

高分辨遥感影像学习与感知

焦李成 冯 婕 刘 芳 杨淑媛 张向荣 著



科学出版社

高分辨遥感影像学习与感知

焦李成 冯 婕 刘 芳 杨淑媛 张向荣 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

高分辨遥感影像学习与感知是近年来遥感应用领域的研究热点。本书分析了高分辨率遥感影像处理的特点和面临的挑战,总结和归纳了国内外已有的研究工作,结合近年来机器学习和人工智能领域中的热点方法,如稀疏表示、多核学习、模糊聚类、多目标优化等,着重从高空间分辨率 SAR 遥感影像相干斑抑制、SAR 地物目标分类和高光谱分辨率遥感影像混合像元分解、维数约简、地物目标分类等方面进行研究,提供了新颖的解决思路和方法。本书侧重于新算法的描述与实例的分析,反映近年来高分辨遥感影像学习与感知的最新发展概况,为该领域的深入研究提供借鉴。

本书可供信息科学、电子科学、计算机科学与地球科学等领域的研究人员参考,也可供相关专业研究生和高年级本科生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨遥感影像学习与感知 / 焦李成等著. —北京: 科学出版社, 2017.3
ISBN 978-7-03-052387-7

I. ①高… II. ①焦… III. ①高分辨率—遥感图象—图象处理—研究
IV. ①TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 056898 号

责任编辑: 宋无汗 / 责任校对: 李 影

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 394 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

遥感是通过不同传感器在远离目标和非接触目标物体条件下探测目标地物,获取其反射、辐射或散射的电磁波信号,并利用地理学、光学、计算机科学知识对这些信号进行处理与分析的一门科学和技术。其主要根据在于地面地物的种类及其所处环境的差异对不同波段的电磁波信号具有不同程度的反射、辐射或散射效应。遥感技术正是利用这种特性,通过研究探测目标的电磁波信号,从而分析出目标的物理属性和几何信息。

遥感影像是通过检测和度量地物目标电磁辐射能量所得到的客观记录,把人眼可得到的和看不到的景物都转化成人眼所能看到的图像,重现地物目标电磁辐射特性的空间分布状况。遥感影像获取后需要更进一步的处理才能够用于实际的工程应用中,如几何校正、辐射校正、混合像元分解、图像配准、图像压缩、图像去噪、图像增强、图像分割、图像分类、变换检测、目标识别等。遥感影像的学习与感知在军事、国民经济以及农业和林业等各个领域都有着重要的价值。

遥感数据获取技术正随着航天技术、计算机技术、传感器技术和空间定位技术等的发展而迅速发展。所获得的遥感影像呈现出高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率的特点。相对于遥感数据获取技术的快速发展,遥感数据的分析、处理和认识技术表现出明显的滞后,无法有效实现大规模、高分辨率遥感数据的学习与处理,难以满足军事和民用领域对高精度、高效率地物分类与识别的需求。如何从大规模、高分辨的遥感数据中,利用机器学习、模式识别、统计分析、进化计算等领域的方法,挖掘遥感数据中的结构信息,建立遥感数据学习与处理模型,设计实用高效的高分辨遥感影像处理系统,是当代遥感技术领域的重点和难点,具有非常重要的应用前景和现实意义。

从 1996 年开始,在国家“973”计划项目(2013CB329402, 2006CB705707),国家“863”计划项目(863-306-ZT06-1、863-317-03-99、2002AA135080、2006AA01Z107、2008AA01Z125 和 2009AA12Z210),国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(61621005),国家自然科学基金重点项目(60133010、60703107、60703108、60872548 和 60803098)及面上项目和青年项目(61272279, 61473215, 61371201, 61373111, 61303032, 61271301, 61203303, 61522311, 61573267, 61473215, 61571342, 61572383, 61501353, 61502369, 61271302, 61272282, 61202176, 61573267, 61473215, 61573015, 60073053、60372045 和 60575037),国家部委科技项目资助项目(XADZ2008159 和 51307040103),高等学校学科创新引智计划(“111”计划)(B07048),国家自然科学基金重大研究计划项目(91438201 和 91438103),教

