



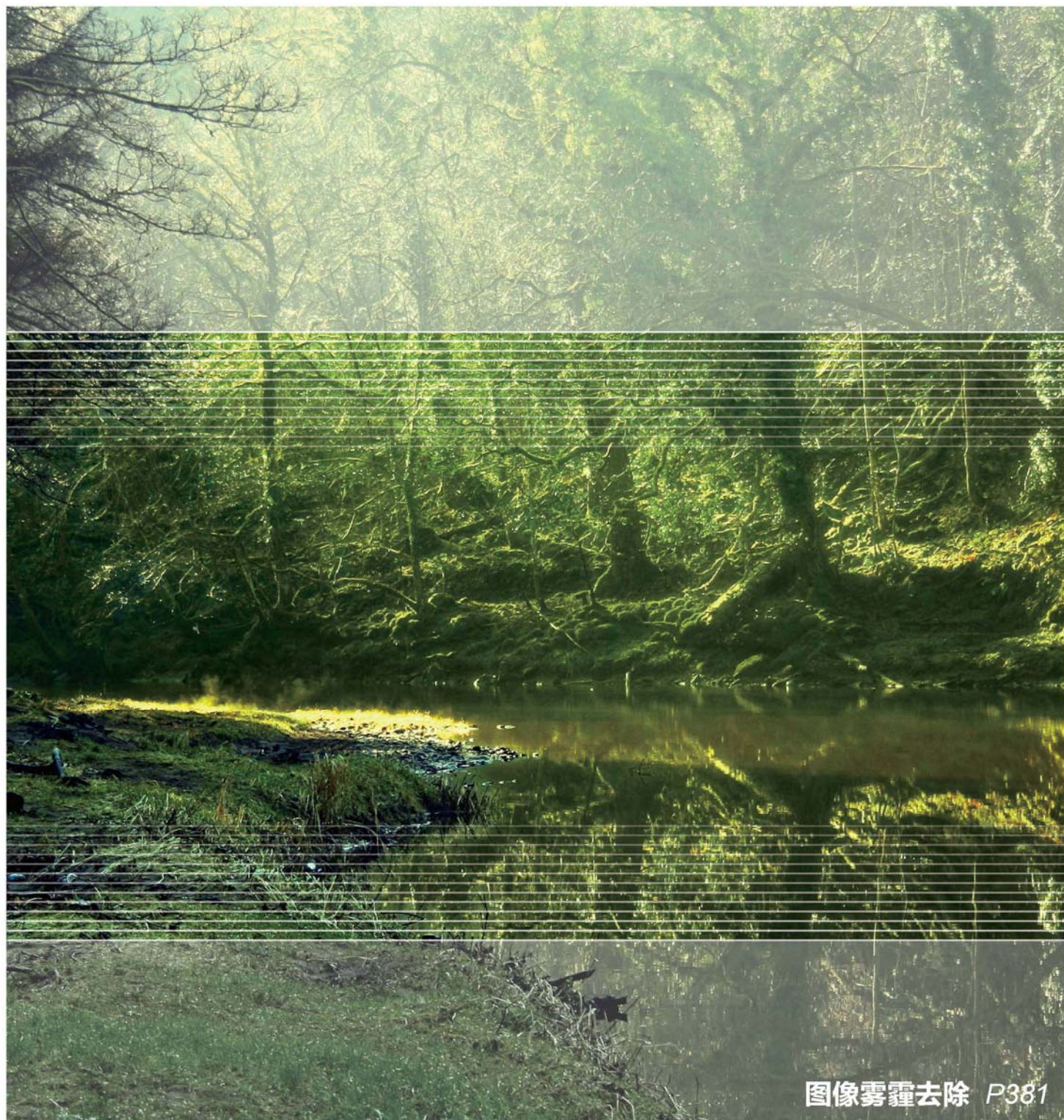
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
03
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像雾霾去除 P381



第19卷第3期（总第215期）

2014年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

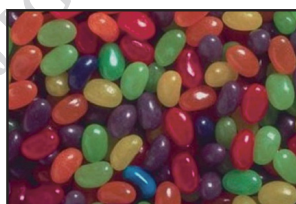
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



控制关键帧选择的H.264熵编码加密算法(第358页)



显著性检测指导的高光区域修复(第393页)



由灭点进行径向畸变的自动校正(第407页)

综述

图像场景分类中视觉词包模型方法综述

赵理君, 唐娉, 霍连志, 郑柯

0333

面向对象的高分辨率SAR图像处理及应用

张红, 叶曦, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先

0344

图像处理和编码

控制关键帧选择的H.264熵编码加密算法

张小红, 袁春经

0358

小波域视觉密码零水印算法

曲长波, 杨晓陶, 袁铎宁

0365

双重轮廓演化曲线的图像分割水平集模型

王相海, 李明

0373

暗原色先验单幅图像去雾改进算法

孙小明, 孙俊喜, 赵立荣, 曹永刚

0381

基于双边滤波的图像去雾

王一帆, 尹传历, 黄义明, 王洪玉

0386

显著性检测指导的高光区域修复

王祎璠, 姜志国, 史骏, 张浩鹏

0393

应用DCT块标准差的自适应隐写算法

凌轶华, 蔡晓霞, 陈红

0401

由灭点进行径向畸变的自动校正

刘丹, 刘学军, 王美珍

0407

图像分析和识别

黎曼流形上的保局投影在图像集匹配中的应用

曾青松

0414

结合全局和局部信息的“两阶段”活动轮廓模型

戚世乐, 王美清

0421

图像理解和计算机视觉

基于超像素的点追踪方法

罗会兰, 钟睿, 孔繁胜

0428

遥感图像处理

结合相位一致与全变差模型的高分辨率遥感图像边缘检测

黄秋燕, 肖鹏峰, 冯学智, 王珂

0439

第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

人眼视觉感知特性的非下采样Contourlet变换域多聚焦图像融合

杨勇, 郑文娟, 黄淑英, 方志军, 袁非牛

0447

面向手绘军标图形的旋转自由识别方法

吴玲达, 张友根, 邓维, 宋汉辰

0456

基于深度相机的手腕识别与掌心估测

姚争为, 潘志庚, 滕国栋

0463

多信息融合的快速车牌定位

王永杰, 裴明涛, 贾云得

0471

H.264/AVC中基于决策树的P帧快速模式选择

王萍, 张晓丹, 张磊

0476

互信息域中的无参考图像质量评价

董宏平, 刘利雄

0484

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



H.264 video entropy coding encryption by controlling key frames(P358)



Algorithm for highlight area inpainting guided by saliency detection(P393)



Automatic approach of lens radial distortion correction based on vanishing points(P407)

Review

- Review of the bag-of-visual-words models in image scene classification
Zhao Lijun, Tang Ping, Huo Lianzhi, Zheng Ke 0333
- The processing and applications of high resolution SAR images with object-based image analysis
Zhang Hong, Ye Xi, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian 0344

Image Processing and Coding

- H.264 video entropy coding encryption by controlling key frames
Zhang Xiaohong, Yuan Chunjing 0358
- Zero-watermarking visual cryptography algorithm in the wavelet domain
Qu Changbo, Yang Xiaotao, Yuan Duoning 0365
- Level set model for image segmentation based on dual contour evolutionary curve
Wang Xianghai, Li Ming 0373
- Improved algorithm for single image haze removing using dark channel prior
Sun Xiaoming, Sun Junxi, Zhao Lirong, Cao Yonggang 0381
- Image haze removal using a bilateral filter
Wang Yifan, Yin Chuanli, Huang Yiming, Wang Hongyu 0386
- Highlight area inpainting guided by saliency detection
Wang Yifan, Jiang Zhiguo, Shi Jun, Zhang Haopeng 0393
- Adaptive steganographic algorithm utilizing block standard deviation of DCT coefficients
Ling Yihua, Cai Xiaoxia, Chen Hong 0401
- Automatic approach of lens radial distortion correction based on vanishing points
Liu Dan, Liu Xuejun, Wang Meizhen 0407

Image Analysis and Recognition

- Locality preserving projection on Riemannian manifold for image set matching
Zeng Qingsong 0414
- "Two-stage" active contour model driven by local and global information
Qi Shile, Wang Meiqing 0421

Image Understanding and Computer Vision

- Method of point tracking based on superpixel
Luo Huilan, Zhong Rui, Kong Fansheng 0428

Remote Sensing Image Processing

- Edge detection from high resolution remote sensing image combining phase congruency with total variation model
Huang Qiuyan, Xiao Pengfeng, Feng Xuezhi, Wang Ke 0439

Special Issue on HHME 2013

- Multi-focus image fusion based on human visual perception characteristic in non-subsampled Contourlet transform domain
Yang Yong, Zheng Wenjuan, Huang Shuying, Fang Zhijun, Yuan Feiniu 0447
- Rotation free recognition of hand-drawn military marking symbols
Wu Lingda, Zhang Yougen, Deng Wei, Song Hanchen 0456
- The wrist recognition and the center of palm estimation based on depth camera
Yao Zhengwei, Pan Zhigeng, Teng Guodong 0463
- License plate detection based on multiple features
Wang Yongjie, Pei Mingtao, Jia Yunde 0471
- Fast intermode decision based on the decision tree for H.264/AVC P-frame encoding
Wang Ping, Zhang Xiaodan, Zhang Lei 0476
- No-reference image quality assessment in mutual information domain
Dong Hongping, Liu Lixiong 0484

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)03-0344-14

论文引用格式: 张红,叶曦,王超,张波,吴樊,汤益先. 面向对象的高分辨率 SAR 图像处理及应用[J]. 中国图象图形学报,2014,19(3):344-357. [DOI:10.11834/jig.20140302]

