



SAR

图像处理的关键技术

张艳宁 李 映 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

SAR 图像处理的关键技术

张艳宁 李 映 编著

電子工業出版社

Publishing

Industry

内 容 简 介

本书是 SAR 图像处理与解译领域的一本新著,是作者所在团队 10 余年来在该领域工作的积累。本书在全面总结国内外研究进展的基础上,着重论述了 SAR 图像噪声抑制和增强、SAR 图像和光谱图像的融合、SAR 边缘检测、SAR 图像分割、SAR 图像典型目标包括桥梁、机场跑道、道路的检测以及环境因子分析和 SAR 图像目标识别。本书侧重于新算法的描述和实例的分析,反映了近年来在 SAR 图像处理和解译关键技术的最新发展概况,为该领域的深入研究提供了借鉴。

本书可以为信息科学、电子科学、计算机科学与遥感、地球科学等领域的科研人员提供参考,也可以作为相关专业研究生和高年级本科生教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

SAR 图像处理的关键技术 / 张艳宁, 李映编著. —北京: 电子工业出版社, 2014.1
ISBN 978-7-121-20904-8

I. ①S… II. ①张… ②李… III. ①遥感图象—数字图象处理 IV. ①TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 146179 号

策划编辑: 祁玉芹

责任编辑: 鄂卫华

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

装 订: 中国电影出版社印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 23.5 字数: 602 千字

印 次: 2014 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前言

PREFACE

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, 简称 SAR) 是一种主动式微波遥感器, 它利用脉冲压缩技术提高距离分辨率, 利用综合孔径原理提高方位分辨率, 从而获得大面积的高分辨率 SAR 图像。和光学、红外等传感器相比, 合成孔径雷达成像不受光照、天气条件等的影响, 能够对地物目标进行全天时、全天候、高分辨率、大面积的探测。

1957 年 8 月, 人类获取了第一张全聚焦 SAR 图像, 标志着 SAR 发展的真正开始。从此 SAR 被人们逐步认识, 并得到了不断的发展。美国、欧洲、加拿大、俄罗斯和日本等国均发射了 SAR 卫星。国内在 SAR 的研究方面虽然起步较晚, 但是进步飞速, 也取得了令人瞩目的成绩。

经过几十年的发展历程, SAR 的成像方法由非聚焦发展到聚焦, 处理方式由光学发展到数字, 工作模式由单极化发展到多极化, 搭载方式由机载发展到星载, 分辨率由几十米提高到几十厘米, 工作模式由单一条带模式发展到多种成像模式 (聚束模式、扫描模式、干涉模式等)。随着 SAR 图像分辨率的提高和获取手段的多样化, SAR 图像被广泛地应用于军事和民用的各个领域。在军事方面, SAR 是直观有效的情报获取手段, 常被用于战略战术目标的自动检测和识别; 在社会经济方面, SAR 在环境监测、资源探测、防灾救灾、气象预报、地理测绘以及海洋科学等领域的应用越来越深入。SAR 充分显示了其在对地观测方面的卓越性能, SAR 图像的研究和应用是遥感方面最为重要的前沿领域之一。

但是 SAR 图像处理和解译却比较困难, 一方面是因为它有较强的目标方位敏感性, 另一方面就是因为它的图像质量问题。SAR 图像的质量受两种因素的影响, 一种来自 SAR 系统自身, 包括雷达系统、校正系统、成像算法等, 存在斑点噪声、阴影、叠掩、透视收缩等几何形变; 另一种与地物目标及其所在场景有关, 包括目标的几何形状、运动速度、介电常数等。

对 SAR 图像的处理和解译属于图像处理与理解的范畴, 涉及模式识别、图像处理、人工智能及信号处理等众多学科领域。近 10 年来, 作者所在课题组在国家“九五”、“十五”、“十一五”国防预研项目, 国家自然科学基金面上项目 (60472072、60873086), 高等学校博士学科点专项科研基金 (20040699034、20070699013), 陕西省自然科学基金 (2001X25、2004F05、2006F05), 航空科学基金 (04I53070、05I53076), 国防科技重点实验室基金 (51431020204HK0302) 以及黄委会治黄专项课题 (2004SZ01-04) 的资助下, 面向 SRA 图像应用, 结合课题组对智能信息处理理论方面的研究成果, 对 SAR 图像相干斑抑制和增强、边缘提取、目标检测、地物

分类、自动目标识别和复杂图像融合、分割等方面展开了大量的工作，进行了较为深入、系统的研究，开辟了 SAR 图像处理与解译研究的新思路，并取得了一定的研究成果，培养博士后、博士、硕士 50 余名，获陕西省科学技术二等奖。撰写本书旨在论述 SAR 图像处理与解译新近的研究进展，除了介绍一些经典的方法外，书中主要结合作者所在课题组多年来的研究成果，详细论述了 SAR 图像智能处理与解译方法，希望能引起更多研究者的关注。

