



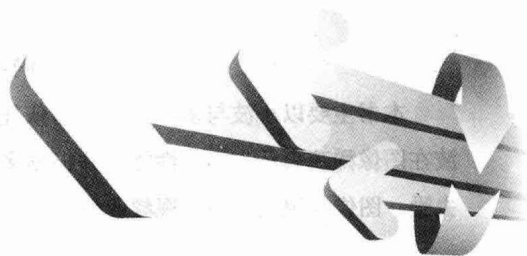
图像的多小波 稀疏表示及其应用

方志军 著

Tuxiang De Duoxiaobo
Xishu Biaoshi Jiqi Yingyong

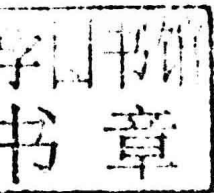


北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



图像的多小波 稀疏表示及其应用

方志军 著



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

内容简介

本书主要以小波与多小波理论为依托,从熵和能量集中的角度,分析小波与多小波在图像稀疏表示方面的性能,并根据多小波在图像稀疏表示方面的特性,结合图像去噪、图像与视频压缩、视频业务模型、图像水印等方面的应用进行了较深入的论述。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

图像的多小波稀疏表示及其应用 / 方志军著. —北京:
北京交通大学出版社, 2010. 1

ISBN 978 - 7 - 5121 - 0231 - 6

I. ①图… II. ①方… III. ①小波分析 - 应用 - 图象处理
IV. ①TP391. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 155137 号

责任编辑: 陈昌文

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010 - 51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京泽宇印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 710 × 1000 1/16 印张: 15.5 字数: 240 千字

版 次: 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 0231 - 6

定 价: 25.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监局反映。

投诉电话: 010 - 51686043; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前言

自小波出现以来,不论在数学或工程应用领域,均产生了不小的影响,因其较好的稀疏表示及其多分辨率的性能,成为图像处理与非平稳信号强有力的分析工具。但研究发现,小波本身无法同时满足正交性、对称性、紧支撑、高消失矩等特性,使小波很多优异的性能难以得到充分应用,于是,人们构造了多小波。多小波以其理论上的优势,促进了小波在各工程领域的广泛应用和发展。

本书主要以小波与多小波理论为依托,从熵和能量集中的角度,分析小波与多小波在图像稀疏表示方面的性能,并根据多小波在图像稀疏表示方面的特性,结合图像去噪、图像与视频压缩、视频业务模型、图像水印等方面的应用进行了较深入的论述。

全书共分六章。

第1章为绪论。简要介绍小波与多小波背景与历史。

第2章为小波的基本理论。介绍了 Fourier 到小波的发展过程、小波变换的基本原理、小波基应满足的条件及其构造以及常用的小波基,并引入小波分析的基本理论,阐述了连续/离散小波变换、多分辨率分析及 mallat 快速算法。

第3章为多小波的基本理论。主要从多小波分析、多小波的性质、预处理、正交离散多小波变换以及多小波变换在图像中的应用展开论述,并对多小波基的评价标准以及多小波基的选择进行论述,最后有针对性地对 Sa4 多小波进行了具体介绍。

第4章为多小波去噪方法研究。首先对图像去噪的基本理论进行了介绍,然后分析了现在运用较广的小波图像去噪问题、原理及其方法,重点介绍了多小波的去噪方法,分别从多小波的信号去噪原理、多小波去噪中阈值以及收缩函数的选取、多小波传统阈值去噪法、基于多小波变换域内系数相关性的图像去噪法、基于经典阈值的多小波多层阈值去噪法展开,并着重对基于遗传算法的多小波自适应阈值去噪法进行了讨论。

第5章为多小波图像嵌入式编码。首先介绍了小波图像嵌入式编码 EZW 及它的改进编码算法 SPIHT,其次对多小波的 SPIHT 进行了简要的描述,主要对改进的 SPIHT 算法进行了较为详细的分析。

