

国家自然科学基金面上项目 (项目编号: 61173184)

中国博士后基金项目 (项目编号: 20100480665)

支持出版

移不变抗混叠 多尺度几何分析 及其在SAR图像处理中的应用

闫河 著



科学出版社

国家自然科学基金面上项目(项目编号:61173184)
中国博士后基金项目(项目编号:20100480665) 支持出版

移不变抗混叠多尺度几何分析及其 在 SAR 图像处理中的应用

闫 河 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

SAR 图像广泛应用于生态环境、地质灾害监测、城市规划、军事侦察等领域。当受到噪声、模糊退化等因素的影响, SAR图像降质明显。因此, 探求有效的SAR图像处理方法, 是SAR图像在各领域应用的前提和关键。

鉴于多尺度几何分析对图像稀疏表示的应用前景, 本书对多尺度几何分析的几种典型代表存在的缺乏平移不变性能和严重的频谱混叠等缺陷进行了分析。在参考国内外其他学者研究方法的基础上, 根据近几年的研究成果, 构造了具有平移不变性和抗混叠性的新的Ridgelet变换、Curvelet变换和Contourlet变换, 初步形成了移不变抗混叠多尺度几何分析理论框架。在此基础上, 开展了SAR图像斑点噪声抑制、恢复、图像融合和分类等若干关键问题的应用研究。

本书可作为光电信息类、电子信息类及计算机应用等专业研究生、教师和科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

移不变抗混叠多尺度几何分析及其在 SAR 图像处理中的应用 / 闫河著. —北京: 科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046487-3

I. ①移… II. ①闫… III. ①合成孔径雷达-图象处理-多重尺度分析 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 274836 号

责任编辑: 杨 岭 黄明冀 / 责任校对: 杨悦蕾

责任印制: 余少力 / 封面设计: 墨创文化

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>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第一版 开本: B5 (720×1000)

2015年11月第一次印刷 印张: 13.5

字数: 272千字

定价: 78.00元

前 言

SAR 图像因其全天候、全天时、强穿透性的独特成像特点而广泛应用于生态环境、地质灾害监测、城市规划、军事侦察等领域。但受成像过程中诸多客观因素的影响，SAR 图像受到噪声、模糊退化等因素降质。探求有效的 SAR 图像处理方法，已成为 SAR 图像在各领域应用的前提和关键。

本书主要致力于解决以 Ridgelet 变换、Curvelet 变换和 Contourlet 变换为代表的非自适应多尺度几何分析方法在追求图像“稀疏”表示的同时丧失了平移不变性能、存在严重频谱混叠等问题，构造了具有平移不变性和抗混叠性的新的 Ridgelet 变换、Curvelet 变换和 Contourlet 变换，初步形成了移不变抗混叠多尺度几何分析理论框架。在此基础上，展开 SAR 图像斑点噪声抑制、SAR 图像恢复、SAR 与高光谱图像融合、SAR 遥感图像分类等若干关键问题的应用研究。

在本书出版过程中，得到了科学出版社的大力支持与帮助，在此表示衷心感谢。同时还要感谢国家自然科学基金面上项目(移不变抗混叠多尺度几何分析基础理论研究，项目编号：61173184)、中国博士后基金项目(基于非接触测量技术的尾矿坝安全预警系统，项目编号：20100480665)、重庆理工大学科研创新团队建设(多尺度压缩感知网络目标跟踪与辨识，项目编号：CQ201413)对本书出版的资助。由于本书引用的参考文献较多，难以一一列出，在此向原作者致敬。

由于作者学识水平和视野所限，加之本书成书时间仓促，书中不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景、目的及意义	1
1.2 小波分析及其局限性	3
1.2.1 小波的产生	3
1.2.2 小波分析在图像处理中的应用概况	4
1.2.3 图像小波分析的局限性	5
1.3 多尺度几何分析理论及其存在的问题	6
1.3.1 多尺度几何分析理论的发展	6
1.3.2 多尺度几何分析理论存在的问题	11
1.4 SAR图像处理关键技术研究内容及现状	16
1.4.1 SAR图像相干斑抑制	16
1.4.2 SAR图像复原	18
1.4.3 SAR图像与多光谱遥感图像融合	20
1.4.4 遥感图像分类	21
1.5 本书主要工作及结构	22
1.5.1 本书主要工作	22
1.5.2 本书结构	25
第2章 移不变抗混叠多尺度几何分析理论基础	27
2.1 小波分析基本理论	27
2.1.1 连续小波变换	28
2.1.2 离散小波变换	29
2.1.3 多分辨率分析	30
2.1.4 双正交小波变换	31
2.1.5 Mallat算法与双通道滤波器组	32
2.2 小波分析的局限	35
2.3 滤波器组的移不变性与抗混叠性	36
2.3.1 滤波器组的平移不变性	36
2.3.2 滤波器组的抗混叠性与平移不变性的关系	38
2.4 移不变离散小波变换	40
2.4.1 平稳小波变换	40

