

文章编号:1001-9014(2009)02-0146-05

高分辨率遥感影像的快速分割方法

李晓峰¹, 张树清¹, 刘 强², 张 柏¹, 刘殿伟¹, 卢碧波³, 那晓东¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012;

2. 深圳大学 数学与计算科学学院, 广东 深圳 518060;

3. 河南理工大学 计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000)

摘要:近年来, C-V 模型被广泛用于图像分割, 但计算速度是制约其应用的一个重要因素, 如果处理数据量较大、内容复杂的高分辨率遥感图像, 耗费时间更长. 本文采用 C-V 模型与小波变换的结合, 不仅大大提高了影像的处理速度, 而且实现了图像的多尺度分割, 并具有良好的抗噪能力. 实验结果显示, 在保证分割质量的前提下, 与直接使用 C-V 模型的多尺度分割方法相比, 该方法能够提高处理速度 1~2 倍.

关键词: C-V 模型; 小波变换; 多尺度分割; 高分辨率遥感图像

中图分类号: TP751 文献标识码: A

FAST SEGMENTATION METHOD OF HIGH-RESOLUTION REMOTE SENSING IMAGE

LI Xiao-Feng¹, ZHANG Shu-Qing¹, LIU Qiang², ZHANG Bai¹,

LIU Dian-Wei¹, LU Bi-Bo³, NA Xiao-Dong¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130012, China;

2. College of Mathematics and Computation Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

3. College of Computer Science & Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In recent years, C-V model has been extensively used in image segmentation, but the computation speed is the key factor restricting the use of the method, especially for the large high resolution remote sensing imagery with complex scene, since the consuming time is very long. This research presented the method of combining C-V model and wavelet transform, which not only can improve the speed but also can achieve the multi-resolution segmentation, and has good anti-noise performance. Experiment results show that our method can improve the speed 1~2 times compared to the C-V model in the premise of segmentation quality assurance.

Key words: C-V model; wavelet transform; multi-resolution segmentation; high resolution remote sensing imagery

引言

随着遥感卫星获取数据技术的不断发展, 遥感影像的空间分辨率不断增大, 探索快速、高效的高分辨率遥感影像的数据处理与信息提取方法, 已成为当前遥感应用领域的一个重要研究课题. 其中, 对影像进行图像分割, 提取出感兴趣的特定区域, 是在影像上进行地物目标计算机自动提取的第一步, 也是影像中地物目标表示和测量的基础. 因此, 图像分割已经成为高分辨率遥感影像地物目标信息提取的主

要研究问题之一^[1]. 然而, 由于高分辨率遥感影像的海量数据、复杂细节等特点, 其分割方法不同于一般的自然图像, 很多现有的图像分割处理技术无法直接应用于高分辨率遥感影像的处理.

近年来, 水平集方法和几何活动轮廓线模型相结合的曲线演化形变模型已被广泛应用于图像分割. Chan-Vese 在文献[2,3]中提出了基于简化 Mumford-Shah (MS) 模型的水平集图像分割方法 (C-V 模型). C-V 模型降低了 MS 模型的复杂度, 具有较强的实用性和可行性. 由于具有曲线长度的控制项, C-V 模型具有很

收稿日期: 2008-01-20, 修回日期: 2008-09-01

Received date: 2008-01-20, revised date: 2008-09-01

基金项目: 国家“十一五”科技支撑重点(2006BAD23B03)、国家自然科学基金(40871188, 10826042)和博士后科学基金(20080431040)资助项目

作者简介: 李晓峰(1978-), 男, 黑龙江讷河市人, 助理研究员, 主要从事遥感图像处理方面的研究, E-mail: lixiaofeng1228@gmail.com.

通讯作者: 刘 强, E-mail: maliu@126.com.

