

SAR 图像中目标的检测和识别研究进展

杨 桃¹, 陈克雄¹, 周脉鱼¹, 徐忠林¹, 王宗明²

(1. 空军航空大学特种专业系, 长春 130022; 2. 中科院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要 SAR 图像以其独有的全天时、全天候观测能力、形态探测能力和对地表的穿透性, 在地学应用中比光学遥感更具优势. 本文结合 SAR 图像检测和识别应用技术的发展过程, 综述了 SAR 图像在噪声抑制、线状特征和纹理特征提取、图像分割和目标检测等方面的研究进展; 介绍 SAR 图像检测和识别的最新研究情况; 最后分析当今国内外 SAR 图像检测和识别所面临的问题, 并对未来发展进行展望.

关键词 合成孔径雷达图像, 图像去噪, 舰船检测, 图像分割, 目标识别

中图分类号 P627 文献标识码 A 文章编号 1004-2903(2007)02-0617-05

Study evolution of detection and recognition on target in SAR image

YANG Guang¹, CHEN Ke-xiong¹, ZHOU Mai-yu¹, XU Zhong-lin¹, WANG Zong-ming²

(1. The Special Profession Department, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences (CAS), Changchun 130012, China)

Abstract SAR remote-sensing instruments with the capabilities of all weather and all day/night, penetration, and terrain detection, provide unique geological environmental information, quite different from, yet complementary to passive systems such as visible remote sensing. Automatic Target Recognition in SAR imagery becomes popular in recent years. The typical Automatic Target Recognition system consists of three stages: detection, discrimination and classification. Detection, whose role is to find regions in SAR imagery that contains potential targets, will inevitably produce false alarms. Combining detection and identify of SAR imagery this paper summarized study evolution of SAR image on demising, characters of line and texture extraction, image segmentation and target detection; Introduced up to date study progress; ultimately analyzed program about detection and identify of SAR image in inland and overseas thing and prospected development in future.

Keywords SAR, image denoising, marine detection, image segmentation, target recognition

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar)的概念是 1951 年美国的 Wiley C. 第一个提出的. SAR 图像具有全天候、全天时和对地表有一定穿透能力等特点, 与可见光、红外等其他类型遥感影像相比较具有得天独厚的优势, 近几年来 SAR 图像已经成为我国民用遥感等领域研究的热点^[1,2]. 因此对 SAR 图像的处理和识别研究成了信息工程领域研究的一个热点问题. 美国是最早从事 SAR 图像研究的国家, 在 20 世纪 50 年代就已开始对 SAR 成像技

术的研究. 80 年代, 航天飞机雷达的成功发射震撼了科技界; 进入 90 年代, 世界范围内形成雷达遥感的高潮, 前苏联、欧洲空间局、加拿大和日本陆续发射了自己的雷达卫星^[1,4]. 我国对 SAR 图像的研究起步较晚. 1979 年进行了机载 SAR 遥感试验, 第一次获取了雷达图像, 但质量不高. 近 20 多年来, 我国对 SAR 成像技术的研究也取得了重大进展.

SAR 图像的特征决定其应用的广泛性, 同时也增加了对 SAR 图像处理与识别的复杂性. 它不像光学图像那样清晰直观、边缘易于检测. SAR 图像不仅具有光学图像的几何特征, 同时还具有重要的电

收稿日期 2006-07-10; 修回日期 2006-08-20.

基金项目 国家自然科学基金(40401003)和中科院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-356)联合资助.

作者简介 杨桃, 男, 1975 年生, 黑龙江齐齐哈尔人, 毕业于东北地理与农业生态研究所, 博士, 讲师, 主要从事遥感影像自动解译, GIS 应用等研究. (E-mail: yg2599@sina.com)

磁特征.由单幅 SAR 图像不仅可以提取目标的几何特征,而且可以提取目标的三维高程信息和运动速度信息.这些信息的提取不仅需要较系统的数学知识,而且需要较系统的电磁理论知识,从而增大了图像理解的难度^[3].对 SAR 图像的识别研究主要集中在自动检测和自动识别的方法研究,下面就 SAR 图像中目标的预处理、自动检测和识别方面的研究进展和发展趋势作以综述.

