

引用格式: Song Shasha, Zhao Yupeng, Su Tengfei, *et al.* Research and Development of SAR Satellite Remote Sensing System of Ocean Oil Spills[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5): 928-933. [宋莎莎, 赵宇鹏, 苏腾飞, 等. 海上溢油 SAR 卫星遥感监测系统研发[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 928-933.]

海上溢油 SAR 卫星遥感监测系统研发

宋莎莎^{1,2}, 赵宇鹏^{1,2}, 苏腾飞³, 马佑军⁴, 安伟^{1,2}, 孟俊敏³, 赵朝方⁴

(1. 中海石油环保服务有限公司, 天津 塘沽 300452;

2. 海洋石油安全环保技术研发中心, 山东 青岛 266061;

3. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4. 中国海洋大学海洋遥感所, 山东 青岛 266003)

摘要: 研发海上溢油 SAR 卫星遥感监测系统, 探索建立中海油海上石油勘探开发作业海域业务化监测体系的可行性。研发的海上溢油 SAR 卫星遥感监测系统支持多种 SAR 数据处理, 基于改进的凝聚层次聚类算法实现了 SAR 影像油膜自动识别与特征提取。系统具有溢油区域置信度分析、多源多时相分析、溢油事故源回溯与分析等溢油识别结果综合分析功能, 其中溢油识别和综合分析结果可与电子海图叠加显示, 并可以生成溢油信息专题图。该系统的研发为海上溢油早期预警与溢油应急措施的有效实施提供了技术支持与决策依据。

关键词: 溢油; SAR; 自动识别; 监测系统

中图分类号: TP 79; X 55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)05-0928-06

1 引 言

近年来我国海洋资源开发力度逐年加大, 随着海洋石油开采和运输业迅速发展, 海上溢油风险随之加剧, 对海洋生态环境和沿岸经济发展造成了严重影响。

溢油事故的实时监测是有效降低溢油污染风险, 提高溢油应急响应能力的有效方法。而目前的监测手段往往局限于目视观测, 对于发生在夜晚或者远离观测点的溢油事故很难及时发现, 因此失去了溢油控制、处理的最佳时机。海上溢油监测能力薄弱, 严重影响了海上溢油风险管理水平和控制能力, 降低了溢油应急快速反应效率。因此亟需加强海上溢油监测能力建设, 建立海上溢油卫星遥感监测系统, 实现海上溢油的早期预警, 对于指导溢油应急处置、降低海上溢油污染损害具有重要的现实意义。

目前, 国内外已经开展了一系列海上溢油遥感监测技术研究, 实现了遥感技术在海上溢油监测中

的有效应用^[1-3]。挪威、加拿大已经利用遥感监测系统开展了海上溢油业务化监测。其中, 挪威 KSAT (Kongsberg Satellite Service) 溢油监测系统自 1998 年开始以卫星雷达遥感数据为主要数据源, 向欧洲乃至全球用户提供近实时溢油应急服务^[4]; 加拿大基于 Radarsat 数据开发了 OMW (Ocean Monitoring Workstation), 除了可以检测油膜和舰船, 还具备海况分析功能^[5]。我国也开展了一系列溢油遥感技术研究, 如 2007 年初国家海洋卫星中心建设的渤海溢油遥感监测业务化系统投入试运行, 该系统基于 ENVISat 和 Radarsat 数据, 经过数据预处理、几何校正、快视图生成、图像分析、溢油识别、面积量算和专题制图等流程, 最后形成溢油监测报告, 向相关部门发布溢油监测信息^[6]。中国科学院遥感应用研究所研发的海面烃类油膜雷达遥感图像监测系统, 实现了 ENVISat ASAR 图像的预处理与海面油膜特征指标提取功能, 并作为溢油检测模块在国家海洋局海面溢油遥感监测业务化系统中得到广泛应用^[7]。

