

基于优化活动轮廓模型的 SAR 影像 海陆分割方法研究 *

单子力^{1,2}, 王 超¹, 张 红¹

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 利用 Gamma 分布拟合 SAR 影像, 并将其用于构造基于区域信息的能量函数, 提出了一种基于活动轮廓模型的 SAR 影像海陆自动分割方法。该方法在能量函数中同时融合了边缘和区域信息, 既有利于边界精确定位, 又有利于降低乘性斑噪的影响, 利用活动轮廓演化模型, 通过变分水平集方法推动活动轮廓曲线向海岸线演化, 在最小化特定能量函数的约束下, 使活动轮廓与海岸线重合, 达到影像分割的目的。同时, 针对该模型提出了优化方法提高其计算效率, 使提出的分割算法更加实用。实验结果表明, 提出的方法能够克服 SAR 影像的斑噪, 较快速准确地分割出海陆边缘。

关键词: 海陆分割; 合成孔径雷达影像; 活动轮廓模型; 水平集

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2011)06-2339-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.06.093

Sea-land segmentation based on advanced active contour model for SAR imagery

SHAN Zi-li^{1,2}, WANG Chao¹, ZHANG Hong¹

(1. Center for Earth Observation & Digital Earth, Chinese Academy of Science, Beijing 100094, China; 2. Graduate school of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: This paper adopted Gamma distribution to fit the image and used it in the construction of the region information based energy function. Thus proposed an automatic active contour model based sea-land segmentation method for SAR imagery. This method combined both edge information and regional information in the energy function which was propitious to both border accurate positioning and decreasing the multiplicative speckle noise effect. The model forced the active contour to the real coastline by variation level set. Under the restriction of minimizing the constructed energy function, the method obtained the final segmentation result when the active contour was overlapped on the coastline. In addition, proposed an optimizing method to improve its computation efficiency, which made our segmentation method more applicable. Experiment results indicate the proposed method can overcome the speckle effects and segment the edges between ocean and land precisely and quickly.

Key words: sea-land segmentation; SAR imagery; active contour model; level set

0 引言

利用星载 SAR 数据进行海洋中目标检测是 SAR 影像常见的应用领域之一, 但现有的目标检测算法的局限性表现在, 若对包含陆地区域的 SAR 影像直接使用目标检测算法会产生很高的虚警, 检测效果不能令人满意。这主要是因为陆地上存在大量的强散射体, 如高大建筑物、起重机等, 影响了检测算法的性能。

目前的 SAR 影像海陆分割方法主要有基于边缘纹理特征的自动分割、基于图形学的手动分割^[1]以及基于海图信息的自动分割方法^[2]。基于边缘纹理特征的方法认为海洋区域和陆地区域对雷达波具有不同的散射特性, 利用边缘检测来获得图像的边缘纹理信息, 进行海陆分割。但 SAR 影像有时在近距的高亮区域内会产生大量干扰边缘纹理, 因此对该方法影响较大。手动分割通过手动圈定陆地区域, 获得陆地掩模, 虽然可以获得较精确的分割结果, 但不适用于批量处理。基于海图

信息的自动分割也能够获得较精确的分割结果, 但其依赖成像地区的先验信息, 从而在一定程度上限制了该方法的使用范围。

基于活动轮廓模型的方法在图像分割领域近年受到广泛关注, 按照曲线表示方式的不同分为参数化活动轮廓模型^[3]和几何活动轮廓模型^[4,5]。前者使用参数曲线方程显式地表示演化曲线, 后者通过定义在三维坐标系下的符号距离函数 (signed distance function) 的零水平集隐含地表示演化曲线, 表示方式更加灵活。因此, 本文提出了一种基于几何活动轮廓模型的 SAR 影像海陆分割方法。

1 数学模型的建立

1.1 活动轮廓模型

基于活动轮廓模型的分割方法近年受到广泛关注^[3~5], 其数学本质是变分法和偏微分方程理论。基本思想是将待分割

收稿日期: 2010-11-28; 修回日期: 2011-01-15 基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2009AA12Z139)