面向对象的高分辨率 SAR 图像处理及应用

张红¹, 叶曦^{1,2}, 王超¹, 张波¹, 吴樊¹, 汤益先¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室, 北京 100094;
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 目的 随着合成孔径雷达(SAR)技术和分辨率的不断提高,越来越多的空间细节呈现在高分辨率 SAR 影像上。与此同时,SAR 图像的数据量越来越大,人们对其应用需求也越来越高,这使得传统的基于像素的 SAR 处理方法不再适用。面向对象分析技术以像元集合——“对象”为分析单元,为高分辨率遥感图像处理提供了有效的思路,并日渐成为遥感、摄影测量以及 GIS 等领域所关注的对象和研究热点之一。目前该技术在光学遥感中已经得到了广泛的应用,但在 SAR 图像处理中的应用还处于起步阶段。**方法** 本文在简要阐述面向对象分析技术起源和特点的基础上,对 SAR 图像面向对象技术中常用的多尺度分割算法进行了分类分析,接着对面向对象技术在 SAR 遥感的应用方向进行全面介绍,最后对面向对象技术在 SAR 上的应用进行了总结与展望。**结果** 面向对象分析技术在 SAR 图像处理中的应用主要分为以下五个方面:地物分类、城市信息提取、变化检测、海洋应用、森林应用。**结论** 面向对象分析技术在解决高分辨率 SAR 图像尺度效应、抑制噪声等方面有着重要作用。目前,国外学者在基于 SAR 的面向对象分析技术研究上已经取得了一定的进展,但总体上该技术仍面临诸多问题,需要进一步的研究和完善。

关键词: 面向对象分析;多尺度分割;高分辨率;SAR 图像

The processing and applications of high resolution SAR images with object-based image analysis

Zhang Hong¹, Ye Xi^{1,2}, Wang Chao¹, Zhang Bo¹, Wu Fan¹, Tang Yixian¹

1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100094, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: **Objective** With the continuous development of technology and resolution on synthetic aperture radar (SAR), thinner spatial features can be observed from the high resolution of newly available SAR images. Due to the larger data volume and higher application requirements, the traditional pixel-based methods have many limitations in high-resolution SAR processing. Object-based image analysis (OBIA) provides a new idea for high resolution remote sensing image analysis based on the pixel set- “object”, which is becoming one of the hot spots of remote sensing, photogrammetry and GIS. Currently, the technique has been widely used in optical remote sensing. However, the application in SAR image processing is still in its early stage. The objective of this review paper is to provide a comprehensive overview and sound summary of all of the work undertaken. **Method** In this paper, after briefly introducing the origin and characteristic of object-based image analysis technique, the multi-scale segmentation methods commonly used in SAR image, are introduced. Then the

收稿日期:2013-03-20;修回日期:2013-09-04

基金项目:国家自然科学基金项目(40971198);中国科学院对地观测与数字地球科学中心主任科学基金项目

第一作者简介:张红(1972—),女,研究员,2002 年于中国科学院遥感应用研究所获地图学与地理信息专业博士学位,主要研究方向为极化 SAR,极化干涉 SAR。E-mail:hzhang@ceode.ac.cn

通信作者:王超, E-mail:cwang@ceode.ac.cn

applications of object-based image analysis in high resolution SAR images processing are presented. Finally, the conclusions are drawn and the outlook of the applications of object-oriented technology in SAR image is given. **Result** The object-based image analysis has been used in some SAR applications successfully, such as image classification, information extraction of urban area, change detection, the monitoring on ocean and forest. **Conclusion** The object-based image analysis plays an important role in solving the scale effect and speckle reduction of high-resolution SAR images. Recently, while some excellent studies have been performed in the applications of SAR Images with object-based image analysis, many challenges remain and much work still needs to be investigated.

Key words: object-based image analysis; muti-scale segmentation; high resolution; SAR image

0 引言

合成孔径雷达(SAR)经过近七十年发展,已广泛应用于测绘、地质、农业、林业和军事等领域,作为一种具有全天时、全天候成像能力的遥感技术手段,SAR在遥感领域具有重要的作用。近年来,随着高分辨率SAR卫星如 TerraSAR-X 和 Cosmo-SkyMed 的发射,所获取的对地观测图像分辨率提高到1—3m,这些可通过商业手段获取的高分辨率SAR图像开始广泛应用到地物提取和分类、城市应用、灾害监测等遥感应用中。与中低分辨率SAR图像相比,高分辨率SAR图像包含的地物类别更加丰富,地面目标的纹理、形状特征更加清晰,并且包含的可用信息也更加丰富,利用这类数据能够获得低分辨率SAR图像所不能反映的地面信息。但另一方面,高分辨率SAR图像细节特征更加复杂,已有的统计模型不再适用,且数据量大,这对传统的处理技术提出新的挑战。针对高分辨率SAR图像的分析技术成为当前需要迫切解决的问题。

近年来,面向对象分析技术(OBIA)^[1]成为提高高分辨率遥感图像分析效果的一种重要手段。OBIA以传统的分割、边缘检测、特征提取及分类技术为基础,将空间尺度的概念引入到多尺度地物分析中,推动了遥感图像处理技术和地理信息科学的发展。常见的OBIA技术的思路如表1所示。

表1 OBIA 技术思路
Table 1 Technical approaches of OBIA

技术步骤	作用
分割	产生相应尺度下的对象
特征分析	进行对象内部、对象之间、不同尺度对象之间的特征分析
分类规则	根据应用(如分类、变化检测等)的需要进行建模,对“对象”进行识别

从表1中可以看到,OBIA实际上是一个对信息进行整理、提取、分析的过程,它的每个步骤都是图像理解和分析中的经典问题,其中分割算法是OBIA技术中最为关键的技术,它不仅是尺度转换的工具,也是建立多尺度分析框架的根本。

近年来,国内外学者在OBIA技术的应用上开展了大量有意义的研究。作为一个新兴的技术,OBIA在光学上已经得到了广泛的应用^[1],并取得了显著的成果,且在遥感软件商业领域获得成功。目前已有不少遥感软件,比如:eCognition、Berkeley-Imgseg、ENVI Feature Extraction、Erdas Imagine、InfoPack,提供了OBIA的分析工具和模块^[2]。但是,关于OBIA在SAR图像上的应用研究起步较晚。2000年10月,德国DLR为研究TerraSAR-X卫星产品的处理技术,启动了ProSmart II项目,该项目的子项目OSCAR(object oriented segmentation and classification of advanced radar allow automated information extraction)利用eCognition软件对OBIA技术在SAR图像上的应用进行了研究。研究发现OBIA技术的优势在于,通过分割得到同质性区域“对象”,将对象视为一个整体能更好地抑制SAR图像相干斑噪声对图像信息的破坏,从而得到更为稳定的图像信息提取结果^[3]。此后,基于OBIA的SAR图像处理研究逐渐增多。

1 OBIA 的基本原理

与传统的图像分析方法相比,OBIA主要有两个特点:1)分析单元为分割区块,2)多尺度。根据人类视觉认知过程,识别感兴趣目标时,通常需要从局部细节到总体特征(形状、大小等)对这个目标进行不同层次的分析;并且在局部进行分析时,人眼一般是将目标分解成多个在视觉特征上具有同一性的单元。OBIA技术正是通过计算机技术实现人类这一认知过程,通过分割技术来提取同质性区域——

“对象”,建立针对图像上感兴趣目标的层次模型。OBIA 技术的产生主要得益于两个方面的研究:对象级分析技术和尺度效应的研究。

利用“对象”来进行图像分析的研究由来已久,早在 1976 年 Kettig^[4]就发现基于同质性区域进行图像分析的优越性,随后 Allen 等人^[5]、O' Neill 等人^[6]、Holling 等人^[7]对“对象”和实际地物之间的对应关系进行研究,研究发现将“对象”按照一定的规则组织起来可提高对“对象”本身属性的描述能力,产生更加合理的特征描述(如均值、方差等属性),并且更接近于实际的地物情况。对象级分析的出现,摆脱了基于像素分析中光谱统计分析的局限,引入了基于有意义的像素集合——对象的语义分析,将图像分析从基于数学与统计的方法,发展成为基于逻辑与启发的分析方法^[8]。

在 OBIA 中,分割是尺度转换的工具,这种转换能实现高分辨率和低分辨率转换。所谓“尺度”(scale)就是观察事物的层面,不同的尺度上对应的基本单元会呈现出不同的形式和特征。在一个多尺度体系下,尺度间的差别主要有两个方面:颗粒度(grain)和范围(extent)。尺度不同,分析结果也不相同,这种现象被称为尺度效应。尺度效应与地物在遥感图像中的波谱、辐射量、空间分辨率、时相等性质有关^[9]。其中空间分辨率的尺度效应是最为普遍和直接的。文献[10-13]对不同分辨率情况下遥感图像的地物分类效果进行分析,研究发现在不同的分辨率情况下,地物的识别效果不一样。高分辨率图像在细节上能更为详细的描述实际地物,为特征分析提供了更为详细丰富的初始数据,但是也突出了地物各个部分的差异,为地物的识别,尤其是面积较大的地块识别(如建筑群落,林区)带来了困难。传统的单一尺度分析思路受到图像固有分辨率的限制,无法很好地解决这一问题。

层次框架为这一问题的解决提供了一个较为合理的分析思路。文献[14-15]对该框架进行如下描述:对自然景观、过程进行理解、解译和预测的办法就是要在它们自身的固有尺度上(natural scale)对它们的自然模式(natural pattern)进行考察。为了将这一概念转化为具体的实现操作,基于层级理论(hierarchy theory)的概念性框架被提出,在该理论的基础上进行尺度的构建和实现以及尺度之间的转化。从概念上讲,基于等级的层次框架系统可以看做一个相互联系的多层网络,每一层对应一个明确

