

GF-3 号 SAR 卫星遥感围填海监测方法研究 ——以大连金州湾为例

范剑超¹, 姜大伟^{1,2}, 赵建华¹, 初佳兰¹, 谢春华³, 安文韬³, 黄凤荣²

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 依据不同围填海类型在高分三号(GF-3)合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星遥感影像上可分性, 建立围填海遥感分类体系及相应的围填海类型解译标志, 进而分析 SAR 图像岸线提取方法, 构建 GF-3 围填海监测技术流程。采用几何主动轮廓模型进行 GF-3 SAR 影像自动提取海岸线, 获得围填海专题图。通过外业精度调查验证 GF-3 SAR 卫星遥感影像可以有效获取围填海信息。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 解译标志; 几何主动轮廓模型; 高分三号(GF-3)卫星

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)12-0060-06

DOI: 10.11759/hyxx20161130002

海洋是人类社会发展的重要基地, 也是人类生存发展的希望, 面对日益紧张的土地供需矛盾, 围填海开发成为沿海地区拓展生存发展空间, 缓解人地矛盾的重要途径。国家海洋局编制的《海域使用分类体系》^[1]对“填海造地”和“围海”做出了明确定义, “填海造地, 指筑堤围割海域填成土地, 并形成有效岸线的用海方式; 围海, 指通过筑堤或其他手段, 以全部或部分闭合形式围割海域进行海洋开发的用海方式”^[2-3]。

科学的围填海具有环境净化功能, 在海陆交界地带, 潮滩对各种有机和无机污染物具有较强的净化能力, 是处置陆源污染物的良好场所之一, 围填海和海堤修筑, 能有效地抵挡海洋灾害的侵袭, 河口围填海工程还能有效阻挡入海江水的含沙量等^[4]。但不合理的围填海活动严重破坏了沿海地区的生态环境, 导致海湾自净能力减弱, 海洋生物多样性降低, 加剧了海水富营养化风险等等^[5-7]。

卫星遥感由于其低成本、宏观、快速、可实时动态连续监测围填海变化活动等一系列优势受到广泛关注。高分三号(GF-3)卫星是我国首颗 C 波段全极化合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像卫星, 已于 2016 年 8 月 10 日在太原卫星发射中心成功发射升空, 可以全天时全天候实现海洋和陆地信息的监测, 具有重要研究意义。SAR 是主动式微波高分辨率影像雷达, 通过脉冲压缩和合成孔径技术分别有效提高距离向和方位向分辨率^[8-9]。SAR 卫

星遥感影像不受天气条件影响, 可解决可见光遥感影像无法每年完全覆盖海岸线的难题, 在自然环境恶劣条件下优势明显。实时科学管理围填海有利于可持续开发利用海岸带资源, 不合理的海域开发利用将会导致生态环境被严重破坏, 因此利用卫星遥感技术手段, 开展海域使用动态监测, 构建 GF-3 号 SAR 影像围填海监测流程, 及时掌握围填海变化范围信息, 有利于扩大沿海地区经济效益, 保护生态环境。

本文依据相关围填海类型在 SAR 遥感影像的可分性, 建立围填海遥感分类体系及相应的 GF-3 图像中围填海类型解译标志, 对比分析 SAR 图像岸线提取方法, 构建围填海监测整体流程, 采用几何主动轮廓模型(geometric active contour models, GAC)提取大连金州湾 SAR 图像岸线, 最后将变化范围信息制成专题图, 通过外业现场验证 GF-3 SAR 卫星遥感数据在获取围填海变化范围的有效性。

收稿日期: 2016-11-30; 修回日期: 2017-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1404902, 2016YFC1401007); 国家自然科学基金项目(41706195, 61273307); 国家高分重大科研专项(41-Y30B12-9001-14/16)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFC1404902, No.2016YFC1401007; National Natural Science Foundation of China, No. 41706195, 61273307; National High Resolution Special Research, No. 41-Y30B12-9001-14/16]

作者简介: 范剑超(1985-), 内蒙古自治区巴彦淖尔市人, 副研究员, 博士, 研究方向为 SAR 图像信息提取, 人工智能技术等, E-mail: jcfan@nmemc.org.cn