作者简介: 单子力 (1980-), 男, 河北唐山人, 博士研究生, 主要研究方向为 SAR 影像处理 (zlsan@ceode.ac.cn); 王超 (1963-), 男, 研究员, 博导, 博士, 主要研究方向为微波遥感; 张红 (1972-), 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为微波遥感。

边界视做可以活动的轮廓线,由特定的能量函数的最小化过程引导轮廓线不断朝着目标的边缘方向移动,直至停留在目标边缘处,此时能量函数达到最小值。根据定位边界时所用信息的差别,几何活动轮廓模型可以分为基于边缘信息的模型^[3]和基于区域信息的模型^[4,5]。前者利用图像轮廓附近的局部梯度信息,有利于局部轮廓的定位,但对于 SAR 图像,图像的梯度受斑点噪声的影响较大,不适合单纯应用基于边缘信息的活动轮廓模型。而基于区域信息的活动轮廓模型利用了区域的内部信息,如均值、纹理、统计特性等来推动轮廓演化,对于 SAR 图像性能会较好,受斑噪影响较前者小。因此,把基于边缘信息和基于区域信息的模型结合起来是一种可行的方案。

1.2 基于边缘信息的活动轮廓模型能量函数

设 $u: \Omega \rightarrow R^+$ 为 SAR 强度图像像素值, Ω 表示图像本身, Σ 与 Σ^- 分别表示轮廓内部与外部区域, C 表示轮廓线本身。因此基于边缘信息的活动轮廓模型的能量函数可以定义为

$$E_e = \mu \text{Length}(C) + \nu \iint_{(x,y) \in \Sigma} g(|\nabla u(x,y)|) dx dy \tag{1}$$

其中:
$$g = \frac{1}{1 + |\nabla G_\sigma \times u(x,y)|^p} \tag{2}$$

式(2)称为边缘检测算子,是关于图像梯度的单调递减函数。 G_σ 是标准差为 σ 的 Gaussian 核函数。通常 $p > 0$, 常取 $p = 2$ 。Length(C) 为轮廓边界长度信息项, μ 和 ν 为权重参数。

1.3 基于区域信息的活动轮廓模型能量函数

根据相干斑模型和中心极限定理,在斑噪充分发育和图像区域均匀的假设下, L 视 SAR 图像通常满足 Gamma 分布,因此可以设轮廓内外区域分别满足如下统计分布模型,如式(3)所示。

$$P_k(u(x,y)) = \frac{L^L}{\mu_k \Gamma(L)} \left(\frac{u(x,y)}{\mu_k} \right)^{L-1} \exp\left(-\frac{Lu(x,y)}{\mu_k} \right) \tag{3}$$

$k \in \{\Sigma, \Sigma^-\}$

从而 SAR 图像的似然函数为轮廓内图像似然函数与轮廓外图像似然函数之积:

$$L(u(x,y)) = \prod_{(x,y) \in \Sigma} P_\Sigma(u(x,y)) \prod_{(x,y) \in \Sigma^-} P_{\Sigma^-}(u(x,y)) \tag{4}$$

将式(4)取对数并取负值后可以得到基于区域信息的活动轮廓模型的能量函数,如式(5)所示。

$$E_r = -\ln L(u(x,y)) = -\iint_{(x,y) \in \Sigma} \ln P_\Sigma(u(x,y)) dx dy - \iint_{(x,y) \in \Sigma^-} \ln P_{\Sigma^-}(u(x,y)) dx dy \tag{5}$$

1.4 曲线演化的总能量函数

把基于区域信息的活动轮廓模型的能量函数和基于边缘信息的能量函数结合起来得到曲线演化的总能量函数,如式(6)所示。

$$E = E_e + \alpha E_r \tag{6}$$

其中: α 为权重因子,用于平衡区域信息与边缘信息对总能量函数的影响。

1.5 曲线演化方程

曲线的演化过程即是最小化总能量函数的过程,接下来根据总能量函数获取轮廓曲线的演化方程,通常采用水平集方法实现。水平集方法是从界面传播等研究领域逐渐发展起来的,因此引入 Lipschitz 连续函数,称为水平集函数:

$$\Phi: \Omega \rightarrow R, \text{使得} \begin{cases} \Phi(x) > 0, x \in \Sigma \\ \Phi(x) < 0, x \in \Sigma^- \\ \Phi(x) < 0, x \in C \end{cases} \tag{7}$$

