

引用格式:贺飞跃,贺兴时,丁小丽,等.合成孔径雷达图像水体目标的提取[J].电光与控制,2018,25(11):21-24,61. HE F Y, HE X S, DING X L, et al. Extracting water bodies from synthetic aperture radar images[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11):21-24, 61.

合成孔径雷达图像水体目标的提取

贺飞跃, 贺兴时, 丁小丽, 刘婷婷

(西安工程大学理学院,西安 710048)

摘要:针对合成孔径雷达(SAR)图像水体目标的筛选和边缘模糊问题,根据SAR图像的成像特点,给出了一种基于区域生长和马尔可夫随机场(MRF)模型的水体目标提取方法。首先,利用SAR图像中水体表面呈现为均匀的低强度区域特点,采用分水岭方法进行分割,确定具有较大面积的区块作为水体的种子区域;然后,利用水体的种子区域统计特征进行区域生长,得到初始水体目标;最后,利用融合观测图像局部均匀性特征的MRF模型对初始分割图像进行精确的目标提取。实验结果显示所提方法能正确地提取SAR图像中的水体目标并精确定位目标边缘。

关键词:合成孔径雷达;水体;目标提取;分水岭;区域生长;马尔可夫随机场

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.004

Extracting Water Bodies from Synthetic Aperture Radar Images

HE Fei-yue, HE Xing-shi, DING Xiao-li, LIU Ting-ting

(School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the imaging characteristics of the water bodies of synthetic aperture radar images, and to solve the problem of blurred edges, a water body target extraction method based on region growing and Markov Random Field (MRF) was proposed. Firstly, considering that the water surface in SAR image is a uniform and low-intensity region, we used watershed method for segmentation, and defined the blocks with large area as the seeded region of water body. Then, region growing was carried out using the statistical characteristics of the region, and the initial water body targets were obtained. Finally, the precise water bodies were extracted from the initially segmented images by the MRF model that combines the local uniformity characteristics of observed image. The experimental results show that the proposed method can accurately extract the water body targets in SAR images and accurately locate the target edges.

Key words: synthetic aperture radar; water body; target extraction; watershed; region growing; Markov random field

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波传感器,由于其全天候、全天时等特点而得到了日益广泛的应用^[1-3]。SAR图像中水体目标的提取是目标识别、环境监控和洪水灾害监测等领域的重要内容。SAR图像中的水体具有典型的特征:其

表面因具有镜面反射特征而呈现为分布均匀的低强度区域;由于SAR图像固有的斑点噪声及波浪、植被倒影等影响,水域表面会出现一定程度的明暗变化;尤其是在水陆结合部常表现为边缘的模糊性和不确定性。这些特征给水体的精确提取造成了较大的困难。一些应用于光学图像处理比较有效的方法一般不能直接应用于SAR图像水体的处理^[4-5]。目前常用于水体提取的方法是基于阈值的分割方法^[6-10],该方法具有简单快速的优点,但如何确定合适的阈值及边缘的精确定位是一个难题。活动轮廓方法^[11-13]是SAR图像水体目标提取的另一类常用方法,这类方法能得到光滑封闭的目标轮廓曲线,但计算复杂度高、适应性差,对复杂场景分割效果不佳。

收稿日期:2018-06-21

修回日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金(11501436);陕西省教育厅科研计划项目(16JK1326);陕西省教育厅科研计划项目(17JK0340);西安工程大学博士科研启动基金项目(BS1420)

作者简介:贺飞跃(1974—),男,湖南邵东人,博士,讲师,研究方向为图像处理。

SAR 图像水体提取的首要问题是水体目标的识别问题。一般情况下可以将分割图像中具有较低强度的一类看作是水体目标^[7-9],但往往需要做一些后处理以剔除虚警目标^[9-13],这些后处理往往比较复杂,剔除的标准难以控制。为此,本文利用 SAR 图像中水体目标具有较低的强度及较好的均匀度的特征,结合分水岭分割的特点^[14-15],将分水岭分割图像中较大的区块作为水体的种子区域,再通过区域生长^[16-18]方法来获取水体的初始轮廓。