的空间(或时间)尺度,该尺度代表了空间变化过程中发生快速转化的一个阈值临界点,这些阈值点将整个尺度空间进行多层的划分,从而形成层次网络^[16]。从遥感分割角度来看,这些尺度阈值临界点代表的就是不同地物类型的观测尺度,在合适的观测尺度上地物特征较易表征。

OBIA 正是在这些研究的基础上被提出的,它建立在层次框架上,每个层次对应一个尺度,每个尺度上有着的一组在空间上互不重叠的对象,对象的产生、尺度的建立和转换都是通过图像分割来完成的,这种分割通常被称为“多尺度分割”。借助 OBIA 能简单模拟人眼认知过程,实现对感兴趣的目标进行多层次分析和精确分类识别。

2 SAR 图像的多尺度分割算法

在 OBIA 技术实现中,要获得一定尺度下的对象,就需要对图像进行分割处理。目前,SAR 分割算法都基于如下的认识:图像是由若干区域组成,区域间在拓扑上不重叠,区域内的一些参数(如 RCS 值)差异很小,这一认识被称为图块模型(cartoon model)^[17]。因此,分割算法的主要目的是对图像区域进行描述,通常有两种方法:1)从区域间在拓扑上不重叠入手,找到区域间的交界,即边缘检测算法;2)认为区域内部服从统一参数的分布模型。目前,第二种思路是 SAR 研究的主要思路,因为它更能直接地描述图块模型,并且能很容易地将分割与分类联系起来^[18]。

随着对 SAR 特性特征分析的不断深入,新的分割方法不断被提出^[19-22]。将适用于 SAR 图像的多尺度分割算法进行归纳总结,认为可分为基于启发条件的合并方法、基于聚类的分割方法、混合分割方法和其他分割方法等四大类,下面将分别阐述之。

2.1 基于启发条件的合并方法

由于随机游走的乘性斑点噪声影响,SAR 图像场景中原本同质性的地块可能呈现出较大差异性(如 RCS 值),在现有的分割算法中,基于区域的分割算法在鲁棒性和抗噪方面有着较好的效果,因此在遥感分析领域中得到广泛应用。区域分割算法通常由以下 3 个部分组成:1)分割顺序;2)区域异质性度量/合并判定;3)迭代终止条件。异质性度量是区域分割最为关键的部分。

Baatz^[23]和 Stewart^[24]等采用一种启发条件来引

导区域合并。该条件由两个竞争项组成,即灰度谱和形状项,形式为

$$f = wh_{\text{color}} + (1 - w)h_{\text{shape}} \quad (1)$$

式中, f 为异质度, w 是用户自定义的颜色权重(变化范围为 $0 \sim 1$), h_{color} 和 h_{shape} 分别为光谱异质性和形状异质性。在启发条件中, h_{color} 是合并的主导, h_{shape} 是区域形状的修正项,其目的是使得合并的结果更加符合人的判读经验——地块是由边缘光滑、无孔洞、外凸的区域组成。

在区域间差异度量上,Baatz 采用假设检验原理,即

$$h = n_1 h_1 + n_2 h_2 - (n_1 + n_2) h_m \quad (2)$$

式中, h 为整体异质性度量, h_1 、 h_2 分别为区域1和2的异质性度量, h_m 是区域合并后的异质性度量, n_1 和 n_2 为区域1和2的大小。

与 Baatz 不同,Stewart 假定 SAR 幅度图像符合 Gamma 分布,通过极大似然规则推导出 h_{color} 服从

$$h_{\text{color}} = a_0 + L \sum_{j=1}^r N_j \log(\bar{\mu}_j) \quad (3)$$

式中, a_0 为常数, L 为 SAR 图像视数, r 表示区域总数, N_j 和 $\bar{\mu}_j$ 分别表示区域 j 的大小和均值。

区域合并是一个由底向上的层级构建过程,Baatz 提出一种局部最优(local mutual best fitting)合并规则,建立了分形网络模型(FENA),实现过程如下:算法从一个单个像元开始,按照局部最优原则与其相邻像素进行合并,并生成图像对象。当一轮合并结束后,以上一轮生成的对象为基本单元,继续分别与它的邻居对象进行异质性计算与对象合并,这一过程一直持续到在用户指定的尺度上已经不能再进行任何对象的合并为止,最终生成该指定尺度下的分割结果。Stewart 则采用全局最优的思路,将启发条件视为能量方程,分割的过程就是求取能量最小的过程,并利用模拟退火的方法来求取最优能量。

目前,Baatz 的方法已被应用在商业软件 eCognition 中,成为使用最为广泛的面向对象分割方法,据 Blaschke 对 800 多篇 OBIA 在遥感应用方面的文章统计,共有约 50% ~ 55% 的研究中使用到了 eCognition 软件^[1]。经过大量的研究表明,该方法鲁棒性强,无论是 SAR 图像或光学图像、单波段图像或多波段图像,均能获得满意的分割结果。

2.2 基于聚类的分割方法

基于聚类的分割方法是把分割看成特征空间下的类别划分,将特征相近的分析单元划分到一起形

成区域。在 SAR 面向对象技术中最常用的基于聚类分割方法是均值漂移(Mean Shift)法^[25],2006 年 Zhang 等将谱聚类(spectral clustering)^[26]也引入到 SAR 图像的分割中。

Mean-Shift 算法是一个迭代算法,它先在特征空间中算出当前特征点的偏移均值(以该点为中心的核函数窗口内特征的加权平均),移动该点到其偏移均值处,然后以此为新的起始点,继续重复上述移动,直到满足一定的条件结束。Comaniciu 等人证明了 Mean-Shift 算法在一定条件下可以收敛到概率密度函数的模态点(极值点)处^[25]。偏移量计算公式为

$$M_h(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n w(\mathbf{x}_i) G \left\| \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}}{h} \right\|^2 \mathbf{x}_i}{\sum_{i=1}^n w(\mathbf{x}_i) G \left\| \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}}{h} \right\|^2} - \mathbf{x} \quad (4)$$

式中, h 为核函数的窗口大小, G 为核函数,通常采用单位均匀核函数、单位高斯核函数^[27], $w(\mathbf{x}_i) \geq 0$ 是一个赋给采样点 $\mathbf{x}_i$ 的权重, $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_s)$ 中 $\mathbf{x}_r$ 为特征向量, $\mathbf{x}_s$ 为 2 维空间向量。

用 Mean-Shift 算法进行图像分割的步骤如下:

1) 利用式(4)寻找图像中的每个像素点的模态点,并将此模态点的特征矢量赋给该像素点;2) 将图像中具有相同模态点的邻近像素点合并形成区域;3) 设定区域最小面积 MinSize,找到面积小于 MinSize 的区域,将区域与其邻域中特征最相近的区域进行合并,并更新合并区域的特征矢量。

Mean-Shift 分割具有很强的抗噪性,在图像特征丰富的情况下可获得较好的分割效果,在高光谱、极化 SAR 等多波段、多特征图像分割中有着很高的效率和精度。文献[28-29]借助 Mean-Shift 分割产生对象,并利用条件随机场进行场景推理,实现了建筑区域的提取。文献[30]以不同的窗口的均值滤波所的结果为输入,利用 Mean-Shift 分割后得到多尺度层级模型,探讨了不同层级对象之间的关系,并利用条件随机场建立能量方程,对极化 SAR 进行分类。文献[31]将 Pauli 分解后的 3 个散射分量作为 3 个波段用 Mean-Shift 进行分割,然后利用 H/α/A 分解作为特征进行分类。由于很多开源库和软件(如 OpenCV、EDISON 等)都有 Mean-Shift 的源码,未来该方法将在高分辨率 SAR 图像分割中得到越来越多的应用。

2006 年 Zhang 等人提出的谱聚类方法是基于

谱图划分理论^[26],利用全局数据相似矩阵的特征向量进行聚类,该方法保证中心点搜索能收敛到全局最优解。目前谱图划分准则有如下几种^[32]:

1) 最小切 (min-cut) 准则,将谱图划分成两个子图 (A, B) ,使得子图间的连接权值之和最小,其划分记为 $cut(A, B)$ 。

2) 率切 (ratio-cut) 准则,公式为

$$Rcut(A, B) = \frac{cut(A, B)}{|A|} + \frac{cut(A, B)}{|B|} \quad (5)$$

式中, $|A|$ 为子图 A 中顶点的数量。

3) 规范切 (normalized-cut) 准则,按照式 (6) 来获得子图划分。

$$Ncut(A, B) = \frac{cut(A, B)}{vol(A)} + \frac{cut(A, B)}{vol(B)} \quad (6)$$

式中, $vol(A)$ 为 A 到图中其他顶点的距离之和。

4) 最小最大切 (min-max-cut) 准则,按照式 (7) 来获得子图划分。

$$MMcut(A, B) = \frac{cut(A, B)}{cut(A, A)} + \frac{cut(A, B)}{cut(B, B)} \quad (7)$$

谱聚类方法虽然在 SAR 图像分类中已经得到了较为广泛的应用,但是在面向对象分析中的应用研究还相对较少。

2.3 混合分割

面向对象分析中的分割算法主要是针对地块区域的提取,其关键作用是为尺度转移提供手段,并产生多尺度模型。很多常用的分割算法,如分水岭、矩合并算法等,往往过分割严重,分割结果也过于破碎;并且这些分割算法的分割参数与尺度层级对应关系并不明显,通过分割参数变化无法获得明显的尺度差异。因此,很难单独利用这些算法来构建面向对象分析所需的多尺度层级模型。通过混合分割算法,在分割算法后进行进一步的合并运算,可以产生与实际地块更为契合的分割结果。