育部“长江学者和创新团队发展计划”项目(IRT_15R53 和 IRT0645), 陕西省自然科学基金(2007F32, 2009JQ8015, 2016JQ6047), 国家教育部高等学校博士点基金项目(20070701022 和 200807010003), 中国博士后科学基金特别资助项目(200801426 和 2016T90892), 中国博士后科学基金面上资助项目(20080431228, 20090451369, 2015M570816)及教育部重点科研项目(02073)的资助下, 作者及其团队对高分辨遥感影像学习与感知进行了较为系统的研究和探讨。

鉴于高分辨遥感影像学习与感知在军事和民用领域展现的广阔前景, 以及对社会各个方面的重要影响, 本书作者在该领域进行了深入而有效的研究工作。在十多年的探索研究中, 取得了一些成果, 并在广泛的应用领域进行了尝试。本书从稀疏表示、多核学习、模糊聚类、多目标优化的角度, 对很多复杂的遥感影像处理问题提出了新颖的解决思路和方法。基于已有研究者的工作, 结合国内外的动态, 本书集合了当前高分辨遥感影像相干斑抑制、混合像元分解、特征学习与提取、分类与识别等很多相关内容, 更加入了许多最新技术在遥感影像处理不同领域的应用工作解析。

本书是西安电子科技大学智能信息处理研究所和智能感知与图像理解教育部重点实验室近十年来集体智慧的结晶。特别感谢保铮院士多年来的悉心培养和指导; 感谢中国科技大学陈国良院士和 IEEE 计算智能学会副主席、英国 Birmingham 大学的姚新教授, IEEE Fellow、美国 University of Florida 的李荐(Jian Li)兼职教授, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 主编、美国 University of Vermont 的吴新东教授, 澳大利亚 University of Queensland 的李雪博士的指导和帮助; 感谢国家自然科学基金委信息科学部的大力支持; 感谢西安电子科技大学田捷教授、高新波教授、石光明教授、梁继民教授的帮助; 感谢凤宏晓, 武杰、段一平、杨咚咚、余航、刘赶超、孙涛、张二磊、王佳宁、于海鹏、王琳、刘立国、翁鹏等智能感知与图像理解教育部重点实验室全体成员付出的辛勤劳动。

感谢作者家人的大力支持和理解。

由于作者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 恳请读者批评指正。

作 者

2016年11月22日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 遥感与遥感影像概述	1
1.2 高空间分辨率合成孔径雷达遥感影像处理	2
1.2.1 SAR 遥感影像	2
1.2.2 高分辨 SAR 遥感影像处理的国内外现状与挑战	5
1.3 高光谱分辨率遥感影像处理	10
1.3.1 高光谱遥感影像	11
1.3.2 高光谱遥感影像处理的研究现状及难点	12
参考文献	17
第 2 章 基于统计的高分辨 SAR 遥感影像相干斑抑制	29
2.1 Marr 的视觉计算理论	29
2.2 基于视觉计算的初始素描模型	30
2.2.1 初始素描模型	31
2.2.2 基于视觉计算的初始素描图提取方法	32
2.3 基于视觉计算的 SAR 图像素描模型	34
2.3.1 SAR 图像素描模型	34
2.3.2 基于视觉计算的 SAR 图像素描图提取方法	35
2.3.3 SAR 图像素描图提取结果分析	39
2.4 基于几何核函数和同质区域搜索的 SAR 图像相干斑抑制	45
2.4.1 基于 SAR 图像素描图的块相似性计算方法	45
2.4.2 基于几何核函数和同质区域搜索的方法	47
2.5 实验结果与分析	48
2.5.1 参数敏感性分析	48
2.5.2 合成 SAR 图像与真实高分辨 SAR 图像相干斑抑制结果与分析	51
2.6 本章小结	60
参考文献	61