消除 SAR 图像中水体目标边缘模糊导致的不确定性是另一个需要解决的问题。常用方法是在预处理时使用那些能保持边缘特征的滤波方法,如 Shearlet 变换^[12]、Lee 滤波方法^[18]等,然后利用数学形态学进行后处理^[6,19-20]。该方法能使水体目标边缘较平滑,但腐蚀算子所得边缘信号较强,抗干扰性不足,而膨胀算子得到的边缘信号较弱,易出现边缘模糊现象。MRF 由于融合了图像的灰度信息和上下文信息,是 SAR 图像消除边缘模糊的有力工具^[21-22]。针对水体目标边缘定位问题,本文提出了融合观测图像灰度统计信息的 MRF 模型,以对水体目标进行精确提取。

1 水体目标的初始提取

1.1 分水岭方法

分水岭方法是一种基于拓扑理论的数学形态学分割方法,其基本思想可以通过模拟浸入过程来说明。假设在每个区域最小值的位置上打一个洞,并且让水以均匀的上升速率从洞中涌出,从低到高淹没整个地形。当处在不同集水盆中的水将要聚合在一起时,修建大坝以阻止其聚合,水将只能达到大坝的顶部处于水线之上的程度。不同的集水盆代表图像的不同分区,大坝的边界对应分水岭的分割线,实现对图像的分割。在 SAR 图像中,水体表现为连通的均匀的低强度区域,在分水岭分割图像中表现为较大的区块,这些较大的区块即可作为水体的种子区域。而其他区域由于乘性斑点噪声和杂波的影响,图像中包含大量局部极小值,在分水岭分割图像中表现为大量密集的小斑块。

1.2 区域生长

区域生长是挑选具有相似性特征的像素点,并将其合并为区域的过程。具体步骤是先从目标区域中挑选一个初始种子点,使用区域生长准则来判断周围像素点是否合并到已生长区域,再把已生长区域中的新像素作为种子点,重复判断该过程,当没有新像素纳入区域时则停止生长,至此形成了一个分割后的区域。种子通常是某个像素,也可以是某个区域。影响区域生长结果的主要因素有初始种子点的选择和区域生长准则。

由于 SAR 图像中水体目标具有较低的灰度值、较好的均匀性即较小的方差,这和非水体目标具有显著的差异。因而本文以分布统计特征量中的一阶矩和二阶矩作为区域生长的相似性特征,得到初始水体目标。

2 水体目标边缘的精确定位

为了精确定位水体目标边缘,本文采用结合观测图像局部均匀性特征的 MRF 模型对初始水体目标做进一步处理。

2.1 图像分割的 Markov 随机场模型

设 $S = \{s = (i, j) \mid 1 \leq i \leq H, 1 \leq j \leq W, i, j, H, W \in \mathbf{Z}^+\}$ 表示一个二维点集,每一个点表示图像中的一个网格位置, H 和 W 分别表示图像的长度和宽度; $X = (X_s)_{s \in S}$ 和 $x = (x_s)_{s \in S}$ 分别表示不可观测的随机场及其实现, $x_s \in \{1, 2, \dots, L\}$ 表示位置 s 所对应的观测图像像素所属类的标记; $Y = (Y_s)_{s \in S}$ 和 $y = (y_s)_{s \in S}$ 表示观测图像对应的随机场及其实现; $N = \{N_s, s \in S\}$ 为邻域系统, $N_s, s \in S$ 表示位置 s 的邻居。图像分割就是要确定观测图像中每个像素类的标记。

在贝叶斯框架下,分割结果 \hat{x} 通常表示为 $p(X|Y)$ 的 MAP 解,即

$$\hat{x} = \arg \max_x p(X=x|Y=y) = \arg \max_x p(X=x)p(Y=y|X=x) \quad (1)$$

为了计算的可行性,通常假设 MRF 分割模型的观测场是关于标记场独立的,且标记场中的每一个特征值只和与其对应的标记场的值有关,即

$$p(Y=y|X=x) = \prod_{s \in S} p(Y_s=y_s|X_s=x_s) = \prod_{s \in S} p_{x_s}(y_s) \quad (2)$$

与此对应的局部最优解可以表示为

$$\hat{x}_s = \arg \max_{x_s \in L} p(y_s|x_s)p(x_s|x_{N_s}) \quad (3)$$

对于 MLL 模型,由 Bayes 准则和 Hamersley-Clifford 定理可知,图像的分割问题可以表示为如下的最大后验概率或 Gibbs 场能量最小化问题,即

$$p(X=x|Y=y) = \frac{1}{Z} \exp(-U(x) + \sum_{s \in S} \lg f(y_s|X_s=x_s)) \quad (4)$$