从目前的研究来看,混合分割算法是提高原有算法分割效果的有效方法之一。在 SAR 分割中有很多利用混合分割的研究文献,如分水岭和谱聚类混合^[32]、分水岭和区域生长混合^[33]、区域生长和合并混合^[34]。混合分割结构灵活、简单易行,在使用中修改起来很方便,而且在运算上有着相当可观的时间效率。作为一种简单有效的多尺度工具,混合分割已经在面向对象光学图像处理中得到了应用^[35-36],在 SAR 图像分割中也将逐渐成为一个重要的研究方向。

目前混合分割常用的方法是统计区域合并 (SRM)^[37] 算法和分水岭算法,因其较好的抗噪性,SRM 算法被 Li^[38] 应用到了极化 SAR 面向对象分类中。由于 SAR 图像斑噪的影响需要选择合适的 SRM 参数,使其能达到一个稳定的滤波效果,但由于 SRM 中分割参数的变化与分割区域的大小并不存在直接对应的关系,因此,很难通过分割参数的值来建立层次分明的多尺度模型。因此 Li 在文献 [39] 中利用混合分割的思想对 SRM 进行了改进,使它能产生多尺度的分割结果,并与 eCognition 分割算法进行比较,实验表明利用混合分割对 SRM 分割算法进行改进后,分割效果提升明显,并能满足多尺度的分割需求。

2.4 其他分割方法

现有 SAR 图像多尺度分割,除了前面所述,还有一类方法已经在商业软件 ENVI 的 OBIA 模块中得到了应用。与其他使用先验分布模型的 SAR 图像多尺度分割方法不同,它借助 Mumford-Shah 方程来描述图块模型。Mumford-Shah 理论是图像处理领域的重要理论,众所周知,与滤波性质相同,对于一个灰度图像,如果将其看做关于 $\{x, y, \text{灰度}\}$ 之间关系的函数,分割的结果就是用分段常量 (piecewise constant) 函数 (每个分割区域中所有像素的灰度值相同) 来对原图像函数进行拟合。用函数 $g(x, y)$ 表示图像,分割记为 $a_i(x, y) = C(x, y) \in R_i$, C 为常量, R_i 为 i 区域,根据 Mumford-Shah 方程,分割过程的目标函数描述为

$$E(f, \Gamma) = \sum_i \iint_{R_i} (g - a_i)^2 dx dy + \lambda |\Gamma| \quad (8)$$

式中, Γ 为区域长度, f 为 Γ 区域的图像, a_i 的极大似然估计为区域 R_i 的均值,等号右侧第一项为拟合误差项,显然该项为分割区域中像素灰度的方差,第二项为形状项,二者之间的关系可以用数学模型来精确描述^[40]。

Koepfler 等人认为 λ 为尺度参数^[41], Redding 等人提出了一个基于 λ 的多尺度分割算法^[42-43],并针对 SAR 图像开展实验,实验结果表明:1) 基于 Mumford-Shah 方程的分割方法,其结果要优于矩合并 (MUM)^[44] 和 White 提出的边缘检测 (RGW)^[45] 这些传统分割方法;2) 参数 λ 与分割结果中区域的尺寸、个数有着显著的关系,通过控制参数 λ 可以获取最优分割结果;3) 有着良好的运行速度,复杂度上限为 $O(N \log N)$, N 为区域个数。

3 OBIA 在 SAR 图像分析中的应用

商业高分辨率 SAR 卫星的发射,使得获取高分辨率 SAR 图像变得方便,关于高分辨率 SAR 图像信息提取和应用的研究越来越受到重视。作为一种有效的高分辨率图像的处理技术,OBIA 在 SAR 图像处理中的应用也开始得到越来越多的关注。Definiens 公司的 Benz 和 Baatz 等人开拓了 OBIA 在 SAR 图像上的应用研究,其开发的软件 eCognition 在 OBIA 应用领域中得到了极大的认可,成为研究 OBIA 的重要工具。目前参与到 SAR 图像的 OBIA 研究的主要机构(不完全统计)有:德国航空航天中心(Esch, Datcu 等人),Definiens 公司(Benz 和 Baatz 等人),香港大学城市规划设计学院(Qi Zhixin),意大利 Pavia 大学通信与遥感学院(Gamba 等人),芬兰大地测量研究所(Matikainen 等人),德国 Jena 大学对地观测中心(Thiel 等人)。其中德国航空航天中心在该领域的研究为世界前列。通过对 2001—2012 年 IEEE 收录的会议和国内外核心期刊论文共 59 篇进行统计分析(如图 1),发现 OBIA 在 SAR 图像处理中的应用主要分为以下 5 个方面:1)地物分类;2)城市信息提取;3)变化检测;4)海洋应用;5)森林应用等。

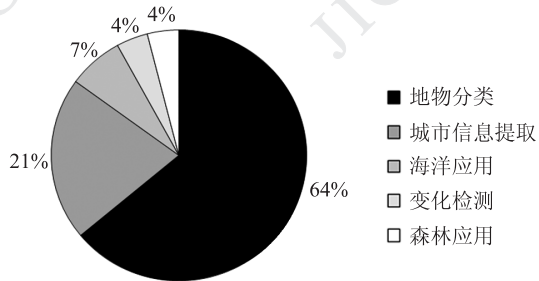


图 1 面向对象的 SAR 图像应用方向统计
Fig. 1 Statistic of OBIA application in SAR images

3.1 地物分类

地物分类是 SAR 图像 OBIA 技术的一个最为主要的应用。高分辨率单极化 SAR 图像分类是一个新的研究热点,但单极化 SAR 图像信息相对较少,单景图像往往不能为地物分类提供足够多的信息,因此常常需要结合其他数据集。目前单极化 SAR 图像分类常采用以下两种方式:1)基于同传感器的多时相 SAR 图像分类;2)基于多传感器数据的 SAR 图像分类。

城市地物分类常利用多时相信息,通过分析 SAR 图像相干性和地物不同时相的特征来进行分类,能达到很好的效果。但由于重复观测,所以不能保证同一个观测目标的后向散射值相同,此外也会受到配准误差和辐射校正误差的影响,像素级分类精度受到限制。而面向对象分类通过根据多时相信息将像素聚集成具有同质性的对象,分割利用对象作为特征的分析单元,通过利用“对象级”的统计特征能很好地克服这些上述问题。2008 年陈富龙等人^[46]利用北京地区的单时相 TerraSAR-X (3 m 分辨率)数据、多时相 ENVISAT ASAR 和 Radarsat-1 数据,以及苏州地区多时相 ALOS PALSAR 数据进行分类实验。实验利用 eCognition 软件中多尺度分割模块和模糊规则集(fuzzy rule set)分类方法,将地物分为 5 类,其中基于 TerraSAR-X 图像的总体分类精度 80%~85%,可满足实际应用需求。2007 年 Ban 和 Hu^[47]利用人工神经网络和面向对象方法对多时相 Radarsat-1 图像(5 景)进行分类,所分类别为 10 类,总体分类精度达到 89.7%。2010 年 Hu^[48]分析了最邻近分类、支持向量机和基于模糊规则集分类(rule-based classification)3 种分类方法在面向对象分类中的分类精度。实验数据为 5 景 Radarsat-1 及 3 景 Radarsat-2 数据,所分类别为 11 类,3 种分类方法的总体分类精度均在 80% 以上。实验结果表明在实验数据相同的情况下,基于模糊规则集分类的总体分类精度比其他两种分类方法要高 15%~20%。

借助于多传感器图像信息,能为地物分析提供更丰富可靠信息,研究数据类型一般可分为:1)不同类型的 SAR 传感器或不同波段 SAR 图像结合;2)SAR 图像与光学、红外传感器图像结合。

Evans 和 Costa^[49]利用 ALOS/PALSAR、RADARSAT-2 和 ENVISAT/ASAR 数据对巴西 Lower Nhecolandia 湿地进行分类, Mahmoud 和 Buchroithner^[50]利用 TerraSAR-X 和 ALOS/PALSAR 数据对德国萨克森州的 Pirna 地区进行地物分类,实验结果都表明利用多传感器数据进行地物分类的分类精度要优于单一传感器的分类精度。Riedel 等人^[51]针对不同分辨率(30 m、60 m、90 m、120 m、150 m)的 ASAR 数据基于 OBIA 技术的分类精度进行了研究,实验结果表明高分辨率(30 m、60 m)的图像分类精度(>81%)要高于中低分辨率的图像的分类精度(<80%)。

Ozdarici 和 Akyurek^[52] 利用 ASAR 图像和多时相 Kompsat-2 光学图像对农作物密度进行估计, OBIA 分析结果比像素级分析结果精度高 10%。Riedel 等人^[53] 利用 ASAR、ERS-2 和 Landsat-5 数据对农田植被进行分类, Huang 等人^[54] 使用 AirSAR、Landsat-5 和 AVIRIS 数据对美国黄石公园的地物进行分类, Ban 等人^[55] 利用 Radarsat 多时相 HH 波段数据和 Quickbird 多光谱数据进行分类, 上述研究人员开展的实验都表明融合 SAR 和光学数据的分类精度要高于单独使用 SAR 数据或光学数据。Grenier 等人^[56] 采用自顶向下 (top down) 的分类方法开展加拿大魁北克湿地 (wetland) 研究, 先在大尺度上初步确定可能存在感兴趣区域的地块, 然后在中尺度上确定湿地所存在的地块, 最后在精细尺度对湿地进行分类 (5 类)。实验基于 Radarsat-1 和夏季的 Landsat (ETM) 数据, 在分类中尝试利用了 OBIA 多尺度特性, 最终的分类结果能很好地应用于地图制图。

从目前的研究情况看, 利用单极化 SAR 图像分类时多时相特征依然是重要的分类依据, 此外可能还借助光学图像和多源传感器信息能为分类提供可靠的信息。在分类中利用 OBIA 能得到精度较高的结果, 并且分类结果由于“杂点”少并成斑块聚集, 因此能很好地用于地图制图中。但目前的研究主要针对单一尺度, OBIA 的多尺度特性研究还不足, 但可以预见 OBIA 在提高单极化 SAR 图像分类精度上还有很大潜力。