第6章为多小波视频可伸缩编码。先从基于小波的视频编码着手,介绍了小波在视频编码中的应用、基于小波的可伸缩视频编码系统、运动补偿时域滤波技术、基于高斯平滑的自适应提升算法,最后对基于多小波的 MC-EZW、MC-SPIHT 框架进行了讨论,并通过实验进行说明,重点研究了改进的 MC-SPIHT 编码算法,且结合实验进行了时域可伸缩以及不同码率的比较。

第7章为视频业务的多重分形多小波模型。首先对视频业务的特征进行了分析,接着介绍了视频业务的传统模型(Poisson 模型、Markov 模型)、自相似过程及其重尾分布的情况、视频业务的分形过程与视频业务的分形小波分析,以引出本章的重点,即多重分形多小波模型,并通过实验,从统计、队列以及多重分形特征等三个方面对模型进行了分析。

第8章为多小波水印技术。首先介绍了数字水印的原理、特征、分类及其典型的数字水印算法、数字水印的攻击类型和评价方法,并介绍了较为理想的基于 DCT 域的自适应中频嵌入数字水印算法,着重介绍了基于 Sa4 域的自适应中频嵌入数字水印方法和基于遗传算法的水印图像优化方法,最后通过实验对抗攻击性能进行了分析,并比较了各算法的优劣。

本书作者多年来从事图像通信与多媒体技术的教学与科研工作。在国家自然科学基金(60662003、60862002)的资助下,在作者指导下,将与研究生章琳、李润午、谭亮、袁嘉晟等共同研究的成果在此结集成书,以

方便小波与图像工作者参考。研究生罗桂华为全书的整理,做了很多有益的工作。新加坡资讯研究院的伍世虔教授、上海交通大学图象与通信研究所的周源华教授对本书的修改给予了许多建设性的指导。

此外,本书的出版得到了“数据工程与数字媒体”江西省科技创新团队、“Web 跨媒体搜索与商务智能”江西省高等学校科技创新团队、“图像处理与智能信息处理”江西财经大学创新团队的大力支持。团队成员曾卫明博士、王正友博士、袁非牛博士、徐军博士、杨巨成博士、杨寿渊博士等对书中的内容提出了许多有益的建议,江西财经大学徐升华首席教授、万常选教授,南昌工程学院汪胜前教授,上海交通大学宋利博士对本书也提供了大量指导与帮助,在此一并致谢。

本书在撰写过程中,参考了大量文献,向相关文献作者和出版社表示感谢。本书出版的动机主要服务于江西财经大学计算机应用技术专业多媒体技术方向研究生的教学与研究,也可作为大学高年级学生、研究生、科研人员、工程技术人员等学习图像与小波的教材或参考书之用。

最后要感谢出版社的编辑老师,是他们辛勤的劳动,使这些文字付之出版。

由于作者水平有限,尽管我们做了很多努力,但本书还有很多有待改进的地方,难免出现错误和缺点,我们诚恳地欢迎同行和读者批评指正,以期匡正。

作 者

2010年2月10日

目 录

Contents

前 言

第 1 章 绪 论

- 1.1 小波 (1)
- 1.2 多小波 (2)

第 2 章 小波基本理论

- 2.1 Fourier 分析到小波分析 (8)
 - 2.1.1 Fourier 变换 (9)
 - 2.1.2 小波变换 (10)
- 2.2 小波变换的基本原理 (11)
- 2.3 小波基 (12)
 - 2.3.1 小波基应满足的条件 (12)
 - 2.3.2 小波基的构造 (13)
 - 2.3.3 常用小波变换基 (17)
- 2.4 连续/离散小波变换 (20)
 - 2.4.1 连续小波变换 (20)
 - 2.4.2 离散小波变换 (21)
- 2.5 小波变换的多分辨率分析 (22)
- 2.6 Mallat 算法 (23)

第3章 多小波基本理论

3.1 多小波分析	(28)
3.1.1 多尺度函数	(29)
3.1.2 多小波函数	(30)
3.2 多小波的性质	(30)
3.3 预处理	(32)
3.4 正交离散多小波变换	(35)
3.5 多小波变换在图像中的实现	(36)
3.6 多小波基的选择	(38)
3.6.1 小波基的评价标准	(38)
3.6.2 小波(多小波)基的性能分析	(40)
3.7 GHM 多小波	(42)
3.8 Sa4 多小波系统	(45)
3.8.1 具有优质滤波特性的多小波分析	(45)
3.8.2 Sa4 多小波	(51)