2.4.2	过完备离散小波变换	41
2.5	移不变多尺度几何分析	42
2.5.1	双树复小波变换	43
2.5.2	控向金字塔变换	47
2.5.3	非下采样 Contourlet 变换	49
2.6	本章小结	50
第3章	移不变抗混叠多尺度几何分析方法的构造研究	51
3.1	Ridgelet 变换及其存在的问题	51
3.1.1	连续 Ridgelet 变换	51
3.1.2	单尺度 Ridgelet 变换	52
3.1.3	图像的离散 Ridgelet 变换	53
3.1.4	数字 Ridgelet 变换存在的问题	54
3.2	复数 Ridgelet 变换的构造	55
3.2.1	复数 Ridgelet 变换	55
3.2.2	基于复数 Ridgelet 变换的软阈值图像去噪	56
3.3	Curvelet 变换及其存在的问题	57
3.3.1	第一代 Curvelet 变换	57
3.3.2	第二代 Curvelet 变换	58
3.3.3	Curvelet 变换的性质	61
3.3.4	Curvelet 变换存在的问题	61
3.4	复数 Curvelet 变换的构造	62
3.4.1	复数 Curvelet 变换	62
3.4.2	基于复数 Curvelet 变换的硬阈值图像去噪	64
3.5	Contourlet 变换	69
3.5.1	拉普拉斯塔型变换	69
3.5.2	方向滤波器组	70
3.5.3	塔型方向滤波器组	73
3.5.4	Contourlet 变换的特性	73
3.6	Contourlet 变换存在的问题	75
3.6.1	Contourlet 变换的等效滤波器组	75
3.6.2	方向滤波器组中的频谱混叠	77
3.6.3	拉普拉斯塔型变换中的频谱混叠	78
3.7	移不变抗混叠 Contourlet 变换的构造	81
3.7.1	复数方向滤波器组	82
3.7.2	移不变抗混叠塔式分解	88

3.7.3	移不变抗混叠 Contourlet 变换	92
3.7.4	基于 SINACT 的硬阈值图像去噪	101
3.8	本章小结	103
第 4 章	基于移不变抗混叠多尺度几何分析方法的 SAR 图像斑点噪声抑制研究	104
4.1	SAR 成像原理及斑点噪声特征	104
4.1.1	SAR 成像原理	104
4.1.2	相干斑噪声产生机理	106
4.1.3	相干斑噪声特性分析	106
4.2	传统 SAR 图像滤波方法	108
4.2.1	空域滤波	108
4.2.2	小波域滤波	109
4.3	复小波包域局部邻域窗口阈值 SAR 图像去噪	114
4.3.1	四树复小波包变换	115
4.3.2	选择最优复小波包基	116
4.3.3	局部邻域窗口阈值 SAR 图像去噪	117
4.3.4	实验结果	118
4.4	基于 SINACT 的混合统计模型 SAR 图像去噪	121
4.5	本章小结	128
第 5 章	SINACT 域 SAR 图像复原研究	129
5.1	图像线性退化模型	129
5.2	图像盲复原算法	130
5.2.1	IBD 复原算法	131
5.2.2	SA 复原算法	132
5.3.2	NAS-RIF 复原算法	132
5.3	SAR 图像降质分析	134
5.3.1	回波相干	134
5.3.2	成像系统模糊降质	134
5.3.3	几何失真	137
5.4	SAR 图像降质模型	138
5.5	基于 SINACT 域 GSM 模型 SAR 图像复原研究	140
5.5.1	小波系数的统计特征与 GSM 模型	140
5.5.2	小波域 BSL 估计与 GSM 模型检验	142
5.5.3	SINACT 局部邻域 GSM 退化模型	146
5.5.4	SINACT 域 GSM 模型 SAR 图像复原算法	147

5.5.5	实验结果	150
5.6	本章小结	156
第6章	基于 SINACT 的 SAR 图像与多光谱图像融合研究	157
6.1	SAR 图像与多光谱图像的各自优势比较	157
6.2	传统的图像融合方法	158
6.2.1	加权平均图像融合	159
6.2.2	PCA 融合	159
6.2.3	多分辨率塔式融合	160
6.2.4	小波变换融合	160
6.3	图像融合效果评价	162
6.3.1	图像融合质量的主观评价	162
6.3.2	图像融合质量的客观评价	162
6.4	基于 SINACT 的图像融合方案	164
6.5	基于 SINACT 的图像融合算法	165
6.6	实验结果与评价	167
6.7	本章小结	169
第7章	基于分形脊波神经网络的 SAR 图像分类研究	171
7.1	SAR 图像分类技术现状分析	171
7.2	分类器的介绍和评价	173
7.2.1	极大似然分类	173
7.2.2	最小距离分类	174
7.2.3	BP 神经网络分类	175
7.3	分类精度评价	176
7.4	基于遗传算法和分形脊波神经网络的遥感图像分类方法	177
7.4.1	分类方案设计	177
7.4.2	基于分形理论的纹理特征	178
7.4.3	基于不变矩的形状特征	179
7.4.4	基于遗传算法的脊波神经网络的构造	180
7.4.5	实验结果与评价	184
7.5	本章小结	186
第8章	结论与展望	187
8.1	本书工作总结	187
8.2	本书不足之处与后续工作展望	191
	参考文献	193