1 SAR 图像自动检测和识别研究主要进展

1.1 SAR 图像噪声抑制等预处理方面的研究

在 SAR 图像的特征提取与目标识别方面,国内外学者已做了很多工作,早期工作主要集中在噪声抑制等预处理方面.成像雷达获得的 SAR 图像是地物对雷达波散射特性的反映.由于成像雷达发射的是纯相干波,这种信号照射目标时,目标的随机散射信号与发射信号的干涉产生斑点噪声,并使图像的像素灰度值剧烈变化,即在均匀的目标表面,有的像素呈亮点,有的呈暗点,模糊了图像的精微结构,使图像解释能力降低^[4].因此,在对 SAR 图像进行自动检测之前必须进行去噪处理.去除斑点噪声采用空域滤波算法,如均值滤波、中值滤波、Frost 滤波、Lee 滤波、GammaMAP 滤波等方法.刘永昌、张平、严卫东在一般方法基础上提出了小波包域值法去除合成孔径雷达图像斑点噪声方法^[5];屈晓荣提出了基于自适应加权中值滤波前处理的多尺度非线性阈值斑点噪声消除算法和利用 Harr 小波基抑制条纹干扰的算法,取得了很有意义的研究成果^[6];T. R. Crimmins 提出几何斑点滤波器^[7],J. S. Lee 提出局部滤波方法^[8];Zhaohui Zeng、S. fukuda、E. P. Simoncelli 等利用小波变换实现 SAR 图像去噪^[9].万朋、王建国等人提出一种抑制 SAR 图像相干斑噪声和提取弱反射地物边缘方法,采用最小错误准则计算 SAR 图像的理论分割阈值,通过逐次迭代得到其合理大小,利用形态算子作用于分割图像获得其边缘^[10].总之,在 SAR 图像的预处理方面国内外研究取得了较大进展,图像去噪水平有了很大提高,对于进一步实现目标的识别奠定了基础.

1.2 SAR 图像中线特征和纹理特征的提取研究方面的研究

利用 SAR 图像的识别特征来分析和提取目标是 SAR 图像中目标检测和识别的重要方法,而在 SAR 图像的特征提取中应用纹理特征和线特征等特征的研究较多.J. Chanussot 提出多源数据模糊

融合的边缘提取算子^[11];法国巴黎高等电信工程学院的 TupinF 等人提出了适合贝叶斯框架下检测线性特征的算法^[10,11];A. Lopes, E. Nezry, R. Touz 等人研究提出适用于边界、线、点提取的结构比率算子^[11].在具体应用中, JinFei Wang 研究通过 Hough 变换实现线特征的自动检测^[9];为精确提取 Radar-sat SAR 图像上水稻田边界信息,遥感所的邵芸等人开发了一个二维八方向滤波算法并设计了优化的边界提取方案,将其应用于“SAR 技术用于南方水稻长势监测与土地利用调查应用示范”研究中,在应用中可降低水稻种植面积计算的误差,进一步提高水稻估产的精度^[12].李岩、彭少麟、廖其芳等人研究采用加拿大雷达卫星(RADARSAT)窄波扫描模式(SNB)数据,建立了基于 RADARSATSNBSAR 的雷达遥感时序信息水稻估产模型,以广东省为例进行了大范围水稻估产^[13];法国的 Roger Fjortoft, Armand Lopes 和 Philippe Marthon 提出了 SAR 图像中最佳的多边缘检测算法,他们提出针对 SAR 图像的边缘检测器,这种检测器在随机多边缘模型下以最小均方误差判断是最优的^[14~16];国防科大的杨龙、周智敏、黄海风等人在线条目标提取方面采用两步检测算子来检测边缘点,然后使用从相位编组思想演化而来的方向编组法形成直线特征方法^[17];王程、王润生等人在直线提取方面针对 SAR 图像中相干斑的统计特性,设计了对应的直线提取算法,首先组合运用 Canny 算子和 Ratio 算子得到边缘点及其边缘方向,然后根据边缘方向一致性原理得到初始直线图,最后通过高层编组方法连接由于噪声引起的直线缺损^[18];宋建社、袁礼海、陈智江等在目标边缘提取的基础上,针对线性目标设计了目标重心提取算法,对环状目标设计了轮廓线追踪算法,并给出了对目标范围、中心点标识、目标横向、纵向“直径”等计算方法^[4];万朋、王建国、赵志钦、黄顺吉等提出了一种新的合成孔径雷达图像目标检测和识别方法,该方法根据 SAR 图像统计分布特性,结合恒虚警检测算法和小波变换提取感兴趣的 SAR 图像目标特征^[19];解放军信息工程大学的朱彩英等对从合成孔径雷达图像上提取类似于居民地复杂结构的目标物进行了探索研究,提出了一种新的提取雷达图像上居民地的方法,该方法在共生矩阵纹理分析的基础上,选取 3 个合适的特征分量合成彩色纹理特征图像,再通过 HIS 变换获得亮度分量,使用亮度阈值分割图像来提取出居民地^[20];韩萍等研究了一种基于 KPCA(Kernel Principal Component A-

analysis)和 SVM(Support Vector Machine)的合成孔径雷达目标特征提取与识别方法^[21];电子科技大学的王运锋等提出了一种用最小二乘法拟合空间曲面的分维特征提取算法,并运用该算法对 SAR 图像进行了特征提取^[22]。