第 3 章 基于非局部信息和改进边缘保持的高分辨 SAR 遥感影像分类	63
3.1 引言	63
3.2 模糊聚类算法研究进展	64
3.2.1 标准的模糊 c 均值算法	64
3.2.2 约束的模糊聚类算法	64
3.2.3 增强的模糊聚类算法	65
3.2.4 快速推广的模糊聚类算法	66
3.2.5 模糊局部信息的聚类算法	67
3.2.6 非局部空间信息的模糊聚类算法	67
3.3 基于非局部信息和改进边缘保持的模糊聚类方法	68
3.3.1 基于非局部信息和改进边缘保持的模糊聚类算法流程	68
3.3.2 基于非局部信息的求和图像的构造	68
3.3.3 基于统计的过平滑边缘的重新定位	70
3.3.4 模糊 c 均值聚类	71
3.4 实验结果与分析	71
3.5 本章小结	79
参考文献	79
第 4 章 基于层次语义和自适应隐模型的高分辨 SAR 遥感影像分类	82
4.1 引言	82
4.2 SAR 图像的层次视觉语义模型	84
4.3 基于层次视觉语义和自适应邻域多项式隐模型的 SAR 图像分割	88
4.3.1 聚集区域的分割	88
4.3.2 结构区域和匀质区域的分割	88
4.4 实验结果和分析	92
4.4.1 数据集	93
4.4.2 合成 SAR 遥感影像的分割	94
4.4.3 真实高分辨 SAR 遥感影像的分割	97
4.5 本章小结	103
参考文献	103
第 5 章 融合多特征的人工免疫多目标 SAR 遥感影像分类	106
5.1 引言	106
5.2 多目标优化问题	107
5.2.1 多目标优化问题的数学定义	107

5.2.2 多目标优化问题研究的必要性	108
5.3 进化多目标优化算法的研究进展	109
5.3.1 进化多目标优化算法的研究起源	109
5.3.2 进化多目标优化的代表算法	110
5.3.3 第一代进化多目标优化算法	111
5.3.4 第二代进化多目标优化算法	112
5.3.5 当代进化多目标优化算法	114
5.4 多目标 SAR 图像分割模型的定义	114
5.5 融合互补特征的人工免疫多目标 SAR 图像分割算法	116
5.5.1 SAR 图像中的互补融合特征	116
5.5.2 SAR 图像的预处理	118
5.5.3 融合互补特征的人工免疫多目标 SAR 图像分割算法流程	119
5.6 实验结果与分析	120
5.7 本章小结	131
参考文献	131
第 6 章 基于上下文分析和非均衡合并的高分辨 SAR 遥感影像分类	136
6.1 引言	136
6.2 基于格式塔规则的上下文分析	137
6.2.1 超像素的产生	138
6.2.2 上下文分析	138
6.2.3 基于上下文的典型: 马尔可夫随机场分割算法	140
6.2.4 基于格式塔规则的上下文分析	143
6.3 无监督非均衡合并算法	146
6.3.1 粗合并阶段	147
6.3.2 细合并阶段	148
6.3.3 无监督非均衡合并算法特性分析	151
6.4 实验结果与分析	152
6.4.1 模拟 SAR 图像	153
6.4.2 真实 SAR 图像	158
6.5 本章小结	161
参考文献	161
第 7 章 基于多元互信息测度和克隆选择优化的高光谱波段选择	165
7.1 引言	165
7.2 高光谱波段选择研究进展	166

7.3 基于三元互信息的准则函数	167
7.3.1 基于互信息的准则	167
7.3.2 互信息和理想互信息准则的相关性	169
7.3.3 半监督互信息准则	171
7.4 基于改进克隆选择算法的搜索策略	172
7.4.1 种群初始化	172
7.4.2 基于互信息和半监督互信息下的种群迭代	172
7.4.3 基于多元互信息测度和克隆选择优化的算法流程	173
7.5 实验结果与分析	174
7.6 本章小结	185
参考文献	185
第 8 章 基于波段协作性和近邻传播聚类的半监督高光谱波段选择	188
8.1 引言	188
8.2 近邻传播聚类算法	189
8.3 基于正则化三元互信息的近邻传播聚类方法	190
8.3.1 基于正则化三元互信息和正则化互信息的波段相关性	191
8.3.2 基于熵和互信息的波段偏向	194
8.3.3 自动噪声波段移除	194
8.3.4 RNTMIAP 算法步骤	195
8.3.5 RNTMIAP 算法时间复杂度分析	195
8.4 实验结果与分析	196
8.4.1 高光谱图像地物分类结果与分析	196
8.4.2 所选波段分析	203
8.5 本章小结	206
参考文献	206
第 9 章 稀疏约束的广义双线性高光谱遥感影像解混	208
9.1 高光谱中的解混问题	208
9.1.1 大气校正	208
9.1.2 降维	209
9.1.3 解混	210
9.2 高光谱解混模型	210
9.2.1 线性光谱混合模型	210
9.2.2 非线性光谱混合模型	212