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景、目的及意义

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种先进的微波对地观测设备,具有全天候、全天时、成像穿透性强的工作特点,能获得类似光学照片的目标图像,在国民经济和军事应用领域有着十分重要的作用。世界上技术先进的国家都在大力发展 SAR 技术。美国在 20 世纪 50 年代就开始了 SAR 遥感成像技术的研究。1978 年 6 月 28 日,美国发射了载有 SAR 的“海洋卫星 1 号”,入轨 10 天后星载 SAR 系统首次启用,标志着 SAR 已成功进入太空对地观测新时代,也标志着星载 SAR 由实验研究向应用研究的重大转变。1981 年 11 月,哥伦比亚号航天飞机装载成像雷达 SAR-A,它所获得的图像可以识别出埃及西北部沙漠地区的地下古河道。20 世纪 90 年代,ERS-1/2、JERS-1 等星载 SAR 卫星先后发射成功,并利用全球性布局的地面接收系统提供全球范围的商用服务,这标志着星载 SAR 系统从试验阶段进入实用阶段,1995 年 11 月发射的加拿大 Radarsat-1 采用 7 种成像工作模式,其图像分辨率可达 9 m,已在各个领域取得举世瞩目的成绩。

我国 SAR 技术起步较晚,中国科学院电子学研究所于 1977 年正式开始了机载 SAR 的研制工作。第一台实验系统于 1979 年 9 月试飞,获得了我国第一幅 SAR 图像。该系统没有采用脉冲压缩技术,距离分辨率为 180 m,方位向利用合成孔径技术,分辨率为 30 m。1980 年 2 月,第二台机载 SAR 实验系统进行了飞行试验。由于采用了脉压技术,增加了天线稳定伺服平台和运动补偿措施,同时提高了发射功率,距离向和方位向分辨率都提高到了 15 m。此后,单测绘通道 SAR 系统于 1983 年研制成功,1987 年又研制成功了多测绘通道和多极化 SAR 系统(正式命名为 CAS/SAR)。1994 年 9 月,机载 SAR 实时成像处理器经过验收鉴定,标志着我国机载 SAR 技术迈上了一个新台阶。该实时处理器成功地用于 1994 年夏季我国南方的洪水监测。近 20 年来,我国 SAR 技术的研究也取得了重大进展,特别是“九五”以来,机载 SAR 技术取得了突破性进展,以中国科学院电子学研究所、中国航空工业集团公司第 607 研究所、中国电子科技集团第三十八研究所等为代表的国内 SAR 研究单位分别研制了具有自主知识产权的机载 SAR 系统,其方位分辨率和距离分辨率分别可达到 1 m 和 3 m;一些机载 SAR 工程演示验证样机,其条带模式空间分辨率已达 0.5~1 m,正在向工程化和实用

化方向发展。

SAR 图像的应用领域非常广泛,从地形测量到大范围的陆地、海洋信息采集和全球范围的环境监测,从城市土地开发、绿地植被沙漠化的检测到江河湖海水位和浑浊状态测定、地质结构提取、地质矿产研究、森林类型分类、农作物生长监测等,特别在热带雨林气候地区和常年多云雾多雨的地区,可见光与红外遥感技术在这些地区的应用受到了很大的限制,而具有全天候、全天时、强穿透性成像能力的 SAR 遥感技术则具有独到的优势。例如,2005 年 10 月 27 日,俄罗斯普列谢茨克卫星发射场成功发射“北京 1 号”卫星,它定期提供覆盖全北京市的遥感影像,为 2008 年奥运会前后的城市规划、生态环境监测、重大工程监测、土地利用监测等重大工程提供迅速、准确的信息。特别是 2008 年年初我国南方大部分地区遭遇罕见的冰雪灾情,2008 年 5 月 12 日的汶川特大地震灾害,在这两次特大地质灾情、灾害的调查和评估工作中,各级政府和部门充分应用包括航空、航天高分辨率 SAR 在内的各种对地观测技术,开展了杰出的监测和评估工作,显示了中国遥感技术的应急能力和水平,为国家决策提供了卓越的科学服务。