在道路和桥梁提取方面,国内外学者都作了大量的工作并取得了较好的提取效果。Florence Tupin, Henri Maitre 等人研究 SAR 图像中公路网的提取,他们首先利用局部线特征检测算子提取基本线段,然后通过 MRF 完成线段的组织^[22,23];鄯苏丹等提出一种两步算法用于从合成孔径雷达(SAR)图像中无监督地提取线性特征,特别是提取公路网^[24];汤志伟等在识别 SAR 图像中桥梁目标时,先对 SAR 图像进行预处理,排除明显的非目标区,增强对目标的识别效果,然后在此基础上进行针对桥梁形状目标的处理,包括方向比值法和双边参数法^[23]。由于在高分辨率 SAR 图像中,道路在空间结构上表现为一细长的且宽度基本恒定不变的均匀区域。所以中南大学的肖志强、鲍光淑提出一种从高分辨率 SAR 图像中提取城市道路网络的算法。具体过程是利用模糊 C 均值聚类方法对高分辨率 SAR 图像进行聚类分析,将道路类像素从原始图像中分离出来,然后对聚类结果进行细化,同时利用跟踪算子消除短线段,以提取道路中心线二值图的像素值作为图像能量,应用 Snakes 模型检测道路网络。通过实际 SAR 图像验证,该算法可以准确提取复杂的城市道路网络^[25]。

1.3 SAR 图像在图像分割和目标检测方面的研究

图像分割是把图像中的目标分成许多感兴趣的区域与图像中的物体目标相对应,通过获得目标图像的灰度范围可检测出目标图像。对于 SAR 图像分割,R. Cook 提出基于矩特征的区域融合分割方法;Y. Dong, B. C. Forster, P. A. Kelly 等利用 MRF 完成雷达图像的分割^[26];C. Lemarchal 研究了基于形态学的 SAR 图像分割^[26~27];R. W. Ives 提出 SAR 图像的像素分割方法^[27];H. Derin 提出基于复信号的 SAR 分割方法等^[28];国防科技大学付琨,匡纲要,郁文贤等给出一种关于高分辨率、单极化 SAR 图像目标分类的完整算法^[29]。

目前 SAR 图像目标的检测与识别成为一个受到高度关注的领域。早期由于图像分辨率不高,工作主要集中在目标检测方面。由于船舶通常存在大量的角反射,船舶目标和海面有较强的对比度。阈值分割直接以图像点的亮度为特征划分目标,所以在对

SAR 图像处理时应用广泛,而且简单快捷。SAR 图像中检测舰船目标是有两种方法:一种是直接检测船舶目标;另一种思路是先检测尾迹,再在尾迹附近寻找舰船目标。这两种方法适用于不同情况,在背景噪声较强、而舰船目标比较小的情况下,由于尾迹线是很长的线目标,特征比较明显,先检测尾迹在检测船舶目标可以减少虚警。而直接检测船舶目标的优点在于可以检测静止船舶。T. Maria, J. K. Tunaley 等研究通过 Radon 变换检测航迹^[24,30];V. A. Nastassopoulos 在 Weibull 分布的基础上提出最优 CFAR 检测算子^[30];W. W. Irving 提出多分辨率目标检测^[31];Leonid I. Perlovsky 研究了基于神经网络的目标检测方法^[24];L. Benyoussef 利用匹配滤波器实现目标检测等^[32]。在应用方面挪威国防研究中心从 1985 年就开始为欧洲航天局从事 SAR 图像中舰船和航迹的检测方面的研究,1992 年他们就已完成使用 ERS-1 SAR 数据的舰船和航迹的检测系统,可对特定海域、海湾港口进行监测。随着 SAR 图像分辨率的不断提高,使得利用 SAR 图像实现目标识别成为可能。