令

$$E_R(x) = \sum_s U_s(x_s, (x_t)_{t \in N_s}) = \sum_s \sum_{t \in N_s} \beta_s \delta(x_s, x_t) \quad (5)$$

$$E_Y = \sum_{s \in S} -\lg f(y_s|X_s=x_s) \hat{=} \sum_{s \in S} -\lg(p_{x_s}(y_s)) \quad (6)$$

式中,当 $x_s = x_t$ 时, $\delta(x_s, x_t) = 1$, 否则, $\delta(x_s, x_t) = 0$ 。上述标记场的 MAP 等价于最小化如下的能量函数

$$E = E_R + \alpha E_Y \quad (7)$$

式中: E_R 为区域标记因子; E_V 为数据模型因子; α 表示区域标记因子和数据模型因子在分割模型中的相对重要性, α 越小, 区域标记因子在分割模型中的作用越大, 得到的分割图像也越光滑, 但可能导致欠分割问题, 否则将会保留更多的细节, 但可能会导致过分割问题。

2.2 含水体 SAR 图像的 Markov 随机场分割模型

由于图像场景的复杂性, 在对图像进行分割时往往需要对不同的区域采用不同的分割策略。为此, 文献[22]采用了如下可变参数

$$\alpha_s(k) = c \cdot 0.9^k + 1 \quad (8)$$

式中: k 表示迭代次数; c 在均质区域取较小的值, 在非均质区域取一个较大的值。可变参数可在分割初期取较大的值以正确估计目标特征, 后期取较小的值以得到光滑的分割结果。但是模型如何确定均质区域是一个困难的问题。同时, 该模型不能满足在非水体部分取较小的 α 值以得到光滑区域的要求。为此, 考虑 SAR 图像中水体目标及边缘的统计特性, 本文给出如下 α 值

$$\alpha_s(k) = \begin{cases} 1 & \bar{x}_{N_s} \leq C_1 \text{ 或 } \bar{x}_{N_s} \geq C_2 \\ s_{N_s} \cdot 0.9^k + 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\bar{x}_{N_s} = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n x_{ij}$ 表示以点 s 为中心的所在邻域 N_s 内的灰度平均值; 相应的 $s_{N_s} = \sqrt{\frac{1}{(2n+1)^2 - 1} \sum_{i=-n}^n \sum_{j=-n}^n (x_{ij} - \bar{x}_{N_s})^2}$ 表征均质性的方差; $\alpha_s(k)$ 可以根据图像灰度、均质性特征及分割过程自适应地改变大小, 从而更精确地定位水体目标边缘。

3 实验结果及分析

实验将本文方法用于 2 幅真实 SAR 图像水体的提取并和 OTSU^[9] 方法及图割^[23] 方法进行对比, 以检验本文方法的有效性。图 1 用于演示本文方法提取水体的过程; 图 2 用于检验存在较强斑点噪声背景的大水体目标的提取效果; 图 3 用于检验对包含细小结构的河流目标的提取效果。实验中, N_s 为以 s 为中心、半径 $n=2$ 的正方形区域。

图 1a 为来自 ALOS 雷达系统的 SAR 图像, 图像像素大小为 512×512 。本文首先针对 SAR 图像水体特征用分水岭方法提取水体作为种子区域, 通过种子区域的统计特征进行区域生长以对身体进行初始识别与提取。然后利用以上初始水体提取结果确定水体目标均值 C_1 和非水体目标均值 C_2 , 最后再利用 MRF 模型对提取的初始目标边缘进行精确定位。图 1a 中水库由于镜面反射而呈现黑色, 周围山体部分由于散射呈现亮色, 也包含了大量的低强度斑块。本文首先利用

分水岭方法对图像进行过分割(见图 1b), 可见由于水体目标在分水岭分割结果中呈现为大面积的集水盆。与之相反, 非水体区域由于存在大量密集的局部极小值而呈现为大量的小斑块。将边缘长度大于 150 的较大区块作为区域生长的种子区域(见图 1c), 然后利用区域生长得到初始水体目标(见图 1d)。图 1e 为提取的初始水体目标边缘在原图上的位置。可见部分边缘位置还存在较大的误差(见图 1e 中黄色方框内部分, 其放大图为图 1f), 需要进一步对边缘进行精确定位。图 1g 和图 1h 分别为利用所提出的 MRF 模型对初始水体目标进一步分割得到的水体目标及边缘。图 1i 显示了 MRF 模型对图 1e 中误分割的部分进行了矫正的放大图, 可见边缘定位精度有了显著提高。