收稿日期: 2012-09-20; 修订日期: 2012-12-17

基金项目: 中国海洋石油总公司项目“中海油海上石油设施溢油卫星遥感监测系统研发”。

作者简介: 宋莎莎(1989—), 女, 山东青岛人, 助理工程师, 主要从事海洋溢油遥感监测研究。E-mail: songshsh@coes.org.cn。

通讯作者: 安伟(1979—), 男, 山东肥城人, 工程师, 博士, 主要从事海洋溢油应急技术研究。E-mail: anwei@coes.org.cn。

作为我国最大的海上油气生产商,中海油海上油气生产设施大量分布在各作业海域,为保护海洋环境,降低溢油污染损害程度,研发海上溢油卫星遥感监测系统,旨在对各作业海域进行有效监测,实现溢油早期预警,为海上溢油应急响应措施的有效实施提供技术支持。在考察国内外现有溢油卫星遥感监测系统及其应用现状的基础上,利用遥感图像处理技术、GIS 技术、人工智能技术和基础信息数据库开发了海上溢油 SAR 卫星遥感监测系统。该系统支持多种 SAR 数据处理,利用基于凝聚层次聚类的面向对象的溢油识别方法,具备溢油识别结果综合分析功能,并可与电子海图叠加显示。本文首先对海上溢油

卫星遥感监测系统进行简要介绍,然后从系统框架、系统功能和系统应用等方面进行详细介绍。

2 系统简介

海上溢油卫星遥感监测系统以 SAR 影像为主要数据源,综合利用遥感图像处理技术、地理信息系统技术、人工智能技术及基础信息数据库,解决 SAR 影像溢油自动识别问题,为海上溢油快速发现、海上溢油应急反应提供技术保障,探索建立全天候的溢油卫星遥感监测业务化体系。图 1 为系统主要功能模块,包括影像预处理、溢油识别、综合分析、海图叠加及产品输出功能模块。

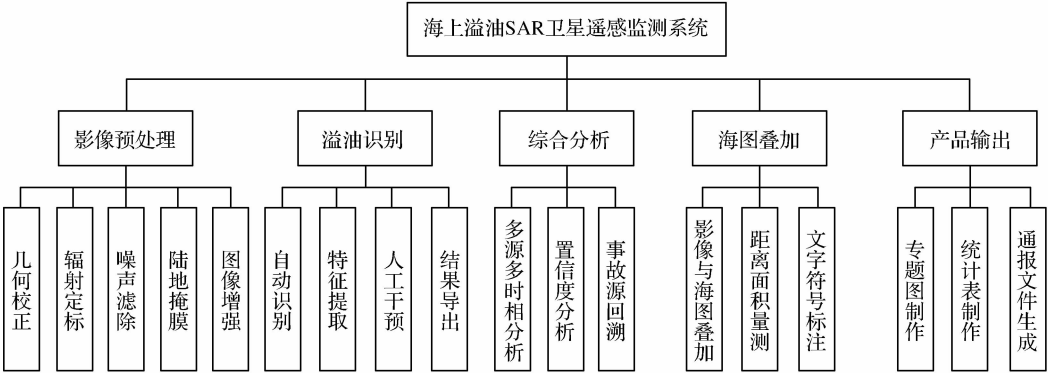


图 1 海上溢油卫星遥感监测系统框架图

Fig. 1 Framework of oil spill satellite remote sensing monitoring system

该系统的特色和优势有:

(1)基于凝聚层次聚类的溢油自动识别算法。系统采用基于凝聚层次聚类的算法进行溢油自动识别,该算法是面向对象的分类方法,可以有效减少碎斑现象。

(2)增加溢油检测综合分析功能。该系统在油膜检测基础上,结合溢油检测综合分析功能,实现多源多时相数据溢油检测分析、溢油区域置信度分析以及溢油事故源回溯与分析。

该系统基于 32 位 Windows 环境,采用 Visual C++ 编程语言开发;使用类 UML(Unified Modeling Language)统一建模语言进行模式建立与处理;显示部分采用基于 GPU 的可视化开发,以提高运算、显示速度,并使用 Microsoft Office Access 库建立基本数据库,对数据进行有效管理。