国内学者在舰船检测和航迹识别方面也作了大量工作,已有的对船舶目标识别的研究工作许多是针对分辨率比较低的 SAR 图像。在这些较低分辨率的 SAR 图像中,图像分辨率与船舶的尺寸基本相当,船舶目标可以近似成一个点或少数几个点组成的强目标,相对于海面有比较高的对比度。王世庆提出了一种由 Radon 变换与形态学图像处理技术检测船行尾迹的算法 SWDRM(Ship Wake Detection Algorithm based on Radon transformation and Morphologic image processing technology)^[33];周红建提出应用非线性拉伸的方法增强舰船目标,运用形态学滤波的方法消除斑点,通过取阈值方法检测出船目标后,统计船目标的长度以及中心位置等重要信息,检测出船目标后,使用曲线扫描的方法来进行进一步检测航迹特征^[34]。随着 SAR 技术的成熟和高分辨率 SAR 图像的出现,对船舶目标的检测也不再只用点目标检测的方法,而是通过船舶目标的小区域特征分析和提取船舶。如种劲松、朱敏慧针对高分辨率 SAR 图像的舰船目标检测算法,利用 KSW 双阈值分割技术,其效果比传统检测方法好,有利于进一步的目标分类和识别^[35,36];汤子跃、朱敏慧等提出了一种基于邻近像素求和的 SAR 海面图像舰船尾迹的恒虚警率检测方法^[37];邹焕新等提出了一种结合小波多分辨率分析、自适应阈值选择、边缘检

测算子和 Radon 变换进行斑点噪声抑制和航迹检测的算法^[38];罗强、罗莉等依据 SAR 图像海洋背景和舰船目标特点分析,提出了基于小波交换的卫星 SAR 海洋图像船舶目标检测方法^[39].在 SAR 图像上,舰船目标清晰可见,进行舰船及其尾迹检测具有广阔的应用前景.随着 SAR 技术向高分辨率、多极化等方式发展,利用 SAR 图像进行舰船及其尾迹检测将具有更大的发展空间.

1.4 SAR 图像最新发展研究

美国国防部高级研究计划局(DARPA)提出了运动、静止目标获取与识别(MSTAR)计划,目的是发展下一代 SAR 自动目标识别系统.该计划提供一些军事目标的高分辨率航空 SAR 图像作为研究对象,在分工合作的条件下进行,很多大学和研究机构参与研究工作,目前已经取得重要研究成果^[24,30].美国 MIT 的 Lincoln 实验室在 SAR 目标的检测和识别中占有重要的地位,他们提供的 ADTS(Advanced Detection Technology Sensor)高分辨率机载 SAR 目标数据用于自动目标检测和识别研究.利用这些数据,Quoc H. Pham 和 Chanin Nilubol 基于隐 Markov 模型完成目标识别;Theera-Umpon 提出利用形态学权值共享神经网络来解决 SAR 图像中军用车辆的检测和识别问题^[24,30].

SAR ATR 是自动或半自动 SAR 图像解译研究的一个重要方面,他具有重要的军事意义.因此,目前世界各国都非常重视这方面的研究,典型的包括:美、俄、法、德、加、日、瑞典、意大利、南非等国,其中美国的处于国际领先地位^[40].美国的 SAR ATR 研究主要有林肯实验室基于模板的 SAR ATR 系统和 MSTAR 基于模型的 SAR ATR 系统.

在对 SAR 图像中机场目标研究方面国内所做的研究还很少,桑农、鲁鹏、张天序等针对低信噪比雷达图像的特点,在 Radon 变换的基础上利用机场目标和背景的雷达成像知识对 Radon 变换的结果进行后处理,以便可靠地提取雷达图像中的机场目标^[41].而针对 SAR 图像中飞机目标识别的研究几乎没有相关报道.

2 SAR 图像自动检测和识别研究中存在的主要问题 and 展望

2.1 SAR 图像最新发展研究

在 SAR 图像の利用方面,国外已从提出特征结构向自动图像理解与目标识别方向发展,而国内还处于目标提取和检测阶段,对目标的自动识别研究

成果较少.

SAR ATR 最难实现的地方在于很难把 SAR ATR 的实验结果推广到一般的实际情况.虽然,可以从一个特定图像集得到随机样本,但由于原图像集本身并不是实际问题的随机样本,因此,该样本本质上也不是随机的^[40,42].国内外的研究还只局限于对某种算法对某一特定 SAR 图像的去噪或目标检测,而识别的研究还处于发展阶段.分析 SAR 图像特点与地理空间的相互影射关系,解决虚警问题,提高 SAR 图像分辨率是实现目标自动识别所急需解决的问题.

