

基于 DRLSE 模型的 SAR 溢油提取方法

刘善伟¹, 王婉笛¹, 李 潇¹, 陈艳拢^{1,2}, 张 婷³

(1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 3. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 为提高海上溢油轮廓 SAR 提取精度, 验证了 FCM(Fuzzy C-Means Algorithm)与 DRLSE(Distance Regularized Level Set Evolution)模型结合的方法提取 SAR 溢油信息的有效性; 鉴于其无法避免细小噪音的影响以及薄油膜提取效果不好的问题, 提出了阈值和 DRLSE 模型结合的溢油信息提取方法, 通过阈值构建溢油区域初始轮廓, 克服了图像细小噪声对溢油提取的影响, 更有利于提取薄油膜信息, 溢油提取精度优于 $H/A/\alpha$ -Wishart 非监督分类方法和 FCM 与 DRLSE 模型结合的方法。

关键词: DRLSE 模型; SAR; 溢油提取; 阈值

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)01-0153-05

DOI: 10.11759/hyxx20171011006

航海事业和海上石油开发的迅猛发展, 导致海面溢油事故频繁发生^[1], 对海洋生态环境和世界经济都造成了严重影响, 世界各国纷纷加强了海洋环境监控。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术由于其全天时、全天候、覆盖面积大、实时性好的特点, 已被证明是一种有效的海洋溢油监测手段。

溢油面积与溢油量的确定对快速处置溢油事故至关重要, 而溢油边界提取是计算溢油面积和估算溢油量的关键。在 SAR 图像中, 溢油的散射回波强度降低, 其在图像中呈现深色, 与周边海水图像的亮色形成对比^[2], 据此可以通过图像分割提取溢油边界。图像分割是图像处理和分析中的重要问题, 包括阈值法、边缘检测法、区域分割方法、基于人工神经网络的分割方法、基于小波分析和变换的分割方法、基于模糊集理论的分割方法、基于偏微分方程的分割方法等^[3]。近年来水平集分割方法备受关注, 它作为一种基于变分法和偏微分方程的方法, 能够表示复杂的拓扑结构轮廓并自然有效地处理拓扑结构的变化。水平集方法包括很多模型, 其中 DRLSE (Distance Regularized Level Set Evolution)模型相较于 Chan-Vese 模型、局部二值拟合模型等均有明显的改善, 但也存在初始轮廓确定困难的问题^[4]。

本文针对 DRLSE 模型的不足, 将应用于医学图像的 FCM(Fuzzy C-Means Algorithm)和 DRLSE 模型结合的分割算法应用于 SAR 溢油提取, 验证了其有效性; 提出了阈值法和 DRLSE 模型结合的分割算法,

提高了溢油提取精度。

1 水平集模型与改进

1.1 DRLSE 模型

水平集方法^[5]的实质其实是曲线的演变问题。曲线演变方程为:

$$\frac{\partial C(s, t)}{\partial t} = FN \quad (1)$$

公式(1)中, C 表示演变的曲线, C 对 t 求导得到的是曲线上每一个点的运动速度(向量); F 为速度函数, 控制轮廓曲线的演变运动; N 为曲线的法线方向。

参数曲线演化的过程可以转化为求解更高一维空间中的水平集函数 $\phi(x, y, t)$ 的零水平集, 即目标轮廓, 则曲线演变方程就可以转化为公式(2)所示的偏微分方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F |\nabla \phi| \quad (2)$$

这就是水平集演化方程, 它给出的活动轮廓模型被称为几何主动轮廓模型, 模型初始化的标准方

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1405600); 国家自然科学基金(41706208, 41776182); 山东省自然科学基金(ZR2016DM16)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFC1405600; National Natural Science Foundation of China, No.41706208, No.41776182; Shandong Natural Science Foundation of China, No.ZR2016DM16]

作者简介: 刘善伟(1982-), 男, 山东青岛人, 副教授, 博士, 从事海洋遥感研究, E-mail: shanweiliu@163.com; 陈艳拢, 通信作者, 副研究员, E-mail: ylchen@nmemc.org.cn

法是保证公式(3)处于稳定状态:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \text{sign}(\phi_0)(1 - |\phi|) \quad (3)$$

公式(3)中: ϕ_0 为需要重新初始化的水平集函数; sign 为符号函数。

在理想情况下, 方程的稳定状态解 ϕ_0 是一个符号距离函数。尽管重新初始化能够获得规则的水平集函数, 但也不可能无法正确使零水平集函数运动至目标边界, 并且在实际操作过程中何时重新初始化也是个关键问题。