9.3 广义双线性模型	213
9.4 稀疏约束的半非负矩阵分解	214
9.4.1 稀疏约束	214
9.4.2 $L_{1/2}$ 正则化半非负矩阵分解	214
9.4.3 多步内循环迭代	217
9.5 实验结果与分析	218
9.6 本章小结	221
参考文献	221
 第 10 章 基于多核学习的不平衡高光谱遥感影像分类	223
10.1 引言	223
10.2 核学习	223
10.3 多核学习的发展历史及研究现状	224
10.3.1 半定规划求解多核学习	225
10.3.2 二阶锥形规划求解多核学习	225
10.3.3 基于切平面的交替优化求解多核学习	226
10.3.4 基于梯度下降的交替优化求解多核学习	227
10.3.5 基于解析优化的交替优化求解多核学习	228
10.4 传统分类器与经典的不平衡分类器	228
10.4.1 传统分类器与不平衡数据	228
10.4.2 经典的不平衡分类器	229
10.5 基于多核学习的不平衡分类器	232
10.5.1 最大 margin 准则	232
10.5.2 最大 margin 的分类器集成	233
10.5.3 基于多核学习的最大 margin 分类器求解	234
10.6 实验结果与分析	235
10.7 本章小结	239
参考文献	240
 第 11 章 基于均值漂移和组稀疏编码的高光谱遥感影像空谱域分类	242
11.1 稀疏表示理论	242
11.2 组稀疏编码	243
11.2.1 组编码	243
11.2.2 组稀疏编码的字典学习	244
11.2.3 组稀疏编码算法与传统的稀疏编码算法的比较	245

11.3 基于组稀疏编码的高光谱图像分类及结果分析	245
11.4 基于均值漂移和组稀疏编码的高光谱图像空谱域分类	252
11.4.1 高光谱图像分割	252
11.4.2 均值漂移聚类	253
11.4.3 基于均值漂移聚类和组稀疏编码的高光谱图像空谱域分类	254
11.5 实验结果与分析	255
11.6 本章小结	260
参考文献	260
第 12 章 基于多特征联合与稀疏表示学习的高光谱遥感影像分类	263
12.1 引言	263
12.2 空谱域多特征提取	265
12.3 基于多特征联合的稀疏表示分类方法	268
12.3.1 基于多特征的稀疏表示分类	268
12.3.2 基于多特征的联合稀疏表示分类	269
12.4 实验结果与分析	270
12.5 本章小结	276
参考文献	276
第 13 章 基于类级稀疏表示学习的高光谱影像空谱联合分类	278
13.1 集成学习理论基础	278
13.1.1 集成学习的定义和系统结构	278
13.1.2 集成学习的应用	281
13.2 基于稀疏集成学习的空谱联合分类方法	281
13.2.1 稀疏集成分类方法	282
13.2.2 空谱联合的稀疏集成分类方法	283
13.2.3 交替方向乘法	285
13.3 实验结果与分析	287
13.4 本章小结	297
参考文献	298

第1章 绪 论

1.1 遥感与遥感影像概述

遥感(remote sensing)是一种远距离的、非接触的目标探测技术和方法^[1,2]。它利用可见光、红外、微波等传感器通过摄影、扫描等各种方式,接收来自地球表层各类地物的电磁波信号,并利用地理学、光学、计算机科学知识对这些信号进行加工处理,从而研究地面物体的各种特性。其理论基础在于地面地物的种类及其所处环境条件的差异对不同波段的电磁波信号具有不同程度的反射或辐射效应^[3]。遥感技术正是利用这种特性,通过研究探测目标的电磁波信号,从而分析出目标的物理属性和几何信息。现代遥感技术正随着航天技术、计算机技术、传感器技术、空间定位技术等的发展而逐渐完善。