第4章 多小波图像去噪方法

4.1 图像去噪概述	(55)
4.1.1 噪声分类	(55)
4.1.2 图像的“去噪”模型	(57)
4.1.3 图像去噪国内外研究现状及存在问题	(58)
4.1.4 图像去噪质量的评价方法	(60)
4.1.5 平滑滤波	(62)
4.2 小波图像去噪	(64)
4.2.1 小波图像去噪原理	(64)
4.2.2 小波图像去噪方法	(66)
4.3 基于多小波的信号去噪原理	(75)
4.4 多小波去噪中阈值以及收缩函数的选取	(76)

4.5 多小波传统阈值去噪法	(79)
4.5.1 经典阈值	(80)
4.5.2 算法描述	(80)
4.5.3 实验结果分析	(81)
4.6 基于多小波变换域内系数相关性的图像去噪法	(83)
4.6.1 小波系数相关性描述	(83)
4.6.2 基于多小波系数相关性的图像去噪法	(84)
4.7 基于经典阈值的多小波多层阈值去噪法	(87)
4.7.1 基于噪声方差已知的多小波多层阈值去噪法	(87)
4.7.2 基于噪声方差估计的多小波多层阈值去噪法	(89)
4.8 基于遗传算法的多小波自适应阈值去噪法	(93)
4.8.1 遗传算法	(93)
4.8.2 图像的奇异特性	(97)
4.8.3 基于遗传算法的多小波自适应阈值去噪法	(98)

第5章 多小波图像嵌入式编码

5.1 小波图像嵌入式编码	(109)
5.1.1 零树	(109)
5.1.2 EZW	(111)
5.1.3 SPIHT	(114)
5.1.4 改进的 SPIHT 算法	(117)
5.2 多小波 SPIHT 编码算法	(124)
5.2.1 基于多小波的 SPIHT 编码算法	(124)
5.2.2 改进的多小波 SPIHT 算法	(125)

第6章 基于多小波的可伸缩视频编码

6.1 引言	(133)
6.2 小波变换在视频图像编码中的应用	(135)

6.3 基于小波变换可伸缩性视频编解码系统	(136)
6.3.1 小波子带预测编码技术	(136)
6.3.2 帧间小波滤波编码技术	(137)
6.4 基于宏块的运动估计	(148)
6.5 运动补偿时域滤波 (MCTF) 技术	(149)
6.5.1 基于 Haar 小波的 MCTF 技术	(150)
6.5.2 基于 5/3 小波的 MCTF 技术	(152)
6.5.3 基于 db2 小波的 MCTF 技术	(152)
6.5.4 提升小波	(156)
6.6 基于高斯平滑的自适应提升算法	(161)
6.6.1 基于高斯平滑滤波的自适应更新	(162)
6.6.2 基于高斯平滑滤波的 MCTF 性能分析	(164)
6.7 多小波可伸缩视频编码算法	(165)
6.7.1 基于多小波的 MC-EZW 编码框架	(166)
6.7.2 MC-SPIHT 编码框架	(169)
6.7.3 改进 MC-SPIHT 的多小波可伸缩 视频编码性能分析	(170)

第7章 视频业务的多重分形多小波模型

7.1 引言	(179)
7.2 视频业务特征分析	(180)
7.3 视频业务模型	(182)
7.3.1 视频业务传统模型	(182)
7.3.2 自相似过程及重尾分布	(184)
7.3.3 视频业务的分形过程	(186)
7.3.4 视频业务的分形小波分析	(187)
7.4 多重分形多小波模型	(189)
7.5 实验结果与分析	(191)

7.5.1 统计分析	(191)
7.5.2 队列分析	(195)
7.5.3 多重分形特征分析	(196)