目前,SAR 图像的分类发展有三个方向:第一,利用雷达遥感数据中提取的新信息和新特征;第二,应用新理论,如基于共生矩阵、小波理论、分形理论的雷达遥感图像纹理信息提取和基于模糊理论混合像元分解等;第三,设计新算法,如何实现这一目标,途径千差万别,但一般从改进经典算法和构造新算法两个方向入手.

3 结 论

由于 SAR 系统既有多波段、多极化、多视角、多传感器和串接飞行服务方式,又具有穿透力强、分辨率高、高灵敏度等特点,能够全天时、全天候工作等多种功能,同时还具有成像面积大,数据丰富,速度快,而且不需要地面设施,完全从空间覆盖等优点^[43~45].随着雷达对地观测技术的日趋发展,面对不断增长的 SAR 图像数据收集能力,如何对这些图像进行自动或半自动快速、准确的解译已经越来越引起人们的关注和重视^[46].对 SAR 图像上的目标的自动检测和识别虽然进行了许多研究,但大多还限于特定数据和单一方法的研究,离普遍应用还有很长的路要走.随着人工智能、模糊信息处理、小波分析、分数维方法等与 SAR 图像研究的结合必将促进 SAR 图像中目标的自动识别研究水平的提高.

致 谢 感谢中科院东北地理与农业生态研究所的宋开山博士对本文在资料方面提供的帮助.

参 考 文 献 (References):

- [1] 郭华东,等.雷达对地观测理论与应用[M].北京:科学出版社 2000.
- [2] 郭华东,等.对地观测系统与应用[M].北京:科学出版社 2001.
- [3] 陶闯.航空影像理解及其系统之进展[J].武测科技,1994,(2): 33~41.