目前根据不同的划分方式,遥感可分为不同种类^[4]:

根据遥感探测所采用的遥感平台不同,可分为:地面遥感、航空遥感、航天遥感。根据遥感探测的工作方式的不同,可分为:主动式遥感,即由传感器主动地向被探测的目标物发射一定波长的电磁波,然后接受并记录从目标物反射回来的电磁波;被动式遥感,即传感器不向被探测的目标发射电磁波,而是直接接收并记录目标物反射太阳辐射或目标物自身发射的电磁波。根据遥感探测的工作波段,可分为:紫外遥感,其探测波段在 $0.3\sim0.38\mu\text{m}$;可见光遥感,其探测波段在 $0.38\sim0.76\mu\text{m}$;红外遥感,其探测波段在 $0.76\sim14\mu\text{m}$;微波遥感,其探测波段在 $1\text{mm}\sim1\text{m}$;多光谱分辨率遥感,其探测波段在可见光与红外波段范围之内,将这一波段范围划分成若干个窄波段来进行探测。随着遥感光谱分辨率的进一步提高,出现了高光谱分辨率遥感,可以将这一波段范围划分成许多非常窄且光谱连续的波段来进行探测。

遥感影像是通过检测和度量地物目标电磁辐射能量所得到的客观记录,重现了地物目标电磁辐射特性的空间分布状况^[5]。通过几何校正、辐射校正、图像配准、图像压缩、图像去噪、图像增强、图像分割、图像分类以及变化检测等方法处理遥感影像在军事、民用、国民经济以及农业和林业等各个领域的应用。

随着计算机科学、传感器技术、航空航天平台等技术的迅速发展,所获得的遥感图像也呈现出高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率的特点。作为微波遥感的代表,合成孔径雷达^[6,7](synthetic aperture radar, SAR)具有全天候、全天时的工作能力,而且特征信号丰富,含有幅度、相位和极化等多种信息。随

着 SAR 技术的广泛应用, SAR 图像处理和理解技术在我国国防和经济建设中占有日益重要的地位。SAR 图像处理引起了各国科学家的广泛重视,成为近些年的研究热点。此外,高光谱分辨率遥感技术^[8,9]是近二十年内迅速发展起来的一种遥感技术,成为当前遥感领域的研究热点。它利用高光谱成像光谱仪通过成百个波段同时成像,能够获取地物连续的光谱信息,从而获得“图谱合一”的三维数据。

由于 SAR 和高光谱遥感在遥感领域中的突出特点,本书主要关注高空间分辨率的合成孔径雷达遥感图像和高光谱分辨率的遥感图像,依次对这两类遥感图像展开研究和分析。

1.2 高空间分辨率合成孔径雷达遥感影像处理

合成孔径雷达是一种主动方式的微波成像传感器,其概念于 1951 年 6 月由美国 Goodyear 宇航公司的 Wiley^[10]首次提出,并于 1957 年在美国密歇根大学雷达和光学实验室获得第一张全聚焦的 SAR 图像,由此开辟了人类遥感观测的一种新途径。与传统雷达相比, SAR 利用脉冲压缩技术来提高距离分辨率,利用合成孔径原理来提高方位分辨率,其基本思想是在雷达平台前进方向上的不同位置记录雷达接收的信号,从而在空间上形成一个比实际雷达天线更长的“虚拟”天线阵列,经过相关算法的处理后,就可得到信号的相干积累,从而实现方位向的高分辨^[11-13],进而获得大面积的二维高分辨率雷达图像。

1.2.1 SAR 遥感影像

作为微波遥感的代表,合成孔径雷达对比于可见光遥感,具有在夜间探测和侦查跟踪能力;对比于红外遥感,虽然红外传感器也能够在夜间工作,但是同其他电光传感器一样,不能在严酷恶劣的气候下产生清晰的图像,而 SAR 突破了红外遥感受天气等外界条件影响的局限,具有全天候、全天时的工作能力。由于其在国防、环境等方面的突出战略意义, SAR 图像处理已成为当前信息领域最活跃的分支之一。