SAR 的应用效能主要取决于获取的 SAR 图像的质量,SAR 图像的质量越高,其后续的应用性能就越好。但受成像过程中诸多客观因素的影响,SAR 图像不可避免地存在以下方面的降质现象:首先是由于成像界面上散射点的相干回波随机干涉而造成的大量相干斑噪声;其次,由于大气吸收、散射的作用存在,传感器接收到的电子波不能真实反映地貌信息,遥感平台姿态、速度的变化,传感器的漂移,扫描频率的变化,都会使遥感图像的像元存在一定变形,因而 SAR 图像不可避免地存在降质;另外,由于 SAR 图像缺乏光谱信息,不利于对地物的识别和解释。因此,研究 SAR 图像的噪声抑制、图像复原及其他高光谱图像的融合技术,对于改善 SAR 图像质量、提高 SAR 图像的应用效能具有非常明显的研究意义。

过去十年,图像多尺度几何分析理论迅速发展,它避免了传统小波基函数的各向同性、有限方向选择性等先天缺陷,其中,以双树复小波变换(dual-tree complex wavelet transforms, DCWT)^[1]、Ridgelet 变换^[2]、Curvelet 变换^[3]和 Contourlet 变换^[4]为代表的一系列非自适应图像多尺度几何分析方法被认为是对二维信号线状奇异性的理想表示方式^[5]。可以说,类似小波的出现,多尺度几何分析理论的发展又一次开创了 SAR 图像处理技术的新局面。近年来,国内外众多基于多尺度几何分析的 SAR 图像处理文献层出不穷^[6-12],为提高 SAR 图像质量作出了巨大贡献。但是,无论是 DCWT、Ridgelet 变换、Curvelet 变换,还是 Contourlet 变换,它们自身均存在一定程度的缺陷,具体来说就是 DCWT 只有 6 个方向且在多尺度分解中固定不变,对图像中纹理和曲线边缘信息的捕捉能力不

足；而 Curvelet 变换和 Contourlet 变换均缺乏平移不变性且在变换域存在严重的频谱混叠，造成重构图像中存在人为的 Gibbs 模糊^[13,14]、严重的划痕^[5,14-20]、嵌入污点^[14,16,19,20]等现象。虽然不同的文献或致力于解决它们的移变性缺陷^[11,13,21-24]，或致力于解决频谱混叠从而避免或减轻重构图像中的划痕、嵌入污点等现象^[5,14-20]，但是这些文献均没有全面、系统地阐述问题和彻底解决问题。因此，本书致力于利用小波框架和泛函理论，对以 DCWT、Ridgelet 变换、Curvelet 变换和 Contourlet 变换为代表的非自适应多尺度几何变换的移不变性能、频谱混叠等问题进行深入研究，在保留 Ridgelet 变换、Curvelet 变换和 Contourlet 变换原本的多尺度、多方向、各向异性等优点的同时，构造新的具有移不变和抗混叠性能的图像多尺度几何分析理论框架，新的理论无疑对进一步提高和改善 SAR 图像质量、推动数字图像处理技术的发展和具有非常重要的意义。

依据上述对新型图像处理技术需求的牵引，本书研究工作着眼于力求完善图像多尺度几何分析理论框架，探索并寻求新的具有移不变性能和抗混叠性能的图像多尺度几何分析方法，并以此为基础，探讨 SAR 图像降噪、复原、融合、分类等若干关键技术，力图提高 SAR 图像质量以满足 SAR 图像实际应用的需求。

1.2 小波分析及其局限性

1.2.1 小波的产生

自 19 世纪 80 年代以来，傅里叶变换一直是信号处理领域内应用最广泛、效果最完美的一种数学分析手段^[25-28]。然而，由于傅里叶变换仅仅是一种纯频域分析方法，虽然它在频域定位准确（即频域分辨率高），但在时域缺乏定位能力（即缺乏时域分辨能力），即傅里叶变换所反映的是整个信号全部时间内的整体频域特征，而不能提供任何局部时间段上的频率信息。相反，当一个函数用 δ 函数展开时，它在时域的定位是完全准确的，而在频域却无任何定位性，即 δ 函数分析所反映的只是信号在全部频率上的整体时域特征，而不能提供任何频域段所对应的时间信息。在实际应用中，许多信号为时变信号，即它们的频域特征随时间而变换，对这类时变信号进行分析，通常需要提取某一时间段（或瞬间）的频域信息或某一频率所对应的时间信息。鉴于此，寻求一种介于傅里叶分析和 δ 函数分析之间且具有一定时间和频率分辨率的基函数来分析时变信号，一直是信号处理界和数学界学者长期以来梦寐以求的目标。

为了研究、探索信号在局部时间范围的频域特征，在傅里叶变换的基础上，人们基于多尺度分析的思想，发展了许多新的信号表达方法。这些技术方法较之傅里叶分析具有更好的局部特性，也正是这样一些探索研究工作，掀起了以小波

