2 小波谱的正则性	123

7.2.3 小波谱滤波算法	124
7.3 M 带小波滤波	125
7.4 基于二代小波的小波滤波	131
7.4.1 基于自适应小波变换的阈值滤波	131
7.4.2 非均匀采样数据的滤波	131
7.5 基于小波域系数模型的小波滤波	132
7.5.1 尺度内模型	132
7.5.2 尺度间模型	133
7.5.3 混合模型	133
7.5.4 基于小波域混合模型的图像滤波	134
7.6 自适应收缩滤波法	141
小结	142
参考文献	142
第 8 章 小波滤波软件的开发	146
8.1 小波滤波软件的开发现状	146
8.2 小波软件的开发与应用	148
小结	158
参考文献	159
第 9 章 小波滤波的应用实例	160
9.1 小波滤波在边缘检测中的应用	160
9.1.1 一维相邻尺度积系数	161
9.1.2 二维情况	163
9.1.3 性能分析	163
9.1.4 仿真实验	166
9.2 自适应相邻尺度积阈值法在核磁共振图像去噪中的应用	170
9.3 小波滤波在 SAR 图像去噪中的应用	177
9.4 小波滤波在超声波医学图像去噪中的应用	178
小结	179
参考文献	179
结束语	181
参考文献	183

第 1 章

CHAPTER 1

引言

分析平稳信号的理想工具是傅里叶变换。对于非平稳信号,傅里叶变换不再是有效的分析工具,因为其无法描述信号的局部频率特征。而小波变换正是分析非平稳信号的有力工具。小波变换是傅里叶变换的新发展,它既保留了傅里叶变换的优点,又弥补了傅里叶变换在信号分析上的一些不足。原则上讲,小波变换适用于以往一切傅里叶变换应用的领域。但小波变换并不是万能的,作为一种数学工具,小波变换(分析)有其特定的应用范围,即面向更能发挥小波分析优势的时间(空间)-频率局域性问题。

小波分析作为一门新的数学学科,包含了丰富的数学内容,并推动了泛函分析和调和理论的发展,同时,在诸如图像压缩、信号去噪、自适应滤波、数值分析和物理学等领域得到了广泛的应用,是当前最为活跃的应用研究领域之一,并逐渐形成为一门极具生命力的新学科。

1.1 小波理论的发展

从历史上追溯,小波分析的原始思想形成于 20 世纪初,即用一个函数的伸缩及平移构成 $L^2(R)$ 函数空间的一组基,此函数称为小波。第一个小波是由 Haar 在 1910 年提出的,他在一篇描述抽象 Hilbert 空间特性的论文中给出了一个由盒函数产生的 $L^2(R)$ 函数空间的一组正交基。1936 年 Littlewood 和 Paley 开发出一种利用八度音阶将频率分组的方法,这是按二进制对频率成分进行分组的傅里叶分析思想的最早起源。1946 年, Gabor 提出加窗傅里叶变换,可以反映信号在任意局部范围的频率特性。

经过数学家、物理学家、地理学家半个世纪的共同努力, Haar 系已发展成为统一的理论框架,使小波分析成为傅里叶分析发展史上一个新的里程碑(本章参考文献 1 对前人这些零散的工作有较详尽的论述)。直到 20 世纪 80 年代中期由一批数学家领导的“French School”小组为小波分析奠定了坚实的数学基础, Daubechies 在本章参考文献 2 中很好地总结了小波分析的发展历史。小波变换

是由法国地质物理学家 Morlet 于 1980 年提出的,随后,他与法国理论物理学家 Grossman 共同提出连续小波变换的几何体系,其基础是平移和伸缩下的不变性^[3],这使得能够将一个信号分解成对空间和尺度的独立贡献,同时又不损失原有信号的信息。1982 年,Strömberg 给出了一个无限支撑的、正交的逐段多项式小波。Battle 和 Lemarie 也分别独立地构造了类似的小波。1985 年,法国数学家 Meyer 给出了一个指数衰减的任意阶可导小波。1988 年 Daubechies 基于离散滤波器迭代方法构造了紧支撑标准正交小波基,即一系列的具有任意选定正则性的、有限支撑的、正交的尺度函数和小波,并将当时所有正交小波的构造统一起来,为以后的构造设定了框架^[4]。随后她又发表了长篇综述^[5],对小波理论的发展和推广起到积极的作用,该文成为目前小波理论研究的最重要的文献之一。