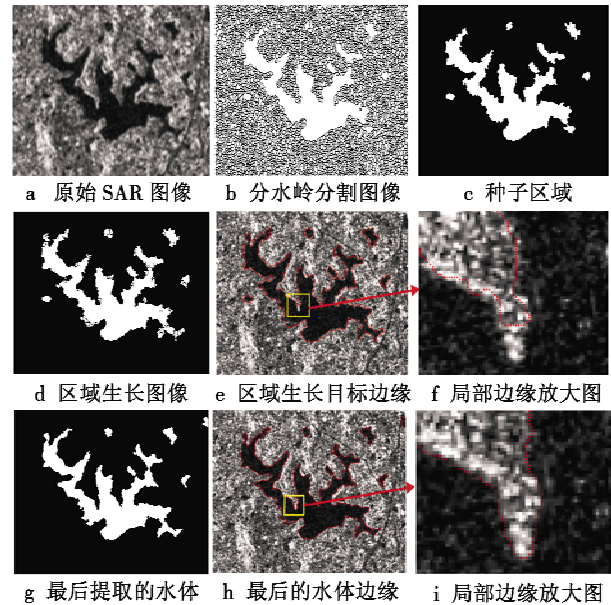


图 1 水库 SAR 图像的提取过程

Fig. 1 Extraction process of reservoir in SAR image

图 2 给出了其他 3 种方法对水库的提取结果。可见单阈值 OTSU 方法由于阈值偏大而导致严重的虚警(见图 2c 和图 2d)。相对单阈值 OTSU 方法, 双阈值 OTSU 方法能较好地提取水体目标, 但依然在目标左下部出现了部分虚警(如图 2e 和图 2f)。图割方法能正确地提取水体目标, 但目标边缘不够光滑。

图 3 显示了不同方法对包含细小结构 SAR 图像中水体的提取效果。图 3a 为包含沙洲及桥梁的 SAR 图像; 图 3b 和图 3c 分别为单阈值 OTSU 方法提取的水体及其在原图中的边缘位置, 可见其提取的水体左上角出现了虚警。双阈值 OTSU 方法能更好地提取河流(见图 3d 和图 3e), 但在图的左边中部的河流支流出现了漏检。图割方法能正确提取水体目标(见图 3f 和图 3g), 但仍然存在所提取的水体目标边缘不够光滑的问题。本文方法所提取的河流相对其他方法具有

更高的精度和光滑度(见图 3h 和图 3i)。

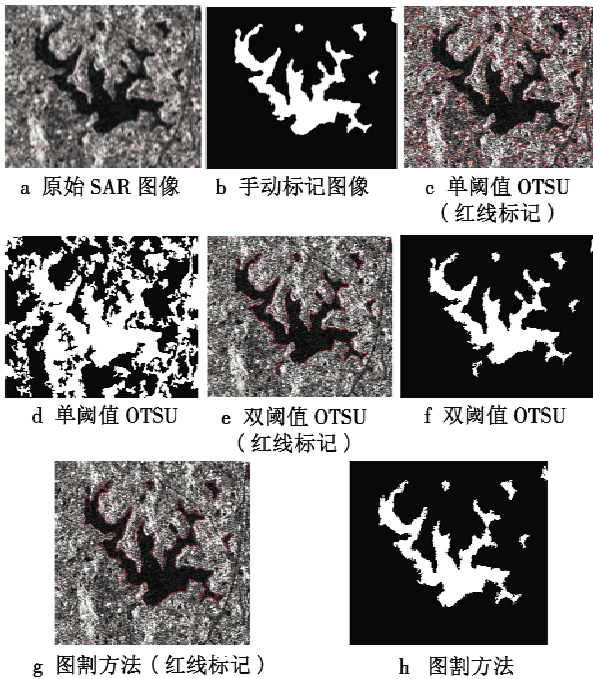


图 2 水库 SAR 图像的提取结果对比
Fig. 2 Comparison of the extraction results of reservoir in SAR image