分析为代表的多尺度(多分辨率)分析的热潮^[25-28]。20世纪80年代中期,由法国数学家组成的 French School 为小波理论建立了坚实的理论基础^[29-31]。Morlet 在分析地震波的局部特征时,在信号分解中引入了小波的概念。Meyer 构造出了具有一定衰减性的光滑函数,它的二进制伸缩时移结构构造了平方可积函数空间的规范正交基。划时代的工作应该归于 Mallat 的创造性研究工作,他把多分辨率(multiresolution 或 multiscale)分析的思想引入小波分析中,从而统一了在此之前提出的各种小波函数构造方法,同时建立了离散小波变换的分解和重构的快速算法^[28]。Daubechies^[30]证明了有限支集的规范正交基的存在。从此,小波分析理论体系初步建立。

1.2.2 小波分析在图像处理中的应用概况

自20世纪80年代末期 Mallat 首次将快速小波变换引入图像处理以来,小波分析在图像处理领域取得了巨大的成功,其应用几乎涵盖图像生成、去噪、融合、恢复、分类、识别、压缩、特征提取、检索等图像处理的各个阶段^[32-39],根据本书的研究内容,就其在图像降噪、恢复、融合和分类中的应用进行简要的分析。

1) 图像去噪

小波变换由于具有多尺度、低熵性、去相关性、选基灵活性等特点,且噪声在变换后有白化趋势,所以小波域比空间域更有利于去噪^[32]。早在1992年, Mallat 就在文献[32]中提出了奇异性检测的理论,从而可以利用小波变换模极大值的方法降噪。1995年, Donoho^[40]提出了非线性小波变换阈值法降噪,该方法得到广泛应用,后人很多研究工作都是在此基础上通过修改阈值来提高降噪性能。Coifman 和 Wickerhauser 提出了小波包理论,并建立了寻找最优正交基的方法。用小波包进行降噪的过程与小波降噪类似,只是它的阈值处理是建立在小波包最优基树结构上的^[41]。此外,文献[42]提出了原子分解的基追踪降噪方法,文献[43]和文献[44]分别提出了多小波和非冗余小波变换的概念。近年来,应用多小波变换和冗余小波变换进行图像降噪的技术也日益成熟^[45-47]。

2) 图像复原

图像复原就是根据一些已知的降质模型,研究如何从所得的变质图像中复原出真实图像,或者说研究如何从获得的信息中反演出有关真实目标信息的过程。近年来,基于小波的复原是图像复原技术较新的发展趋势。基于小波的复原算法对于以保持边缘为目的的恢复具有一定优势^[26]。这些方法通过对图像多尺度分解得到的细节系数进行正则化处理或降噪,根据图形中的局部边缘信息进行自适应复原。Donoho 在文献[48]中提出了一种具有高计算效率的图像复原算法,但此方法只适用于尺度不变模糊函数的情况;文献[49]~文献[51]提出了频域和小

波域联合正则化的恢复方法, 获得了较好的效果。文献[52]利用小波变换检测边缘信息, 提出自适应的线性复原算法, 也取得了较好的效果。其他文献中也报道了更加通用的基于小波的复原算法, 如文献[53]提出的最大期望(expectation maximization, EM)恢复算法, 能够通过递归运算达到全局和局部最优解。文献[54]~文献[56]提出了小波域正则化隐马尔可夫树(hidden markov tree, HMT)模型的图像复原方法, 能有效解决图像复原的边缘模糊问题。

3) 图像融合

图像融合是在采集多源图像的基础上, 通过协同利用原始的多源图像, 获得同一事物或目标的更客观、更本质认识的一门综合处理技术。与单一、孤立的原始多源图像相比, 融合处理后的图像更简洁、冗余更少、信息更丰富。由于小波变换可将原始图像分解到一系列频率通道中, 利用分解时的金字塔结构, 对不同分解层、不同频带, 可以分别进行融合, 并可将来自不同图像的细节有效融合在一起, 这一过程与人的视网膜对多源图像的感知过程是一致的, 因此可获得与人的视觉特性更为接近的融合效果, 目前基于小波变换的图像融合技术已成为通用的图像融合技术^[57-60]。

4) 图像分类

图像分类把图像或图像中的每个像元或区域划归为若干个类别中的某一种, 以代替人的视觉判读。图像分类的过程就是模式识别的过程, 其在许多应用领域都是一项关键任务。图像分类可分为图像空间的分类和特征空间的分类。图像空间的分类方法利用图像的灰度、颜色、纹理、形状、位置等底层特征对图像进行分类; 基于小波的分类方法就是充分利用小波的多尺度分解能力, 把图像变换到特征空间, 然后在特征空间提取图像的高层特征以实现图像的分类^[60-62]。近年来, 在小波变换域的特征空间内, 利用神经网络^[63]、支持向量机^[64]等方法进行分类成为新的图像分类技术的研究热点。