1989 年 Mallat 将计算机视觉领域内多尺度分析的思想引入到小波分析中,提出多分辨率分析(multiresolution analysis, MRA)的概念,用多分辨率分析来定义小波,给出了构造正交小波基的一般方法和与 FFT 相对应的快速小波算法——Mallat 算法,并将它用于图像分析和完全重构^[6]。它使许多以前分散在各应用领域里研究的小波成果有可能统一在同一个理论框架下。

1992 年,在小波变换的基础上, R. R. Coifman 和 M. V. Wickerhauser 进一步提出了小波包(wavelet packet)的概念^[7,8],并从数学上作了严密的推导。利用推广的二尺度方程,原来的尺度函数和小波可以生成一族包括原小波基在内的“小波包”函数。通过引入 Shannon 熵作为信号处理应用中对不同小波包基函数的选定准则,为信号进行自适应频带划分提供了工具^[7,9]。

1992 年, A. Cohen 和 I. Daubechies 提出了“双正交小波”的概念,即对同一信号 $f \in L^2(R)$, 其分析小波和综合小波可以是两组不同的函数系^[10]。

1993 年,基于 M. Vetterli 和 P. P. Vaidyanathan 各自独立提出的多采样率数字信号处理器、广义镜像滤波器组和共轭正交镜像滤波器组的理论^[11,12],产生了 M 带小波,它有一个尺度函数和 $M-1$ 个小波函数^[13,14]。

由于实际信号均是有限支撑的,为了很好地刻画信号,避免出现譬如周期化处理引起的边界效应或失真,1993—1994 年,许多学者从不同的角度提出了小波的思想 and 构造方法^[15,16]。

为了解决正交小波基没有线性相位的问题,有学者提出多小波的理论^[17~20],用向量小波来代替标量小波以满足线性相位的要求。1994 年, T. N. T. Goodman 和 S. L. Lee 首先提出了这个概念,并且用 Hermit 样条构造了第一个多小波^[19]。而第一个非样条多小波是由 Geronimo, Hardin 和 Massopust 利用分形理论在 1994 年给出的,记为 GHM 多小波——一个著名的多小波^[20]。

在多小波的思想出现的同时,1994 年 Sweldens 提出了用提升方法来构造具有线性相位的小波变换^[21,22],进而给出整数可逆的提升框架^[23,24],使得小波变换向实用前进了一大步。

随着小波理论的深入发展,小波应用和产业的建立也成为一种趋势。各种以小波理论研究和应用为主的公司和研究小组相继成立,例如,以 I. Daubechies 为首的 Bell 实验室小波小组、D. L. Donoho 领导的 Stanford 大学的小波与统计学中心、Gopinath 和

Burrus 领导的 Rice 大学的小波与多滤波器组中心以及 Wickerhauser 等的小波包应用研究中心。而“Wavelet Digest”成为 Internet 网上发行最广的专业期刊之一。从 20 世纪 90 年代初,国内不少院校和科研单位相继成立了小波理论和应用研究的专题小组,已取得了部分突出成果。而且,可以实现小波变换的集成芯片也已经问世。现在,有关小波理论的文献已经遍布当代信息科学的所有学科。所有这些都充分显示了小波分析自身的优势和强大的生命力。

1.2 小波分析的应用

小波变换是近十几年信号处理领域研究的一个热点,许多学者将小波在理论上的研究成果应用到诸如图像压缩、特征提取、信号滤波和数据融合等方面,而且小波变换的应用领域还在不断地发展当中。小波之所以在信号处理领域具有很大的优势,在于小波变换可以获得信号的多分辨率描述,这种描述符合人类观察世界的一般规律,同时,小波变换具有丰富的小波基可以适应具有不同特性的信号。