好的抗噪和多尺度图像分割能力.然而,在水平集演化的过程中,为了保证数值计算的稳定性,需要采用重新距离化的方法对水平集进行重构,它导致 C-V 模型的计算速度大大降低,成为制约水平集广泛应用的一个重要因素.已经有许多学者致力于寻找快速的水平集算法,例如窄带法^[4],AOS 算法^[5],无重新距离化方法^[6]等.但如果处理数据很大并且内容复杂的图像(如高分辨率遥感图像),这些方法的计算时间仍然相当可观,因此针对具有海量数据、复杂细节的高分辨率遥感图像研究快速水平集分割方法是非常有意义的.

在图像分割中,小波分析一直备受关注,利用小波分析方法构造的多尺度分割算法大量涌现,如文献[7~9].小波变换的多分辨率特性是小波变换能够用于多尺度分割的基础,同时 Mallat 塔形分解又能够减小图像尺寸,降低分割运算量,但由于缺乏好的重构方案,这一点很少被利用或者重构效果不够理想.Jung^[10]结合小波变换和分水岭分割

$$\min \left\{ E(C, c_1, c_2) = \mu \int_0^{L(C)} ds + v \int_{\text{inside}(C)} dA + \lambda_1 \int_{\text{inside}(C)} |u_0 - c_1|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{\text{outside}(C)} |u_0 - c_2|^2 dx dy \right\}, \quad (1)$$

其中, u_0 表示原始图像, C 表示演化曲线, c_1 和 c_2 分别表示由封闭曲线 C 所分开的内外区域的灰度均值, $\mu, v \geq 0, \lambda_1, \lambda_2 > 0$ 分别是曲线长度, 区域内部面积, 以及区域内部和外部同质性检验项的加权.

结合水平集方法和 Euler-Langrange 方法, 能够得到

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \delta_\varepsilon(\phi) \left(\operatorname{div} \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) - v - \lambda_1 (u_0 - c_1)^2 + \lambda_2 (u_0 - c_2)^2 \right), \quad (2)$$

其中, ϕ 表示水平集函数, δ_ε 是规则化的 Dirac 函数, 定义如下

$$\delta_\varepsilon(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } |x| > \varepsilon \\ \frac{\varepsilon}{\pi(\varepsilon^2 + x^2)} & \text{if } |x| \leq \varepsilon \end{cases}.$$

C-V 模型在计算过程中一般取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1, v = 0$, 而通过对曲线长度加权 μ 的调整能够实现图像的多尺度分割, 具有良好的抗噪性. 在式(1)中, 如果因子 μ 很大, 则加大了对演化曲线周长的惩罚, 周长较大的物体将被保留下来, 从而减少了噪声对分割结果的干扰; 反之, 则减小了长度的惩罚, 能够分割出较小的目标. 对于不同的需求我们可以适当选择因子 μ , 这样就会产生多尺度现象. 一般来说式(2)没有显式解, 必须要对它进行离散求数值的近似解. 为了保证数值计算的稳定性, 往往使用隐式的离散格

方法提出了一种新的多尺度分割方法, 该方法充分利用低频近似子图和高频细节子图的特性进行重构和后处理, 达到了很好的分割效果, 对于带有较大噪声的图像也具有很好的鲁棒性.

本文结合 C-V 模型和小波变换方法的各自优点进行图像分割. 首先对图像进行 Mallat 塔形分解, 在低频近似子图上使用 C-V 模型进行分割, 然后在小波重构的框架下得到图像的最终分割结果. 我们的方法具有水平集方法鲁棒性和小波变换多尺度的特点, 不仅大大减少了 C-V 模型的运算量, 而且能够实现图像的多尺度分割, 能够快速有效地处理大数据量并伴有噪声的高分辨率遥感影像的分割问题.