2010 年, Li 等^[6]提出的 DRLSE 模型解决了重新初始化的问题, 通过引入新的距离正则项, 即对传统活动轮廓模型中的能量泛函上再添加一项内部能量泛函, 用于纠正水平集函数与符号距离函数之间的偏差, 从而达到水平集函数在演化过程中无须周期性地重新初始化水平集函数的目的。该活动轮廓模型设计了一个关于演化曲线的能量泛函, 定义为:

$$\varepsilon(\phi) = uR_p(\phi) + \varepsilon_{\text{ext}}(\phi) \quad (4)$$

$R_p(\phi)$ 为水平集函数 ϕ 的内部能量泛函, 用于定量地纠正水平集函数与符号距离函数之间的偏差, $\varepsilon_{\text{ext}}(\phi)$ 为外部能量函数, 依赖于图像特征, 用于驱使零水平集向目标边界演化并在到达边界时获得最小值。

DRLSE 模型法可用于分割均匀或边界清晰图像, 但由于 SAR 图像背景复杂、边缘模糊、斑点噪声严重的特点, 当其运用在 SAR 图像分割时存在如下问题^[6]: 一旦初始轮廓曲线与目标交叉, 则无法正确分割, 因此 DRLSE 模型未能解决演化曲线的自适应运动和对初始位置敏感的问题; SAR 图像弱边缘时存在边缘不封闭问题。

1.2 FCM 和 DRLSE 模型结合

DRLSE 模型运用在 SAR 图像分割时存在上述提到的各种不足。FCM 是一种适用于边缘模糊区域分割的通用方法, 也是目前最广泛使用的模糊聚类算法之一^[7], 但是传统的单一 FCM 适用于无噪声图像的分割。对于本文具有噪声、特殊点值、瑕疵且边缘模糊、灰度值不均匀的 SAR 图像分割则不能准确分类, 在医学领域^[8]针对颅脑出血 CT 图像中存在出血病灶不明显、边界不规则、不连续及含有高噪声现象。FCM 和 DRLSE 模型结合进行颅脑出血 CT 图像分割的方法被首次提出。基于 SAR 图像与 CT 图像的相似性, 本文将 FCM 与 DRLSE 模型结合^[7], 应用于 SAR 图像溢油信息提取, 验证算法在 SAR 图

像溢油信息提取应用中的有效性。

1.3 阈值法和 DRLSE 模型结合

阈值法是一种简单有效的图像分割方法。对灰度图像的阈值分割就是先确定一个处于图像灰度取值范围之中的灰度阈值, 然后将图像中各个像素的灰度值都与这个阈值相比较, 并根据比较结果将对应的像素分为两类, 从而达到分割的目的。确定一个最优阈值是阈值分割的关键。而 DRLSE 模型算法的初始轮廓对图像分割的精准度至关重要, 对于灰度值均一、边缘规则光滑的普通图像进行图像分割, 初始轮廓设置为简单初始矩形或者椭圆边框即可满足精度需求, 但是对于由于油膜厚度不均而在图像上反应为灰度值不均匀、溢油区域边缘模糊、噪声比较大的溢油 SAR 图像, 简单设置的初始轮廓无法精确进行溢油 SAR 图像的分割。该方法首先使用阈值分割的方法确定阈值, 然后将这个阈值代入 DRLSE 模型的初始轮廓函数, 由此确定 DRLSE 模型的初始轮廓, 解决 DRLSE 模型对初始位置敏感以及 SAR 图像弱边缘不封闭的问题, 同时避免水平集初始轮廓曲线与目标交叉, 最终准确分割溢油区域, 提高 DRLSE 模型提取 SAR 图像溢油信息的精度。

2 实验

2.1 数据

实验数据源于 2010 年 4 月 20 日的墨西哥湾溢油事件, 选用的数据为 2010 年 5 月 8 日的 Radarsat-2 (HH、VV、HV、VH) 影像, 其成像波束为 Q5, 距离向分辨率 12 m, 方位向分辨率 8 m, 是 C 波段单视复合数据, 如图 1。