1 GF-3 SAR 数据分析

GF-3 具有聚束、条带、扫描、全极化、波成像、全球观测、高低入射角 12 种成像模式，最高分辨率

可达 1 m，工作频率为 C 波段，极化方式可选单极化、双极化和全极化。考虑空间分辨率和幅宽的因素，针对围填海信息提取具体问题，通常选用如下 6 种模式进行检测，具体成像模式详细信息如表 1 所示。

表 1 可用于围填海监测的 GF-3 号卫星成像模式

Tab. 1 Attributes of GF-3 satellite with respect to reclamation monitoring

成像模式	极化模式	标称(m)	方位向(m)	距离向(m)	幅宽(km)	入射角(°)
聚束	可选单极化	1	1.0~1.5	0.9~2.5	10	20~50
超精细条带	可选单极化	3	3	2.5~5	30	20~50
精细条带 1	可选双极化	5	5	4~6	50	19~50
精细条带 2	可选双极化	10	10	8~12	100	19~50
全极化条带	全极化	8	8	6~9	30	20~41
窄幅扫描	可选双极化	50	50~60	30~60	300	17~50

研究数据采用 2016 年 8 月 20 日天津港 GF-3 SAR 精细条带 2 模式数据 1 景，VHVV 双极化模式，建立围填海分类解译标志。采用 2016 年 12 月 19 日金州湾 GF-3 SAR 数据 1 景，HHHV 交叉极化模式，C 波段，窄幅扫描成像模式，进行围填海信息提取。

2 GF-3 SAR 围填海解译标志建立

基于《海域使用分类体系》关于围填海用海类型的定义及其在 SAR 遥感影像中可分性，制定了围填海的遥感分类体系，根据各种围填海类型在 SAR 影像上的纹理、色调、形状、空间组合等特征差异，制定了各围填海类型基于 SAR 影像的解译标志，如图 1 和表 2 所示。

3 SAR 图像岸线提取方法

阈值分割^[10]适用于目标和背景占据不同灰度级范围的影像，基本原理是通过不同的特征阈值，将影像像素点分为若干类。其优点是计算简单，运算效率高，速度快，但在 SAR 图像分割过程中，后向散射强度受到相干斑噪声的影响，容易造成边界定位不准确。边缘检测法主要依据影像边缘处灰度梯度

的不连续性来检测边界。常用的经典边缘检测算子包括：Robert 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Canny 算子等^[11-12]。这些算子都是用影像的水平和垂直差分来逼近梯度算子，最终产生一个梯度影像，达到突出边缘的目的。

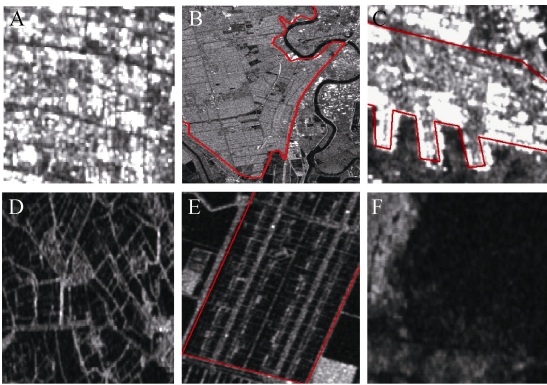


图 1 GF-3 SAR 图像围填海解译标志

Fig. 1 Reclamation interpretation marks on GF-3 SAR images

A. 建设填海造地用海; B. 农业填海造地用海; C. 港口建设用海; D. 围海养殖用海; E. 盐业用海; F. 其他用海

A. construction of reclamation land; B. sea area for agriculture reclamation; C. sea area for port construction; D. sea area for aquaculture reclamation; E. salt industry; F. other sea-area use

表 2 围填海方式在 SAR 图像上的遥感解译标志

Tab. 2 Reclamation interpretation marks on SAR images

围填海类型	解译标志
建设填海造地用海	道路网格状清晰可见，建筑物呈亮白色点状，绿化植被呈片状浅灰色
农业填海造地用海	纹理整齐，但表面粗糙不平整
港口建设用海	通过码头、港口设施齿状图形或地物空间组合关系辨识
围海养殖用海	呈网格状且大小不一，色调有深灰色、浅灰色和亮白色等
盐业用海	网格状排列且大小形状接近
其他用海	未知用途，影像表现与海水融为一体