1 C-V 模型

C-V 模型由 Chan 和 Vese 于 1999 年提出^[2,3], 它基于简化的 Mumford-Shah 能量泛函来考虑区域的某种最优划分. 它所考虑的能量泛函为

$$\min \left\{ E(C, c_1, c_2) = \mu \int_0^{L(C)} ds + v \int_{\text{inside}(C)} dA + \lambda_1 \int_{\text{inside}(C)} |u_0 - c_1|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{\text{outside}(C)} |u_0 - c_2|^2 dx dy \right\}, \quad (1)$$

式, 最终需要求解一个线性代数方程组. 然而, 当 $|\nabla \phi|$ 较大或者较小的时候, 这个代数方程的条件数会很大, 使得求解过程不稳定. 因此, 在求解方程(2)的过程中, 往往采用重新距离化的办法, 直接方法是逐点来求解, 这是相当耗费时间的. 我们直接使用 C-V 模型对大小为 3810×2278 像素的一幅相对简单的遥感图像进行了分割试验, 运算时间为 864.8s (约 15min), 耗时很可观. 另外一种方法是求解 Hamilton 方程 $|\nabla \phi| = 1$, 快速的方法例如快速步进法、快速扫描法等. 也有的方法试图绕过重新距离化的过程, 例如无重新距离化方法, 但是数值计算不稳定. 现在, 如何快速稳定地求解方程(2)已经成为利用水平集方法进行图像分割的重要公开问题.

本文将在 Mallat 塔形小波分解的框架下, 在尺寸减少为原图像 $1/2^{J-1}$ (J 为小波分解的层数) 的低频近似子图上使用无惩罚项 C-V 模型, 并基于文献[10]的小波重构框架得到分割结果. 这样不仅明显减少了分割时间, 而且实现了多尺度分割, 并具有良好的抗噪效果.

2 算法描述

算法在使用 C-V 模型时未加入长度惩罚项, 因而能够快速稳定地得到泛函极值. 它利用小波变换的特点, 一方面小波变换方法具有良好的去噪性能; 另一方面, 小波变换方法具有多尺度特性, 能够控制分割出来

的目标物体面积的大小,实现多尺度图像分割,这就节省了 C-V 模型加入惩罚长度项而求解非线性偏微分方程所耗费的时间. 具体设计的算法步骤如下:

(1) 对原始图像进行 J 级二进塔式小波分解,得到低频近似子图 A_{2^j} , 和各级水平、垂直以及对角高频细节子图 $\{W_{2^j}^h, W_{2^j}^v, W_{2^j}^d\}_{j=1,2,\dots,J}$.

(2) 在低频近似子图 A_{2^j} 上使用当 $\mu = 0$ 时的 C-V 模型进行初始分割,得到区域的封闭边界图.

(3) 生成新的简化低频近似子图 S_{2^j} , S_{2^j} 上对应区域用低频近似子图 A_{2^j} 上每个区域的灰度均值替换, S_{2^j} 区域边界用 A_{2^j} 上分割出的边界灰度值.

(4) 生成新的高频细节子图,规则如下:

$$NW_{2^j}^l[n, m] = \begin{cases} W_{2^j}^l[n, m], & \text{如果 } [n, m] \text{ 属于区域边界} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中 $l \in \{h, d, v\}$, 上式表示出了在简化图 A_{2^j} 上的分割.

(5) 利用新的低频近似子图 S_{2^j} 和各方向新的

高频细节子图 $NW_{2^j}^l$ 进行小波重构得到上一级的同质区域图像 $S_{2^{j-1}}$.

(6) 由于 S_{2^j} 和 $NW_{2^j}^l$ 中边缘灰度与区域灰度不一致和小波重构过程的影响,图像 $S_{2^{j-1}}$ 中的不同地物区域相邻的边缘部分会出现一些不属于任何区域的像素点 L_p (lost pixels), 可以给这些像素重新赋值. 首先计算边缘像素和其 8 邻域的像素灰度差,然后把与之差值最小的像素的灰度赋给 L_p 像素.

(7) 对处理后的图像 $S_{2^{j-1}}$ 进行边缘检测得到新的区域边界图. 因为图像 $S_{2^{j-1}}$ 已经为同质区域,其区域边缘很容易获得.

(8) 重复步骤(3) ~ (6)直到得到原始图像分辨率的分割图.

