

文章编号: 1007-4619(2005)05-0549-06

SAR 影像中海洋浮油膜特征分割的 Level Set 方法

黄晓霞¹, 李红春¹, 黄波²

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 新加坡国立大学工程系, 新加坡 119260)

摘 要: 介绍了一种全新的区域影像分割技术——基于迎风格式偏微分方程 (PDE) 的 Level Set 方法进行海洋浮油膜特征提取。在该方法中, 海洋浮油膜特征表示为扩散界面, 影像灰度的梯度决定了界面扩散的方向和强度。界面边缘在影像灰度差异动力和曲率流的作用下不断向外扩散, 能够有效地克服尖锐突起和裂缝等, 在特征边缘趋于稳定和光滑。同时, 该方法对高噪声具有一定抑制作用, 适用于低对比度高噪声图像, 特别是 SAR 图像中特征提取。以不同地区 ERS-2 SAR 图像中海洋浮油膜提取为例, 进行方法验证, 同时对传统的影像分割技术进行对比。

关键词: 影像分割; Level Set; 海洋浮油膜; SAR

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

海底油气藏烃类渗漏、海上溢油和海洋生物的活动均可在海面形成表面膜, 该表面膜改变海洋表层的 (物理) 特性, 使可见光、雷达波的反射特性改变, 因而可用遥感的方法检测到海面上的这层表面膜^[1]。其中海底油气藏烃类渗漏成因的浮油膜对现代海洋油气资源的勘探能起到重要的指示作用, 有效地提取油膜的分布范围是对其时空变化特征进行研究的首要条件^[2]。

卫星雷达技术是一种主动式有源探测方式, 不需要自然光源, 能够穿透云雾。与其它可见光、红外等光学遥感器相比, 具有全天候观测能力。众所周知, 由于内在的雷达波后向散射作用, 雷达图像受到较强的噪声干扰。在海洋上, 浮油膜区域形成的 Bragg 波抑制雷达后向散射, 浮油膜在图像上显示为较暗的斑点或条带, 而周围波浪形成明暗混杂的背景数据^[3]。海洋波浪的干扰, 造成海洋雷达数据高噪声和低对比度, 严重影响了浮油膜特征的提取与解译。

为了消除雷达噪声, 大量基于物理和数学方法的滤波处理不断被提出, 例如基于高斯-马尔可夫随

机场 Gaussian MRF (Gaussian Markov Random Field) 和 Gamma MRF 模型, 迟滞性阈值处理^[4]等。经典的方法是采用几何滤波, 例如 Lee 滤波^[5]、增强 Lee 滤波^[6]、Kuan 滤波^[7]、Gamma 滤波^[8]、增强 Frost^[9]等, 来抑制噪声。Han 等和 Shi 等对以上滤波进行了对比^[10, 11], 以上滤波利用卷积的方式抑制噪声的同时, 会造成特征边界的模糊, 影响特征的提取。如果采用较大滤波窗口, 噪声抑制幅较大, 但是会出现分辨率的下降。如果采用较小滤波窗口, 分辨率得到保持, 但是连续噪声会形成似是而非的边界点, 特征边界受到干扰而显得不完整。因此, 在高噪声情况下, 往往采用复杂边界或区域的图像分割技术, 例如 Level Set 进行特征提取^[12-14]。

在本文中, Level Set 被进一步发展应用于海洋 SAR 图像的浮油膜提取, 该方法将图像中强度与曲线模型集成在一起, 图像强度驱动与曲线驱动作为波前传播速度。根据预先设定的初始 Level Set 通过迎风格的偏微分方程, 在强噪声低对比度海洋 SAR 图像中, 计算出浮油膜的边界, 提取浮油膜区域。