小波变换^[13-14]是空间(时间)和频率的局部变换,能对信号进行多尺度细化与分析,有效从信号中提取信息。在岸线提取过程中,首先将海陆灰度信息转化为数字信号,在海陆分界处数字信号具有明显的奇异性,通过小波技术对数字信号进行分析,找到奇异点,确定海岸线位置。主动轮廓模型(active contour model)^[15-18]算法首先在影像中初始化一个封闭曲线,然后通过最小化能量泛函使初始曲线运动到目标对象的边界,获得影像分割结果。但是由于 SAR 图像具有对比度小、易受雷达固有相干斑噪声干扰等问题,主动轮廓模型方法在

处理 SAR 图像时仍会遇到一些问题,需进一步完善。

几何主动轮廓模型^[19-20]又称为水平集方法,是将移动界面作为零水平集嵌入到高维度的闭合水平集函数中,通过水平集函数的循环迭代,确定零水平集即初始轮廓的演化结果,其优点是轮廓拓扑自适应能力强,能有效处理轮廓线的分裂合并,数值求解稳定,存在唯一解。几何主动轮廓模型方法可以有效结合 SAR 遥感数据特点,因此本文采用该方法进行岸线自动提取。上述不同方法在 SAR 图像中岸线检测效果优劣对比如表 3 所示。

表 3 SAR 图像岸线提取不同方法性能比较

Tab. 3 Comparison of efficiencies of different approaches in coastline detection with SAR imagery

方法	适用范围	抗噪性能	复杂度	待解决问题
阈值分割法	精度要求低	低	低	阈值选取
边缘检测法	精度要求低	较低	较低	抗噪性与精确度的矛盾
小波变换法	较复杂图像	一般	一般	小波算子选取
主动轮廓模型	简单图像	较低	较低	岸线迭代不稳定速率低
几何主动轮廓模型	复杂 SAR 图像	较高	较高	迭代速率低

4 围填海监测技术流程

海岸线动态反映围填海分布信息,首先针对 GF-3 SAR 卫星数据特点,对 SAR 图像预处理,包括辐射校正、几何校正、相干斑降噪等。选取随机初始岸线,利用几何主动轮廓模型进行循环迭代计算,将得到的岸线栅格数据矢量化,用 ArcGIS 软件行使矢量编辑功能对海岸线精修正,得到围填海变迁数据。在围填海现场进行亚米级 GPS 测量,分别针对 2007—2016 年围填海信息进行 GPS 站点现场测量,与围填海信息自动提取、人工目视解译和现场测量的结果进行一致性校验。最后根据达到外业验证精度要求的数据和建立的不同类型 SAR 图像遥感解译标志制成围填海信息专题图,如图 2 所示。

5 大连金州湾围填海信息提取

金州湾位于大连市金州区西 2 km 渤海海域,海域宽阔呈椭圆形,南北长 28 km,宽约为 15 km。岸线北自金州区大魏家镇莽麦山、葫芦套一带,南至甘井子区黄龙尾咀,长约 74 km,面积约为 7 453 km²,是大连地区渤海沿岸最大的海湾。

以 2007 年 4 月 SPOT 数据作为基础数据,对 2016 年 12 月 19 日金州湾 GF-3 SAR 数据 1 景,HHHV 交叉极化模式, C 波段,窄幅扫描成像模式,进行围