与单极化 SAR 数据相比, 极化 SAR 图像具有多个通道的观测数据, 可以为分析提供更丰富的原始信息。最简单的方法就是将极化数据作为多通道数据进行利用, 如 Matikainen 等人^[57] 选取 E-SAR 系统在 2000 和 2001 年所观测的两组数据, 每组包括 L 波段的全极化数据和 X 波段的 HH, VV 波段的数据, 利用“对象”在不同波段上的均值和方差对地物进行分类; Liu^[58] 选取 ENVISAT 的 HH, VV 两个波段的数据, 将所有波段输入 eCognition, 利用分割模块和模糊规则集分类, Biro 等人^[59] 利用 HH 和 VV 波段的 TerraSAR-X 数据对地物分类。这些研究所到的分类精度高于像素级分类精度, 但它们并没有充分利用到 SAR 的极化特征。

极化 SAR 可以通过极化分解来提取地物的散射特征, 这些特征在分类当中起着重要的作用。此外, 对于多时相的极化 SAR 图像, 还可以利用极化

干涉信息, 常用的极化干涉特征有: 最优复极化干涉系数 (complex polarimetric interferometric coherence)^[60], 相对最优相干谱 (relative optimal coherence spectrum)^[61]。

Benz 等人^[62] 利用 eCognition 分割模块将极化 SPAN 图像分割为 5 个尺度, 利用 H/ α /A 分解进行散射特征提取, 并利用 eCognition 中的模糊规则集分类。Corr 等人^[63] 利用极化干涉特征进行分类, 对 SAR 城市分类中有用的特征进行了初步探讨, 认为有效的特征为 H/ α /A、幅度、面积、各个通道的相干性。Li 等人^[38-39] 利用 H/ α /A 分解和支持向量机进行分类。Niu 和 Ban^[64] 利用 6 景 2008 年多伦多郊区的 RADARSAT-2 全极化图像的极化和多时相信息进行分类, 采用全部 6 景图像进行分类时分类精度最高 ($\kappa = 0.91$), 只采用 3 景图像时分类精度较低 ($\kappa = 0.86$)。

Qi 等人^[65] 提取了 SAR 图像面向对象分析中所有特征, 包括极化 SAR 特征、极化干涉系数、形状信息等, 每个对象的特征数达 1 897 个, 分别利用最邻近分类、支持向量机和决策树 (decision tree) 分类对 Radarsat-2 全极化数据进行分类, 实验结果表明: 1) OBIA 分类精度高于像素级分类, 总体分类精度相差约 17%; 2) 散射特征和干涉信息在分类中有着重要作用, OBIA 分类中不使用散射特征和干涉信息, 总体精度下降约 8.5%, 不使用散射特征下降约 3%, 不使用干涉信息下降约 2%; 3) 3 个分类器中, 支持向量机在处理高维特征时有着最为优异的表现。

3.2 城市信息提取

城市信息提取主要包括城市区域提取和建筑区分类。城市地区特征分析主要是基于 SAR 图像上城市地区强散射点较多, 区域中纹理较强的特点。当前, 星载高分辨率 SAR 图像能够清晰反映建筑区场景, 为精确评估区域中建筑的密度, 甚至直接提取建筑轮廓提供了可能。

城市地区分类前提是提取出相应的城市区域。由于高分辨率图像的城市区域包含地物类别极为复杂, 目前城市区域提取一直以中低分辨率的图像为主。但是作为城市区域分析的重要步骤, 研究对高分辨率图像城市区域提取是很有必要的。Esch 等人^[66] 利用对象属性 (面积, RCS, 纹理), 先找出城市区域的中心对象 (强散射强纹理对象), 并通过对象属性和与中心对象之间的空间关系找出次中心对象, 如此类推, 直到找到所有可能是城市区域的对

象,最终提取出城市区域。他们对 12 景不同城市的 TerraSAR-X 图像进行实验,总体精度为 90%,并与像素级方法进行了对比,实验结果表明面向对象方法精度略高于像素级方法。

Matikainen^[67]利用 SAR 图像进行面向对象地物分类,并针对城区分类精度进行了分析,研究发现城区分类依赖于建筑的强散射特性,强散射点对强度、相干性和纹理等对结果影响很大,而建筑物高度、密度又是影响强散射点的关键因素,因此城区对象的识别精度与对象内部建筑密度、高度相关。分类结果显示,建筑密度越大、高度越高对象识别精度越高。Gamba 等人^[68]利用局部自相关(local index spatial analysis)函数和斑噪差异(speckle divergence)来提取城市地区的纹理,并根据分割对象中纹理强度的不同判断建筑区的类别,研究中将建筑区分为 3 类:商业建筑区、密集建筑区(residential continuous dense urban fabric)和城市绿地建筑区,基于北京和上海地区的 ASAR 数据进行实验,总体分类精度均在 83% 以上。Chaabouni-Chouayakh 等人^[69]基于拉斯维加斯街区的 TerraSAR-X 图像开展针对城市地区的复杂场景的分类研究,通过对象内部统计特征和形状属性(如 RCS 均值、紧致度、面积、线密度)成功区分了商业建筑、居民建筑、街道和停车场,并能判定停车场是否停放有车辆。以上实验对 OBIA 在建筑区中的分类进行了尝试,针对 SAR 图像中不同建筑区地物的特点,提出了适用的特征分析方法,验证了 OBIA 对复杂城市市场景分析的有效性。

更精细的单个建筑轮廓提取也是高分辨率城市应用的一个重要方向。He 等人^[29]利用 OBIA 和条件随机场对 EMISAR 极化图像进行了建筑提取实验,Wegne 等人^[28]利用类似方法对 InSAR 数据进行实验。高分辨率图像建筑目标所处的场景复杂,存在大量干扰信息。但目前单个建筑物提取的研究还处在研究的初级极端,上述两个研究中对 OBIA 方法的利用并不充分,没有考虑对象形状特征、多尺度特征等,因此 OBIA 在这方面的应用还有待更深入研究。

3.3 变化检测

面向对象分析很早就被应用到 SAR 图像变化检测上。Caves 等人^[70]在 1994 年研究发现,分割能抑制 SAR 图像的相干斑噪,提高变化检测精度。

Dekker 等人^[71]利用 SAR 图像的面向对象变化检测方法(OBCD)进行欧洲天然气管道网络的安全监测。Inglada^[72]对变化检测中的尺度效应进行分析,发现融合不同尺度下的变化信息,比单一尺度下的变化检测具有更高的变化检测精度和鲁棒性。这些研究为面向对象技术在 SAR 变化检测上的应用提供了重要的思路。

Chen 等人^[73]对光学遥感中 OBCD 方法进行总结,将 OBCD 方法大致分为以下 4 类:1)基于图像对象的变化检测;2)基于面向对象分类的变化检测;3)基于对象多时相特征的变化检测;4)混合变化检测。在 SAR 变化检测中由于相关的研究较少,目前的研究方法主要集中在第 2)3)两类方法上。与光学图像相比,由于斑噪的影响 SAR 图像的 OBCD 可能需要采用更为复杂的算法,如马尔可夫随机场(MRF)^[74]、全局最大后验估计(MAP)^[75]、谱聚类集成^[76]等。

由于传感器入射角、观测条件等因素的影响,即使是同一个地区的观测图像也会呈现出较大的光谱差异和几何差异,因此对不同时相的图像进行分割,分割所产生的对象即使在实际中是同一个地物,在图像上往往不能在空间和光谱上严格对应。为了解决这一问题,需要采用多时相图像联合分割而摒弃不同时相单独分割的方法,这被称为基于对象多时相特征的变化检测。尤红建^[77]的研究就是基于这一思路,具体的实现方法见图 2。首先对不同时相的图像信息进行分割,得到多尺度的分割结果;然后以分割区域为单元计算不同时相信息之间的差异程度,得到差异图;这样每个尺度都会有一个差异图,然后对差异图进行融合得到最优差异图,对最优差异图进行阈值分割得到变化检测结果。Liu 等人^[78]将光学的面向对象变化检测思路引入到 SAR 图像中,先分割然后提取区域的变化矢量(change vector),最后通过分类算法将区域分为两类,即变化区域和未变化区域,并对 SAR 图像鱼池变化进行检测,获得了较好的效果。孙晓霞^[79]在其博士论文中对全极化 SAR 变化检测进行了研究,并提出了一种基于 OBIA 的全极化 SAR 变化检测方法,该方法通过将单时相图像的分割结果与另一时相图像套合,实现了不同时相分割对象的一一对应,通过分析相应对象之间相关系数、H/ α 极化分解特征的差异精确提取变化区域。