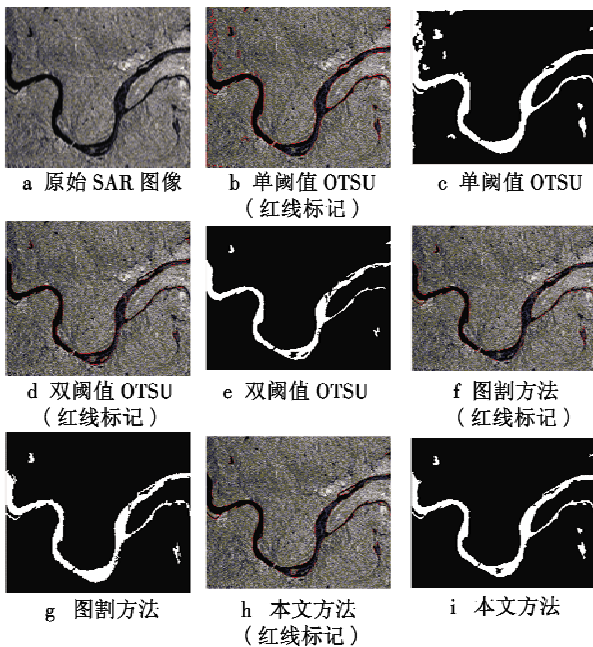


图 3 河流 SAR 图像的提取结果对比
Fig. 3 Comparison of the extraction results of streams in SAR image

表 1 给出了 4 种方法对 2 幅 SAR 图像中的水体进行分割的量化评价。表 1 中数据为 4 种方法和手动标记图像进行对比所得到的正确分割点数和图像大小的比值。从表 1 可看出,本文方法在两种情况下所提取的水体目标都具有更高的精度。

表 1 不同方法提取水体目标的精度

Table 1 The extraction precision of the water body target by different methods

	单阈值 OTSU 方法	双阈值 OTSU 方法	图割方法	本文方法
水库	0.8166	0.9842	0.9805	0.9873
河流	0.9655	0.9710	0.9716	0.9897

4 结束语

本文针对 SAR 图像水体提取时目标的筛选和边缘模糊问题,给出了一种结合区域生长和 MRF 模型的水体目标提取方法。结果显示,在进行区域生长时,通过提取分水岭过分割图像中的较大区块作为水体的种子区域能较好地剔除非水体区域,没有出现虚警或漏检的情况,所提出的包含观测图像灰度均值和局部均匀性特征的 MRF 模型能较好地对初始水体目标边缘进行精确的定位。

参考文献

- [1] 熊伟,徐永力,姚力波,等. 基于频谱残差视觉显著计算的高分辨 SAR 图像舰船检测算法[J]. 电光与控制, 2018,25(4):7-11,49.
- [2] 李廷元. 基于稀疏表示和拉伸变换的 SAR 图像目标识别[J]. 电光与控制,2018,25(5):50-55.
- [3] 冯颖,贺兴时,薛笋笋,等. 基于 NSCT 的 SAR 与可见光图像融合算法[J]. 电光与控制,2018,25(3):23-27.
- [4] 郭莹,贺兴时. 基于混合布谷鸟算法的图像阈值分割[J]. 西安工程大学学报,2017,31(1):141-146.
- [5] 夏雨薇,贺飞跃,张敏,等. 贝叶斯优化的 RSF 模型脑肿瘤图像分割新方法[J]. 西安工程大学学报,2018,32(2):237-242.
- [6] MAURIZIO S, URS W. Multi-temporal synthetic aperture radar metrics applied to map open water bodies[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(8):3225-3238.
- [7] 安成锦,牛照东,李志军,等. 典型 Otsu 算法阈值比较及其 SAR 图像水域分割性能分析[J]. 电子与信息学报,2010,32(9):2215-2219.
- [8] 安成锦,陈曾平. 基于 Otsu 和改进 CV 模型的 SAR 图像水域分割算法[J]. 信号处理,2011,27(2):221-225.
- [9] 魏航. 多源遥感图像水体信息提取方法的研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
- [10] 曹哲,张弓,戴为龙. 结合二次 OTSU 和 SIFT 的光学和 SAR 水域图像快速配准[J]. 计算机辅助设计与图形学报,2017,29(11):1963-1970.