1. SAR 成像的基本原理

雷达通过对目标产生回波来检测出当前目标的存在。一般来说,雷达搭载在某个运动平台上,如星载或者机载,来对目标扫描并收集距离和方位两个方向的回波信号而形成图像^[14],如图 1.1 所示。

研究者们不断提高雷达的分辨率,来呈现观测地物更丰富的信息。雷达的距离分辨率主要受限于信号的频带,提高较为容易。提高雷达的方位分辨率,要

依靠减小波束宽度,即要采用大孔径的天线。而在现实中过分增加天线的长度是很难做到的,特别是在飞行平台上。为了提高方位分辨率,利用小天线,称为阵元,排成很长的线性阵列,将这些线性阵列安装于运动平台上,通过运动形成一个等效的大孔径天线,并不断地记录回波的相位和幅度。将它们按阵列回波作合成处理,可以得到与实际阵列相类似的结果,从而提高方位分辨率,这就是 SAR 的工作原理。

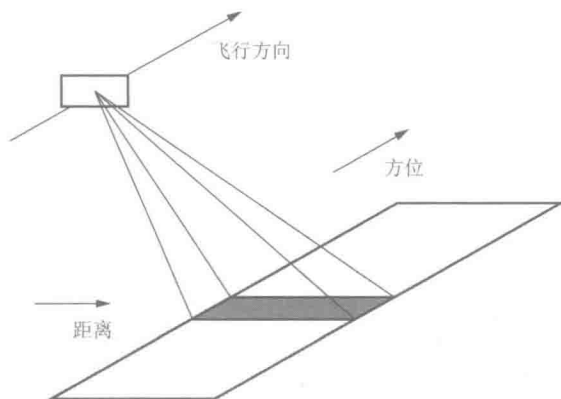


图 1.1 雷达成像示意图

2. SAR 图像的特点和应用

相比于其他对地观测设备, SAR 具有一些显著的特征^[15-17]:

(1) 全天时、全天候的工作。微波可以几乎不受雨雪等气候条件的影响进行传播。作为主动式微波成像雷达, SAR 能够全天时、全天候地提供详细的地面测绘资料和图像,具有很好的昼夜和季节稳定性,能够在严酷恶劣的气候条件下产生清晰的图像。

(2) SAR 图像能够获得地物丰富的辐射、极化、散射特性。

(3) SAR 图像具有相干成像特点,可以利用孔径进行合成,获得 SAR 图像的分辨率进而提供详细的地物属性。因此,可以根据 SAR 图像进行有效的地物分类和目标识别。

(4) 由于 SAR 的相干成像特点,其存在严重的相干斑现象。这些斑点噪声会对图像分割、边缘检测、特征提取、目标识别和其他图像处理技术造成一定的影响。

相比于光学和红外遥感设备, SAR 不仅可以准确、详细地测绘地形、地貌,获取地球的表面信息,还可以透过地表和自然植被收集地下或隐藏的信息,甚至在恶劣的环境下,也能提供详细的、具有较高分辨率的地面测绘数据和图像。概括而言, SAR 具有全天时、全天候、穿透性、可变侧视角、多波段、多极化以及高分辨率等优点^[17-19]:

(1) 全天时、全天候: SAR 作为主动式微波成像雷达, 能够不分白天、黑夜, 各种季节都有很好的稳定性。

(2) 穿透性: 微波具有一定的穿透能力, 这使得 SAR 能够穿透尘埃、烟雾、云层和其他一些障碍物进行成像, 如果选择合适的波长, 甚至可以探测植被覆盖的地面、沙漠或浅水覆盖的地区, 这种能力有助于资源勘探的工作。

(3) 可变侧视角: SAR 所采用的侧视成像方式使其具有防区外探测能力, 即 SAR 可以不直接飞越目标地区而对该地区进行探测并收集信息, 从而实现对远距离航迹区域的成像。此外, 与光学和红外传感器不同的是, SAR 的分辨率与距离无关, 不会随着距离的增加而降低, 这将有助于 SAR 的远距离高分辨成像。