算法中进行小波分解使用 Haar 小波函数是因为 Haar 小波具有正交性和较小的支撑,它对于重构后有效去除 L_p (lost pixels) 尤为重要,同时,用 Haar 小波进行分解也能够减少计算的复杂度. 对于最后

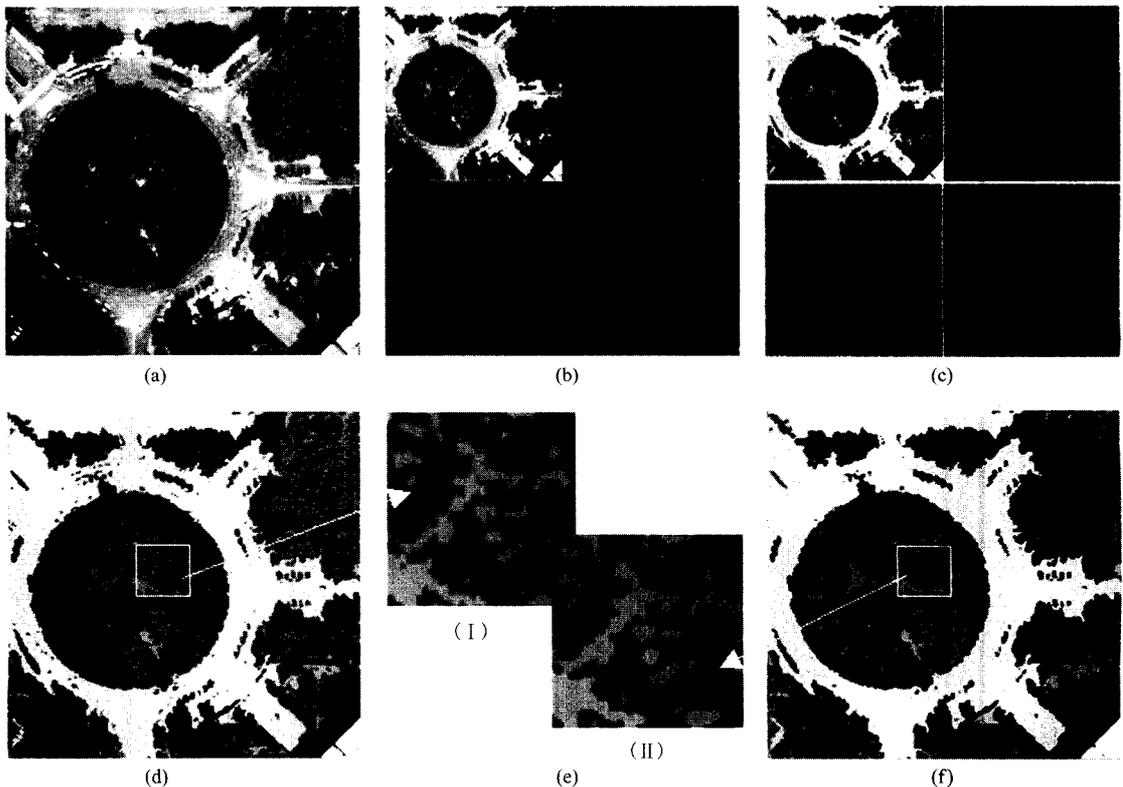


图 1 (a)原始 Quickbird 全色波段影像 (b) 2^1 尺度 Haar 小波分解结果 (c)C-V 模型分割后的简化低频近似子图和构造的各高频细节子图 (d)利用图(c)进行小波重构的结果 (e)去除 L_p (Lost pixels) 前后的局部效果比较, (I) 和 (II) 分别是带有 L_p 的图(d)和处理后的图 (f)相同位置的局部(白色矩形框内)放大图 (f)去除 L_p 和区域融合之后的分割结果
 Fig.1 (a)The original Quickbird image of panchromatic band (b)wavelet decomposition result at scale 2^1 with Haar wavelet (c) the new simplified approximation image after segmentation with C-V model and the constructed detail images (d)the result of projecting the initial segmentation to finer resolution (e)local effect pictures before and after eliminating L_p (lost pixels) (I) and (II) are respectively the locally magnified images within the white rectangles in the same location of (c) and (f) (f) the segmentation result after assigning lost pixels and region merging