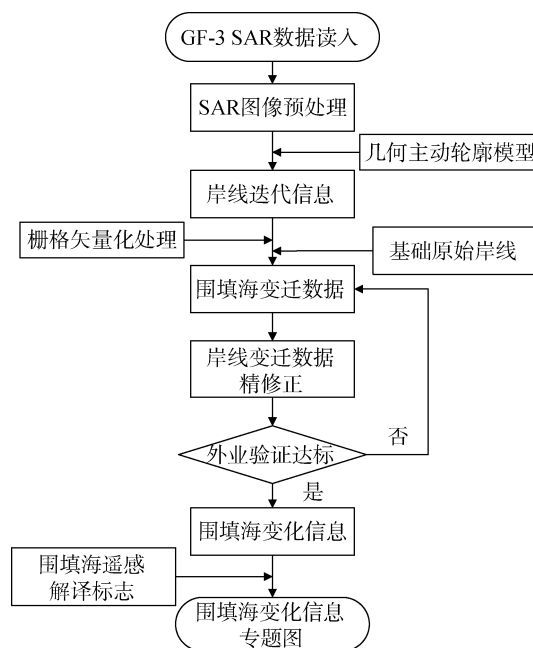


图 2 GF-3 SAR 围填海动态监测流程图

Fig. 2 Flow chart of dynamic monitoring process of reclamation with GF-3 SAR imagery

填海变化信息检测, GF-3 如图 3A 所示, 图 3B 为同期 GF-2 空间分辨率为 1 m 真彩色数据。可以发现 GF-3 SAR 卫星遥感影像可以更加清晰地表征出海陆分界线, 对比度更强。相对于高分辨率可见光卫星遥感影像, 可以减少悬浮泥沙等海洋水色要素的影响。

图 4A 为基于几何主动轮廓模型自动提取海岸线, 直观上该算法可以准确获得海岸线位置。采用 50 个 GPS 站位点进行测量, 如图 4B 所示, 进行外业精度验证。图 4C 和图 4D 分别为调查区域现场照片。通过调查结果显示, 金州湾围填海用地类型绝大部分为建设填海用地。GF-3 SAR 遥感影像可以准确获得围填海变化信息。经过与基础原始岸线比较, 人工交互修正, 获得金州湾围填海专题图, 如图 5 所示。

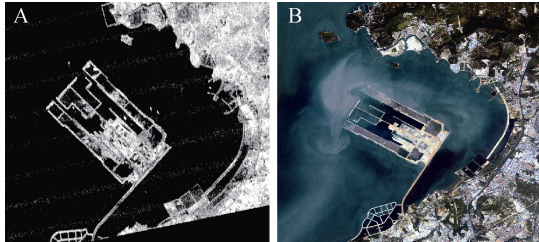


图 3 大连金州湾多源卫星遥感影像

Fig. 3 Multi-source satellite RS imagery of the Jinzhou Bay in Dalian

A. GF-3 号 SAR 数据; B. GF-2 号真彩色数据

A. GF-3 SAR data; B. GF-2 true color data

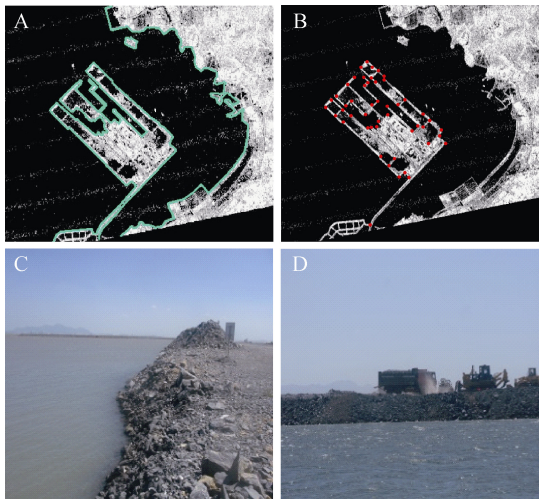


图 4 自动提取与现场验证

Fig. 4 Automatic extraction and field validation

A. 几何主动轮廓模型解译结果; B. GPS 站位点测量; C. 现场调查区域 1; D. 现场调查区域 2

A. GAC results, B. GPS site survey, C. Area 1, D. Area 2

6 结语

依据围填海类型在 SAR 遥感影像和可见光影像上的可分性, 建立了围填海遥感分类系统及相应的围填海类型解译标志。分析典型 SAR 遥感影像岸线提取算法优缺点, 构建了围填海监测技术流程, 采

用几何主动轮廓模型实现大连金州湾机场围填海变化检测, 并进行现场实地精度校验, 验证 GF-3 SAR 卫星遥感影像可以有效获取围填海变化信息, 在国家海域使用动态监测中具有广泛地推广意义。