射信号较强的陆地部分掩盖掉,以便对海上溢油开展针对性处理。此外,该系统可以实现天线方向图校正、滤波、几何粗校正/投影、陆地掩膜等过程的一键处理功能,方便系统操作,如图 2 所示。



图 2 影像预处理

Fig. 2 Image preprocessing

3 系统功能

3.1 影像预处理

影像预处理包括图像滤波、几何粗校正、辐射定标和图像增强等,同时可以进行陆地掩膜,将后向散

3.2 油膜识别

油膜识别方面,该系统基于油膜自动识别算法和人工干预实现了油膜识别功能。其中,自动识别

算法采用基于凝聚层次聚类的方法^[8]。由于 SAR 影像的复杂性,目前尚无法实现油膜的全自动识别,需在自动识别基础上加以专家经验的人工干预,保证识别结果的准确度。SAR 影像中溢油通常表现为暗斑或暗条纹的形式,但并非影像中所有的暗斑和暗条纹都是溢油。低风速区、内波、上升流、岛屿背风侧、雨团和油脂冰等常表现出与油膜类似的暗特征,称作类油膜现象。类油膜现象干扰油膜的识别,因此 SAR 溢油识别的关键便是区分油膜与类油膜。本系统基于凝聚层次聚类的溢油识别方法,首先利用灰度阈值、斑块大小参数和斑块形状参数检测出 SAR 影像中的所有暗斑块,然后在分析历史溢油事故影像和研究油膜斑块与类油膜斑块差异特征的基础上,利用斑块对比度差异特征排除类油膜,得到油膜计算机识别结果。

油膜识别算法中,传统的 K 均值(K-Means)、迭代自组织聚类(ISODATA)和模糊 C 均值算法(FCM)都是基于像素判断的分类算法,会产生较多的碎斑,且没有考虑周围像素的分布情况。而凝聚层次聚类方法首先将每个对象作为一个类,设置一定的规则把它们合并为越来越大的类,直到某个终结条件被满足^[9],是面向对象的方法,可减少碎斑现象。该方法已在海冰分类和海冰边缘线提取方面得到有效应用^[9-10]。

本系统进行溢油识别,首先采用凝聚层次聚类方法进行图像分割,然后在图像分割基础上通过区分溢油斑块和类油膜斑块,达到识别溢油的目的。凝聚层次聚类方法进行图像分割,主要利用灰度阈值、斑块大小参数和斑块形状 3 个参数。其中,灰度阈值是区分暗斑与非暗斑的灰度值,灰度值低于该阈值的斑块分为暗斑,否则非暗斑;斑块大小是斑块包含的像素数目,斑块包含像素数目小于该阈值的将与邻近斑块合并;斑块形状参数描述斑块的形状特征,取值 0~1。形状参数接近 1 时,斑块形状较规则;形状参数接近 0 时,斑块呈不规则形状。图像分割完成后,利用斑块对比度参数对暗斑进行分类,以便区分油膜斑块和类油膜斑块。其中,斑块对比度是暗斑与其邻近斑块平均灰度的比值。一般对于溢油暗斑来说,该参数值较类油膜斑块大,以此区分油膜斑块和类油膜斑块。图 3~5 分别给出原始 SAR 图像、图像分割结果和溢油识别结果。从中可以看出,该方法可有效分割出图像中的暗斑,溢油识别结果较好。