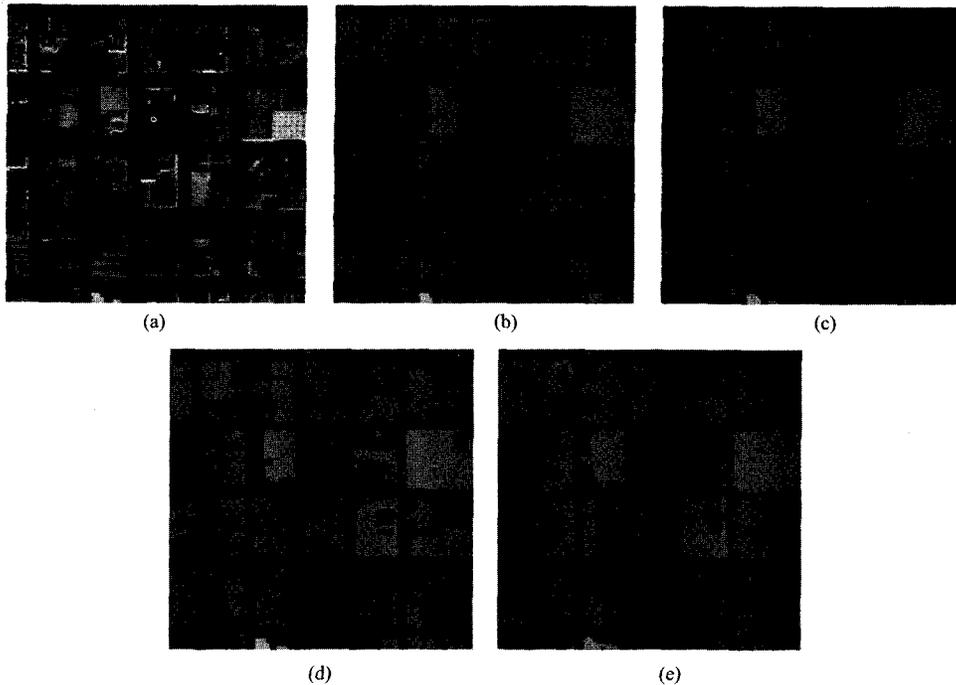


图2 (a)原始 IKONOS 全色波段影像 (b)C-V 模型分割结果, $\mu=2$, Time = 9.0s, Region = 346 (c)C-V 模型分割结果, $\mu=10.5$, Time = 8.5s, Region = 129 (d)本文方法结果, 2^1 尺度, Time = 4.4s, Region = 340 (e)本文方法结果, 2^2 尺度, Time = 4.2s, Region = 128

Fig. 2 (a) The original Panchromatic image of IKONOS (b) the segmentation by C-V model with $\mu=2$, and Time = 9.0s, Region = 346 (c) the segmentation by C-V model with $\mu=10.5$, Time = 8.5s, Region = 129 (d) the segmentation by our method with 2^1 scale, Time = 4.4s, Region = 340 (e) The segmentation by our method with 2^2 scale, Time = 4.2s, Region = 128

表1 本文方法和 C-V 模型分割不同大小的高分辨率影像(IKONOS)分割时间比较

Table 1 The comparison of segmentation time on various size high resolution remote sensing image (IKONOS) by our method and C-V model

图像尺寸(像素数)	128 × 128	256 × 256	512 × 512	1024 × 1024	2048 × 2048
运行时间(s)					
带有惩罚长度项的 C-V 模型	2.4	2.6	19.3	197.7	1900.2
结合小波与 C-V 模型	0.2	0.9	6.5	65.1	879.8

分割的结果也可以使用区域融合技术,即如果两个区域的灰度之差小于给定的阈值 T ,将两个区域合并为一个区域.