本书共分 7 章，第 1 章介绍了 SAR 图像处理及解译的研究背景、意义、研究内容及进展；第 2 章分析了 SAR 图像特性及相干斑噪声的特性；第 3 章论述了 SAR 图像在空间域、小波域和一些新的噪声抑制和增强方法；第 4 章给出融合评价准则和基本方法，详细论述了几种基于小波变换的融合新算法；第 5 章论述了 SAR 图像目标特征，具体给出了桥梁、港口目标的检测和曲线特征检测方法；第 6 章详细讨论了基于各种不同方法的 SAR 图像和纹理图像的分割技术；第 7 章研究 SAR 图像的目标检测和自动识别的新方法。

本书是作者在该领域工作的总结，这些工作总结中包含了很多已经毕业研究生的研究成果，包括雷小刚和龚红丽（第 3 章）、程英蕾和许星（第 4 章）、史勤峰和石慎（第 5 章）、夏勇和孙莉（第 6 章）、张利利、童燕和王敏（第 7 章）等，并且许多已经毕业或在读的研究生还直接参与了本书部分章节内容的图文编辑工作，包括韩晓宇、李文博、李海森等，他们的无私贡献对本书完成至关重要，对此作者表示衷心的感谢。特别感谢赵荣椿教授多年来的培养和教导，是他将作者引入图像处理领域，并在长期的研究中给予切实的指导；最后感谢所有被引用文献作者的工作。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

2013 年 8 月

于西北工业大学

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 SAR 图像处理国内外研究现状	2
1.2.1 SAR 图像相干斑噪声抑制	2
1.2.2 SAR 图像增强	3
1.2.3 SAR 图像融合	4
1.2.4 SAR 图像边缘检测	4
1.2.5 SAR 图像分割	5
1.2.6 SAR 图像目标检测	6
1.2.7 SAR 图像目标识别	7
参考文献	7
第 2 章 SAR 图像特性及其相干斑噪声特性	11
2.1 SAR 图像成像原理和特点	11
2.1.1 SAR 成像方式	11
2.1.2 SAR 图像成像特点	13
2.2 SAR 图像特性	14
2.2.1 SAR 图像空间分辨特性	14
2.2.2 SAR 图像辐射特性	15
2.2.3 SAR 图像极化特性	16
2.2.4 SAR 图像几何特性	17
2.2.5 SAR 图像噪声特性	19
2.2.6 SAR 图像目标特性	19
2.3 相干斑噪声的产生机理和仿真模型	20
2.3.1 相干斑噪声的产生机理	20
2.3.2 相干斑的数学仿真模型 ^{[4][5][6]}	21
2.4 相干斑噪声的统计特性和模型	23
2.4.1 单极化情况下相干斑噪声的统计特性 ^{[8][9]}	24
2.4.2 多极化情况下相干斑噪声的统计特性 ^{[3][9]}	25
2.4.3 Pearson 系统	27



2.4.4	SAR 图像后向散射强度模型 ^[12]	30
2.4.5	系统热噪声的影响	33
参考文献		33
第 3 章 SAR 图像噪声抑制和增强		35
3.1	去噪方法的性能评价标准	35
3.2	空间域噪声抑制方法	36
3.2.1	均值滤波	36
3.2.2	中值滤波	37
3.2.3	Sigma 滤波	37
3.2.4	Lee 滤波及其增强型算法	37
3.2.5	Kuan 滤波及其增强型算法	39
3.2.6	Frost 滤波及其增强型算法	39
3.2.7	Gamma MAP 滤波	40
3.2.8	自适应窗口的 Kuan 滤波	41
3.2.9	仿真实验与分析	43
3.3	小波域噪声抑制方法	47
3.3.1	小波变换和多分辨分析	47
3.3.2	小波硬、软阈值滤波	52
3.3.3	基于小波系数统计特性的阈值滤波	53
3.3.4	基于双树复数小波变换的 SAR 图像滤波	55
3.3.5	实验结果与分析	59
3.4	结合 Curvelet 和 Wavelet 变换的 SAR 图像去噪	62
3.4.1	平稳小波变换	62
3.4.2	Curvelet 变换	63
3.4.3	基于 Curvelet 变换和 Wavelet 变换的图像抑噪	66
3.4.4	实验结果与分析	67
3.5	基于平稳树状小波变换和贝叶斯估计的 SAR 图像噪声抑制	70
3.5.1	平稳树状小波变换	70
3.5.2	贝叶斯小波估计	72
3.5.3	比值边缘检测算子	73
3.5.4	仿真结果	74
3.6	基于稀疏表示和字典学习的 SAR 图像去噪	75
3.6.1	基于 MCA 的稀疏表示和分解	75
3.6.2	基于 K-SVD 算法的字典学习	77
3.6.3	基于稀疏表示和字典学习的 SAR 图像去噪	79
3.6.4	实验结果与分析	80