(4) 多波段、多极化: 不同地面目标对不同波段的微波反应不同, 同时, SAR 成像对目标的物理和化学属性反映为不同的极化, 目标介质产生的后向散射回波携带着去极化程度的信息, 使得雷达图像对目标的宏观和微观的几何属性及质地和状态都极为敏感, 这都为进一步的 SAR 图像应用创造了极为有利的客观条件。

(5) 高分辨率: SAR 图像的分辨率与其工作波长、雷达平台的飞行高度、雷达的作用距离无关, 因此, 相比于其他种类的图像, SAR 图像无论是在高空还是在太空, 均能有效地达到高分辨率的属性。另外, SAR 成像是相干成像, 即以幅度和相位的形式收集信号, 并用来进行孔径的合成, 从而可以获得非常高的分辨率。

基于以上优点, SAR 目前已经成为先进的遥感工具, 在国防建设、国民经济和社会发展的各个领域中获得广泛的应用^[18-23], 具体表现在以下八个方面:

(1) 军事领域: SAR 可以进行全天候战略侦察、战术监视和战区监控, 可以在战场中进行实时的态势评估和打击效果验证, 从而提高现代化部队的实际作战能力和信息化水平。

(2) 矿藏资源探测: SAR 具有一定的穿透性, 可以透过地表和自然植被收集地下的信息, 因此可以进行矿藏资源的初探, 并且具有探测范围广、探测周期短、准确度高、探测成本低等优点。

(3) 灾情探测与防治: 考虑到 SAR 图像可以不受烟雾、扬尘的影响, 通过对不同时期图像的对比分析, 能够迅速把握受灾区域的具体情况, 从而对灾情进行较为客观地评估, 给抗灾决策提供直观、全面的依据。

(4) 地形测绘和制图: SAR 作为一种有效的遥感工具, 可以对大面积的地形图进行测绘, 以测定山脉、河流、城市、道路、乡村、建筑物等地面目标的形状和位置及变迁情况。

(5) 海洋探测: SAR 可用来研究大面积的海浪特性、海洋及冰山的分布、海

洋变迁、海洋石油污染及海藻生长等情况,考虑到可以穿透云层,其目前已经被广泛应用于风暴和龙卷风的研究当中。

(6) 水资源应用:湿度是影响雷达发射回波的重要因素,据此 SAR 可用于测定土壤湿度及其分布,估测大面积的降水量,研究湖泊变迁及冰雪覆盖的情况,评估水源污染并测定污染区域、统计灌溉系统的分布及状况等。

(7) 农业和林业: SAR 图像目前已经被广泛应用于农作物鉴别和农林区域分布监测的任务中,研究农作物生长状态、田地界线、自然植被分布,并发现和评估森林火灾等工作。

(8) 天文学方面:由于 SAR 可以不受行星表面水汽云层的影响,已经将其用于对金星的监测,并获得金星表面的雷达图像,其未来将在研究其他有大气存在的行星方面发挥重要作用。

1.2.2 高分辨 SAR 遥感影像处理的国内外现状与挑战

1. SAR 遥感影像处理的国内外研究现状

1) SAR 图像相干斑抑制

从相关斑抑制问题的提出到现在,经过众多学者的努力研究,已经提出很多有效的 SAR 图像相干斑抑制方法。这里,主要从以下几类降斑方法分析 SAR 图像降斑方法的研究进展:

(1) 基于空域的相干斑抑制方法。空域滤波中,鉴于均值滤波和中值滤波对噪声具有很强的抑制能力,这两种滤波方法也常用于 SAR 图像相干斑的抑制^[24,25]。然而,由于没有考虑图像噪声的统计特性,上述滤波算法往往会导致图像中细节信息的泛化和模糊。Lee^[26]针对上述问题,基于局部平稳性假设,用一阶泰勒展开式对 SAR 图像的乘性噪声模型进行分析,实现对 SAR 图像真实信号的有效估计。Kuan 等^[27]则直接利用局部线性最小均方误差准则来设计 SAR 图像相干斑抑制方法。从形式上来看, Lee 滤波与 Kuan 滤波都采用了基于最小均方误差的估计方法,但 Lee 滤波比 Kuan 滤波在图像细节特征的保持上具有更好的性能^[28]。相比之下, Frost 滤波^[29]则通过分析 SAR 图像中像素之间的自相关特性,指出负指数函数可以较好地模拟 SAR 图像中像素间的自相关性,并采用负指数加权求平均的方法来估计 SAR 图像的真实值。

在上述滤波算法中没有充分考虑到 SAR 图像场景内容的特性,学者们提出了很多改进的滤波算法。一般来说,这些改进的滤波方法大体可以分为两类:第一类是基于 SAR 图像的统计分布特性,通过设计具有判别性的测度准则将整个 SAR 图像分为不同的区域,并针对不同区域采用特定的滤波估计方法^[30-35];第二类则

通过搜索满足局部平稳性假设的同质区域,利用传统的估计方法来抑制 SAR 图像的相干斑噪声^[36-46]。

(2) 基于马尔可夫随机场 (MRF) 模型的相干斑抑制。图像处理中,马尔可夫随机场模型是利用马尔可夫随机理论对图像内容信息(如边、线几何特征,纹理统计特性等)的一种描述方式。它通过将邻域内像素的状态标记转化为先验概率,利用贝叶斯理论实现图像的去噪、分割等操作,可以针对不同的图像区域建立不同的先验概率。因此,基于 MRF 的 SAR 相干斑抑制方法也受到了众多学者的关注。文献[47]利用 Gauss-MRF 模型对 SAR 图像的真实值进行建模,通过期望最大化方法估计参数实现 SAR 相干斑的抑制,有效保持了 SAR 图像所具有纹理特性。文献[48]则将 Gauss-MRF 模型推广到小波变换域中,利用高斯分布对小波系数建模实现对 SAR 相干斑的抑制。

(3) 基于变换域的相干斑抑制。由于具有多分辨和时频分析特性,小波变换已经成为分析非平稳信号的重要工具之一,并且在图像处理中得到了广泛的应用。同时,随着小波研究的发展,学者们已经研究出多种具有特殊特性的小波变换操作,如正交小波变换、平稳小波变换、非下采样小波变换、双树复小波变换等。在 SAR 相干斑抑制的研究中,小波变换的应用也很广泛。与此同时,随着小波基函数的深入研究,学者们发现小波基函数对“点”奇异性具有很好的逼近表示特性,而对具有“线”奇异性的结构则显得无能为力;并且,由于小波变换中子带方向的局限性,导致其不能很好地表示图像中所包含纹理边缘的方向信息。针对上述的问题,学者们经过不断的研究设计,提出多种后小波变换(如 Curvelet^[49]、Bandelet^[50]、Contourlet^[51]和 Directionlet^[52]等),并将其应用到了 SAR 图像的降斑方法中^[53-68]。

(4) 基于非局部的相干斑抑制。近年来,基于块相似性测度的非局部均值(non-local means, NLM)滤波^[69]方法在图像去噪中取得很好的结果,并且它的思想在图像分割、分类等方面得到广泛的应用。本质上来说,非局部滤波器是以图像内容的冗余性为前提假设,利用图像块间的结构相似性来实现估计样本的有效选择,从而实现图像内容的估计。近几年,非局部滤波的思想也被推广到了 SAR 图像的相干斑抑制中^[70-84]。

2) SAR 图像特征提取

SAR 图像中的典型特征包括峰值、纹理、区域、边缘和强度等。由于在纹理特征中既考虑了图像的像素特征,又考虑了图像像素的空间结构关系,使得 SAR 图像的纹理特征提取成为 SAR 图像处理的一个重要方向。

国内外许多学者对纹理特征提取方法展开研究并试图对其进行分类。其中,Tuceryan 等^[85]的分类方法被广为流传。他们将纹理特征提取方法主要分为三类,即基于统计的方法、基于模型的方法和基于信号处理的方法。