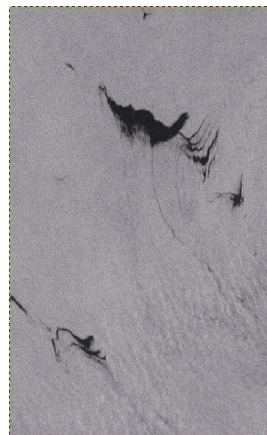


图 1 墨西哥湾某溢油区域 Radarsat-2 影像

Fig. 1 Radarsat-2 image of oil spill area in Mexico Bay

2.2 实验方法与结果

本实验首先应用 FCM 算法与 DRLSE 模型结合方法进行 SAR 溢油提取, 验证该方法在 SAR 溢油提取中的有效性; 然后利用本文提出的阈值法与 DRLSE 模型结合方法进行 SAR 溢油提取, 并与常规的 $H/A/\alpha$ -Wishart 非监督分类方法对比。

2.2.1 FCM 和 DRLSE 模型结合的溢油信息提取

首先对 SAR 图像做模糊聚类, 然后利用 DRLSE 模型对溢油边界提取, 结果如图 2 所示。

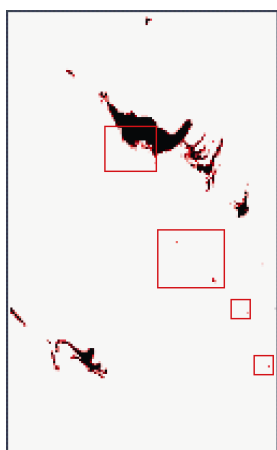


图 2 FCM 与 DRLSE 模型结合的溢油提取结果

Fig. 2 Oil-spill results combined with FCM and DRLSE model

2.2.2 阈值和 DRLSE 模型结合的溢油信息提取

构建 SAR 图像灰度直方图(图 3), 通过分析溢油与海水的灰度值分布, 以溢油与海水灰度峰值间的中间值做阈值参数(本文阈值为 110), 代入 DRLSE 模型的初始轮廓函数生成模型初始轮廓(图 4), 阈值的选取以初始轮廓不与溢油边缘交叉为原则, 然后利用 DRLSE 模型对 SAR 图像进行分割, 提取溢油边界, 如图 5 所示。

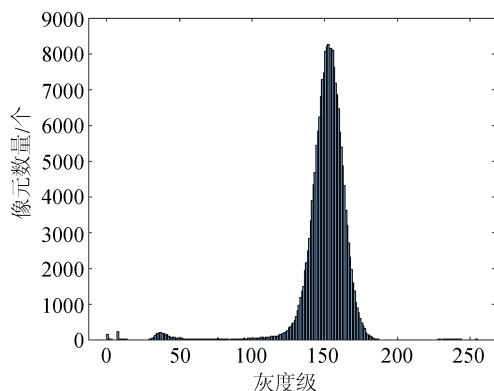


图 3 灰度直方图

Fig. 3 Gray-scale histogram

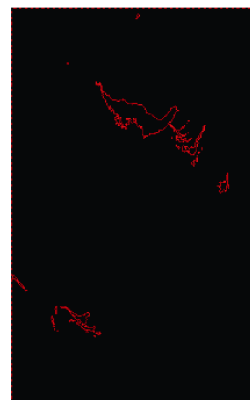


图 4 溢油初始轮廓

Fig. 4 Initial outline of oil spill

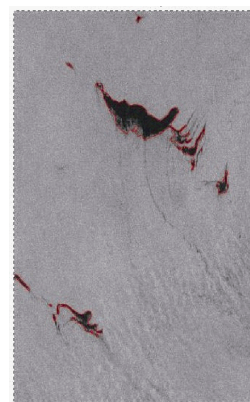


图 5 阈值和 DRLSE 模型结合的溢油提取结果

Fig. 5 Oil-spill results combined with threshold and DRLSE model

2.2.3 $H/A/\alpha$ -Wishart 非监督分类

对 SAR 图像进行 $H/A/\alpha$ -Wishart 非监督分类。先对 SAR 图像进行 Lee Refined Filter 滤波处理, 在抑制 SAR 图像相干斑噪声的同时, 较好地保持溢油区域的边缘特征; 再对滤波处理后的 SAR 图像进行 $H/A/\alpha$ 分解, 将分解所得到的 H 、 A 、 α 作为特征向量进行初步分类^[9]; 最后基于上述初步分类结果进行 Wishart 分类, 结果如图 6 所示。