2 Level Set 原理介绍

Level Set 由 Osher and Sethian 于 1988 提出, 是

收稿日期: 2004-01-15; 修订日期: 2004-07-20

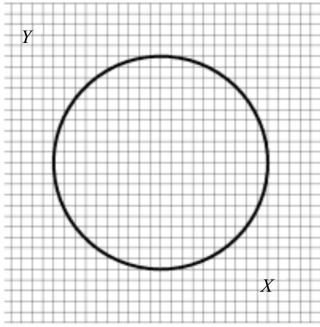
基金项目: 国家自然科学基金项目 (49901016) Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 黄晓霞 (1970—), 女, 副研究员, 1998 年毕业于中国科学院遥感应用研究所, 制图学与遥感专业, 博士学位, 现主要从事遥感图像处理和矿产资源遥感应用研究, 发表文章 10 余篇。E-mail: hxx@irsa.ac.cn

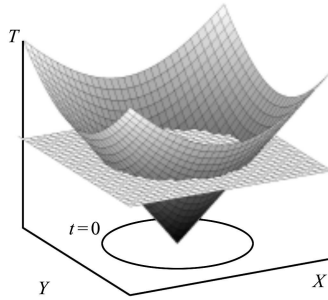
一种有效的界面扩散数值方法。在 Level Set方法中, Lipschitz函数, $\phi(x, t)$ 表示为在 R^{n+1} 空间中 n 维的界面, 其中 $x \in R^{n+1}$, t 为计算时间(图 1)。界

面由点集 S 构成, 其中 k 为任意等级数据

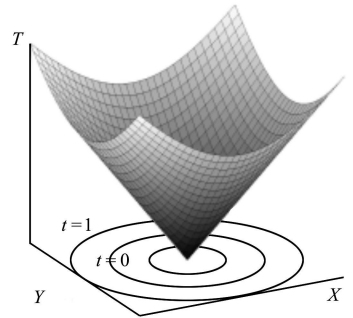
$$S = \{x \mid \phi(x, t) = k\} \tag{1}$$



(a) 曲面在均匀平面的投影



(b) t 时刻的 Level Set集



(c) 不同时刻的 Level Set

图 1 Level Set原理

Fig 1 Illustration of Level Set

初始时刻的零界面表示为: $\{\phi(x, t=0) = 0\}$ 。Level Set是拓扑自由的, 因此初始时刻的零界面可以是任意形状。

不同时刻下, Level Set界面扩散可以表示为时间的偏微分方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F|\nabla \phi| \tag{2}$$

其中, F 是标量函数, 表示波前扩散速度, 其方向为波前运动的法线方向, $|\nabla \phi|$ 表示为有限差分算子, ∂t 为时间步长。

3 浮油膜特征 Level Set分割方法

利用 Level Set进行应用于海洋 SAR 图像的浮油膜提取流程见图 2, 其中 Level Set方法, 包括了影像强度驱动模型和曲线驱动模型。为了进一步说明该方法, 在选择初始零界面时, 我们分别采用了自动和半自动(交互)方式, 以显示 Level Set模型的拓扑自由特性以及克服强噪声特征的分割能力。

3.1 Level Set进行 SAR 图像分割

根据公式(2), 界面随时间传播的数值公式可以表示为:

$$\phi(x, t + \partial t) = \phi(x) + \Delta t \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{3}$$

以上公式可以扩展到二维, 即在 SAR 图像上, 每一个像素代表一个具有 (x, y) 坐标的均匀格网点, 例如 ϕ_{ij}^n 表示界面点集中元素在像素 (i, j) , n

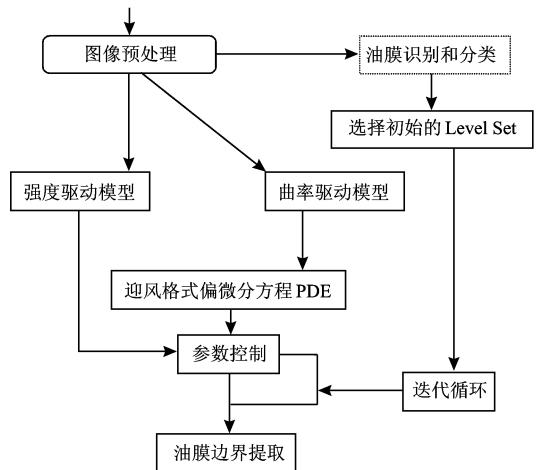


图 2 自动/半自动浮油膜提取流程

Fig 2 Automatic/semi-automatic oil spill extraction using a Level Set surface method