第8章 多小波水印技术

8.1 数字水印技术	(206)
8.1.1 数字水印的原理及其系统模型	(206)
8.1.2 数字水印的特征	(209)
8.1.3 数字水印的分类	(210)
8.1.4 数字水印的典型算法	(211)
8.1.5 数字水印的攻击类型	(215)
8.1.6 数字水印的评估方法	(217)
8.2 基于 DCT 域的自适应中频嵌入数字水印算法	(218)
8.2.1 水印的嵌入与提取	(220)
8.2.2 实验结果分析	(221)
8.3 基于 Sa4 多小波的自适应中频数字水印嵌入方法	(223)
8.3.1 数字水印的嵌入过程	(223)
8.3.2 实验结果分析	(224)
8.4 多目标优化算法	(225)
8.5 基于遗传算法的水印图像优化方法	(226)
8.5.1 水印嵌入算法	(226)
8.5.2 水印提取算法	(226)
8.5.3 基于遗传算法的水印图像优化	(226)
8.5.4 实验结果分析	(227)

小波被誉为“数学的显微镜”。小波自 20 世纪 80 年代开始发展,在数学领域享有极高的荣誉,随着其日趋完善,小波已渐为各个领域所熟悉并应用,特别是在图像处理中发挥了极为重要的作用,如图像数据压缩、检索、去噪等方面均取得了相当多的科研成果。在研究使用中,小波不断被完善,但其本身不能同时满足正交性与对称性等特性,受到了限制。多小波的出现,使得图像处理领域焕然一新,多小波也就成为研究者们现阶段所亲睐的热点问题之一。本章主要对小波及多小波的发展进行简要介绍。

1.1 小波

1981 年,法国地球物理学家 Morlet 在分析地质数据时基于群论首先提出了小波分析这一概念^{[1][2]}。Morlet 方法所取得数值分析的成功不仅激发了他本人对小波分析进一步的研究,而且也大大地鼓舞了法国理论物理学家 Grossmann 和他一起共同研究小波理论。这一理论是 Fourier 分析划时代的发展结果。正如三角函数 e^{inx} 是 Fourier 分析的基本组成一样,小波函数是小波分析的基本组成。小波函数具有任意小的紧支撑特性,这使得小波分析成为处理随时间快速变化和非平稳信号(图像)强有力的工具。1985 年,法国大数学家 Meyer 首先提出光滑的小波正交基(Meyer 基),对小波理论的发展做出了重要贡献。1986 年, Meyer 和他的学生 Lemarie 提出多

尺度分析思想。1988年,年轻的女物理学家 Daubechies 提出了具有紧支撑集光滑正交基——Daubechies 基^[3]。Daubechies 基的紧支撑品质在小波理论中取得了无可争辩的成功。后来, Mallat 受金字塔算法的启示,巧妙地将计算机视觉内的多分辨率分析思想引入到小波分析中提出了著名的快速小波算法——Mallat 算法 (FWT)^{[4][5]},这是小波理论突破性的成果,其地位相当于 Fourier 分析中的快速 Fourier 变换 (FFT)。Mallat 算法的提出宣告小波理论从理论研究转向了实际应用。^[6]

小波分析的主要思想是寻找快速算法以计算信号和图像的紧支撑表示。这种紧支撑表示是建立在信号和图像相关基础上的,纯粹的随机信号是没有紧支撑表示的。然而,现实生活中的信号和图像大多数具有一定的平滑性和相关性。

小波是一种时频分析工具,在 20 世纪 80 年代初,便有科学家使用小波来进行数据处理,小波的发展无论对工程应用或是数学领域均产生了重要的影响。最近几十年,小波在图像处理、数学、信号处理、分形、模式识别等众多领域都得到了广泛的发展和运用。特别在图像处理方面发挥了重要的作用,运用较为前沿的当属图像处理的去噪及压缩,小波作为一种多分辨率方法用于图像处理,具有良好的时频局部化的特征,能根据人眼的特性来设计压缩及去噪的方法,其成果不计其数。小波最初是为克服 Fourier 分析的不足而出现,是 Fourier 发展史上的里程碑,因为其良好的特性而在接下的时间里得到了广泛的发展和应用。小波作为 Fourier 分析的下一代时频分析工具,从理论上来说,不仅可以替代 Fourier 分析出现的地方,而且克服了 Fourier 分析的许多不足,是近年来研究的一个突破。