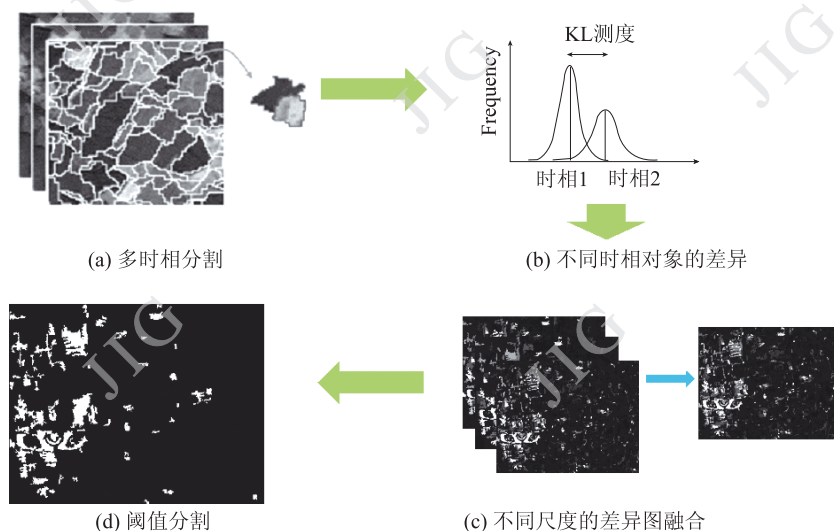


图2 面向对象的SAR图像变化检测

Fig. 2 Object based SAR change detection

上述的变化检测方法只能解决变或不变的问题,而对于从什么变成了什么这一问题则无能为力,这需要进行进一步分类操作。在这里把检测地物类别变化,通过分类的方式来进行不同时相间变化检测的OBCD方法称之为基于面向对象分类的变化检测。该方法其实是对不同时相的图像分别进行面向对象分类,然后比较不同时相图像中相应地物类别的变化判断实际变化结果。2012年Hölbling等人^[80]利用ERS-1/2、ENVISAT/ASAR和RADARSAT-1基于面向对象分类的变化检测对意大利奥斯塔(Aosta)河谷中的德拉萨克森山(Mont de la Saxe)滑坡类型进行了分类识别和监测,将分析场景划分为流体(flow-like)滑坡和其他类别滑坡,总体检测精度为44.8%~50.4%。2013年Arnesen等人^[81]利用2006—2010年间的12景ALOS ScanSAR数据对亚马逊流域库鲁阿伊湖(Curuai lake)季节性洪泛地区进行监测评估。他们先研究区域进行面向对象分类,分为非洪泛林区(non-flooded forest)、洪泛林区(flooded forest)和永久水域(open water)、土壤(soil)4类,然后对水位和洪水泛滥程度之间的关系进行了分析预测,其中泛洪范围提取的总体精度在低水位时为84%,高水位时为94%。

总的来说,面向对象SAR变化检测有着很大的优越性,既抑制SAR图像噪声,又解决了SAR变化检测的多尺度效应问题,与基于像素的变化检测方法相比,面向对象的变化检测法避免了变化检测结果中的椒盐现象,大大减少了后处理工作量;且提取的变化

图斑边界更为准确,接近人的目视解译效果,并且在克服配准误差,辐射校正误差方面有着优异表现。

3.4 海洋应用

海洋的监管对于环境及经济有着重要的意义,直接关系到公共安全与环境保护,因此海洋监测是SAR技术的重要应用之一。面向对象技术在陆地复杂环境下提取面目标(如城市区域、建筑)所获得的成功,使得研究者将其引入到海洋应用中。

Karathanassi等人^[82]对面向对象技术在溢油检测上的应用进行了研究,研究思路有两种:1)是将溢油检测看成是一个面向对象分类的过程,提取对象的统计特征进行分类,得到溢油区域;2)是利用面向对象的多尺度特性,在大尺度下分析对象内部统计分布特性判断是否包含溢油区域,在小尺度下通过对象亮度以及与周边对象的亮度差异精确提取溢油区域,该方法通过在12景ERS-1/2图像上实验得到99%以上的提取精度。Ma等人^[83]分析认为灰度共生矩阵中的均值、对比度、方差和熵这几种纹理能增强海上溢油区域的特征。Ozkan等人^[84]利用纹理信息和神经网络对ALOS/PALSAR和Radarsat-2进行溢油提取。

Zhang等人^[85]利用面向对象进行船舶检测研究,通过面向对象分割产生同质性区域,并对其杂波模型进行拟合,然后根据每个区域中的杂波模型对区域中的船舶进行检测。研究表明对不同区域进行自适应杂波模型拟合,比全图使用同一杂波模型要更为精确。他们利用长江入海口的ASAR图像进行

实验,可以看到对同质性区域进行分析可以很好地地区分陆地和水域。

早在1990年,Daida等人^[86]基于Seasat数据对Alaska地区陆缘海冰带进行了精确提取。Brigham等人^[87]利用Radarsat-1和OBIA技术将北冰洋海冰按照冰层厚度分类,并以此来判断海象栖息地。Mazur^[88]利用ENVISAT/ASAR和OBIA技术对波罗的海海冰进行提取,实验中水域和海冰能很好地区分开,并能够对平整冰面和破碎冰面进行区分。

相对于传统像素方法,OBIA可以适应复杂的海洋场景。它能够对海洋场景进行比较精确地划分,并引入上下层关系、形状等像素方法所不具备的特征,为海洋场景分析提供丰富的信息。

3.5 森林应用

森林资源是关系到人类社会稳定和可持续发展的重要保障。雷达观测具有大范围、动态、全天候监测的特点,为森林资源的监测提供了有效手段。植被地区的散射特征极为复杂,同类植被在SAR图像中呈现出很强的同质异谱现象,OBIA能很好地克服同质异谱现象,因此是SAR图像森林资源分析中一个极为有效的工具。

目前OBIA在SAR森林遥感中的应用,主要有森林区域提取以及森林植被分类两个方面。

Mitchell等人^[89]基于Definiens Developer v8.0软件利用PALSAR HH/HV数据对2007—2010年这4年间的Tasmania地区森林区域进行提取,对森林/非森林地区的总体分类精度达到了96.1%。凌飞龙等人^[90]基于冬季单时相ASAR数据的HH、HV极化比值和HV极化图像,提出了一种面向对象的森林/非森林分类方法,应用于中国东北森林/非森林制图,对森林/非森林地区的总体分类精度达到了83.7%。肖伟山等人^[91]基于面向对象分类方法,提出利用HH、HV和HV与HH比值进行红树林区域提取,他们对福建漳江口地区2007年多时相ALOS PALSAR多极化数据进行实验,森林区域提取精度均在99%以上。

Thiel等人^[92]将OBIA引入到森林区域分类中,并对1992—1998年的多时相L波段SAR图像森林区域进行分类(永久性植被、重栽植被、被伐植被),实现了森林地区植被变化检测,尤其对被伐植被区有着较高检测率,对5处不同森林地区实验,检测率达到90%。Flores De Santiago^[93]利用HH极化和HH/VV双极化PALSAR数据对Guinea地区的红树林进行提取并分为3类(红色树种、黑色树种、矮小

红色树种),森林区域提取精度为92.3%,分类精度为64.9%。Rahman等人^[94]利用全极化PALSAR数据中不同通道的强度特征和OBIA方法结合,对孟加拉西南部热带森林地区地物进行分类。此外,Kellndorfer和Ulaby^[95]对Raco地区ERS和JERS图像森林生物量反演进行了研究,研究证明,基于对象的分析值与标准值的有着很高相关性($r^2=0.89$)。

结合OBIA技术,SAR技术在森林遥感应用,如森林植被管理、森林地区变化检测等,将有着更为广阔的应用前景。

4 结 语

OBIA技术是遥感领域中的新兴技术,在解决尺度效应、抑制噪声等方面有着重要作用。随着高分辨率SAR数据不断增多,高分辨率SAR图像分析中的尺度效应问题越来越受到重视。研究OBIA在SAR上的应用,对发展和完善OBIA技术,推动SAR图像应用有着重要意义。

目前,学者将OBIA技术引入到了SAR遥感的几个主要应用领域,由于起步较晚,研究还不深入,大部分研究方法停留在直接移植光学图像分析中的研究方法,对SAR图像特点考虑还不够。通过对现有研究文献总结,OBIA在SAR上的应用还需要在以下几个方面进行进一步研究探讨:

1) SAR图像分割算法研究。分割是OBIA的核心,其分割效果直接关系到分析效果。如何将当前大量使用的eCognition软件应用到SAR图像分割中,依然没有达成共识。在针对SAR图像的分割上获得突破,无疑将极大推动OBIA技术在SAR上应用的发展。

2) SAR图像尺度效应的研究。SAR图像尺度效应的研究远远滞后于光学图像。不同的SAR数据在波谱、辐射量、空间分辨率、时相等方面的尺度问题研究还不全面,尺度效应对传统SAR图像处理方法制约的研究还不够深入。

3) 进一步探讨OBIA分析方法之间的优劣。作为一门技术,其应用方法多种多样,当前大量的研究文献只是将OBIA与传统像素级方法进行比较,目前还缺乏在某个应用方向上针对不同的OBIA方法进行比较和探讨,而这些比较和探讨无疑会促进OBIA技术的成熟完善。

4) 最优尺度的分析及不同尺度信息之间关系

的研究。对 SAR 图像 OBIA 的研究大部分都将各个尺度独立开来(如在分类中通常选取一个分类效果最好的尺度),很少探讨不同尺度信息之间的联系,对如何利用不同层次的信息进行场景推理缺乏研究。另外,对地物分类中各类地物最优分析尺度的分析,是进行多尺度分析的重要步骤。这方面的研究是理解运用 OBIA 多尺度特性的关键。

大量星载和机载高分率 SAR 数据的涌现,使得相关机理及应用的研究成为热点。如何借鉴吸收现有 OBIA 技术的成果和思想,根据 SAR 图像处理的问题和特点,建立并完善针对 SAR 图像处理的问题,是一项迫切而艰巨的任务。国外学者在基于 SAR 的 OBIA 技术研究上已经取得了一定的进展,但总体上还略显不足。国内的研究还处于起步阶段,与国外水平还存在一定差距,本文的目的就是通过回顾和总结面向对象的 SAR 图像处理及应用技术的现有研究成果,希望能为中国进一步开展相关研究提供帮助和启发。

参考文献(References)