再引入 Heaviside 函数,如式(8)所示。

$$H(z) = \begin{cases} 1, z \geq 0 \\ 0, z < 0 \end{cases} \tag{8}$$

从而水平集函数 Φ 表示的总能量函数如式(9)所示。

$$E(\Phi) = E_e(\Phi) + \alpha E_r(\Phi) = \mu \iint_{(x,y) \in \Omega} g(|\nabla u(x,y)|) \delta(\Phi) |\nabla \Phi| dx dy + \nu \iint_{(x,y) \in \Omega} g(|\nabla u(x,y)|) H(\Phi) dx dy - \alpha \iint_{(x,y) \in \Omega} \ln P_\Sigma(u(x,y)) H(\Phi) dx dy - \alpha \iint_{(x,y) \in \Omega} \ln P_{\Sigma^-}(u(x,y)) (1 - H(\Phi)) dx dy \tag{9}$$

求该式的第一部分可以得到轮廓曲线的演化方程组,如式(10)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \alpha \delta(\Phi) [\ln P_\Sigma(u(x,y)) - \ln P_{\Sigma^-}(u(x,y))] - \nu g(|\nabla u(x,y)|) \delta(\Phi) + \mu \delta(\Phi) \text{div}(g(|\nabla u(x,y)|) \frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|}) \\ \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \text{ 在 } C \text{ 上} \end{cases} \tag{10}$$

2 模型的优化

由于水平集函数 Φ 通常需要借助符号距离函数 (signed distance function) 实现,由式(10)可以看出,活动轮廓模型存在计算量较大的问题。仔细研究可以发现,每次迭代过程中仅有零水平集 (即轮廓) 及其附近的像素所对应的 Φ 对结果产生影响,即优化模型可以仅考虑更新轮廓两边的窄带内像素数据对应的 Φ 值,如图 1 所示。

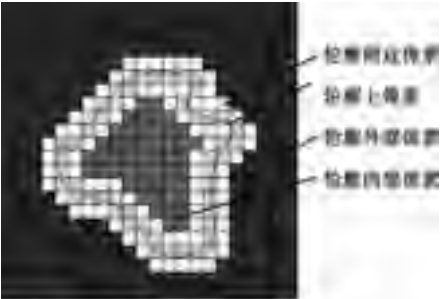


图1 轮廓曲线及其附近的窄带示意图

2.1 数据结构初始化

按照表 1 定义的规则将窄带范围分成五层,相应的像素存入五个链表 $L_{-2} \sim L_2$ 中。同时按照图像中各个像素对应的链表,对各个像素作标记,不在窄带范围内的像素按照位于轮廓的内部或外部分别标记为 -3 或 3。

表 1 各个链表取值及其用途

链表名称	label	链表中像素对应 Φ 值	链表用途
L_{-2}	-2	$[-2.5, -1.5)$	轮廓内窄带内较远像素
L_{-1}	-1	$[-1.5, -0.5)$	轮廓内窄带内较近像素
L_0	0	$[-0.5, 0.5]$	轮廓上的像素
L_1	1	$(0.5, 1.5]$	轮廓外窄带内较近像素
L_2	2	$(1.5, 2.5]$	轮廓外窄带内较远像素

2.2 数据结构初始化

随着曲线演化的每次迭代,以前在曲线或窄带内的点在水平集函数更新后可能进入轮廓区域内部或外部,不再属于窄带范围。因此每次迭代中要对 $L_{-2} \sim L_2$ 这五个链表进行更新,为便于实现,引入 $T_{-2} \sim T_2$ 五个辅助链表,分别用于缓存即将进入 $L_{-2} \sim L_2$ 中的点。单次迭代过程中各个链表的更新规则

如下:

- a)更新 L_0 中各个点的 Φ 函数值,考察更新后的 Φ 值,若不处于 $[-0.5,0.5]$,则分别根据表 1 中 Φ 的取值范围,将该点移入 T_{-1} 或 T_1 链表。
- b)更新 L_{-1} 与 L_1 链表中各个点的 Φ 值。若其 4 邻域内没有点位于 L_0 中,则将该点移入 T_{-2} 或 T_2 。 L_{-1} 与 L_1 链表其余点 Φ 函数值若越界(表 1),则根据表 1 将其移入 T_0 、 T_{-2} 或 T_2 。
- c)更新 L_{-2} 与 L_2 队列中各个点的 Φ 函数值。若其 4 邻域内没有点位于 L_{-1} 和 L_1 中,则从链表移除该点,并将该点 Label 置为 -3 或 3。 L_{-2} 与 L_2 链表中其余点 Φ 函数值若越界(表 1),根据表 1 将其移入 T_{-1} 或 T_1 ,或从所有链表移除。
- d)将 T_0 中所有的点移入 L_0 ,并将对应的 Label 置为 0;将 T_{-1} 与 T_1 中所有点分别移入 L_{-1} 与 L_1 ,并将对应的 Label 值分别置为 -1 与 1;若 L_{-1} 与 L_1 的 4 邻域中存在 Φ 函数值为 -3 或 3 的邻点,则将该邻点移入 T_{-2} 或 T_2 ;将 T_{-2} 与 T_2 中所有点分别移入 L_{-2} 与 L_2 ,并将对应的 Label 值分别置为 -2 与 2。

2.3 基于活动轮廓模型的 SAR 影像海陆分割快速实现方法

从上述讨论可以得到本文提出的基于活动轮廓模型的 SAR 影像海陆区域快速分割方法的主要步骤如下:

- a)使用符号距离函数初始化影像的水平集函数 Φ ,得到初始值 Φ^0 。
- b)由式(10)计算出下一时刻的 Φ 增量,并将其归一化,使其满足模不大于 0.5,若增量值小于 0.001,则程序结束,否则执行 c)。
- c)执行 2.2 节中的步骤 a)~d),返回 b)。

3 实验结果及分析

本文分别选用 Radarsat 以及 Radarsat-2 SAR 影像作为实验数据来验证本文算法的性能。硬件环境采用 PC 机,CPU 为 Core2 E7200 2.53 GHz,2 GB 内存,Windows XP 操作系统,VC++6.0编程。式(10)中 α 取 0.5, μ 取 1, v 取 1。

实验 1 采用一幅 1024×1024 像素的 Radarsat-2 HV 极化通道的影像切片,结果如图 2 所示。其中(a)为分割算法未进行计算优化前的分割结果以及对应的二值图像,用时 464 s;(b)为进行计算优化过后的分割结果以及对应的二值图像,用时 10 s。实验结果表明,本文提出的算法同时考虑了区域统计信息与边缘信息,能够比较准确地分割出水域与陆地,边缘定位精确。在几乎不降低影像分割质量的基础上,优化后的算法具有更高的计算效率。这是因为,假设影像大小为 $m \times n$ 像素,则本文提出的算法未优化前,根据式(10)每次迭代都需要对全部像素更新水平集函数值 Φ ,因此算法的时间复杂度为 $O(cmn)$ 量级,其中 c 为迭代次数,算法复杂度随着影像尺寸的增长而呈指数增长。采用优化算法后,时间复杂度降为 $O(cp)$ 量级,其中 p 为轮廓线附近窄带内的像素数,显然 p 远小于 mn ,因此,每次迭代大大减少了数据计算量。

为进一步比较本文算法的性能,本文给出其他几种常用分割方法实验结果的二值图,其中白色像素表示水体,黑色像素表示陆地。分别为期望最大化算法(EM)、最大熵分割方法(ME)、模糊 K 均值分割方法(FKS)以及大津阈值分割方法(OTSU),如图 3 所示。将其分割结果与本文优化后的算法分