3.7 多波段多极化 SAR 图像信息压缩与滤波算法.....	84
3.7.1 极化原理和经典多极化 SAR 滤波方法.....	84
3.7.2 主成分分析 (PCA)	86
3.7.3 核主成分分析 (KPCA)	87
3.7.4 基于 KPCA 的多频率多极化 SAR 图像滤波	89
3.7.5 实验结果与分析	90
3.8 基于 ME-curvelet 变换和 PSO 的自适应 SAR 图像增强	93
3.8.1 ME-Curvelet 变换	93
3.8.2 改进的增益函数	94
3.8.3 基于改进的 PSO 算法的参数优化	96
3.8.4 基于 ME-Curvelet 和 PSO 算法的 SAR 图像自适应增强	99
3.8.5 实验结果与分析	100
参考文献	107
 第 4 章 SAR 图像与光谱图像的融合	 111
4.1 经典的融合效果评价准则	111
4.1.1 基于信息量的评价	112
4.1.2 基于统计特性的评价	113
4.1.3 基于相关性的评价	114
4.1.4 基于梯度值的评价	114
4.2 多传感器图像融合主要方法	114
4.2.1 基于不同彩色空间的融合方法	115
4.2.2 数学合成技术的融合方法	120
4.2.3 多分辨率融合方法	122
4.2.4 基于统计理论的图像融合方法	129
4.3 基于保真小波图像融合方法	131
4.3.1 融合准则选取	132
4.3.2 保真小波融合方法 (HFWT)	135
4.3.3 实验结果与分析	137
4.4 基于多小波变换的图像融合方法	138
4.4.1 连续多小波变换	139
4.4.2 多小波的特性	139
4.4.3 多元多分辨分析	140
4.4.4 多小波的分解与重构	141
4.4.5 基于离散多小波变换的图像融合方法	142
4.4.6 实验结果与分析	143
4.5 基于小波包变换的图像融合	145



4.5.1	小波包变换	145
4.5.2	基于区域能量的融合规则	148
4.5.3	基于小波包方向自适应 (WPT-SAO) 的融合方法	150
4.5.4	实验结果与分析	150
4.6	基于区域统计特征的特征级图像融合	153
4.6.1	特征级图像融合原理	153
4.6.2	SAR 图像分割	154
4.6.3	光学图像的边缘提取	156
4.6.4	基于区域长轴线的融合特征提取	157
4.6.5	实验结果与分析	157
	参考文献	159
第 5 章 SAR 图像边缘检测		163
5.1	经典的多尺度边缘检测方法	163
5.1.1	Marr - Hildreth 算子	163
5.1.2	Canny 算子	164
5.1.3	Canny 算子的几种改进	165
5.2	基于小波的多尺度边缘检测	169
5.2.1	传统的小波边缘检测方法	169
5.2.2	小波域尺度自适应的边缘检测	170
5.3	基于多尺度几何分析的边缘检测	183
5.3.1	基于 Wedgelet 的边缘检测	183
5.3.2	基于 Beamlet 的边缘检测	187
5.3.3	实验结果与分析	198
5.4	多尺度边缘检测技术在 SAR 图像上的应用	200
5.4.1	SAR 图像的恒虚警边缘检测方法	201
5.4.2	多尺度方法在 SAR 图像边缘检测中的应用	202
5.5	基于自适应免疫遗传算法的 SAR 图像边缘检测	204
5.5.1	自适应免疫遗传算法 (AIGA)	205
5.5.2	基于 AIGA 的 SAR 图像边缘检测	209
	参考文献	218
第 6 章 SAR 图像分割		221
6.1	图像分割概述	221
6.1.1	图像分割的定义	221
6.1.2	图像分割应用及评价 ^[1]	221
6.2	基于马尔可夫随机场的 SAR 图像分割	222

6.2.1	马尔可夫随机场 (MRF)	222
6.2.2	MRF 在图像分割中的应用	227
6.2.3	基于简化马尔可夫随机场 (SMRF) 模型的 SAR 图像快速分割算法	232
6.2.4	基于多纹理特征 SMRF 的 SAR 图像分割	240
6.2.5	基于耦合马尔可夫随机场 (CMRF) 模型的纹理图像分割方法	256
6.3	基于模糊神经网络的 SAR 图像分割	266
6.3.1	模糊神经网络的结构	266
6.3.2	模糊神经网络的学习算法	267
6.3.3	模糊神经网络初始参数的选择	268
6.3.4	具体分割步骤	268
6.3.5	分割结果	269
6.4	基于 Gaussian-Hermite 矩的 SAR 图像分割	269
6.4.1	引言	269
6.4.2	Gaussian-Hermite 矩的定义	270
6.4.3	Gaussian-Hermite 矩的性质	272
6.4.4	Gaussian-Hermite 矩的能量特征	278
6.4.5	基于 Gaussian-Hermite 矩能量的 SAR 图像分割	280
6.4.6	实验结果与分析	281
6.5	基于 Dirichlet 过程混合模型的 SAR 图像分割方法	286
6.5.1	基于贝叶斯统计推理的非参数估计	287
6.5.2	Dirichlet 过程混合模型 (DPMM)	289
6.5.3	基于 DPMM 的聚类方法	293
6.5.4	基于 DPMM 的 SAR 图像分割	296
6.5.5	基于多尺度 DPMM 的 SAR 图像分割	305
	参考文献	311
第 7 章	SAR 图像目标检测和识别	315
7.1	基于快速 Beamlet 变换的 SAR 图像桥梁检测	315
7.1.1	快速 Beamlet 变换	315
7.1.2	基于快速 Beamlet 变换的 SAR 图像桥梁检测	317
7.1.3	实验结果与分析	323
7.2	基于图像高维奇异性分析的 SAR 图像带状目标检测	325
7.2.1	基于线奇异性分析的带状目标检测	325
7.2.2	二维基 Beamlet 变换	328
7.2.3	基于二维基 Beamlet 变换的 SAR 图像带状目标检测	332
7.3	SAR 图像环境因子的检测	340
7.3.1	水域检测	340