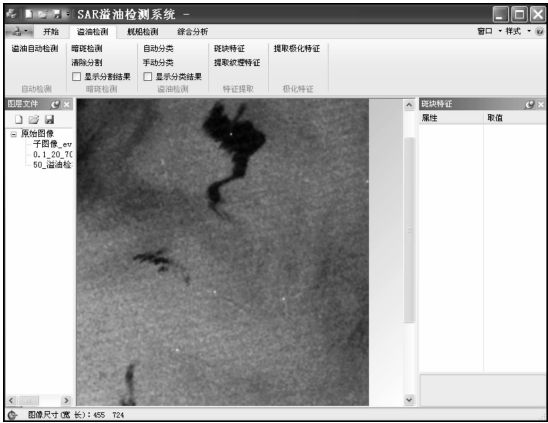


图 3 原始 SAR 图像
Fig. 3 The original SAR image

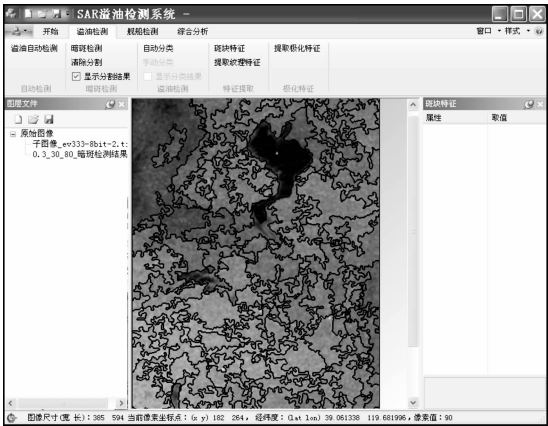


图 4 溢油图像分割
Fig. 4 Oil spill image segmentation



图 5 溢油识别结果
Fig. 5 Oil spill identification results

3.3 综合分析

本系统综合考虑溢油特征、风速、平台、管线、舰船 AIS 信息、飞机船舶现场勘查信息、溢油漂移预测轨迹信息及回推溢油源信息等因素,开展溢油置信度分析、多源多时相分析及事故源回溯与分析,制定不同因素对应的分析规则,并设置分析权重。

以置信度分析为例,各因素置信度判断规则设置如下:

Brekke 和 Solberg 等^[11-12]在挪威 KSAT 溢油监测系统置信度分析规则的基础上,增加了其发现的有效规则,最终选取局部对比度(即暗斑与背景的反差)、功率均值比、与船只平台距离、风、暗斑面积、边界、外角和、一阶不变平面矩等参数进行置信度分析。本系统研发中选取若干典型特征背景功率均值比(PMR)、暗斑与背景的反差(Lcont)、暗斑复杂度(C)、与平台管线距离、风速等参数进行置信度分析。

通过溢油影像样本统计特征规律,确定其分析规则如下:

若背景功率均值比 $PMR < P_1$,则溢油置信度为高;

否则若 $P_1 < PMR < P_2$,则溢油置信度为中;

否则若 $PMR > P_2$,则溢油置信度为低。其中 P_1 、 P_2 为背景功率比经验值。

.....

对于与平台管线距离和风速,根据经验确定分析规则,并可针对实际情况进行相应调整。以暗斑距平台、管线距离为例:

若与平台、管线的距离 $Distance < D_1$,则溢油置信度为高;

否则若 $D_1 < Distance < D_2$,则溢油置信度为中;

否则若 $Distance > D_2$,则溢油置信度为低。其中 D_1 、 D_2 为特征距离。

.....

在对各因素制定分析规则的基础上,根据经验预设各因素在溢油置信度分析中所占权重如下,参考事故类型、事故发生时海况等可进行相应调整权重:

与石油平台及管线的距离(Distance)占权重为 A;

背景的功率均值比(PMR)占权重为 B;

暗斑与背景的反差(局域对比度 Lcont)占权重为 C;

形状是否规则(复杂度 C)占权重为 D;

风速所占权重为 E;

$$A+B+C+D+E=1$$

在规则制定和权重设置的基础上,进行置信度分析,给出识别结果的置信度水平(图 6)。从而可

以排除置信度低的斑块,得到最终识别结果。



图 6 综合分析
Fig. 6 Comprehensive analysis

多源多时相数据分析一方面排除类油膜,提高油膜识别准确率;另一方面生成油膜动态变化图,统计油膜面积变化、漂移距离等。将多时相遥感影像识别的油膜位置、溢油漂移轨迹预测结果及飞机船舶监测结果相叠加进行分析比较。