1.2 多小波

多小波是在小波分析的基础上发展而来,它将传统小波的单个尺度函数扩展成多个尺度函数,因此,多小波是指由两个或两个以上的函数作为尺度函数而生成,是继小波的一次发展。它与小波变换的最大不同在于,

采用多小波进行信号处理时,先要对数据进行预处理,再来进行数据分解,在进行恢复处理时,同理也应对重构后的数据进行后处理,而单小波在对信号进行处理的时候,直接对预处理的数据进行分解和重构即可,因此,多小波在对信号进行分解和重构时,比较复杂。

众所周知,小波变换因具有许多良好的特性(如多分辨率、去相关性、低熵性和选基灵活性等)而在很多领域得到了良好的运用^[7],但是小波因其本身不能同时满足对称性、正交性等的缺陷,存在应用上的局限性。而多小波的出现,恰好地解决了这一问题,能够在保持小波优势的基础上同时拥有紧支撑性、正交性、对称性以及光滑性等良好特性。而这些性质对于信号的处理都显得非常重要^[8],因此,多小波在图像应用方面存在非常大的潜力。

多小波的构造最早可追溯到1991年,由Alpert和Rokhlin构造的用来作为某些多项式表达式基底的多项式小波^[9]。Goodman、Lee和Tang于1993年,开始对多小波进行研究,他们基于 r 重多分辨率分析建立了多小波的理论框架,同时,也构造成功能满足插值条件的多小波^[10]。Geronimo等人于1994年,应用分形插值的方法构造了具有正交性、对称性、短支撑性以及二阶消失矩的多小波两尺度的函数,并于1996年再次利用分形的方法,构造了基于两小波函数的多小波^[11],即著名的GHM多小波,GHM多小波真正有了多小波的相关性质,在实际应用时能够将对称、正交、紧支撑及光滑性相结合,是多小波真正应用的始祖。其中,对称性能使之更好地适合人眼视觉系统,同时,使得信号的边界更易于处理;正交性能保持信号的能量;而紧支撑性的小波对应的滤波器具有有限脉冲响应,它使得对应的快速小波的变换之和有限;光滑性对数据压缩起着非常重要的作用,使得小波变换带来的误差不易被视觉所检测。这些特性在图像处理中具有非常重要的作用。

继GHM多小波获得成功,研究者们对多小波的兴趣倍增,1996年,Chui和Lian利用对称性构造出了支撑在 $[0, 2]$ 和 $[0, 3]$ 上的二重多尺度函数和多小波函数,即CL多小波。

与小波一样,多小波同样也存在双正交多小波的概念。Hardin^[12]等人利用分形插值的方法构造出了在区间 $[-1, 1]$ 上的双正交多小波。Tan^[13]等人利用两种方法构造了一类对称/反对称双正交多小波,Strela为多小波的构造提供了一种新的思路,首次提出两尺度相似变换的概念,使得研究者们可以利用已构造的多小波,构造任意阶的多小波多尺度函数^[14],同时,他也构造出了双正交GHM多小波,其逼近阶为3,以及双正交多小波Hermite系列,且计算出了Sobolev双正交多小波的空间指数^[15]。M. Cotronei等人将Gram矩阵和Hurwitz块矩阵相结合,给出了求小波与尺度函数的快速算法,并且可以根据已知的半正交两尺度的系数矩阵来求得其对偶,从而构造出了半正交的多小波^[16]。此外,Jiang利用时频分析的窗函数性质,构造了具有最优的时频分辨率的二重多小波^{[17][18]}。

Heil与Clolla对向量为尺度函数解的唯一性与存在性进行了研究,分析了其条件收敛、无条件收敛与超条件收敛^[19];Miccheli与Xu对矩阵两尺度收敛的充分必要的条件进行了研究,并讨论了多小波的正则性问题^[20];Jia与Wang对矩阵两尺度稳定性问题进行了研究,且对其稳定的充要条件进行了解释;Lian对多尺度函数是否正交的判断标准进行了详细说明;Ruch, So, Wang等人对多尺度函数的支撑特性进行了研究,等等。同时,Lebrun与Vetterli提出了平衡多小波的概念,解决了多小波处理的预滤波的问题,还提出了高阶平衡多小波理论、因式分解和设计方案^[21]。

多小波的出现给各个领域的研究都注入了新鲜血液,其理论上的优势使它在很多领域都得到广泛的应用和发展。目前,多小波已经在信号处理方面的研究上取得一定成果,特别是在图像的去噪、水印以及压缩等方面^{[22]~[25]}。

参考文献

- [1] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [2] 李建平. 小波分析与信号处理 [M]. 重庆: 重庆出版社, 2001.