3 实验与结果

为了清楚说明算法的流程,我们首先给出一幅影像的分割过程和分割结果.图 1(a)是一幅 512×512 大小的长春市南湖广场的 Quickbird 全色波段影像,影像中有广场、绿化树木、道路标志和车辆等,它们在灰度上具有一定差别.按照算法各步骤进行处理,所得结果如图 1(b) ~ 图 1(f) 所示.从结果可以看出,本算法能够把图像中的地物很好地分割出来.

下面通过实验对 C-V 模型和本文算法的多尺度分割效果和所需时间加以比较.图 2(a)是一幅 512×512 像素大小的 IKONOS 全色波段影像,主要包含城市区域中的道路和居民楼;图 2(b) 和图 2

(c) 使用 C-V 模型并调整惩罚长度因子 μ 进行多尺度分割,图 2(d) 和图 2(e) 使用本文方法进行多尺度分割,分别进行小波分解至 2^1 尺度和 2^2 尺度.分割所需时间和最后分割区域数见图 2(b) ~ 图 2(e) 的注释.由于多尺度分割适用于不同的应用目的,获得标准图比较困难,所以通过视觉效果对分割结果进行检验.为了使结果具有可比性,调整 C-V 模型中的惩罚长度因子 μ ,使得分割后的区域和图 2(d) ~ 图 2(e) 中分割的区域数接近.从每个尺度最后的分割结果上可见,结合了小波框架的 C-V 模型多尺度分割方法和直接使用 C-V 模型实现的多尺度分割效果相当,而运算时间能够平均节约一倍左右.

为了比较本文方法和 C-V 模型在不同大小的高分辨率遥感影像上进行分割所需的时间,我们通过实验给出表 1 所示结果.实验选用在一幅 IKONOS 影像中裁剪得到的各种大小不同的影像,C-V 模型的惩罚

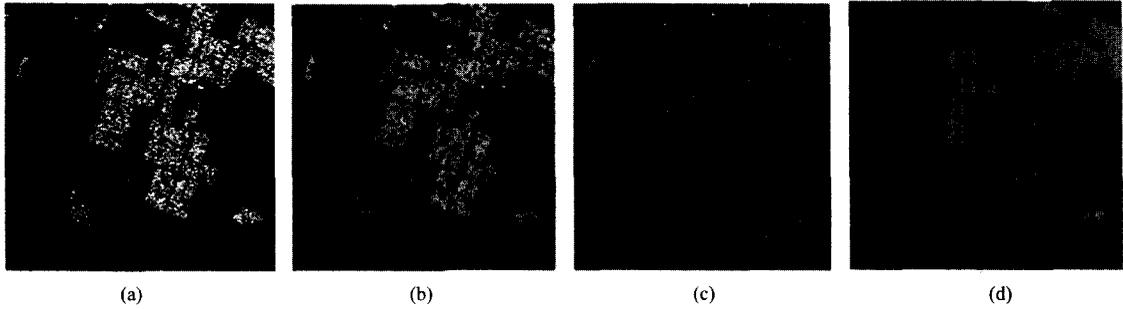


图3 对于带有严重噪声的 SAR 图像的多尺度分割结果(a)原始 SAR 图像 (b)~(d) 2^1 , 2^2 和 2^3 尺度分割结果图
Fig.3 The segmentation for a very noisy SAR image (a)the original SAR image (b)~(d)the segmented image starting at resolution 2^1 , 2^2 and 2^3

长度因子 $\mu = 2$, 小波分解尺度为 2^1 , 实验使用的个人计算机 CPU 配置为 Pentium IV 2.4GHz, 运行环境为 Matlab7.0. 由表 1 可见, 在分割速度上本文方法比 C-V 模型提高 1~2 倍以上, 可以基本适应大数据量高分辨率遥感影像的分割时间要求。