割结果和手工分割结果作比较,分别统计其检测的正确率、漏检率及虚警率,如表 2 所示。从图 3 中不难看出,上述分割方法无法准确定位陆地与水体边缘,分割结果中存在大量散斑。本文方法较其他几种方法能获得较好的分割精度,基于活动轮廓演化本身的特性,本文方法不存在其他几种分割方法所得到的结果中存在的散斑问题,且分割结果基本与手工分割结果一致。



表 2 实验 1 不同分割方法精度比较

比较项	本文算法	EM	ME	FKS	OTSU
正确率	0.983 2	0.832 7	0.460 2	0.777 3	0.684 7
漏检率	0.005 6	0.022 2	0.000 0	0.009 1	0.004 4
虚警率	0.011 2	0.145 1	0.539 8	0.213 6	0.310 9

实验 2 采用一幅 Radarsat 单极化影像,大小为 8030×8922 像素,成像区域为东海某海区。由于针对该幅影像的计算量很大,未进行计算优化的算法,无法在令人满意的时间内获得分割结果(实际分割时间大于 24 h),不具有实际应用的意义,实验 2 直接给出计算优化后的算法分割结果以及对应的二值图像,如图 4 所示。实验 2 采用计算优化后的算法对应的分割耗时为 101 s。与实验 1 类似,实验 2 同样给出了其他常用的分割方法对该影像的分割结果,如图 5 所示。表 3 给出了实验 2 中各种方法对应的分割性能的统计结果。从图 4、5 以及表 3 能够进一步看出,本文提出的基于优化后的几何活动轮廓模型的 SAR 海陆分割算法,能够较准确快速地获得海区影像的掩模,为进一步的海区内船只检测工作提供稳定的自动掩模图像。

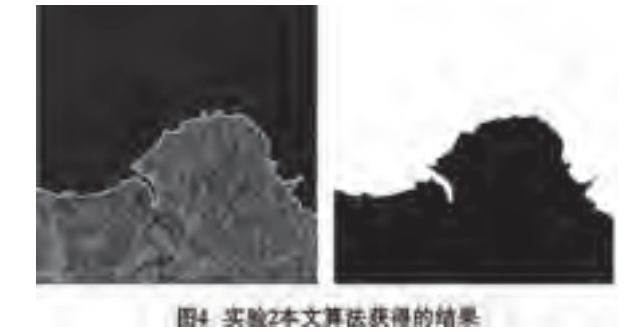
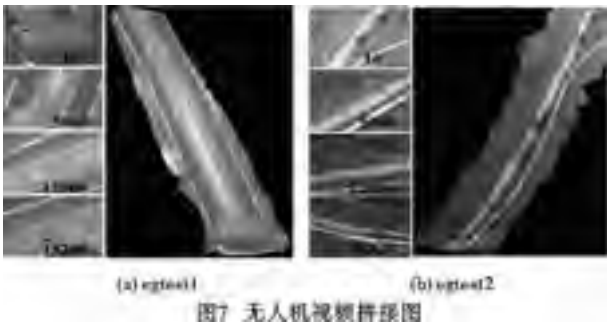


图 4 实验 2 本文算法获得的结果

值得注意的是,实验 1 与 2 中用于与本文所提出的算法进行对比的四种影像分割方法,由于其本身的局限性,仅能对全图作统一的分割处理,无法像本文所提出的算法那样针对不同地物如陆地及海区进行运算,因此获得的二值图像无法准确地区分出陆地与水体,从直观上看类似于灰度图像。

的拼接结果,左边部分为第 1、500、1200、1832 帧。可以看到,两幅拼接的图像中均有效地去除了场景中的运动车辆,拼接没有出现明显的误差,这也说明了本文所提的背景运动估计算法对运动目标检测的有用性。在算法效率方面,整个背景运动估计算法的平均处理速度为 20 ms/帧,完全能够满足实时估计的需要。



5 结束语

为对航拍视频进行校正以检测独立运动目标,本文提出了一种基于改进 Harris 角点检测算子的全局仿射运动估计方法,主要结论有:

- a) Harris 角点具有较好的稳定性和环境适应性,根据场景中的梯度排除大部分平坦区域,可在保持这些优良性能的同时大大提高其提取速度。
 - b) SURF-16 描述子与原 SURF-64 描述子相比,维度更低,且提取和匹配速度更快,完全能够满足航拍视频中特征匹配的需要。
 - c) 根据匹配对向量的幅度分布情况,可以有效去除部分明显的误匹配对,有效提高匹配对的内点率。
- 整个估计算法计算复杂度低,能够满足航拍视频全局运动在线估计的要求。实验结果表明了所提算法的有效性。

参考文献:

[1] IRANI M, ANANDAN P. A unified approach to moving object detection in 2D and 3D scenes [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1998,20(6):577-589.

[2] ZHANG Deng-sheng, LU Guo-jun. Segmentation of moving objects in image sequence: a review [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing,2001,20(2):143-183.

[3] MUBARAK S, RAKESH K. Video registration [M]. [S. l.]: Springer, 2003.

[4] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. Image Vision Computing, 2003,21(11):977-1000.

[5] BROWN M, LOWE D. Recognising panoramas [C]//Proc of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision. Washington DC: IEEE Computer Society,2003:1218-1225.

[6] JACKSON B P, GOSHTASBY A. Registering aerial video images using the projective constraint [J]. IEEE Trans on Image Processing,2010,19(3):795-804.

[7] OBDRZALEK S, PERDOCH M, MATAS J. Dense linear-time correspondences for tracking [C]//Proc of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2008: 1-8.

[8] SCHMID C, MOHR R, BAUCKHAGE C. Evaluation of interest point detectors [J]. International Journal of Computer Vision,2002,37(2):151-172.

[9] TUYTELAARS T, MIKOLAJCZYK K. Local invariant feature detectors: a survey [J]. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision,2008,3(3):177-280.

[10] HARRIS C, STEPHENS M. A combined corner and edge detector [C]//Proc of the 4th Alvey Vision Conference. 1988:147-151.

[11] LOWE D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision,2004,60(2):91-110.

[12] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. A performance evaluation of local descriptor [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2005,27(10):1615-1630.

[13] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, et al. SURF: speeded up robust features [J]. Computer Vision and Image Understanding,2008,110(3):346-359.

[14] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision [M]. 2nd ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2003.

(上接第 2341 页)



图5 实验2不同分割方法的比较

表 3 实验 2 不同分割方法精度比较

比较项	本文算法	EM	ME	FKS	OTSU
正确率	0.995 7	0.789 4	0.631 8	0.783 5	0.692 2
漏检率	0.000 0	0.051 1	0.000 0	0.026 2	0.000 0
虚警率	0.002 5	0.159 5	0.368 2	0.190 3	0.307 9

4 结束语

本文为解决海洋 SAR 影像目标检测中的陆地掩模问题,提出了一种基于活动轮廓模型的 SAR 影像海陆自动分割方法。在能量函数中同时融合了影像的边缘信息和区域统计信

息,在提高算法鲁棒性的同时更有利于轮廓朝着真实的海陆边界线演化。最后针对该模型提出了优化算法改进其计算效率,实验结果表明,本文算法能够在缺乏先验地理信息的情况下,较好地把 SAR 影像中海洋和陆地分离开,取得比较令人满意的结果。

参考文献:

[1] 田巴睿. 高分辨率 SAR 图像目标检测与识别中的关键技术研究 [D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2008.

[2] 李宏忠,王超,张红,等. 基于海图信息的 SAR 影像海陆自动分割 [J]. 遥感技术与应用,2009,24(6):731-736.

[3] CASELLES V, KIMMEL R, SAPIRO G. Geodesic active contours [J]. International Journal of Computer Vision,1997,22(1):61-79.

[4] CHAN T F, VESE L A. Active contours without edges [J]. IEEE Trans on Image Processing,2001,10(2):266-277.

[5] BRESSON X, ESEDOGLU S, VANDERGHEYNST P. Fast global minimization of the active contour/snake model [J]. Journal of Mathematical Imaging Vision,2007,28(1):151-167.