7.3.2	耕地和果园检测	341
7.3.3	林地检测	342
7.3.4	居民地检测	343
7.3.5	梯田检测	345
7.3.6	淤地坝检测	346
7.4	SAR 图像两个典型小流域环境因子专题分析	347
7.4.1	Flevoland 地区环境因子分析	347
7.4.2	合阳地区环境因子分析	349
7.5	基于 KSVD 和 PCA 的 SAR 图像目标特征提取和识别	352
7.5.1	KSVD 方法	352
7.5.2	基于 KSVD 和 PCA 的特征提取方法	355
7.5.3	基于 KSVD 和 PCA 的 SAR 图像识别	356
7.6	基于 LPSO 训练算法的模糊多类 SVM 的 SAR 图像目标识别	357
7.6.1	引言	357
7.6.2	模糊多类 SVM	358
7.6.3	线性 LPSO 算法 (LPSO)	360
7.6.4	用于模糊多类 SVM 训练的 ILPSO 算法	361
7.6.5	基于 LPSO 训练算法的模糊多类 SVM 的 SAR 目标识别	362
	参考文献	363
	附录	366
	附录 I 定理 5.3 的证明	366
	附录 II 用子束链来近似任意直线段的算法	366

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, 简称 SAR) 的产生可以追溯到 20 世纪 50 年代初期。1951 年 6 月, 美国 Goodyear 航空公司的 Carl Wiley 首次将多普勒频率分析用于相干运动雷达, 发现通过频率分析可以改善雷达的角分辨率, 即“多普勒波束锐化”, 这一概念便是 SAR 最初的思想。与此同时, 美国 Illinois 大学也独立开展了相干雷达实验, 不仅通过实验验证了“多普勒波束锐化”概念, 而且从理论上证明了合成孔径雷达的原理, 并于 1953 年 7 月研制成功第一部相干 X 波段雷达系统, 首次获得了非聚焦 SAR 图像。1953 年, 美国 Michigan 大学提出了利用载体运动可将雷达的真实天线综合成大尺寸的线性天线阵列的概念, 并派生出了聚焦和非聚焦 SAR 的工作方式。在军方的资助下, 于 1957 年 8 月研制出第一个聚焦式光学处理机制合成孔径雷达系统, 并获得第一幅全聚焦的 SAR 图像。至此, SAR 得到了广泛的认可, 并进入了实用阶段。

20 世纪 60 年代, SAR 的光学处理技术得到了全面发展, 并开展了多频多极化 SAR 研究。60 年代末, 美国 Michigan 环境研究院研制成功了第一个民用的双频双极化机载 SAR 系统, 主要用于北极海洋冰成像。

70 年代, 随着电子技术的发展, SAR 的数字成像处理成为可能。由于数字成像处理系统具有数据处理灵活、便于各种误差校正、可实时处理等优点, 因而它成为 SAR 处理器的主流。在此基础上, 美国在 80 年代研制成功了一系列的多频、多极化、多入射角的机载 SAR 系统, 如 JPL 实验室的机载 AIRSAR 及 P3SAR 等。此外, 其他一些国家也先后开展了机载 SAR 系统的研究。

随着太空时代的到来, SAR 的发展也进入了太空。1978 年 7 月美国宇航局 (NASA) 发射了海洋卫星 (Seasat-A), 在卫星上首次装载了合成孔径雷达, 对地球表面 1 亿平方公里的面积进行了测绘。此后, 一系列星载 SAR 先后升空。除 Seasat-A 外, NASA 还利用航天飞机分别于 1981 年 11 月、1984 年 10 月和 1994 年 4 月将 SIR-A、SIR-B 和 SIR-C/X-SAR 三部成像雷达载入太空。值得一提的是, 美国于 1988 年发射的军用雷达卫星“长曲棍球” (Lacrosse), 它可以全天候、全天时地监视地面目标的活动情况, 其分辨率为 0.3~1 米左右, 这是到目前为止分辨率最高的星载合成孔径雷达。

中国在 SAR 的研究方面也取得了可喜的成绩。1979 年在中国科学院电子学研究所研制成功了机载 SAR 原理样机, 获得我国第一批雷达图像。1987 年完成国家“六五”攻关项目“机载多条带多极化 SAR”并装备在中国科学院遥感飞机上。1990 年研制成功 SAR 机地实时传输系统。1994 年完成 863 项目“机载实时成像器”, 从而使机载雷达系统成为我国民用遥感的有效工具。自 80 年代末以来, 国家“863”计划部署了发展星载 SAR 及相关技术的一系列课题, “星载 SAR 应用研究”课题探索和开拓了星载 SAR 的应用前景, 为我国星载 SAR 系统参数的选择提供了理论科学依据。“星载 SAR 模拟样机研制”是“863”计划重大项目, 并已于 1988 年顺利通过验收。