本文最后对带有严重噪声的合成孔径雷达 (SAR) 图像进行多尺度分割. 由于 SAR 图像受到斑点噪声影响, 经典算法在 SAR 图像中难以获得良好的效果^[11]. 图 3(a) 是一幅大小为 $512 * 512$ 像素的 SAR 图像, 图 3(b)~图 3(d) 分别是本文方法进行的 2^1 , 2^2 和 2^3 尺度的分割结果. 从结果可以看到, 本文方法对于带有严重噪声图像的多尺度分割也可以取得很好的效果。

4 结语

本文通过小波变换和 C-V 模型相结合实现了图像的快速多尺度分割. 实验表明, 本方法在保证分割质量的前提下较 C-V 模型在速度上有较大提高, 并具有很好的抗噪能力, 能够适应于带有噪声的大数据量高分辨率遥感影像的多尺度分割. 由于原始 C-V 模型只能针对两相图像进行分割, 本文方法亦是如此. 但对于多相的情况, 可采用多相的 C-V 模型^[12]与小波变换结合的方法. 另外, 采用多尺度技术可能损失对小目标的分割能力, 所以该方法需要根据具体的应用目的来选择合适的尺度进行分割。

有研究表明, 充分利用遥感影像的多光谱波段, 在多光谱与全色波段融合的高分辨率遥感影像进行多尺度分割能够明显提高分割效果^[13], 如何结合小波变换和 C-V 模型设计兼容多波段遥感影像的快速分割方法, 进一步提高分割效果, 将是我们下一步研究的主要工作。

REFERENCES

[1] Schiewe J. Segmentation of high-resolution remotely sensed

- data concepts, applications and problems [J]. *Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2002, 4: 380—385.
- [2] Chan T F, Vese L A. *Active Contours Without Edges* [M]. Lecture Notes in Computer Science, 1682, Berlin: Springer Verlag, 1999: 141—151.
- [3] Chan T F, Vese L A. Active contours without edges [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2001, 10(2): 266—277.
- [4] WANG Zheng, YANG Xin, SHI Peng-Fei. Segmentation based on Mumford-Shah model combined with narrow band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王峰, 杨新, 施鹏飞. 基于窄带 Mumford-Shah 模型的图像分割方法. *红外与毫米波学报*), 2002, 6, 21(3): 161—166.
- [5] Küne G, Weickert J, Beier M, et al. *Fast Implicit Active Contour Models* [M]. Lecture Notes in Computer Science, 2449, Berlin: Springer Verlag, 2002: 133—140.
- [6] MIN Li, LI Xiao-Mao, TANG Yan-Dong. Improved C-V model without re-initialization [J]. *Opto-Electronic Engineering* (闵莉, 李小毛, 唐延东. 一种改进的无需水平集重新初始化的 C-V 主动轮廓模型, *光电工程*), 2006, 33(9): 52—58.
- [7] Wu H, Liu J, Chui C. A wavelet-frame based image force model for active contouring algorithms [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(11): 1983—1987.
- [8] Kim J B, Kim H J. Multiresolution-based watersheds for efficient image segmentation [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24: 473—488.
- [9] Jung C, Scharcanski J. Robust watershed segmentation using wavelets [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(7): 661—669.
- [10] Cludio R Jung. Combining wavelets and watersheds for robust multiscale image segmentation [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25: 24—33.
- [11] ZHAO Xia, WANG Zheng-Ming. Adaptive regularization variation method for SAR image feature-enhancement and speckle removal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵侠, 王正明. SAR 图像相干斑抑制和特征增强的自适应正则化变分方法. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(2): 112—116.
- [12] Vese L A, Chan T F. A multiphase level set framework for image segmentation using the mumford and Shah model [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 50(3): 271—293.
- [13] Jin X Y, Davis C H. An integrated system for automatic road mapping from high-resolution multi-spectral satellite imagery by information fusion [J]. *Information Fusion*, 2005, 6: 257—273.