目前,小波在信号处理和图像处理中的应用得到空前发展,大量的理论及应用成果已经出现。

1. 小波分析在图像压缩编码中的应用

由于小波分析具有时频分析、多分辨率分析等优点,易与人类视觉特性相结合,因此小波变换用于信号与图像压缩是小波分析应用的一个重要方面。它的特点是压缩比高,压缩速度快,压缩后能保持信号与图像的特征不变,且在传递过程中可以抗干扰。基于小波分析的压缩方法很多,比较成功的有小波包最优基法、小波域纹理模型方法、小波变换零树压缩、小波变换向量量化压缩等。

根据小波变换的时频局部化原理,基于小波变换的图像编码与经典的 JPEG(moving picture experts group)方法相比,至少具有以下优点^[93,94]:

(1) 在基于 DCT(discrete Cosine transform)的图像变换编码中,人们将图像分成 8×8 像素或 16×16 像素的块来处理,故容易出现方块效应。而小波变换是对整幅图像进行变换,因此在重构图像中可以免除采用分块正交变换编码所固有的方块效应。

(2) 小波变换采用塔式分解结构,与人眼由粗到精、由全貌到细节的观察习惯相一致,这是将 WT(wavelet transform)与 HVS(human visual system)的空间分解特性结合起来以改善图像压缩性能的有利条件。小波变换比 DCT 变换更符合人的视觉特性,通过合理的量化编码产生的人为噪声比同样比特率下 JPEG 方法产生的影响要小得多。

(3) 小波变换是图像的时频表示,具有时间频域定位能力,因此可实现图像中平稳成分与非平稳成分的分离,从而可对其进行高效编码。

(4) 尺度由大到小变化,高频图像的细节逐渐增多,因此可以先给出一幅较粗糙的图像,然后根据需要提供更好的细节。

总而言之,小波变换用于图像压缩时,除具有时频局部化分析方法处理非平稳信号的固有长处外,还体现在它具有易于与 HVS 相结合的潜力上。在图像压缩标准“JPEG-

2000”中,小波已成为一个主要的技术。

2. 小波分析在信号滤波中的应用

在传统的基于傅里叶变换的信号处理方法中,要使信号和噪声的频带重叠部分尽可能地小,这样,在频域就可以通过时不变滤波方法将信号同噪声区分开。而当它们的频谱重叠时,这种方法就无能为力了。基于小波变换的非线性滤波是完全不同的,在这种方法中,谱可以重叠,但是谱的幅度(而不是谱的位置)要尽可能不同。在小波变换域,可通过对小波系数进行切削、缩小幅度等非线性处理,以达到滤除噪声的目的。采用这种方法滤波可在一定程度上避免一般低通滤波时造成的信号突变部分变模糊,然而同传统的低通滤波相似,也会造成小程度上的图像(或信号)细节丢失。在使用这种方法时,还应考虑抑制噪声与保留信号细节之间的折衷问题。

3. 小波分析在图像处理边缘检测中的应用

常规的边缘提取只是在原始图像上(时域)进行的,利用图像边缘点处的灰度阶跃变化进行边缘检测,然后提取图像的边缘。常用的边缘检测方法有差分算子法、广义 Hough 变换法、最优曲线拟合法以及模糊边缘检测法等^[94]。在实际图像中,对应景物图像的边缘灰度变化有时并不十分明显,另外,图像中也存在噪声。因此,时域方法受噪声和模糊的干扰很大。

小波变换的模极大值点对应于信号的突变点,在二维情况下,小波变换适用于检测图像的局部奇异性,故可通过检测模极大值点来确定图像的边缘。图像边缘和噪声在不同尺度上具有不同的特性,因此在不同的尺度上检测到的边缘在定位精度与抗噪性能上是互补的。在大尺度上,边缘比较稳定,对噪声不敏感,但由于采样移位的影响,使得边缘的定位精度较差;在小尺度上,边缘细节信息比较丰富,边缘定位精度较高,但对噪声比较敏感。因此,在多尺度边缘提取中,应发挥大、小尺度的优势,对各尺度上的边缘图像进行综合,以得到精确的单边像素宽的边缘。详细论述见 9.1 节。

