

中低分辨率合成孔径雷达影像多纹理特征的 Otsu 变化检测

马 骥, 邓喀中, 庄会富, 韩亚芳

中国矿业大学国土环境与灾害检测国家测绘地理信息局重点实验室, 江苏 徐州 221008

摘要 利用中低分辨率合成孔径雷达(SAR)影像,通过灰度共生矩阵提取不同纹理窗口大小的纹理特征来构造差异影像,并结合 Otsu 阈值分割方法来获取变化图像。实验结果表明,当检测地物单一、变化较明显的区域时,通过选用均值纹理特征并结合相应纹理窗口,中低分辨率 SAR 影像能够满足变化检测精度的要求。

关键词 传感器;合成孔径雷达;图像处理;变化检测;灰度共生矩阵;纹理特征

中图分类号 TP751.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.062804

Otsu Change Detection of Low and Moderate Resolution Synthetic Aperture Radar Image by Using Multi-Texture Features

Ma Su, Deng Kazhong, Zhuang Huifu, Han Yafang

NASG Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China

Abstract Low and moderate resolution synthetic aperture radar (SAR) images are used to extract texture features with different texture window sizes by the gray-level co-occurrence matrix and construct the difference images. Otsu threshold segmentation method is combined to obtain the change image. The experimental results show that, as for the detection of areas with simple surface features and obvious changes, the low and moderate resolution SAR images can meet the high detection accuracy demand by using the mean-value texture feature in combination with the corresponding texture window.

Key words sensors; synthetic aperture radar; image processing; change detection; gray level co-occurrence matrix; texture features

OCIS codes 280.6730; 110.2960; 100.3008

1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天候、全天时成像的优势,在民用、军用领域都有着广泛的应用^[1-2]。变化检测技术通过各种图像处理手段,对同一地区不同时相的 SAR 影像进行检测,在城市建筑物变化、矿区塌陷地变化、山体滑坡、湖泊面积变化以及海冰变化等研究中具有优势。随着科学技术的不断发展,高分辨率的 SAR 影像越来越多^[3],最高分辨率均在 3 m 以下,且成像质量高,纹理特征复杂。但是,高分辨率 SAR 的影像斑点噪声问题尤为突出,并且成像成本高,对于地物种类相对单一、变化较明显的区域,其高分辨率的优势无法发挥。

收稿日期: 2017-01-16; **收到修改稿日期:** 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(41272389)、测绘地理信息公益性行业科研专项项目(201412016)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金(BK20130174)

作者简介: 马 骥(1993—),男,硕士研究生,主要从事遥感影像融合与解译方面的研究。E-mail: sumacumt@163.com

导师简介: 邓喀中(1957—),男,博士,教授,主要从事开采沉陷及防护、岩土工程、3S 技术、工程测量等方面的研究。

E-mail: kzdeng@cumt.edu.cn(通信联系人)

本文选用两幅中低分辨率 SAR 影像(分辨率大于等于 9 m),一幅反映了海冰变化,一幅反映了洪水前后湖泊水位变化,其影像纹理简单,且地物种类单一^[4]。利用灰度共生矩阵(GLCM)^[5]提取不同窗口大小的纹理特征,并对比分析了 4 种纹理特征的检测结果,以期能利用中低分辨率 SAR 影像精确地检测出变化区域。

2 灰度共生矩阵

图像纹理特征被广泛应用于计算机视觉中,是图像分割、特征抽取及分类识别的重要手段,描述了像素的邻域灰度空间分布规律。20 世纪 70 年代,Haralick 等^[6]提出纹理特征的 GLCM 算法,在图像的二维条件概率密度函数基础上,通过计算图像中一定方向(θ)、一定距离(d)的两像素间的灰度相关性,来统计图像中的所有像素,从而反映图像的方向、间隔、变化幅度及变化快慢等信息。GLCM 算法的计算公式为

$$P_{i,j} = P(i, j, d, \theta) = \# \{ [(x, y), (x + \Delta x, y + \Delta y) \mid d, \theta, f(x, y) = i, f(x + \Delta x, y + \Delta y) = j] \}, \quad (1)$$