溢油事故源回溯与分析:结合溢油预测软件回推信息、船只 AIS 信息、平台管线等,通过分析油膜与舰船和平台管线及回推结果的相对位置关系,进行事故源回溯与分析。

3.4 海图叠加与产品输出

系统支持遥感影像与电子海图数据叠加,具备遥感影像与电子海图显示、放大与缩小、漫游、距离与面积度量等功能。基于 C# 语言与开源 GIS 软件 Map-Window 和开源栅格/矢量空间数据转换库 GDAL/OGR,开发了专题图制作功能,同时可生成溢油信息统计表和通报文件。

4 系统应用

在系统研发的基础上,实现了海上溢油监测从溢油事故发生—数据订购—数据解译—信息发布的一体化、快速化流程。系统在卫星过境获取数据后 2~3 h 之内即可提供遥感影像溢油解译结果。通过分析溢油 SAR 影像,提取溢油区域信息,进行溢油卫星遥感影像的解译(图 7)。系统提取的油膜信息为飞机和船舶的现场勘查验证提供技术指导,表明了该系统的有效性和实用性。

- 系统生成的通报文件,包含以下信息:
- (1)事故概述:时间、地点及油膜总面积等。
 - (2)油膜信息统计表:包括油膜位置、面积、周长、长、宽及置信度等。

(3)事故影像专题图:油膜形状、遥感影像、成像时间、分辨率和坐标系等。

(4)多源多时相数据分析专题图:油膜面积变化、漂移距离等。

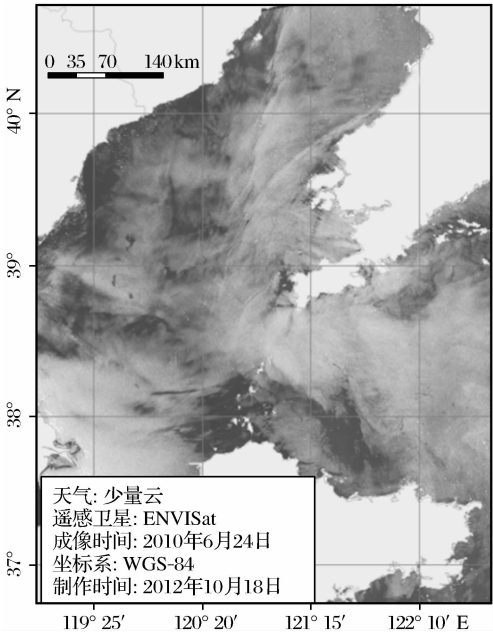


图 7 溢油专题图
Fig. 7 Oil thematic map

5 结 语

研发的海上溢油 SAR 卫星遥感监测系统,通过利用遥感图像处理和人工智能技术实现从 SAR 影像中识别海上溢油,计算油膜位置、面积、周长和置信度等参数,并且具备对进行溢油识别结果进行综合分析等功能。同时利用该系统提取的油膜信息,可以与溢油预测及应急决策支持系统相结合,为海上溢油应急提供有效的技术支持。溢油卫星遥感监测系统的建立和应用,为中海油全方位立体化监测体系的建立奠定了基础,有利于提升中海油海上溢油应急快速反应技术水平。

参考文献(References):

[1] Espdal H A, Wahl T. Satellite SAR Oil Spill Detection Using Wind History Information[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(1): 49-65.
[2] Bern T I, Wahl T, Andersen T, et al. Oil Spill Detection Using