他算法得到了进一步优化。同时,本文算法将波束频率不同作为约束条件,拓宽了天线阵列的频带范围,又可以通过移相器灵活控制波束指向,从而实现多功能阵列天线的设计。

宽带波束形成技术是当前阵列信号处理研究的重点,对于改善天线阵列的性能有着重要的意义,后续将进一步研究宽带信号的共享孔径技术。

参考文献

- [1] 杨瑞娟,陈小民,李晓柏,等. 雷达通信一体化共享信号技术研究[J]. 空军预警学院学报,2013(1):39-43.
- [2] 石长安,刘一民,王希勤,等. 基于帕累托最优的雷达-通信共享孔径研究[J]. 电子与信息学报,2016,38(9):2351-2357.
- [3] COMAN C I, LAGER I E, LIGTHART L P. A deterministic solution to the problem of interleaving multiple sparse array antennas [C]//European Radar Conference, IEEE, Paris, 2005:243-246.
- [4] QIN Y, GAO S, SAMBELL A, et al. Design of a broadband square-ring-slot coupled patch antenna [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2005, 47(5):454-457.
- [5] SIMEONI M, LAGER I E, COMAN C I, et al. Implementation of polarization agility in planar phased-array antennas by means of interleaved subarrays [J]. Radio Science, 2009, 44(5):1-12.
- [6] 胡继宽,王布宏,李龙军. 共享孔径交错阵列综合优化方法[J]. 电光与控制,2013,20(8):33-36.
- [7] 李龙军,王布宏,夏春和,等. 基于子阵激励能量匹配的多子阵交错阵列设计[J]. 北京航空航天大学学报,2016,42(11):2395-2402.
- [8] 李龙军,王布宏,夏春和. 基于迭代 FFT 算法的平面阵列交错稀疏布阵方法 [J]. 电波科学学报,2016,31(2):387-393.
- [9] 李龙军,王布宏,夏春和. 基于改进迭代 FFT 算法的均匀线阵交错稀疏布阵方法 [J]. 电子与信息学报,2016,38(4):970-977.
- [10] GUO H, GUO C J, DING J. Pattern synthesis of dual-band shared aperture interleaved linear antenna arrays [J]. Radioengineering, 2014, 23(3):798-804.
- [11] 陈客松. 稀布天线阵列的优化布阵技术研究 [D]. 成都:电子科技大学,2006.
- [12] SILVEIRA M, HELENO S. Separation between water and land in SAR images using region-based level sets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3):471-475.
- [13] 侯彪,胡育辉,焦李成. SAR 图像水体的改进 Shearlet 边缘检测 [J]. 中国图象图形学报,2010,15(10):1549-1554.
- [14] 徐川,华凤,眭海刚,等. 多尺度水平集 SAR 影像水体自动分割方法 [J]. 武汉大学学报:信息科学版,2014,39(1):27-31.
- [15] 蔡强,刘亚奇,曹健,等. 一种基于自适应标记与区域间近邻传播聚类的分水岭图像分割算法 [J]. 电子学报,2017,45(8):1911-1918.
- [16] 沈夏炯,吴晓洋,韩道军. 分水岭分割算法研究综述 [J]. 计算机工程,2015,41(10):26-30.
- [17] 徐蔚波,刘颖,章浩伟. 基于区域生长的图像分割研究进展 [J]. 北京生物医学工程,2017,36(3):317-322.
- [18] 陈志国. 高分辨率 SAR 卫星影像洪水区域提取应用研究 [D]. 武汉:武汉大学,2017.
- [19] SASCHA K, BJORN W, SILVIA V, et al. Automatic detection of rivers in high-resolution SAR data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(5):1364-1368.
- [20] 吴戌,叶伟. 复杂场景下的 SAR 图像水域边缘特征提取 [J]. 兵器装备工程学报,2017,38(8):136-139.
- [21] 贺飞跃,赵伟. 含水体的合成孔径雷达图像配准 [J]. 光学学报,2017,37(9):295-303.
- [22] LEI X G, LI Y, ZHAO N, et al. Fast segmentation approach for SAR image based on simple Markov random field [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(1):31-36.
- [23] 曹志民,吕秀丽,吴云,等. 基于渐进核图割的 SAR 图像自动分割 [J]. 光学技术,2016,42(4):357-360,366.

(上接第 24 页)