随着 SAR 图像的广泛应用, SAR 图像处理日益成为 SAR 技术的研究重点内容之一。一方面, 由于 SAR 是一种侧视成像雷达, 所以几何失真很大; 另一方面, SAR 图像中包含了大量由于成像界面上散射点的相干回波随机干涉而造成的相干斑, 它们会极大降低传统的边缘检测、图像分割、目标识别和其他信息扩展技术的有效性。众所周知, 光学和红外遥感是利用非相干太阳光照射或利用目标的非相干辐射来获得人眼习惯的图像, 而采用相干波照射得到的 SAR 图像, 由于雷达波的相干性, 引起了图像的斑点噪声。因而使 SAR 图像的处理工作变得相当复杂, 还有待于进一步艰苦的工作。

1.2 SAR 图像处理国内外研究现状

自 1953 年合成孔径雷达的概念被首次提出以来, 受到了各国的广泛重视, 特别是在以卫星为平台的星载 SAR 获得巨大的成功以来, 更是在世界范围内掀起了发展主动微波遥感对地观测卫星的热潮。近几年来, 我国的 SAR 技术也取得了重大发展, 特别是“九五”以来, 以飞机为平台的机载 SAR 正在向工程化和实用化的方向发展, 星载 SAR 的研究也取得了很多成果。

合成孔径雷达不仅能获得高分辨率的雷达图像, 而且与可见光成像相比有着独特的优势^{[1][2]}:

- (1) 具有全天候、全天时的成像特点;
- (2) 选择合适波长的微波, 对地物具有一定的穿透能力, 可以对植被覆盖的地面、沙漠或浅水覆盖的地区成像^[3];
- (3) 不仅可以提供幅度信息, 也可以提供相位信息;
- (4) 雷达图像的分辨率与雷达的工作波长、载机飞行高度、雷达作用距离无关, 可以在高空或太空都能有效工作;
- (5) 采用侧视成像方式, 可以对远离航迹的地方成像。

正是由于 SAR 成像具有以上的优势, SAR 图像已经被广泛地应用到各个领域。目前 SAR 图像处理和解译的研究主要集中在以下几个方面: (1) SAR 图像相干斑噪声抑制; (2) SAR 图像分割与分类; (3) SAR 图像特征提取; (4) SAR 图像目标检测; (5) SAR 图像与其他传感器图像融合。本文主要介绍 SAR 图像相干斑噪声抑制和 SAR 图像与其他传感器图像数据融合两方面的研究现状和发展方向。

1.2.1 SAR 图像相干斑噪声抑制

相干斑噪声抑制一直是 SAR 图像处理领域的一个亟待解决的重要问题。相干斑噪声的存在严重干扰了 SAR 图像的理解和解译, 因此该问题受到众多学者和研究人员的高度关注和重视。

到目前为止, 根据作用域的不同, SAR 图像相干斑噪声抑制的方法主要包括空间域方法、变换域方法和空频结合处理方法。

空间域的滤波方法是最早使用的 SAR 图像相干斑噪声抑制技术, 其中经典的方法有均值滤波、中值滤波等, 这些方法虽然能有效地减小相干斑噪声, 但有时会模糊掉 SAR 图像的细节信息。为此, 到了 80 年代, 基于局部统计特征的空间域滤波方法得到了迅速的发展, 主要有 Lee 滤波^[4]及其增强型^[5]、Kuan 滤波^[6]、Frost 滤波^[7]及其增强型^[5]、Gamma MAP 滤波^[8]等, 这些方法主要适用于背景简单、纹理信息不丰富的 SAR 图像。但是当图像背景复杂并且纹理丰富时, 这些方法则会产生过平滑现象, 不能很好地保持边缘纹理信息。另外, Crimmins 提出的几何滤波方法^[9]、White 提出的迭代滤波方法^[10]、Safa 等提出的形态学方法^[11], 也是 SAR

图像相干斑噪声抑制的重要分支, 这些方法考虑了像素间的结构领域信息, 能较处理好相干斑噪声。然而, 这类方法并没有利用 SAR 图像的统计特性, 而且计算量较大。

变换域的滤波方法常用的步骤是: ①图像的变换; ②对变换后的图像系数进行处理; ③将处理后的系数进行反变换。小波变换是常用的图像变换方式之一, 传统的小波系数处理方法包括软、硬阈值等, 这些都只是对小波系数的简单处理。目前基于 MAP 和 MMSE 的估计准则的相干斑噪声方法得到了快速的发展。基于 MAP 估计准则的方法主要有 Foucher 等人提出的多尺度 MAP SAR 图像抑噪方法^[12], 胡正磊等人提出的以 α 平稳分布为先验的 SAR 抑噪方法^[13]等; 基于 MMSE 准则的抑噪方法主要有 Pižurica 等人提出的贝叶斯收缩方法^[14], Argenti 等人提出的局部线性 MMSE 为准则的抑噪方法^[15], 我国学者也在这方面进行了广泛的研究^[16-19]。