4. 小波分析在数字水印中的应用

数字水印(digital watermarking)是一种新的有效的数字产品版权保护和数据安全维护技术,它是一种十分贴近实际应用的信息隐藏技术。以图像为载体对象的水印技术是当前研究的热点,由于小波分析在图像处理中所体现出的优势,目前已经有学者将小波分析用在了图像水印技术中。使用小波域水印方法的优点与在 JPEG 中使用小波是类似的,主要表现在以下三个方面^[94]:一是可以保证在“JPEG-2000”有损压缩下水印不会被去除;二是可以将图像编码研究中关于视觉特性的研究成果用于水印技术;三是有可能提供在压缩域中直接嵌入水印的方法。除此之外,小波的多分辨率分析与人眼视觉特性是一致的,这对根据 HVS 选择适当的水印嵌入位置和嵌入强度有很大的帮助。

和其他变换域的水印技术一样,小波变换域水印也分为水印嵌入、提取(检测)两部分,小波水印的嵌入和提取都是在小波域中进行的。在此过程中,小波的类型、水印的选取、水印嵌入的强度以及水印嵌入的位置都会影响到水印系统的性能,包括水印的鲁棒性

和视觉可见性。

5. 小波分析在遥感影像融合中的应用^[94]

基于小波分析的影像融合技术是目前遥感影像融合研究的主流。在低分辨率的多光谱影像和高分辨率的全色影像的融合中,要求充分利用多光谱影像的光谱信息与全色影像的细节信息,使融合后的多光谱图像具有较高的空间细节表现能力,同时较好地保持原始多光谱图像的光谱特性。传统的小波分析融合方法是在小波变换域中,用高空间分辨率的全色图像的细节分量替代低空间分辨率的多光谱图像的细节分量,然后对多光谱图像的小波系数进行小波逆变换,得到融合的多光谱图像。在小波变换域中,细节系数幅值较大的位置对应于灰度变化,即对应于边缘、突变点等显著特征,在融合中不做简单的替代,而是综合考虑两幅影像的显著特征,按一定的融合准则选取每一位置上的小波系数,再经过小波逆变换得到重构的融合影像。这就是基于特征的小波分析融合方法。

上面列出了小波分析在图像处理领域的一些应用,关于小波在模式识别、语音识别、量子物理、地震勘测、流体力学、电磁场、CT 成像、机器视觉、机器故障诊断与监控、分形、数值计算、微分方程计算等领域的应用,本书不再涉及,有兴趣的读者可参考相关文献^[87~89,91,95]。

1.3 小波滤波问题、原理及方法

随着计算机应用技术的迅速发展,在数据分析和信号处理方面涌现出大量有趣的课题。从银河系天文学到分子光谱学,从 SAR 图像到医学图像,直至计算机视觉等领域,我们都需要从不完备的、直接或间接测量的,而且往往是被噪声污染的数据中恢复信号、曲线、图像、频谱或密度。这就使得利用各种信号处理理论、数学分析方法以及计算机技术对各种信息在一定准则下进行滤波、估计和分析的技术得以迅速发展^[25~27]。

近年来,小波滤波这一概念不断见之于有关信号及图像处理研究的文献中^[27~40],这标志着一种新的信号滤波思想的出现。在早期的多尺度信号处理工作中,人们就已注意到信号和噪声在不同尺度上有不同的特征表现,并试图有效地利用这些特征,小波变换的出现为这一思想提供了一个自然而完美的工具,使信号图像的多尺度处理技术得到迅速发展。

20 世纪 90 年代初期,在一些公开出版的文献中开始出现有关小波去噪(denoising)的概念或术语,表示在小波域对噪声小波系数进行抑制,以达到去除噪声的目的^[32,41]。Lu Jian 则多用术语降噪(noise reduction)^[30,33,42,43]。直到 1994 年,Donoho 正式解释了“去噪”一词的含义,指的是通过对小波系数阈值化处理基本上可去除所有的噪声,在均方差意义下取得最优的去噪效果^[37]。事实上,随着小波去噪方法应用的推广和深入,考虑到具体应用目的的不同,目前用得较多的术语还有估计(estimation)、回归(regression)、平滑(smoothing)和滤波(filtering)等,在国内外的文献中均有使用,且尚无统一标准。由于滤波的含义更为广泛,并且在小波分析中,除去噪外,还有如平滑、锐化和保留信号特征等功能,同时考虑到小波分析所具有的时频分析功能,作者认为“小波滤波”更能全面反映