- [3] I. Daubechies. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets [J]. Common Pure and Appl. Math. , Vol. 31, No. 4, 1998: pp. 532 ~ 540.
- [4] S. Mallat. A Theory for Multiresolution Signal Decompositions: The Wavelet Representation [J]. IEEE Transactions on PAMI, Vol. 11, No. 7, 1989: pp. 674 ~ 693.
- [5] S. Mallat. Multifrequency Channel Decompositions of Images and Wavelet Models [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 37, No. 12, 1989: pp. 2091 ~ 2110.
- [6] 汪胜前. 图像的小波稀疏表示及收缩去噪算法. [博士学位论文]. 上海交通大学, 2002.
- [7] 谢杰成, 张大力, 徐立文. 小波图像去噪综述 [J]. 中国图像图形学报, 2002, 7 (3): 209 ~ 217.
- [8] V. Strela, A. Walden. Signal and Image Denoising via Wavelet Thresholding: Orthogonal and Biorthogonal [J]. Scalar and Multiple Wavelet Transforms. Imperial College, Statistics Section, Technical Report TR298201, 1998.
- [9] B. K. Alpert, V. Rokhlin. A fast algorithm for the evaluation of Legendre expansion [J]. SIAM. J. Sci. Statist. Comput, 1991, 12: 158 ~ 179.
- [10] T. N. T. Goodman. Interpolatory Hermite spline wavelet [J]. J. Approx. Theory, 1994, 78: 174 ~ 189.
- [11] X. G. Xia, J. S. Geronimo, D. P. Hardin, B. W. Suter. Design of prefilters for discrete multiwavelet transforms [J]. IEEE transactions on signal processing, 1996, 44(1): 25 ~ 35.
- [12] D. P. Hardin, J. A. Marasovich. Biorthogonal multiwavelets on $[-1, 1]$ [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1999, 7(1): 34 ~ 53.
- [13] H. H. Tan, L. Shen, J. Y. Lee. New biorthogonal multiwavelet for

- image compression[J]. *Signal Processing*, 1999, 79: 45 ~ 65.
- [14] V. Strela. *Multiwavelets: theory and application*. Doctoral thesis: [doctor thesis]. United States: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [15] V. Strela. A note on construction of biorthogonal multi-scaling functions, in *Contemporary Mathematics: Wavelets, Multiwavelets, and their Applications*. A. Aldoubi and E. B. Lin, eds., AMS, Philadelphia, 1998.
- [16] M. Cotronei, L. B. Montefusco, L. Puccio. Multiwavelet analysis and signal processing[J]. *IEEE Transaction on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, 1998, 45(8): 970 ~ 987.
- [17] Q. T. Jiang. Orthogonal multiwavelet with optimum time-frequency resolution[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 1998, 46(4): 830 ~ 844.
- [18] Q. T. Jiang. On the design of multifilter banks and orthogonal multiwavelet bases [J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 1998, 46(12): 3292 ~ 3303.
- [19] C. Heil, D. Colella. Matrix refinement equations: Existence and uniqueness[J]. *J Fourier Anal Appl*, 1996, 2(4): 4 ~ 10.
- [20] C. A. Micchelli, Y. Xu. Restruction and Decomposition Algorithms for Biothogonal Multiwavelet [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 1997, 8: 31 ~ 67.
- [21] J. Lebrun, M. Vetterli. High-order balanced multiwavelet: theory, factorization and design[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2001, 49(9): 1918 ~ 1930.
- [22] 费佩燕, 郭宝龙. 基于多小波的图像去噪技术研究 [J]. *中国图像图形学报*, 2005, 10 (1): 107 ~ 112.