1.2.3 图像小波分析的局限性

尽管小波分析理论已非常完善, 并在图像处理领域内得到广泛应用, 但基于小波分析的图像处理技术仍存在以下主要缺陷。

(1) 小波基函数缺乏多方向选择性, 不利于图像纹理、边缘、轮廓等方向信息的保护。小波分析理论的成功主要得益于其对信号的时、频局域分析能力及其对一维信号有界变差函数类的最优逼近性能^[27]。小波能够有效表示信号的零维奇异特征, 反映奇异点的大小和位置, 是表示具有点状奇异目标函数的最优基。遗憾的是, 小波分析在一维信号应用中所具有的优异特性并不能简单地推广到二维或更高维。二维图像中轮廓、边缘、纹理等高维几何特征包含了大量信息, 而由一维信号小波张成的二维可分离小波只具有水平、垂直和对角三个固定的方

向, 方向选择性的匮乏使得小波不能充分利用图像本身的几何正则性, 也就无法实现对图像中奇异曲线的稀疏表示, 小波不再是表示图像的最优基^[3,5]。

(2)小波基函数缺乏各向异性, 不具备“沿”边缘的信息表达能力。对于二维图像处理, 常用的二维小波是一维小波的张量积, 采用分离的变换核先对图像进行水平方向的小波变换, 然后再进行垂直方向的小波变换, 这样的二维小波变换的基是各向同性的(isotropy), 变换系数的局部模极大值只能反映出某个小波系数出现的位置是“过”边缘(across edge)的, 而无法表达“沿”边缘(along edge)的信息, 这就使得传统小波变换在处理二维图像时表现出一定的局限性^[5,16]。生物学家对人类视觉系统的研究成果同样说明, 最优的图像表示方法, 其基函数应该是各向异性的, 具有方向选择性^[65]。多方向选择性和各向异性是获得图像“稀疏”表示的必备条件, 它们实现对高维奇异性特征函数最优表示的基本要求^[5]。

(3)小波变换缺乏移不变性, 会造成重构图像的边缘轮廓等线状奇异特征处存在人为的 Gibbs 模糊现象。Matllat 的离散小波变换是一种基于下采样的正交小波变换, 它对平移参数的采样间隔随着尺度的增大以 2 的指数倍增大, 破坏了平移不变性, 即 Matllat 的离散小波变换缺乏平移不变性, 这对图像去噪、恢复和融合非常不利^[43,44]。基于正交小波变换的图像去噪, 对分解的细节系数进行阈值处理后重建图像边缘附近容易产生伪 Gibbs 振荡, 造成图像的边缘失真。特别当噪声较严重时, 图像经多次分解, 对多层细节图像阈值处理后图像模糊加剧^[66,67]。文献^[68]已通过实验证明基于下采样的正交小波变换在图像融合中存在方块效应和光谱失真。

1.3 多尺度几何分析理论及其存在的问题

1.3.1 多尺度几何分析理论的发展

生理学家对人类视觉系统和自然图像的统计模型研究结果表明, 一种“最优”的图像表示法应该具有如下特征^[2]: ①多分辨率, 能够对图像从粗分辨率到细分辨率进行连续逼近, 即带通性; ②局域性, 在空域和频域, 这种表示方法的基应该是局部的; ③方向性, 其基应该具有方向性, 不仅仅局限于二维可分离小波的三个方向。

针对小波变换基函数的各向同性和有限方向性选择的缺陷, 近年来, 许多学者提出了各种对高维奇异性特征函数的最优表示方法, 称为多尺度几何分析(multiscale geometric analysis, MGA), 它以传统多尺度分析理论为基础, 并进行延伸、拓展, 通过构造支撑区间满足各向异性尺度关系的基, 达到稀疏表示图

像信号的能力。

图 1.1 为各向同性基函数和各向异性基函数空域逼近和频域支撑的示意图。图 1.1(a) 表示了二维可分离小波基函数对图像中奇异曲线的逼近过程及其频域支撑。由一维小波张成的二维小波基具有正方形的支撑区间，不同的分辨率下，其支撑区间为不同尺寸大小的正方形，二维小波逼近奇异曲线过程最终表现为用点来逼近线的过程，在尺度为 j 时，小波支撑区间的边长近似为 2^{-j} ，幅值超过 2^{-j} 的小波系数的个数至少为 $O(2^j)$ 阶^[5,69]。当尺度变细时，非零小波系数的数目以指数形式增长，出现了大量不可忽视的系数，最终表现为不能稀疏表示原函数。同时其基函数的频域支撑说明，二维可分离小波方向选择性非常有限。图 1.1(b) 表示多尺度几何分析变换对曲线函数的逼近，它能充分利用原函数的几何正则性，其基函数的支撑区间表现为长条形，以达到用最少的系数逼近奇异曲线。基的长条形支撑区间实际上是方向性的一种体现，一般把基函数的这种逼近特性称为各向异性(anisotropy)。