近年来, 马尔可夫随机场模型与小波变换相结合, 建立小波马尔可夫模型的抑噪方法是 SAR 图像相干斑抑噪技术的研究热点^[20], 特别是近年来提出的一些新的 Markov 结构^[21], 已被用于 SAR 图像相干斑抑噪中, 并且取得了非常好的抑噪效果, 然而存在计算量大、训练算法收敛速度较慢等问题。但总的来说, 研究 SAR 图像变换域系数的统计模型, 结合 Markov 随机场等理论对于 SAR 图像相干斑噪声抑制研究来说是一个重要研究方向。

同时, 随着小波理论不断发展, 平稳小波 (Stationary Wavelet Transform, SWT) 由于其具有平移不变性, 弥补了离散小波变换缺乏平移不变性的缺点, 在 SAR 图像抑噪中得到了迅速的应用^{[13][15][21][22]}。特别是, 近年来随着多尺度几何分析的发展, 基于多尺度几何分析的 SAR 图像抑噪方法受到了研究者越来越多的关注和重视, 其 SAR 图像抑噪效果^{[23][24]}, 也展示了多尺度几何分析自身的优势。

空频结合处理的 SAR 图像抑噪方法是近年来人们发展的一种滤波技术, 如对小波系数采用 Lee 滤波^[25]或维纳滤波等处理, 然后再重建图像。这类方法虽然都取得了较好的抑噪效果, 但却并没有考虑实际的相干斑噪声在小波域的分布特性。

1.2.2 SAR 图像增强

由于 SAR 图像存在大量的相干斑噪声, 通用的图像增强方法在增强图像纹理细节和边缘信息时, 会同时增强 SAR 图像中的噪声信息, 加剧了 SAR 图像的解译困难, 因此不适用于 SAR 图像增强。根据作用域的不同, 当前的增强方法主要包括空域方法, 变换域方法。

空域方法是最基本的图像增强方法, 比较经典的有对比度增强、直方图增强和图像锐化等。对比度增强通过一定的规则逐点修改输入图像的每一个像素的灰度, 从而将图像的灰度全局或局部拉伸, 它一般分为线性变换和非线性变换两种。直方图增强可以将整体亮度偏暗的图像进行直方图均衡化, 也可以将一幅图像的直方图形状调整为与某一图像的直方图相近的形状, 从而根据直方图规格化的方法校正传感器和亮度差异引起的变化。图像锐化主要针对模糊的图像, 可以对其进行边缘增强, 突出目标的边缘和轮廓。

频域增强是变换域增强方法中比较经典的一种, 它主要通过某种变换 (如傅里叶变换, 余弦变换等) 将图像从空间域变换到频域, 然后对图像的变换系数进行修正, 最后逆变换到空域得到增强后的图像。频域增强方法主要包括低通滤波、高通滤波和同态滤波等。

传统的空域增强和频域增强都是对图像的整体进行操作, 无法有效地突出局部感兴趣的目标, 而且没有考虑到 SAR 图像的相干斑噪声特性, 因此不适于 SAR 图像的增强。

小波变换是近几年非常流行的一种变换域方法, 它广泛应用于图像降噪、增强、分割、压缩、融合、目标检测等领域, 取得了良好的处理结果。小波变换将一幅图像分解为大小、位置、



方向都不相同的分量系数,然后根据需要 will 不同位置、不同方向上的某些分量改变其系数的大小,从而拉伸感兴趣的分量系数同时抑制不需要的分量系数,最后进行逆变换,得到小波增强的结果。然而,小波变换“各向同性”的特点使得其在增强过程中,无法兼顾抑制噪声和保留图像的纹理细节这两方面。因此,建立在小波变换基础上的多尺度几何分析方法因为增加了任意的方向性而受到图像处理领域学者们的青睐。Curvelet 变换结合了 Ridgelet 变换的各项异性和 Wavelet 变换的多尺度特性,在对 SAR 图像增强的过程中,抑制噪声的同时还有效地保持了图像的边缘信息,从而成为 SAR 图像增强的一种热点方法。

1.2.3 SAR 图像融合

随着遥感技术的不断发展,新型传感器不断涌现。不同传感器提供了不同光谱分辨率、不同时间分辨率和不同空间分辨率的遥感图像。与单一传感器图像不同的是,多源遥感图像具有充足的冗余性、互补性和合作性,可以最大限度利用各种图像源提供的信息。因此,多源遥感图像融合是目前研究的热点。

SAR 图像作为多源遥感源图像在各个领域中得到了迅速的应用,它不仅具有与可见光、红外图像相同程度的分辨率,而且还是具有全时域、全天候的特点。目前以 SAR 图像为图源的融合主要包括 SAR 图像与 TM 图像的融合、不同波段与不同 SAR 极化图像的融合、极化 SAR 图像与超光谱图像的融合^[20]。