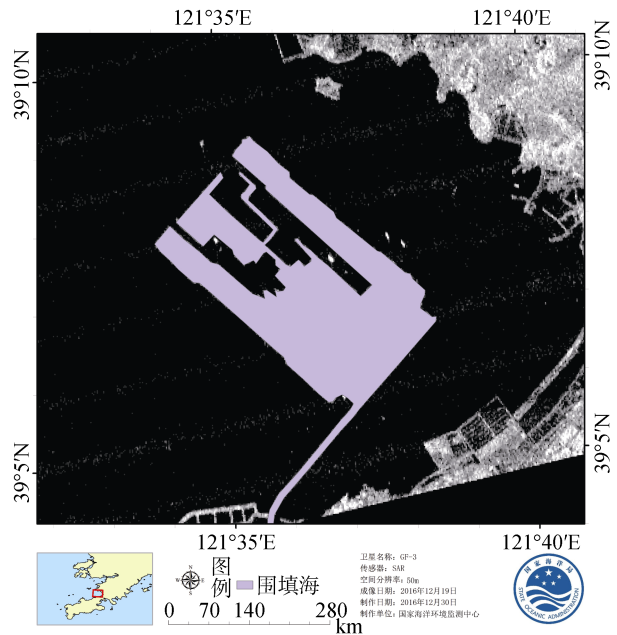


图 5 金州湾 2016 年 12 月围填海变化专题图

Fig. 5 Thematic map of reclamation changes in Jinzhou Bay in December, 2016

致谢: 感谢国家卫星海洋应用中心提供首批 GF-3 SAR 卫星遥感影像进行数据仿真实验。

参考文献:

- [1] 国家海洋局. 海域使用分类体系(HY/T123-2009)[R]. 北京: 国家海洋局, 2011.
State Oceanic Administration .Marine Use Classification System (HY/T123-2009)[R]. Beijing: State Oceanic Administration, 2011.
- [2] 胡聪, 尤再进, 毛海英. 基于德尔菲法的围填海对海洋资源影响指标体系研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(8): 150-156.
Hu Cong, You Zaijin, Mao Haiying. Indicator system for the impact of reclamation on marine resources using the Delphi method[J]. Marine Sciences, 2016, 40(8): 150-156.
- [3] 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的海洋生态服务功能损失估算[J]. 海洋科学, 2012, 36(3): 108-114.
Suo Anning, Zhang Minghui, Yu Yonghai, et al. Loss appraisal on the value of marine ecosystem services of the sea reclamation project for Caofeidian[J]. Marine Sciences, 2012, 36(3): 108-114.