时刻, 则以上数值公式表示为

$$\frac{\phi_{ij}^{n+1} - \phi_{ij}^n}{\Delta t} + F|\nabla_{ij} \phi_{ij}^n| = 0 \tag{4}$$

在界面点集中任意元素的法线方向为

$$n = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \tag{5}$$

波前扩散速度 F , 可以进一步分为扩散驱动速度和曲线驱动速度。

$$F = F_{pmp} + F_{curv} \tag{6}$$

其中, F_{pmp} 为扩散驱动速度, $F_{curv} = -\epsilon \kappa$ 是曲线驱动速度, 表示 >0 的常量, κ 表示平面曲线的曲率。波前扩散速度决定着边界扩散的速度和运动的方向, 在模型中起着重要作用(图 3)。

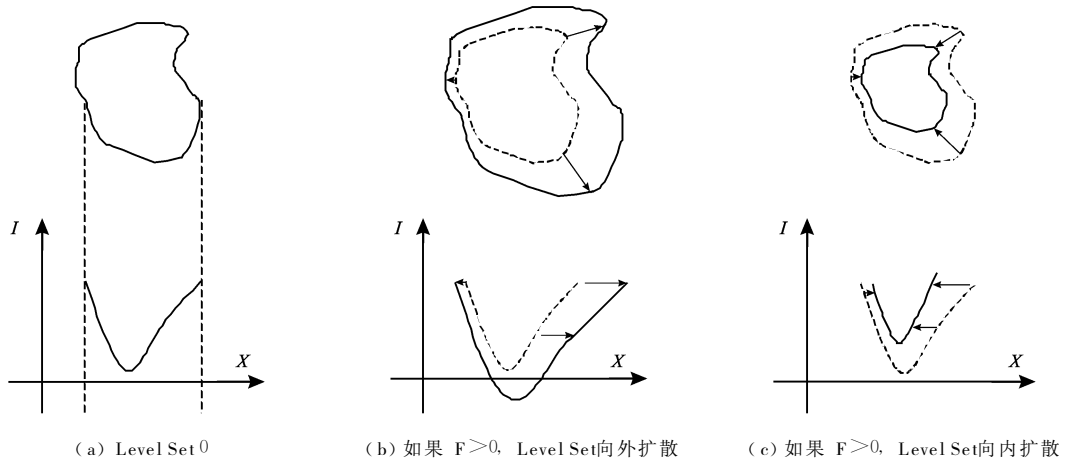


图 3 Level Set 扩散与波前扩散速度
Fig 3 Propagation direction of Level Set

3.2 影像强度驱动模型

特征区域在影像中表现为内部强度“均匀”的具有一定空间区域,在 SAR 影像处理中,我们将扩散驱动速度与影像强度值相联系,即影像强度如果属于浮油膜特征内部,则构造较大扩散驱动速度,而在特征区域边界时将扩散驱动速度趋于零,也就是停止扩展。

我们将基于浮油膜特征的影像强度驱动模型定义为:

$$I_{average} = (I_{lower} + I_{high}) / 2$$

$$F_{prop} = \begin{cases} I(x, y) - I_{lower} & \text{if } I(x, y) \leq I_{average} \\ I_{high} - I(x, y) & \text{if } I(x, y) \geq I_{average} \end{cases} \quad (7)$$