(1) SAR 图像与 TM 图像的融合

专题绘图仪 (Thematic Mapper, TM) 是 1972 年美国发射的 Landsat4、5 号地球观测卫星上搭载的一种多光谱扫描仪, TM 图像由于其丰富的多光谱信息而被广泛使用。TM 的波谱范围大,工作波段多,每个波段范围较窄,因此谱分辨率较高,但其空间分辨率较低。而 SAR 图像的主要特征就是具有较高的空间分辨率,因此这两种图像的融合将更好的实现信息的互补。

SAR 图像和 TM 图像融合的主要方法有 IHS 变换法, PCA 变换法, HPF 法等。然而这些方法或多或少存在着一些问题。为此,程英蕾等人^[26]提出了一种基于小波包变换的 SAR 图像与 TM 图像的融合算法,于秀兰等人^[27]对于 SAR 图像和 TM 图像的不同层次融合进行了分类比较。

近年来随着多尺度几何分析的发展,基于多尺度几何分析的 SAR 图像与 TM 图像融合成为研究热点。同时,目前 SAR 图像和 TM 图像的融合方法大多运算量较大、复杂度高,不能满足快速或实时融合的需要,因此并行的融合方法也受到了越来越多的重视。

(2) 不同波段与不同 SAR 极化图像的融合

随着合成孔径雷达技术的发展, SAR 能提供单极化、多极化和全极化图像,这些图像特点各有所不同,特别是不同波段图像的相关性较小,因此融合不同波段的图像,能使 SAR 图像达到清晰的效果^[28]。但目前这方面的研究还不多见。

(3) 极化 SAR 图像与超光谱图像的融合

超光谱图像具有丰富的纹理信息,而且空间相关性较差,因此, SAR 图像与超光谱图像的融合为图像的后续处理提供丰富的纹理信息。特别是随着遥感技术的不断发展,超光谱成像技术的不断推广, SAR 图像与超光谱图像的融合也是今后的一个研究方向。

1.2.4 SAR 图像边缘检测

一般来讲,一个好的边缘检测算法应满足如下要求:①检测精度高;②抗噪能力强;③计算简单;④易于并行实现。其中最根本的问题是解决检测精度与抗噪声能力间的矛盾。从理论

上讲,这两者之间存在着相互制约的互变关系,即不确定性原则。

为了有效检测 SAR 图像边缘,人们提出了许多边缘检测算法。早期的 SAR 图像的边缘提取源自传统的图像处理技术,如 Sobel 算子、Laplace 算子、Canny 算子等各种基于梯度的边缘检测算子被广泛用于 SAR 图像,但传统的微分算子检测是基于图像具有加性噪声假设的。而 SAR 图像的噪声是乘性的,梯度算子用于 SAR 图像边缘检测得到的结果不是恒虚警的,而是随着图像局部强度均值的变化而变化^[29]。这样就容易在亮区检测出虚假边缘,而在暗区域则丢失很多真实边缘。为了解决这个问题,必须研究专门针对 SAR 图像乘性噪声的边缘检测算子。

从 20 世纪 80 年代开始,陆续出现了很多种针对 SAR 图像设计的边缘检测方法,主要可以分为四类^[30]:基于单边缘模型的方法、基于多边缘模型的方法、多分辨率的方法以及包括贝叶斯、神经网络、遗传算法在内的其他方法。其中,又以单边缘模型方法中的局部均值比方法^[31](Ratio of Average, RoA)及其改进和以广义似然比^[32](Generalized Likelihood Ratio, GLR)为代表的假设检验方法,应用最为广泛。它们的共同特点是在边缘检测过程中都结合了 SAR 图像的斑点噪声特性,故它们都具有恒虚警性(Constant False Alarm Rate, CFAR)。但是,它们都是在一个固定尺寸的局部窗口内进行边缘点判断的,所以都是单一尺度的方法。

90 年代中后期,随着小波理论的进一步发展,出现了大量的基于小波理论的 SAR 图像边缘检测方法。这类方法可以得到图像在不同尺度下的灰度突变点,具有极敏感的变焦特征,在不同的分辨率下,反映出图像的不同结构特征,具有较强的处理突变信号能力。以小波为代表的是以图像的多尺度分析为基础的第三代 SAR 图像边缘检测算法。

小波理论自身也存在着问题,在高维下不能有效地“表示”图像,这促使人们研究更先进的理论。Contourlet 变换^[33]和非下采样 Contourlet 变换(Nonsubsampled Contourlet Transform, NSCT)^[34]是近年来新兴起的理论,在高维下相比小波变换具有明显的优势和潜力,其应用的范围也逐渐扩大。Contourlet 变换的主要特征是有很好的方向敏感性和各向异性的特点,能够准确地将图像中的边缘信息“捕获”到不同尺度、不同频率的子带中。因此,Contourlet 变换在图像增强、去噪等方面取得了比小波变换更好的效果。但由于需要进行上采样和下采样,使 Contourlet 变换缺乏平移不变性,导致在进行图像处理时会引入 Gibbs 效应。文献[34]提出了一种具有平移不变性的 Contourlet 变换,即非下采样 Contourlet 变换(NSCT)。该变换通过使用迭代非下采样滤波器组来获得平移不变、多分辨、多方向的图像表示能力,有效表达了图像的纹理特征。