- [4] 林磊, 刘东艳, 刘哲, 等. 围填海对海洋水动力与生态环境的影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(8): 1-11.
Lin Lei, Liu Dongyan, Liu Zhe, et al. Impact of land reclamation on marine hydrodynamic and ecological environment[J]. Haiyangxuebao, 2016, 38(8): 1-11.
- [5] 刘百桥, 刘利东. 海洋功能区遥感监测方案设计[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 611-614.
Liu Baiqiao, Liu Lidong. Technical scheme for remote sensing monitoring of marine functional zone[J]. Marine Environment Science, 2014, 33(4): 611-614.
- [6] 温礼, 吴海平, 姜方方, 等. 高分遥感影像的围填海变化图斑自动提取[J]. 测绘科学, 2015, 40(6): 42-45.
Wen Li, Wu Haiping, Jiang Fangfang, et al. Automatic extraction method of coastal reclamation area using high resolution remote sensing image[J]. Science of surveying and Mapping, 2015, 40(6): 42-45.
- [7] 张杰, 王进河, 崔文连, 等. 我国海岸带面临的威胁、管理实践与“十三五”科技支撑工作重点——以青岛市、东营市和连云港市为例[J]. 海洋科学, 2015, 39(2): 1-7.
Zhang Jie, Wang Jinhe, Cui Wenlian, et al. The threat, management practice and work focus of science and technology support in the China coastal zone during the 13th Five-Year: examples in Qingdao, Dongying and Lianyungang[J]. Marine Sciences, 2015, 39(2): 1-7.
- [8] 朱良, 郭巍, 禹卫东. 合成孔径雷达卫星发展历程及趋势分析[J]. 现代雷达, 2009, 31(4): 5-10.
Zhu Liang, Guo Wei, Yu Weidong. Analysis of SAR satellite development history and tendency[J]. Modern Radar, 2009, 31(4): 5-10.
- [9] 崔瑞, 薛磊, 汪波. 基于等效视数的 ISAR 干扰效果评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30, (5): 887-888.
Cui Rui, Xue Lei, Wang Bo. Evaluation method of jamming effect on ISAR based on equivalent number of looks[J]. System Engineering and Electronics, 2008, 30(5): 887-888.
- [10] 魏东岚, 曹晓晨. Matlab 平台下遥感影像的北方岸线提取研究——以大连长兴岛为例[J]. 测绘通报, 2015, 5: 80-83.
Wei Donglan, Cao Xiaochen. Using satellite remote sensing image data to research the north coastline extraction based on Matlab—A case study of Changxing Island, Dalian City[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015, 5: 80-83.
- [11] 严海兵, 李秉柏, 陈敏东. 遥感技术提取海岸线的研究进展[J]. 地域研究与开发, 2009, 28(1): 101-105.
Yan Haibing, Li Bingbai, Chen Mindong. Progress of researches in coastline extraction based on RS technique[J]. Areal Research and Development, 2009, 28(1): 101-105.
- [12] 马小峰, 赵冬至, 张丰收, 等. 海岸线卫星遥感提取方法研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(4): 575-580.
Ma Xiaofeng, Zhao Dongzhi, Zhang Fengshou, et al. An overview of means of withdrawing coastline by remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(4): 575-580.
- [13] 吴良斌. SAR 图像处理与目标识别[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 106-107.
Wu Liangbin. SAR image process and target recognition[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 106-107.
- [14] 丁亚杰. 遥感自动提取海岸线方法[J]. 地理空间信息, 2011, 9(4): 37-39.
Ding Yajie. Coastline automatic extraction method based on RS[J]. Geoscience Space Information, 2011, 9(4): 37-39.
- [15] Sun G C, Xing M D, Xia X G. Multichannel full-aperture azimuth processing for beam steering SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(9): 4761-4778.
- [16] 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, 1(2): 1-3.
Ouyang Yue, Zhong Jinsong. A review of coastline detection on SAR imagery[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2006, 1(2): 1-3.
- [17] Yang X, Gao X B, Tao D C, et al. An efficient MRF embedded level set method for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(1): 9-21.
- [18] Colgan T J, Hagness S C, VanVeen B D. A 3D level set method for microwave breast imaging[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2015, 2(99): 56-62.
- [19] 刘鹏程. 基于水平集理论的海岸线轮廓特征提取[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(2): 75-79.
Liu Pengcheng. Feature extraction of coastline contour based on level set theory[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(2): 75-79.
- [20] Li C M, Xu C Y, Gui C F, et al. Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(12): 3243-3254.

Marine reclamation monitoring approach research based on GF-3 remote sensing image: A case study of the Jinzhou Bay in Dalian

FAN Jian-chao¹, JIANG Da-wei^{1, 2}, ZHAO Jian-hua¹, CHU Jia-lan¹, XIE Chun-hua³, AN Wen-tao³, HUANG Feng-rong²

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. China School of Urban Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 3. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

Received: Nov. 30, 2016

Key words: synthetic aperture radar; interpretation mark; geometric active contour model; GF-3 (Gaofen-3)

Abstract: GF-3 (Gaofen-3) is the first earth observation satellite to be equipped with a full polarimetric synthetic aperture radar (SAR) imaging sensor, which provides the capability for dynamic national marine monitoring. Based on the separability of the reclamation categories in SAR images, in this study, we establish a land reclamation classification system and interpret marks associated with the corresponding reclamation categories. In addition, we apply and analyze various coastline extraction approaches with respect to SAR imagery and establish a flowchart for the reclamation monitoring process. We adopt the geometric active contour model to automatically extract the coastline from GF-3 SAR imagery and use reclamation-change range information to generate a thematic map for GF-3 SAR images. Our field survey results demonstrate that GF-3 SAR remote sensing imagery can be effectively used to obtain reclamation information.

(本文编辑: 刘珊珊)