其中 $I(x, y)$ 表示在空间坐标 x, y 的像素强度, I_{lower} 和 I_{high} 分别表示浮油膜强度分布的上下门限。可以看出,该模型表示 Level Set 界面只在灰度是 I_{lower} 和 I_{high} 内部向外运动,而在 I_{lower} 和 I_{high} 区域外部则向内部收缩。

3.3 曲线驱动模型

曲线驱动速度,是表示特征区域边界曲线的运动,由具有特定空间位置(特征边界)的像素空间坐标和强度决定。利用差分方程,Level Set 界面边缘上任意点的平均曲率可以由其波前的单位法向量的散度表示,即

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} = \frac{\phi_{xy} \phi_y^2 - 2\phi_x \phi_{xy} \phi_{xy} + \phi_{xy} \phi_x^2}{(\phi_x^2 + \phi_y^2)^{3/2}} \quad (8)$$

这里为了达到边界稳定和简化计算,采用迎风格式的偏微分方程,只计算从上风向到下风向的扩散运动,从而避免在边界上叠代。

根据 8 个邻域,分别定义向前差分算子 D^+ 、向

后差分算子 D^- 和中心差分算子,例如在 SAR 影像中,沿 x, y 轴等距离间隔为 h 时间 t 的差分算子 $u(x, y, t)$,根据一阶二阶序可以定义为:

$$\begin{cases} D_x^+ u(x, y, z) = \frac{u(x+h, y, z) - u(x, y, z)}{h} \\ D_x^- u(x, y, z) = \frac{u(x, y, z) - u(x-h, y, z)}{h} \\ D_x u(x, y, z) = \frac{u(x+h, y, z) - u(x-h, y, z)}{2h} \\ D_x^{+y} u(x, y, t) = \frac{u(x+h, y+h, t) - u(x-h, y+h, t)}{2h} \\ D_x^{-y} u(x, y, t) = \frac{u(x+h, y-h, t) - u(x-h, y-h, t)}{2h} \\ D_y^{+x} u(x, y, t) = \frac{u(x+h, y+h, t) - u(x+h, y-h, t)}{2h} \\ D_y^{-x} u(x, y, t) = \frac{u(x-h, y+h, t) - u(x+h, y-h, t)}{2h} \end{cases} \quad (9)$$

因此,Level Set 界面边缘在 x, y 点的散度可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial n_x}{\partial x} = n_x^+ - n_x^- \\ \frac{\partial n_y}{\partial y} = n_y^+ - n_y^- \end{cases} \quad (10)$$

其中,边缘法向量, n^+ 和 n^- , 定义为:

$$n^+ = \begin{cases} \frac{D_x^+}{4 \sqrt{(D_x^+)^2 + \left(\frac{D_y^{+x} + D_y^-}{2}\right)^2}} \\ \frac{D_x^+}{4 \sqrt{(D_y^+)^2 + \left(\frac{D_x^{+y} + D_x^-}{2}\right)^2}} \end{cases} \quad (11)$$

$$n^- = \left\{ \begin{array}{l} \frac{D_x^-}{4 \sqrt{(D_x^-)^2 + \left(\frac{D_y^- + D_x^-}{2}\right)^2}} \\ \frac{D_y^-}{4 \sqrt{(D_y^-)^2 + \left(\frac{D_x^- + D_y^-}{2}\right)^2}} \end{array} \right. \quad (12)$$

4 实验与分析

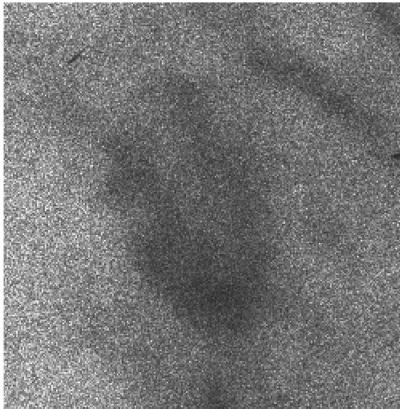
具有浮油膜特征的实验数据分别采用以下渤海海域两个地区的 ERS-2 SAR 图像:

- ERS-2 SAR 影像, 大小为 336 × 352 像元, 时间为 1996-08-03.
- ERS-2 SAR 影像, 大小为 295 × 360 像元, 时

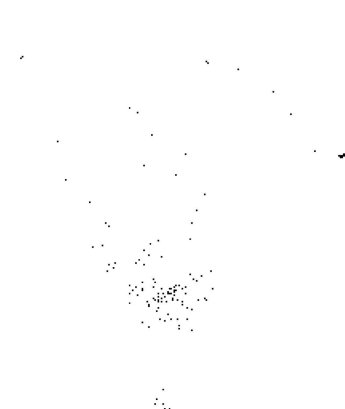
间为 1996-06-05.

图像分割分别采用自动与半自动形式, 以说明该方法的用途. 此外, 为了测试效果, 第一幅图像直接采用原始图像, 没有进行预处理 (例如去噪声处理、增强滤波), 而第二幅图像则简单做了直方增强.

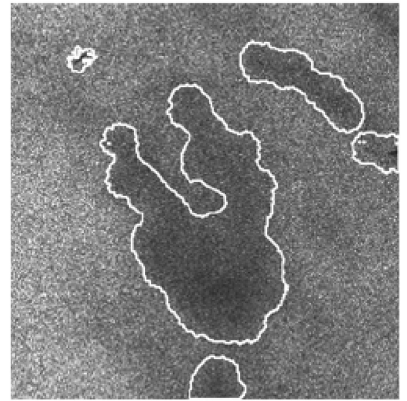
对于渤海实验区的 SAR 影像 (图 4(a)), 采用自动图像分割, 利用阈值分割的少数像素作为初始 Level Set 值 (图 4(b)). 随着迭代次数的增加 (<50 次), Level Set 边缘不断扩散, 很快在特征区域边缘达到平衡, 并停止扩散 (图 4(d)). 由于加入了影像强度驱动模型, 可以利用 I_{low} 和 I_{high} 来控制浮油膜特征边界的范围, 不同的强度门限, 决定了不同的特征范围 (图 4(c), (d), (e)).



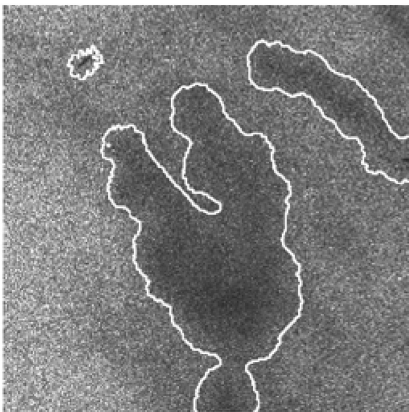
(a) ERS-2 SAR 影像, 大小为 336 × 352 像元, 位于渤海, 时间 1996-08-03



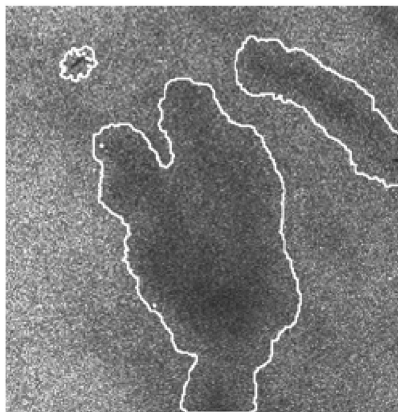
(b) 初始 Level Set 值 (阈值分割而成)