式中 $\# \{ \cdot \}$ 表示大括号中成立的像元对数; (x, y) 为像素坐标,且 $x=0, 1, 2, \dots, M-1, y=0, 1, 2, \dots, N-1$; $i, j=0, 1, \dots, L-1$ 代表灰度级; $\Delta x, \Delta y$ 为像素坐标偏移量; d 为 GLCM 的移动步长; θ 为 GLCM 的移动方向,一般取 $0, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$; f 函数表示为每一个分辨单元或者坐标对分配一些灰度值。为了减少计算量,同时不影响精度,结合其他研究者的成果^[7-8],选取 $d=1, \theta=0$ 来生成共生矩阵。Haralick 共提出了 14 个基于 GLCM 的特征向量,其中常用的共生纹理特征包括对比度、同质性、异质性、角二阶矩(ASM)、熵、均值、方差、相关性。Ulaby 等^[9]发现 14 个特征中,对比度、相关性、逆差矩、ASM 这 4 个特征向量不相关,可以减少计算量;Baraldi 等^[10]研究了 6 个纹理特征,认为对比度和熵是最重要的两个特征向量;杜培军等^[11]认为最大概率、相关性、对比度、均值、同质性及熵这 6 个纹理特征在 GLCM 中的应用较为广泛。本文选取均值、熵、ASM 和对比度这 4 个纹理特征进行实验,它们的计算公式为

$$C_{\text{CON}} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2, \quad (2)$$

$$A_{\text{ASM}} = \sum_{i,j=0}^{N-1} (P_{i,j})^2, \quad (3)$$

$$E_{\text{ENT}} = \sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\ln P_{i,j}), \quad (4)$$

$$M_{\text{MEAN}} = \sum_{i,j=0}^{N-1} iP_{i,j} \text{ or } M_{\text{MEAN}} = \sum_{i,j=0}^{N-1} jP_{i,j}, \quad (5)$$

式中 C_{CON} 为对比度,反映了纹理的粗细程度; A_{ASM} 为角 ASM,反映了图像灰度分布的均匀性和纹理的粗细程度; E_{ENT} 为熵值,反映了图像所具有的信息量,熵值越大,纹理信息越丰富; M_{MEAN} 为均值,反映了图像的明暗深浅,适用于灰度图像。

3 最大类间方差算法

假设给定的图像灰度级数 L 为 $1 \sim 256$ ^[12-13],每个灰度级数 i 对应的像素个数为 n_i ,并且图像总像素 $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$ 。为了简化计算,对灰度直方图进行归一化:

$$p_i = n_i / N, p_i \geq 0, \sum_{i=1}^L p_i = 1. \quad (6)$$

通过阈值 k 将图像分为两类:未变化类 C_0 和变化类 C_1 ,它们的出现概率、类内均值及方差公式分别为

$$\omega_0 = \Pr(C_0) = \omega(k), \quad \omega_1 = \Pr(C_1) = 1 - \omega(k), \quad (7)$$

$$\mu_0 = \mu(k) / \omega(k), \quad \mu_1 = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - \omega(k)}, \quad (8)$$

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^k (i - \mu_0)^2 p_i / \omega_0, \quad \sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 p_i / \omega_1, \quad (9)$$

式中 $\mu(k)$ 为未变化类的类内均值, μ_T 为原始图像的均值, $\omega(k) = \sum_{i=1}^k p_i$, $\mu(k) = \sum_{i=1}^k i p_i$, $\mu_T = \mu(L) = \sum_{i=1}^L i p_i$ 。

为了评价阈值 k 的分类性能, 最大类间方差(Otsu)算法引入了统计模式识别中的三个分类依据:

$$\lambda = \sigma_B^2 / \sigma_W^2, \quad \kappa = \sigma_T^2 / \sigma_W^2, \quad \eta = \sigma_B^2 / \sigma_T^2, \quad (10)$$

$$\sigma_W^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2, \quad \sigma_B^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2, \quad \sigma_T^2 = \sum_{i=1}^L (i - \mu_T)^2 p_i,$$