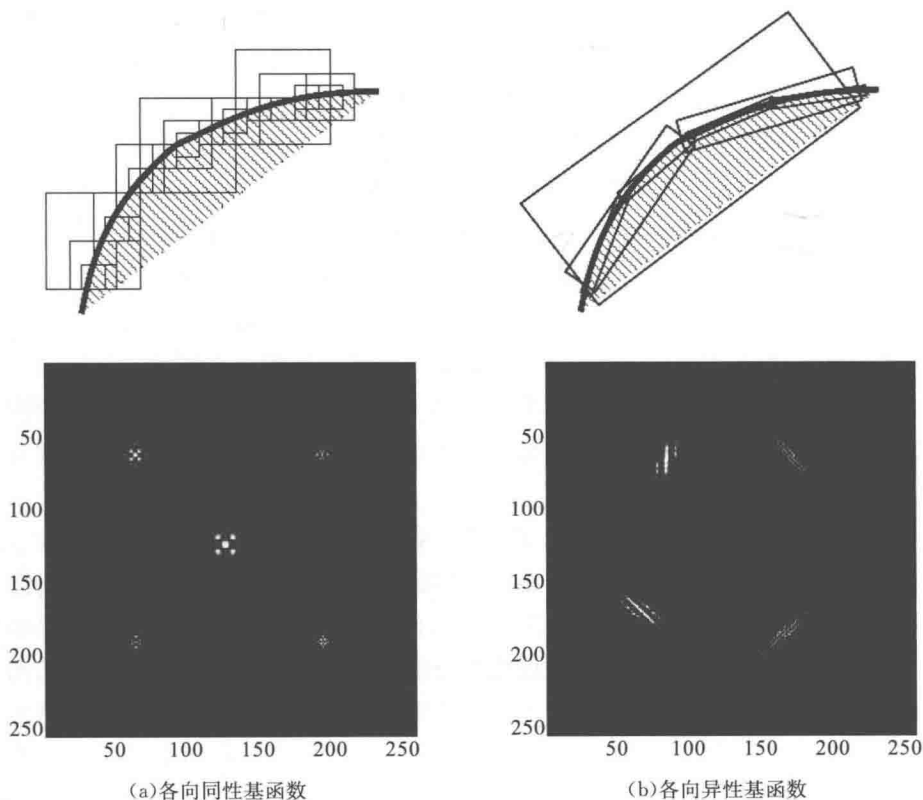


图 1.1 基函数逼近及其频域支撑

目前，基于不同的应用范围，众多学者提出了一系列多尺度几何分析理论，文献[5]根据基函数的不同，把它们分为自适应多尺度几何分析和非自适应多尺

度几何分析两种。

1) 自适应多尺度几何分析^[70]

自适应多尺度几何分析是指图像变换的基函数随图像内容的变化而变换,它一般先进行边缘检测,再利用边缘信息对原函数进行最优表示,主要包括 Brushlet^[71]、Wedgelet^[72,73]、Bandelet^[74,75]、Directionlets^[76]等。文献[71]首先提出了一种自适应频带分割方法,即 Brushlet 变换,它仅在频域上一个峰值周围局部变化,能反映局部相位信息,因而非常适合表示周期纹理图像,对于分片光滑图像的边界,它具备稀疏表示的能力。Wedgelet 变换是 Donoho 在研究如何从噪声数据中恢复原始图像的问题时提出的一种方向信息检测模型。Wedgelet 变换是定义在正方形区域上的分片二值函数,该区域被一条直线分成两部分,直线的方向可以根据边缘的方向调节,用一系列不同尺寸和不同方向的 Wedgelet 可以逼近图像的边缘轮廓,得到图像的稀疏表示,其对函数的逼近精度可以达到 $O(M^2)$ 级,并在检测含噪图像的线性奇异性方面得到一定的应用。Pennec 和 Mallat 在文献[74]中提出的 Bandelet 变换称为第一代 Bandelet 变换,它是一种基于边缘的自适应图像表示方法,它能自适应地跟踪图像的几何正则方向。第一代 Bandelet 变换的主要思想是,根据图像边缘自适应地构造一种局部弯曲的小波变换,将局部区域中的曲线奇异性改造成垂直或水平方向上的直线奇异性,再用普通的二维张量小波处理;而二维张量小波基恰恰能有效处理水平、垂直方向的奇异性。第一代 Bandelet 变换适用于图像压缩处理,在相同码率的情况下,其重构图像的质量明显优于 JPEG2000。基于第一代 Bandelet 变换的概念,Peyer 与 Mallat 提出了第二代 Bandelet 变换^[75],它通过普通的二维小波变换结合几何正交投影实现,算法更加简洁、快速。同年,文献[76]基于整数格点理论,提出了一种可分离、多方向、多尺度图像表示方法,即 Directionlets 变换^[76],该方法利用拉格朗日(Lagrange)优化算法,对图像进行最优分块操作,每块图像采用不同方向的 Directionlets 表示。