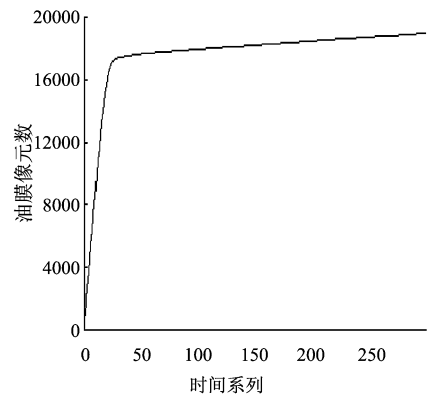
(c) 分割结果 $I_{low} = 0.0$, $I_{high} = 0.32$



(d) 分割结果 $I_{low} = 0.0$, $I_{high} = 0.38$



(e) 分割结果 $I_{low} = 0.0$, $I_{high} = 0.44$

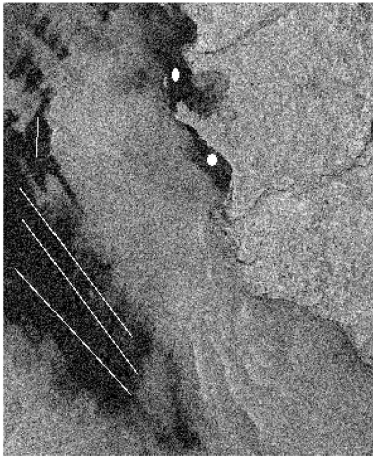


(f) 特征分割中特征区域像素和迭代时间对比 (对应图 (e))

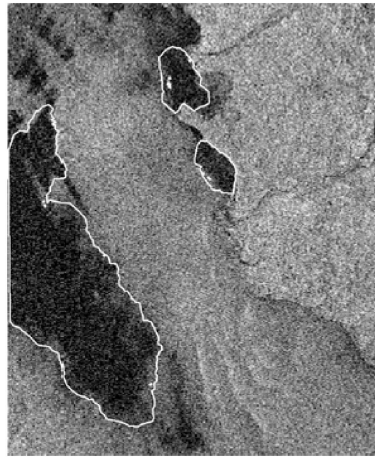
图 4 渤海实验区 Level Set 浮油膜特征分割

Fig 4 Level Set-based segmentation of surface slicks in Bohai sea

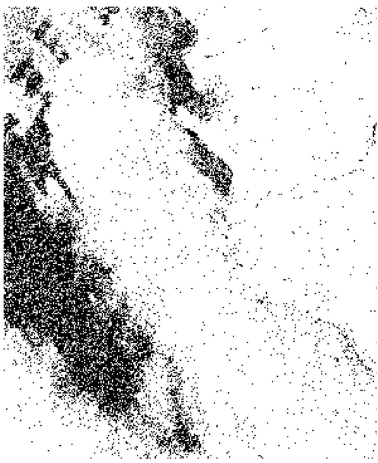
对于渤海实验区的 SAR 影像 (图 5(a)), 采用 Set 值可以是任意的点、线、面, 经过迭代, 最后总是交互式确定初始 Level Set 值 (图 5(a)), 初始 Level 趋于一个稳定的边界 (图 5(b)). 同时, 采用传统



(a) ERS-2 SAR 影像, 位于渤海, 时间为 1996-06-05
(白色短线和圆初始 Level Set 值)



(b) 分割结果 $I_{lower}=0$, $I_{high}=0.26$



(c) 阈值分割结果



(d) 种子填充方法分割结果

图 5 Level Set 浮油膜特征分割方法对比

Fig 5 Level Set-based segmentation in contrast to the conventional approaches

的影像分割方法如阈值分割(图 5(c))和种子填充方法(图 5(d))进行对比。

这里可以看出, 由于受到海洋上波浪以及内在噪声的影响, SAR 影像中浮油膜特征常常与背景相混淆, 采用传统的影像分割方法, 得到的区域边缘成锯齿形, 同时内部有较多的缝隙与孔洞, 而采用 Level Set 分割方法, 可以在较大噪声和低对比度的情况下, 得到比较光滑的边界, 而且内部均匀。