式中 σ_W^2 , σ_B^2 , σ_T^2 分别代表类内方差、类间方差及总方差。最优阈值能使任意一个判别准则(λ , κ , η)最大化。通过观察发现, 阈值 k 与类内方差和类间方差有关, 而与总方差无关。进一步研究可以看出, 类内方差是基于第二类统计特征(类方差)的, 而类间方差是基于第一类统计特征(类均值)的。因此, 选取 η 作为阈值分类器:

$$\sigma_B^2 = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]}, \quad \sigma_B^2(k^*) = \max_{1 \leq k < L} \sigma_B^2(k), \quad (11)$$

式中 k^* 为最优阈值。

4 实验部分

4.1 数据介绍

实验数据一是由 Envisat 卫星在孟加拉国地区采集到的两张多时相先进合成孔径雷达(ASAR)图像, 如图 1 所示。图像大小为 $300 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$, 获取时间分别为 2007 年 4 月 12 日和 2007 年 7 月 26 日。Envisat 卫星的 ASAR 传感器工作在 C 波段, 回波信号可以穿透云层、雨水, 返回地面、海平面、冰面。

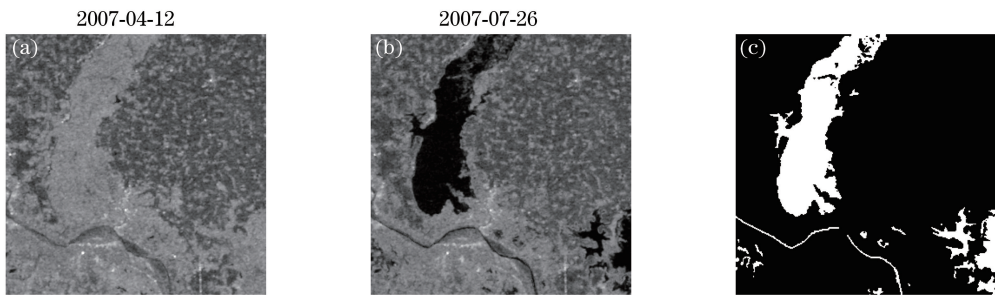


图 1 (a)(b)不同时间下的孟加拉国地区 ASAR 影像原始数据及(c)真实变化图

Fig. 1 (a)(b) Original data of ASAR images in Bangladesh area at different time and (c) real change image

实验数据二是由加拿大 RADARSAT-1 卫星获得的加拿大首都渥太华的两幅 SAR 影像, 如图 2 所示。图像大小为 $290 \text{ pixel} \times 350 \text{ pixel}$, 获取时间分别为 1997 年 5 月和 1997 年 8 月。该卫星采用太阳同步轨道, 工作在 C 波段, 用于全球土地利用、自然资源监测等。

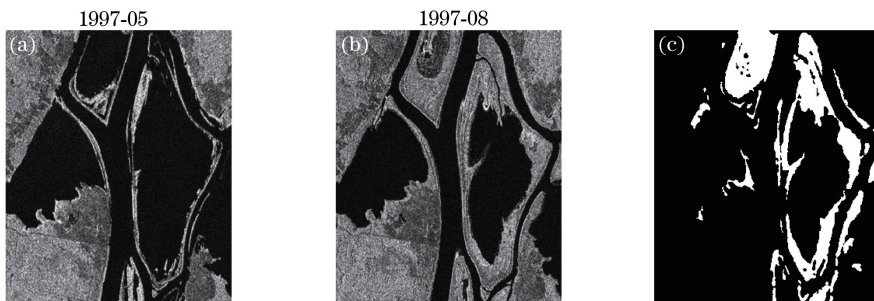


图 2 (a)(b)不同时间下的渥太华地区 SAR 影像原始数据及(c)真实变化图

Fig. 2 (a)(b) Original data of SAR images in Ottawa area at different time and (c) real change image

4.2 数据预处理

采用 GAMMA 软件将原始数据处理成单视复数(SLC)影像, 并进行影像配准, 以达到亚像元精度。在对 SAR 影像进行特征提取与分析前, 采用滤波方式对影像进行滤波处理以抑制相干斑^[14-15], 同时保证影像