Satellite based SAR: Experience from a Field Experiment[J]. Petroleum Abstracts, 1993, 33: 423-428.
[3] Maritime Safety Administration of the People's Republic of China. Manual of Oil Spill Emergency Response Training [M]. Beijing: China Communications Press, 2004. [中华人民共和国海事局. 溢油应急培训教程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.]
[4] Kongsberg Satellite Services. Oil Spill Detection Service[EB/OL]. <http://www.ksat.no/>, 2012.
[5] Satlantic. OMW Ocean Monitoring Workstation[EB/OL]. <http://www.satlantic.com/>, 2012.
[6] National Satellite Ocean Application Service. Bohai Sea Oil Spill Monitoring System Put Into Trial Operation[EB/OL]. http://www.nsoas.gov.cn/new/channel/detail.asp?Content_id=128,2007,2012. [国家海洋卫星应用中心. 卫星中心渤海溢油遥感监测业务化系统进入试运行[EB/OL]. http://www.nsoas.gov.cn/new/channel/detail.asp?Content_id=128,2007,2012.]
[7] Yuan Junna, Shao Yun, Tian Wei, et al. Introduction of the Method of Discrimination of Oil Spills in SAR Images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(1): 97-101. [原君娜, 邵芸, 田维, 等. 利用 SAR 图像识别海面油膜的方法介绍[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(1): 97-101.]
[8] Su Tengfei, Meng Junmin, Zhang Xi. A Segmentation Algorithm for Oil Spill SAR Image based on Hierarchical Agglomerative Clustering[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(2): 256-265. [苏腾飞, 孟俊敏, 张晰. 基于凝聚层次聚类的溢油检测算法研究[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(2): 256-265.]
[9] Yu Bo. Interpretation and Classification Algorithm for Multi-polarization SAR Image of Sea Ice in Liaodong Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. [于波. 辽东湾海冰多极化 SAR 影像解译分析与分类算法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.]
[10] Wang Ning, Zhang Xi, Ji Yonggang, et al. A Method of MODIS Sea Ice Edge Extraction based on Agglomerative Hierarchical Clustering Method[J]. Journal of Geo-information and Science, 2011, 13(2): 266-272. [王宁, 张晰, 纪永刚, 等. 凝聚层次聚类的 MODIS 海冰外缘线提取算法与应用[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(2): 266-272.]
[11] Solberg A, Clayton P, Indregard M. D2-Report on Bench Marking Oil Spill Recognition Approaches and Best Practice[R]. 2005, 04-10225-A-Doc, Contract No: EVK2-CT_2003-0177.
[12] Brekke C, Solberg A H S. Classifiers and Confidence Estimation for Oil Spill Detection in ENVISat ASR Images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(1): 65-69.

Research and Development of SAR Satellite Remote Sensing System of Ocean Oil Spills

Song Shasha^{1,2}, Zhao Yupeng^{1,2}, Su Tengfei³, Ma Youjun⁴,
An Wei^{1,2}, Meng Junmin³, Zhao Chaofang⁴

(1. *China Offshore Environmental Services Ltd. ,Tianjin 300452,China;*

2. *Research and Development Center for Offshore Oil Safety and
Environmental Technology,Qingdao 266061,China;*

3. *Remote Sensing Department ,the First Institute of Oceanography ,SOA,Qingdao 266061,China;*

4. *Ocean Remote Sensing Institute ,Ocean University of China ,Qingdao 266003,China)*

Abstract: SAR satellite remote sensing system of ocean oil spills has been developed for the operational surveillance in the offshore oil exploration areas of National Offshore Oil Corporation in China. The system is capable of SAR images processing, oil spill automatic detection using the algorithm of agglomeration hierarchy cluster and oil features extraction. The comprehensive analysis of oil detection results is also available including confidence analysis, multi-source and multi-phase data analysis as well as backtracking of oil spill sources. Oil thematic maps are output utilizing oil detection and comprehensive analysis results, which can be overlaid with electronic charts. The system can provide the technical backup and decision support for oil spill early warning and emergent measures implement.

Key words: Oil spills; SAR; Automatic detection; Surveillance system