- [1] Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(1): 2-16. [DOI:10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004]
- [2] Marco Neubert. Segmentation Evaluation [EB/OL]. 2012-01-01 [2013-07-15]. <http://www.ioer.de/segmentation-evaluation/results.html>.
- [3] Benz U, Baatz M, Schreier G. Oscar-object oriented segmentation and classification of advanced radar allow automated information extraction [C]//The 2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, Australia: IEEE Press, 2001:1913-1915. [DOI:10.1109/igarss.2001.977114]
- [4] Kettig R L, Landgrebe D A. Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1976, 14(1): 19-26. [DOI:10.1109/tge.1976.294460]
- [5] Allen T F H, Starr T B. Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1982.
- [6] O'Neill R V, DeAngelis D L, Waide J B, et al. A Hierarchical Concept of Ecosystems[M]. Princeton(NJ): Princeton University Press, 1986.
- [7] Holling C S. Cross-scale morphology, geometry, and dynamics of ecosystems[J]. Ecological Monographs, 1992, 62(4): 447-502. [DOI:10.2307/2937313]
- [8] Argialas D P, Harlow C A. Computational image interpretation models: an overview and a perspective[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56(6): 1449-1464.
- [9] Marceau D J, Hay G J. Scaling and modelling in forestry: applications in remote sensing and gis[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1999, 25(4): 342-346.
- [10] Moody A, Woodcock C. The influence of scale and the spatial characteristics of landscapes on land-cover mapping using remote sensing[J]. Landscape Ecology, 1995, 10(6): 363-379. [DOI:10.1007/bf00130213]
- [11] Benson B, MacKenzie M. Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters[J]. Landscape Ecology, 1995, 10(2): 113-120. [DOI:10.1007/bf00153828]
- [12] Parker K C, Bendix J. Landscape-scale geomorphic influences on vegetation patterns in four environments[J]. Physical Geography, 1996, 17(2): 113-141.
- [13] Pax-Lenney M, Woodcock C E. Monitoring agricultural lands in egypt with multitemporal landsat tm imagery: how many images are needed? [J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 59(3): 522-529. [DOI:10.1016/S0034-4257(96)00124-1]
- [14] Wessman C A. Spatial Scales and Global Change: Bridging the Gap From Plots to Gcm Grid Cells[M]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1992, 23: 175-200.
- [15] Levin S A. Towards a science of ecological management[J]. Conservation Ecology, 1999, 3(2): 6-9.
- [16] Wiens J A. Spatial scaling in ecology[J]. Functional Ecology, 1989, 3(4): 385-397.
- [17] Oliver C J, Quegan S. Understanding of Synthetic Aperture Radar Images[M]. New York, USA: SciTech Publishing, 2004.
- [18] Bombrun L, Beaulieu J M, Vasile G, et al. Hierarchical segmentation of polarimetric SAR images using heterogeneous clutter models [C]//The 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town, South Africa: IEEE Press, 2009: III-5-III-8. [DOI:10.1109/igarss.2009.5418271]
- [19] Bombrun L, Beaulieu J M. Segmentation of polarimetric SAR data based on the fisher distribution for texture modeling [C]//The IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, USA: IEEE Press, 2008: 350-353. [DOI:10.1109/igarss.2008.4780100]
- [20] Bombrun L, Beaulieu J M. Fisher distribution for texture modeling of polarimetric SAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(3): 512-516. [DOI:10.1109/lgrs.2008.923262]
- [21] Galland F, Nicolas J M, Sportouche H, et al. Unsupervised synthetic aperture radar image segmentation using fisher distributions [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2966-2972. [DOI:10.1109/tgrs.2009.2014364]
- [22] Troune N, Colin-Koeniguer E. Sirv based distance for polarimetric SAR image segmentation [C]//Proceedings of the 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Aachen, German: EU-SAR Press, 2010: 1-4.
- [23] Baatz M, Schäpe A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation [C]//Proceedings of the Angewandte Geographische Informationsver-

- beitung. Heidelberg, Wichmann-Verlag: AGIT Press, 2000; 12-23.
- [24] Stewart D, Blacknell D, Blake A, et al. Optimal approach to SAR image segmentation and classification[J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2000, 147(3): 134-142. [DOI: 10.1049/ip-rsn:20000400]
- [25] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619. [DOI: 10.1109/34.1000236]
- [26] Zhang X, Jiao L, Liu F, et al. Spectral clustering ensemble applied to SAR image segmentation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(7): 2126-2136. [DOI: 10.1109/tgrs.2008.918647]
- [27] Cheng Y. Mean shift, mode seeking, and clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(8): 790-799. [DOI: 10.1109/34.400568]
- [28] Wegne J D, Soergel U, Rosenhahn B. Segment-based building detection with conditional random fields [C]//Proceedings of the 2011 Joint Urban Remote Sensing Event. Munich, Germany: IEEE Press, 2011; 205-208. [DOI: 10.1109/jursee.2011.5764756]
- [29] He W, Jaeger M, Reigber A, et al. Building extraction from polarimetric SAR data using mean shift and conditional random fields [C]//Proceedings of the 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Friedrichshafen, Germany: EUSAR Press, 2008; 1-4.
- [30] Su X, Chu H, Qian F, et al. A supervised classification method based on conditional random fields with multiscale region connection calculus model for SAR image[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 497-501. [DOI: 10.1109/lgrs.2010.2089427]
- [31] Zou T Y, Yang W, Dai D X, et al. An unsupervised classification method of polsar Image[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(8): 910-914. [邹同元, 杨文, 代登信, 等. 一种新的极化 SAR 图像非监督分类算法研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(8): 910-914.]
- [32] Ma X L, Jiao L C. SAR image segmentation based on watershed and spectral clustering[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(6): 452-456. [马秀丽, 焦李成. 基于分水岭-谱聚类的 SAR 图像分割[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 452-456.]
- [33] Li W, Benie G B, He D C, et al. Watershed-based hierarchical SAR image segmentation[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(17): 3377-3390. [DOI: 10.1080/014311699211390]
- [34] Carvalho E A, Ushizima D M, Medeiros F N S, et al. SAR imagery segmentation by statistical region growing and hierarchical merging[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(5): 1365-1378. [DOI: 10.1016/j.dsp.2009.10.014]
- [35] Castilla G. Object-oriented analysis of remote sensing images for land cover mapping: conceptual foundations and a segmentation method to derive a baseline partition for classification [D]. Spain: Universidad Plitecnica De Madrid, 2003.
- [36] Castilla G, Lobo A, Solana J. Size-constrained region merging (SCRM): a new segmentation method to derive a baseline partition for object-oriented classification[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5239: 472-482. [DOI: 10.1117/12.511568]
- [37] Nock R, Nielsen F. Statistical region merging[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(11): 1452-1458. [DOI: 10.1109/TPAMI.2004.110]
- [38] Li H T, Gu H Y, Han Y S, et al. Object-oriented classification of polarimetric SAR imagery based on statistical region merging and support vector machine [C]//Proceedings of the International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications. Beijing, China: IEEE Press, 2008; 1-6 [DOI: 10.1109/eorsaa.2008.4620315]
- [39] Li H T, Gu H Y, Han Y S, et al. An efficient multiscale srmhr (statistical region merging and minimum heterogeneity rule) segmentation method for high-resolution remote sensing imagery[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2009, 2(2): 67-73. [DOI: 10.1109/jstars.2009.2022047]
- [40] Morel J M, Solimini S. Variational Methods in Image Segmentation[M]. Boston: Birkhauser, 1995.
- [41] Koepfler G, Lopez C, Morel J M. A multiscale algorithm for image segmentation by variational method[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1994, 31(1): 282-299. [DOI: 10.1137/0731015]
- [42] Redding N J, Crisp D J, Tang D. An efficient algorithm for mumford-shah segmentation and its application to SAR imagery [C]//Proceedings of the Digital Image Computing: Techniques & Applications. Perth, Australia: DICTA99, 1999; 35-41.
- [43] Robinson D J, Redding N J, Crisp D J. Implementation of a fast algorithm for segmenting SAR imagery [R]. Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2002.
- [44] Cook R, McConnell I, Oliver C J, et al. Mum (merge using moments) segmentation for SAR images [C]//Proceedings of the SPIE. Rome, Italy: SPIE Press, 1994; 92-103. [DOI: 10.1117/12.197529]
- [45] White R. Low level segmentation of noisy imagery [R]. United Kingdom: Royal signals and radar establishment malvern, 1986.
- [46] Chen F L, Wang C, Zhang H, et al. The analysis of single polarization synthetic aperture radar images for the application of land use and land cover change[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(3): 289-294. [陈富龙, 王超, 张红, 等. 单极化合成孔径雷达图像在土地利用分类中的潜力分析[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(3): 289-294.]
- [47] Ban Y, Hu H. Radarsat fine-beam SAR data for land-cover mapping and change detection in the rural-urban fringe of the greater toronto area [C]//Proceedings of the Urban Remote Sensing Joint Event. Paris, France: IEEE Press, 2007; 1-7. [DOI: 10.1109/urs.2007.371788]
- [48] Hu H. Urban land-cover mapping with high-resolution spaceborne