此外, 尽管自动半自动方法设置不同初始值, 区域边缘将不断扩展、合并、分裂、收缩以达到稳定的边界, 这说明了 Level Set 分割方法具有拓扑不变性, 不受背景纹理、噪声、强度的影响, 适用于浮油膜特征的提取。

5 结 论

在本文中, 我们介绍了一种与常规基于空间和频率遥感图像处理完全不同的方法, 即基于流体扩散的 Level Set 图像分割方法。采用影像强度和边界曲线作为特征边缘扩散驱动力, 克服了 SAR 影像高噪声和低对比度, 提取了海洋浮油膜区域。同时, 该方法与传统的影像分割方法相比, 受到的噪声干扰较少, 边缘较光滑内部均匀。因此, 本方法是一种具有发展前景的新兴遥感图像处理方法。

参考文献 (References)

- [1] Fiscella B, Giancaspro A, Nirchio F, et al. Oil Spill Detection

- Using Marine SAR Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, **21**: 3561—3566.
- [2] Huang X, Zhu Z. Oil and Gas Resources Detection Using SAR Images in the Bohai Bay [A]. Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing (Vancouver) [C], 1999, March 1—3.
- [3] Liu G, Xiong H, Huang S. Study on Segmentation and Interpretation of Multi-look Polarimetric SAR Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, **21**: 1675—1691.
- [4] Kanaa T, Tonye E, Mercier G, et al. Detection of Oil Slick Signatures in SAR Images by Fusion of Hysteresis Thresholding Responses [A]. IGARSS'03 (Toulouse: IEEE) [C], 2003, July: 21—25.
- [5] Lee J S. Speckle Suppression and Analysis for Synthetic Aperture Radar Images [J]. Optical Engineering, 1986, **25**: 636—643.
- [6] Lee J S, Jurkevich I, Dewaele P, et al. Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: a Review [J]. Remote Sensing Reviews, 1994, **8**: 313—340.
- [7] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, et al. Adaptive Restoration of Images with Speckle [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, **35**: 373—383.
- [8] Lopes A, Nezry E, Touzi R, et al. Structure Detection and Statistical Adaptive Speckle Filtering in SAR Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, **14**: 1735—1758.
- [9] Frost V S, Stiles J, Shamugan K, et al. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, **4**: 157—166.
- [10] Han C M, Guo H D, Wang C L, et al. A Novel Method to Reduce Speckle in SAR Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, **23**: 5095—5101.
- [11] Shi Z H, Fung K B. A Comparison of Digital Speckle Filters [C]. IGARSS'94 (New York: IEEE) [C], 1994.
- [12] Osher S, Sethian J. Fronts Propagating with Curvature-dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations [J]. Journal of Computational Physics, 1988, **79**: 12—49.
- [13] Sethian J A. Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [14] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image Processing: Analysis and Machine Vision, 2nd edition [M]. USA: Brooks/Cole Publishing Company, 1999.

Oil Slicks Extracted by Level Set Method in Synthetic Aperture Radar Images

HUANG Xiao-xia¹, LI Hong-ga¹, HUANG Bo²

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Department of Civil Engineering, National University of Singapore, Singapore 119260)

Abstract The special indications in Synthetic Aperture Radar images formed by oil slicks on ocean surface, which are seeped from hydrocarbon under sea bed, is important to search ocean oil and gas resources. This paper explores the segmentation of oil spills using a partial differential equation (PDE) level set method, which represents the oil slick surface as an implicit propagation interface. Specifically, the image intensity gradient is utilized as the impetus and direction for oil slick propagation. The integration of the intensity driven speed and curvature flow into the method allows the front interface to propagate naturally with topological changes, significant protrusions and narrow regions, giving rise to a stable and smooth boundary. In addition, it reduces the speckles simultaneously. The proposed method has been illustrated by experiments on oil slick segmentation using the ERS-2 SAR images. Its advantages over the traditional image segmentation approaches have also been demonstrated.

Key words image segmentation; Level Set; oil slicks; SAR