自适应的多尺度几何表示方法实际上是边缘检测和图像表示方法的结合。例如,Bandelet 变换根据图像边缘自适应地构造一种局部弯曲小波变换,将局部区域中的曲线奇异改造成垂直或水平方向上的直线奇异,再用普通的二维张量小波处理,于是,问题的关键归结为对图像本身的分析,即如何提取图像本身的先验信息、怎样剖分图像、局部区域中如何“跟踪”奇异方向等。然而,在自然图像中,灰度值的突变并不总是对应着物体的边缘,一方面,衍射效应使得图像中物体的边缘可能并不明显地表现出灰度的突变;另一方面,许多时候图像的灰度值剧烈变化,并不是由于物体的边缘而是由于纹理的变化而产生的。所有基于边缘的自适应方法需要解决的一个共同的问题,是如何确定图像中灰度值剧烈变化的区域对应的是物体边缘还是纹理的变化,实际上这是一个非常困难的问题。在实

际使用中,当图像出现较复杂的几何特征时,用逼近误差作为衡量标准,大部分基于边缘的自适应算法性能并不能超过可分离的正交小波分解^[5,74]。

2)非自适应多尺度几何变换^[70]

人们从小波基中受到启发,试图寻找一种不受图像先验信息限制,既能够有效表示图像中线状或面状奇异性,又具有固定基函数的图像表示方法,便出现了非自适应多尺度几何分析方法。非自适应多尺度几何分析是指图像变换的基函数与图像内容无关。它主要包括最近提出的 Ridgelet 变换^[2]、Curvelet 变换^[3]和 Contourlet 变换^[4]。Ridgelet 变换由 Candes^[2]在 1998 年提出,其初衷是解决二维张量小波在表示含线状奇异或面状奇异等高维函数时的缺陷。同年,Donoho 提出了一种正交 Ridgelet 变换的构造方法。2000 年,Do 和 Vetterli^[77]提出了一种有限长 Ridgelet 变换(finite Ridgelet transform)。2003 年,我国学者侯彪等^[78]给出了 Ridgelet 变换的实现方法,并给出了一种基于 Ridgelet 变换的直线检测算法。Ridgelet 变换对具有直线奇异性的多变量函数有良好的逼近性能^[2,79],其核心思想就是利用 Radon 变换将一维奇异特征(线奇异)映射为零维奇异特征(点奇异),然后通过小波变换有效捕捉点状奇异特征。然而,自然图像往往以曲线奇异居多,对此类图像进行 Ridgelet 变换,其逼近性能只相当于小波变换。因此,为了解决含曲线奇异的多变量函数的稀疏逼近问题,Candes^[80,81]又于 1999 年提出了单尺度 Ridgelet 变换(monoscale Ridgelet transform)。单尺度 Ridgelet 变换是通过分块的方法将曲线近似为直线,然后对每个块进行 Ridgelet 变换以获得更好的逼近效果。随后,Candes 和 Donoho^[3]在单尺度 Ridgelet 变换的基础上提出了第一代 Curvelet 变换(Curvelet 99),第一代 Curvelet 变换由子带滤波结合多尺度局部 Ridgelet 变换组成。2002 年,Starck、Candes 和 Donoho^[14]利用频域子带滤波和离散局部 Ridgelet 变换,实现了离散 Curvelet 变换,并将其应用于图像去噪,取得了令人满意的效果。Ridgelet 变换和第一代 Curvelet 变换都是基于块剖分思想的变换。为了避免重构图像出现方块效应,块与块之间必须有重叠,这增加了 Curvelet 变换的计算量和变换稀疏的冗余度。当进行 J 层分解时,其冗余度高达 $16J + 1$ ^[15]。此外,Ridgelet 变换和 Curvelet 变换都是通过 Radon 变换实现的,Radon 变换的关键是笛卡儿坐标与极坐标的转换。精确的转换需要复杂的插值,这同样会导致计算量成倍上升,因而在实际应用中,第一代 Curvelet 变换并不多见。为降低第一代 Curvelet 变换的冗余度和计算复杂度,在 2005 年,Candes 等利用非均匀空间抽样的二维快速傅里叶变换算法(unequally spaced fast Fourier transform, USFFT)实现了第二代 Curvelet 变换(Curvelet 05)^[15,82]。第二代 Curvelet 变换不需要分块操作和 Ridgelet 变换,所以计算量和冗余度大大降低。无论第一代 Curvelet 变换还是第二代 Curvelet 变换,它们共同的特征是都满足各向异性尺度关系,即 Curvelet 基函数的支撑区间的宽度与长度近似符合平方