- SAR data [D]. Sweden: Geoinformatics KTH, 2010.
- [49] Evans T L, Costa M, Tøler K, et al. Using Alos/PalSAR and radarsat-2 to map land cover and seasonal inundation in the Brazilian pantanal[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(4): 560-575.
- [50] Mahmoud A, Buchroithner M. TerraSAR-X and ALOS PALSAR data application to landuse/landcover classification [C]//Proceedings of the Remote Sensing and Geoinformation not only for Scientific Cooperation. Prague, Czech: Curran Associates, Inc., 2011: 441-449.
- [51] Riedel T, Thiel C, Schmullius C. Multi-scale analysis of c-band SAR data for land use mapping issues [C]//Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSeL (European Association of Remote Sensing Laboratories and the) Special Interest Group on Land Use and Land Cover. Germany: ESA Press, 2006: 41-47.
- [52] Ozdarici Ok A, Akyurek Z. A segment-based approach to classify agricultural lands by using multi-temporal optical and microwave data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(22): 7184-7204. [DOI: 10.1080/01431161.2012.700423]
- [53] Riedel T, Thiel C, Schmullius C. Fusion of optical and SAR satellite data for improved land cover mapping in agricultural areas [C]//The Envisat Symposium. Switzerland: ESA Press, 2007: 23-27.
- [54] Huang S, Potter C, Crabtree R L, et al. Fusing optical and radar data to estimate sagebrush, herbaceous, and bare ground cover in yellowstone[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(2): 251-264. [DOI: 10.1016/j.rse.2009.09.013]
- [55] Ban Y, Hu H, Rangel I M. Fusion of quickbird ms and Radarsat SAR data for urban land-cover mapping: object-based and knowledge-based approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(6): 1391-1410. [DOI: 10.1080/01431160903475415]
- [56] Grenier M, Demers A M, Labrecque S, et al. An object-based method to map wetland using Radarsat-1 and Landsat ETM images; test case on two sites in Quebec, Canada[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2007, 33(S1): S28-S45.
- [57] Matikainen L, Karjalainen M, Kaartinen H. Rule-based interpretation of high-resolution SAR images for map updating[J]. The Photogrammetric Journal of Finland, 2004, 19(1): 47-62.
- [58] Liu X. Double polarization SAR image classification based on object-oriented technology [J]. Journal of Geographic Information System, 2010, 2(2): 113-119. [DOI: 10.4236/jgis.2010.22017]
- [59] Biro K, Pradhan B, Sulieman H, et al. Exploitation of TerraSAR-X data for land use/land cover analysis using object-oriented classification approach in the African Sahel area, Sudan[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2012, [DOI: 10.1007/s12524-012-0230-7]
- [60] Papathanassiou K P, Cloude S R. Single-baseline polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2352-2363. [DOI: 10.1109/36.964971]
- [61] Ferro-Famil L, Pottier E, Jong-Sen L. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the h/a/alpha-wishart classifier [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2332-2342. [DOI: 10.1109/36.964969]
- [62] Benz U, Pottier E. Object based analysis of polarimetric SAR data in alpha-entropy-anisotropy decomposition using fuzzy classification by ecognition [C]//The 2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, Australia: IEEE Press, 2001: 1427-1429. [DOI: 10.1109/igarss.2001.976867]
- [63] Corr D G, Walker A, Benz U, et al. Classification of urban SAR imagery using object oriented techniques [C]//The 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France: IEEE Press, 2003: 188-190. [DOI: 10.1109/igarss.2003.1293719]
- [64] Niu X, Ban Y. Multi-temporal radarsat-2 polarimetric SAR data for urban land-cover classification using an object-based support vector machine and a rule-based approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 34(1): 1-26. [DOI: 10.1080/01431161.2012.700133]
- [65] Qi Z, Yeh A G O, Li X, et al. A novel algorithm for land use and land cover classification using radarsat-2 polarimetric SAR data [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118: 21-39. [DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.001]
- [66] Esch T, Thiel M, Schenk A, et al. Delineation of urban footprints from TerraSAR-X data by analyzing speckle characteristics and intensity information[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 905-916. [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2037144]
- [67] Matikainen L. Object-Based Interpretation Methods for Mapping Built-up Areas[M]. Espoo: Publications of the Finnish Geodetic Institute, 147.
- [68] Gamba P, Aldighi M. SAR data classification of urban areas by means of segmentation techniques and ancillary optical data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(4): 1140-1148. [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2195774]
- [69] Chaabouni-Chouayakh H, Datcu M. Coarse-to-fine approach for urban area interpretation using terraSAR-x data [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(1): 78-82. [DOI: 10.1109/Lgrs.2009.2020070]
- [70] Caves R G, Quegan S. Segmentation based change detection in ERS-1 SAR images[C]//The 1994 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. California, USA: IEEE Press, 1994: 2149-2151. [DOI: 10.1109/igarss.1994.399677]
- [71] Dekker R J, Lingenfelder I, Brozek B. Object-based detection of hazards to the European gas pipeline network using SAR images [C]//Proceedings of the 5th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Ulm, Germany: EUSAR Press, 2004: 1035-1038.
- [72] Inglada J, Mercier G. A new statistical similarity measure for change detection in multitemporal SAR images and its extension to multiscale change analysis[J]. IEEE Transactions on Geosci-

- ence and Remote Sensing, 2007, 45 (5): 1432-1445. [DOI: 10.1109/tgrs.2007.893568]
- [73] Chen G, Hay G J, Carvalho L M T, et al. Object-based change detection [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(14): 4434-57. [DOI: 10.1080/01431161.2011.648285]
- [74] Smits P C, Dellepiane S G. Synthetic aperture radar image segmentation by a detail preserving markov random field approach [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 844-857. [DOI: 10.1109/36.602527]
- [75] Caves R, Shuan Q, White R. Quantitative comparison of the performance of SAR segmentation algorithms [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(11): 1534-1546. [DOI: 10.1109/83.725361]
- [76] Zhang X R, Jiao L C, Bo L F, et al. Spectral clustering ensemble applied to SAR image segmentation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(7): 2126-2136. [DOI: 10.1109/tgrs.2008.918647]
- [77] You H J. SAR change detection by multiscale segmentation and optimization [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(5): 531-534. [尤红建. 多尺度分割优化的 SAR 变化检测 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(5): 531-534.]
- [78] Liu K, Ai B, Wang S. Fish-pond change detection based on short term time series of radarsat images and object-oriented method [C]//Proceedings of the 3rd International Congress on the Image and Signal Processing. Yantai, China: IEEE Press, 2010: 2175-2179. [DOI: 10.1109/cisp.2010.5647643]
- [79] Sun X X. Land use and land cover change detection by multi-polarimetric SAR images [D]. Xuzhou: China Mining University, 2011. [孙晓霞. 基于多极化 SAR 图像的土地利用/土地覆盖变化检测方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.]
- [80] Hölbling D, Füreder P, Antolini F, et al. A semi-automated object-based approach for landslide detection validated by persistent scatterer interferometry measures and landslide inventories [J]. Remote Sensing, 2012, 4(12): 1310-1336. [DOI: 10.3390/rs4051310]
- [81] Arnesen A S, Silva T S F, Hess L L, et al. Monitoring flood extent in the lower amazon river floodplain using ALOS/PALSAR scan-SAR images [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 130(15): 51-61. [DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.035]
- [82] Karathanassi V, Topouzelis K, Pavlakis P, et al. An object-oriented methodology to detect oil spills [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(23): 5235-5251. [DOI: 10.1080/01431160600693575]
- [83] Ma L, Li Y, Zhang B, et al. Research on oil spill identification based on texture features—a case study of “hebei spirit” accident [C]//The IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town, South Africa: IEEE Press, 2009: III (377-380). [DOI: 10.1109/igarss.2009.5417781]
- [84] Ozkan C, Osmanoglu B, Sunar F, et al. Testing the generalization efficiency of oil slick classification algorithm using multiple SAR data for deepwater horizon oil spill [C]//Proceedings of the XXII International Society for Photogrammetry Remote Sensing Congress. Melbourne, Australia: ISPRS Press, 2012: 67-72.
- [85] Zhang F, Wu B. A scheme for ship detection in inhomogeneous regions based on segmentation of SAR images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(19): 5733-47. [DOI: 10.1080/01431160802089887]
- [86] Daida J, Samadani R, Vesecky J F. Object-oriented feature-tracking algorithms for SAR image of the marginal ice zone [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4): 573-589. [DOI: 10.1109/tgrs.1990.572956]
- [87] Brigham C, Kolkowitz I, Dolson M, et al. Object-oriented analysis of sea ice fragmentation using SAR imagery to determine pacific walrus habitat [C]//Proceedings of the ASPRS Tampa 2007 Conference. Tampa, Florida: ASPRS Press, 2007: 1-10.
- [88] Mazur A, Krężel A. Object-based classification of baltic sea ice extent and concentration in winter 2011 [J]. Journal of Earth Science and Engineering, 2012, 2: 488-495.
- [89] Mitchell A L, Tapley I, Milne A K, et al. Radar processing methodologies for the generation of forest information products [M]. Australia: International Forest Carbon Initiative Research Alliance, 2012.
- [90] Ling F L, Li Z Y, Chen E X, et al. Regional forest and non-forest mapping using Envisat ASAR data [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(5): 1100-1113. [凌飞龙, 李增元, 陈尔学, 等. Envisat ASAR 的区域森林—非森林制图 [J]. 遥感学报, 2012, 16(5): 1100-1113.]
- [91] Xiao W S, Wang X Q, Ling F L. The application of ALOS PAL-SAR data on mangrove forest extraction [J]. Remote sensing technology and Application, 2010, 25(1): 91-96. [肖伟山, 汪小钦, 凌飞龙. Alos palSAR 数据在漳江口红树林提取中的应用 [J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(1): 91-96.]
- [92] Thiel C, Weise C, Riedel T, et al. Object based classification of L-band SAR data for the delineation of forest cover maps and the detection of deforestation [C]//Proceedings of the Conference Proc OBIA. Salzburg, Austria: Salzburg University, 2006: 1-6.
- [93] Flores De Santiago F, Kovacs J M, Lafrance P. An object-oriented classification method for mapping mangroves in guinea, west africa, using multipolarized ALOS PALSAR L-band data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(2): 563-586. [DOI: 10.1080/01431161.2012.715773]
- [94] Rahman M M, Sumantyo J T S. ALOS PALSAR data for tropical forest interpretation and mapping [C]//Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing: ISPRS Press, 2008: 185-189.
- [95] Kellndorfer J M, Ulaby F T. Forest biomass inversion from SAR using object oriented image analysis techniques [C]//The 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, France: IGARSS2003, 2003: 3465-3467. [DOI: 10.1109/igarss.2003.1294823]