- [4] 宋建社,袁礼海,薛文通. SAR 图像处理的最新研究与应用[J]. 遥感技术与应用,2002,17(5):284~288.
- [5] 刘永昌,张平,严卫东,等. 小波包域值法去除合成孔径雷达图像斑点噪声[J]. 红外与激光工程,2001,30(3):160~162.
- [6] 屈晓荣. 小波分析在 SAR 图像处理中的应用[D]. 西安:第二炮兵工程学院硕士学位论文,2000.
- [7] Crimmins T R, Geometric filter for reducing speckle, Appl. Opt,1985,24(2):1438~1443.
- [8] Wang J F, Philip J H. Use of the Hough transform in automatic lineament detection, IEEE Trans. on Geosc. Remote Sensing,1990,28(7):561~566.
- [9] Fukuda S, Hirosawa H. Suppression of speckle in synthetic aperture radar images[J]. Int. J. Remote Sensing, 1998, 19(3):507~519.
- [10] 万朋,王建国,黄顺吉. SAR 图像目标综合检测方法[J]. 电子学报,2001,29(3):323~325.
- [11] Loper A, Nezry E, Touzi R, Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images, Int. J. Remote Sensing,1993,14(9).
- [12] 邵芸,谭衢霖,肖建华,等. Radarsat SAR 图像上水稻田边界提取研究[J]. 高技术通讯,2002,(7):26~29.
- [13] 李岩,彭少麟,廖其芳,等. Radarsat SNB SAR 数据在大面积水稻估产中的应用研究[J]. 地球科学进展,2003,18(1):109~115.
- [14] Helmut M. Automatic object extraction from aerial Imagery-A survey focusing on buildings[J]. Computer Vision and Image Understanding,1999,74(2):138~149.
- [15] Aleksandra V, Vlada R, Andrew C N C, Dejan P. Automatic recognition of alertness and drowsiness from EEG by an artificial neural network[J]. Medical Engineering & Physics, 2002(24):349~360.
- [16] Eduardo M R, Vicente M B. Intelligent interpretation of validation data[J]. Expert Systems with Applications 2002, (23):189~205.
- [17] 杨龙,周智敏,黄海风. SAR 图像线条特征提取方法研究[J]. 现代雷达,2002,(1):50~53.
- [18] 王程,王润生. SAR 图像直线提取[J]. 电子学报,2003,31(6):816~820.
- [19] 万朋,王建国,赵志钦,等. SAR 图像弱反射地物边缘提取方法[J]. 信号处理,2000,16(4):317~323.
- [20] 朱彩英,蓝朝楨,靳国旺. 纹理图象亮度阈值法提取 SAR 图象居民地[J]. 中国图象图形学报,2003,8(6):616~619.
- [21] 韩萍,吴仁彪,王兆华. 基于 KPCA 准则的 SAR 目标特征提取与识别[J]. 电子与信息学报,2003,25(10)1297~1301.
- [22] 王运锋,汤志伟,王建国,黄顺吉. SAR 图像中桥梁的识别方法研究[J]. 系统工程与电子技术,2001,23(6):76~78.
- [23] 汤志伟,王运锋,王建国. 合成孔径雷达图像中桥梁形状的目标识别[J]. 电波科学学报,2000,15(1):41~44.
- [24] 郇苏丹,王正志,张翠. SAR 图像中道路的检测[J]. 国防科技大学学报,2001,23(1):59~65.
- [25] 肖志强,鲍光淑. 一种从 SAR 图像中提取城市道路网络的方法[J]. 测绘学报,2004,33(3):264~268.
- [26] Kelly P A, Derin H. Adaptive segmentation of speckled images using hierarchical random field model[J]. IEEE Trans. on ASSP,1988,36(10):1628~1641.
- [27] Ives R W, Eichel P. Application of pixel segmentation to the low rate compression of complex SAR imagery,IGARSS'98, 1998:1064~1067.
- [28] Derin H, Kelly P, Modeling and segmentation of speckled images using complex data[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing,1990,28(1):76~87.
- [29] 付琨,匡纲要,郁文贤. 高分辨率 SAR 图像地物分类算法研究[J]. 电子学报,2001,29(12A):1820~1823.
- [30] 郇苏丹,张翠,王正志. SAR 图像中道路检测方法研究[J]. 宇航学报,2002,23(1):17~24.
- [31] Novak L M, Burl M C, Irving W W, Optimal polarimetric processing for enhanced target detection, IEEE. Trans. on Aerospace and Electronic System,1993,29(1) 36~45.
- [32] L. Benyoussef, Y. Delignon, An optimal matched filter for target detection in images distorted by noise[J]. IGARSS'98, 1998:1000~1003.
- [33] 王世庆,金亚秋. SAR 图像船行尾迹检测的 Radon 变换和形态学图像处理技术[J]. 遥感学报,2001,5(4):289~294.
- [34] 周红建,周宗谭等. 一种 ERS-1 SAR 海洋图像中检测船舶航迹的算法[J]. 遥感学报,2000(1).
- [35] 种劲松,朱敏慧. SAR 图像舰船及其尾迹检测研究综述[J]. 电子学报,2003,31(9):1356~1360.
- [36] 种劲松,朱敏慧. SAR 图像舰船目标检测算法的对比研究[J]. 信号处理,2003,19(6):580~582.
- [37] 汤子跃,朱敏慧,王卫延. 一种 SAR 图象舰船尾迹的 CFAR 检测方法[J]. 电子学报,2002,30(9):1337~1339.
- [38] 邹焕新,匡纲要,郁文贤. 一种从 SAR 海洋图像中检测舰船航迹的算法[J]. 现代雷达,2004,26(1):41~44.
- [39] 罗强,罗莉,任庆利,等. 一种基于小波变换的卫星 SAR 海洋图像舰船目标检测方法[J]. 兵工学报,2002,23(4):500~503.
- [40] 匡纲要,计科峰,粟毅,等. SAR 图象自动目标识别研究[J]. 中国图象图形学报,2003,8(10):1115~1120.
- [41] 桑农,鲁鹏,张天序. 一种基于知识的雷达图像机场目标提取方法[J]. 红外与激光工程,2003,32(6):594~598.
- [42] 张进铎. 地震解释技术现状及发展趋势[J]. 地球物理学进展,2006,21(2):578~587.
- Zhang J D. Present status and future trend of seismic data interpretation techniques [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(2):578~587.
- [43] 朱俊杰,郭华东,范湘涛,等. 基于纹理与成像知识的高分辨率 SAR 图像水体检测[J]. 水科学进展,2006,17(4):525~530.
- [44] 程辉,于秋则,田金文,等. 基于小波支持向量机分割的 SAR 图像桥梁目标检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2006,34(4):52~55.
- [45] 欧阳越,种劲松. SAR 图像海岸线检测算法综述[J]. 国土资源遥感,2006,(68):1~3.
- [46] 梁北援,郭铁控,申旭辉. 地质雷达双域数据处理软件及其应用[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):443~445.
- Liang B Y, Guo T S, Shen X H. Processing software of double-domain data from Ground Penetrating Radar and its application[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(2):443~445.