1.2.5 SAR 图像分割

SAR 图像分割一直是 SAR 图像处理领域的一个热点问题,随着 SAR 图像分辨率的不断提高及其在军事和民用方面的广泛应用,这方面的研究将更加受到关注。一方面,有效的 SAR 图像分割结果能为地物的准确解译提供支持;另一方面,SAR 图像分割是自动目标检测与识别的基础。到目前为止,针对 SAR 图像分割已经开展了大量研究,大致可以分为以下四类:

基于阈值的分割方法。Lee 和 Jurkevich 最早提出了用于单视和多视 SAR 图像分割的多级阈值法^[35],Zaart 则通过 Gamma 分布对 SAR 图像进行建模,在此基础上进行直方图阈值估计^[36],进而完成分割。

基于边缘检测的分割方法。该方法旨在提取 SAR 图像中各个目标和区域的边缘,其中,基于 SAR 图像数学模型的 Ratio 算法^[37]通过假设检验来判断边缘存在与否,研究表明它能较好地克服噪声影响,降低检测的错误率。国内也有学者将 Beamlet 理论用于 SAR 图像的边缘检测^[38],并取得了一定成效。



基于纹理特征聚类的分割方法。该方法通常先对原始 SAR 图像提取多维纹理特征, 然后通过一定的聚类算法对已有特征进行聚类, 进而完成对输入 SAR 图像的分割。其中典型的纹理特征有小波能量特征^[39]、灰度共生矩阵特征^{[40][41]}、尺度共生矩阵特征^[42]、分形维数特征^{[43][44]}等。相关方面的研究有 Kersten 等人^[45]提出的基于模糊聚类和 EM 聚类的极化 SAR 图像分割, Xue 等人^[46]提出的基于小波特征和灰度特征融合的 SAR 图像分割等。

基于马尔可夫随机场模型的分割方法。作为概率理论的一个分支, 马尔可夫随机场理论刻画了具有某种上下文依赖关系的物理实体所表现出的特性。它是一种有效的随机建模工具, 可以有效地捕获像素间的相互约束, 从而对各像素间的上下文信息进行描述。

此外, 还有 Cook^[47]提出的基于矩特征的区域融合分割算法, Lemarechal 等人^[48]和 Ogor 等人^[49]提出的基于数学形态学的 SAR 图像分割方法, 等等。然而上述几种 SAR 图像分割算法都存在着或多或少的缺点: 基于阈值的分割方法较为简单, 但最易受到相干斑噪声的影响, 由于该方法没有考虑 SAR 图像中的上下文信息, 没有对 SAR 图像中的纹理进行分析, 因此分割效果较差; 基于边缘检测的分割方法也容易受到相干斑噪声的干扰, 而且还存在漏检和误检之间的矛盾, 很难达到令人满意的效果; 基于纹理特征聚类的 SAR 图像分割, 由于涉及到对 SAR 纹理特征的提取, 可以在一定程度上改善基于灰度阈值分割的效果, 但是同样存在特征选择、特征组合和聚类算法选取等问题; 基于马尔可夫随机场模型的 SAR 图像分割, 涉及到较多的概率统计知识且模型较复杂。因此当前的研究热点逐渐趋向于结合不同的方法, 取长补短, 采用更为有效的多种方法结合进行分割。

1.2.6 SAR 图像目标检测

1. 道路检测

出现得比较早的道路检测方法是 Fischler 提出来的低分辨率航空图像的道路提取算法^[50]。Bazohar 和 Cooper 定义了马尔可夫随机场, 并将这种方法用于自动道路目标提取, 通过检测局部最大后验概率得到道路^[51]。酃苏丹等^[18]提出了一种两步算法用于从 SAR 图像中无监督地提取线性特征, 进而提取公路的方法, 取得了较好的效果, 但检测结果很大程度地受前期线性特征检测准确度的限制。M. Mokhtarzade 等^[52]提出了一种从高分辨率卫星图像中应用神经网络进行道路提取的方法, 输入参数中利用到了图像的光谱信息。Miriam Amo 等^[53]提出了一种区域竞争算法, 半自动地从航空图像中提取道路。蒋斌提出了一种基于边缘检测和直线段组织的 SAR 图像道路提取算法和一种基于模糊聚类和最短路径搜索的 SAR 图像道路提取算法。

2. 桥梁检测

桥梁是 SAR 图像中另外一种重要的线性目标。它的检测与识别在军事和民用上都具有重要的意义。Hou biao 等^[54]先对图像进行滤波、增强和边缘检测后再检测桥梁, 此方法获得了较好的分割效果, 但存在着伪目标。程辉等^[55]对河流区域进行特征提取后, 利用 SVM 训练建模的方法分割河流, 最后在分类后的二值图像中按方向累加能量最小准则进行桥梁目标检测, 有较强的抗噪性。Zhengyao Bai 等^[56]将梯度与比值结合的边缘检测算子与最优阈值选择法相结合进行桥梁检测。

3. 舰船检测

船舶是图像中一种重要的目标。它的检测与监视是世界各国海岸地带国家的传统任务, 在民用及公安部门有广泛的应用, 如舰船的寻找与救助、渔船监视、非法移民、保卫领土、舰船