2.3 结果分析

(1) 常规 $H/A/\alpha$ -Wishart 非监督分类方法提取的溢油区域边缘模糊, 精度较差, 会将图像噪声错分为溢油信息。

(2) FCM 与 DRLSE 模型结合的方法, 解决了 DRLSE 模型初始轮廓曲线与目标交叉无法正确分割、对初始位置敏感以及图像弱边缘时存在边缘不封闭等问题, 可以有效应用于 SAR 溢油信息的提取, 但对薄油膜提取效果不好, 如图 2 红色方框。



图 6 $H/A/\alpha$ -Wishart 非监督分类图

Fig. 6 Unsupervised classification diagram by $H/A/\alpha$ -Wishart

(3) 阈值和 DRLSE 模型结合的方法, 针对噪声较大、边界较模糊、灰度不均匀的 SAR 溢油图像, 能够较好地提取薄油膜信息, 由于应用了溢油区域初始轮廓, 不会把图像的噪声错分为溢油信息, 溢油区域边缘清晰。

3 结论

(1) FCM 与 DRLSE 模型结合的方法, 能够有效应用于 SAR 溢油信息的提取, 但对薄油膜提取效果不好。

(2) 提出的阈值和 DRLSE 模型结合的溢油信息提取方法, 通过阈值构建溢油区域初始轮廓, 克服了图像细小噪声对溢油提取的影响, 更有利于提取薄油膜信息, 溢油提取精度优于 $H/A/\alpha$ -Wishart 非监督分类方法和 FCM 与 DRLSE 模型结合的方法。

参考文献:

- [1] 赵谱. 我国船舶溢油污染事故溢油量评估方法及其应用[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(4): 469-472.
Zhao Pu. Method and application of assessment on oil

spill quantity from ship accident[J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(04): 469-472.

- [2] 石立坚, 赵朝方, 刘朋. 基于纹理分析和人工神经网络的 SAR 图像中海面溢油识别方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(6): 1269-1274.
Shi Lijian, Zhao Chaofang, Liu Peng. Oil Spill Identification in Marine SAR Images Based on Texture Feature and Artificial Neural Network[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2009, 39(6): 1269-1274.
- [3] 王俊. SAR 影像溢油目标边缘提取方法及实现[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
Wang Jun. The extraction method and realization of the oil spill target edge of SAR image [D]. Dalian Maritime University, 2009.
- [4] Li Chunming, Xu Chenyang, et al. Distance Regularized Level Set Evolution and Its Application to Image Segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Process, 2010, 19(12): 3243-3254.
- [5] Osher S, Sethian J. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations[J]. Comput Phys, 1988, 79: 12-49.
- [6] 沈凌云, 朱明. 改进的距离正则化水平集演化方法[J]. 北京工业大学报, 2015, 41(5): 674-679.
Shen Lingyun, Zhu Ming. Improved Method of Distance Regularized Level Set Evolution[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(5): 674-679.
- [7] Sethian J A. Level set Methods and Fast Marching Methods[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [8] Gupta D, Anand R S, et al. A Hybrid Segmentation Method Based on Gaussian Kernel Fuzzy Clustering and Region Based Active Contour Model for Ultrasound Medical Images[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2015, 16: 98-112.
- [9] 刘桢. 基于极化信息的 SAR 地物分类技术研究[D]. 洛阳: 解放军信息工程大学, 2010.
Liu Zhen. SAR Land Classification Technology Research Based on Polarimetric Information[D]. Luoyang: The PLA Information Engineering University, 2010.

SAR oil-spill extraction method based on DRLSE model

LIU Shan-wei¹, WANG Wan-di¹, LI Xiao¹, CHEN Yan-long^{1, 2}, ZHANG Ting³

(1. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023 China; 3. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Oct. 11, 2017

Key words: DRLSE model; SAR; oil spill extraction; threshold

Abstract: In this study, we evaluated the SAR information extraction of oil spilled at sea and the effectiveness of combining the fuzzy C-means (FCM) and distance regularized level set evolution (DRLSE) models to extract SAR oil-spill information. In light of the inability of this approach to prevent small-noise effects and its poor thin-oil-film extraction performance, we propose a method for extracting oil-spill information that combines threshold data and the DRLSE model. With this method, the initial contour of the oil-spill region is constructed based on the threshold, which overcomes the influence of small noises on the oil extraction, and the extraction of thin-oil-film information is facilitated. Our method demonstrates better oil-extraction precision than the $H/A/\alpha$ -Wishart unsupervised classification method and the combined FCM and DRLSE models.

(本文编辑: 李晓燕)