信息的完整性^[16]。对两张时相 SAR 影像进行灰度级压缩处理,以提高纹理特征计算效率(原始灰度级为 256,压缩后灰度级为 16)。

4.3 实验与分析

选取 $d=1, \theta=0$, 利用 GLCM 提取 SAR 图像的纹理特征(均值、熵、ASM 及对比度)。参考文献 [17-18], 结合实验影像大小及纹理情况, 选取 7 种不同大小的窗口 ($3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$, $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$, $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$, $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$, $11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$, $13 \text{ pixel} \times 13 \text{ pixel}$, $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$), 生成了 28 幅纹理特征影像。利用相同纹理特征不同时相的影像构造差异影像^[19], 对经过 Otsu 阈值分割后的变化图的精度进行评价, 评价指标包括漏检数、误检数、总误差数及正确检测率(PCC)。其中漏检数指未检测出的真实变化像素数; 误检数指将实际未变化像素检测为变化像素的次数; 总误差数即漏检数与误检数之和^[20]; PCC 指纹理特征被正确识别的程度^[21]。图 3, 4 分别为不同窗口大小下渥太华和孟加拉国地区两组 SAR 各纹理特征的漏检数和误检数。

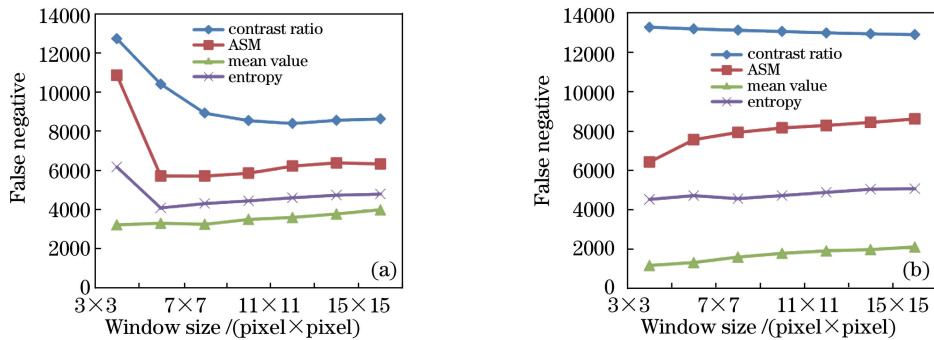


图 3 不同窗口大小下各纹理特征的漏检数。(a)渥太华地区;(b)孟加拉国地区

Fig. 3 False negatives of each texture feature under different window sizes. (a) Ottawa area; (b) Bangladesh area

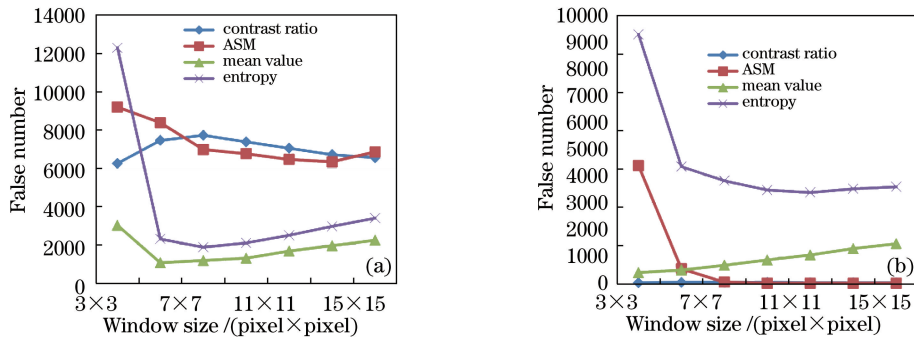


图 4 不同窗口大小下各纹理特征的误检数。(a)渥太华地区;(b)孟加拉国地区

Fig. 4 False number of each texture feature under different window sizes. (a) Ottawa area; (b) Bangladesh area

由图 3, 4 可知, 总误差数与纹理特征提取窗口的大小有关; 有的特征, 如 ASM, 对提取窗口大小很敏感; 而有的特征, 如熵, 其漏检数对窗口大小不敏感, 但其误检数对窗口大小很敏感, 尤其在窗口较小时, 窗口大小变化对其误检数有很大影响。因此, 在处理纹理特征熵时, 要注意对提取窗口的选择^[22]。总体上, 对比度对窗口大小最不敏感, 均值、熵次之, ASM 最为敏感; 各个纹理特征的误检数和漏检数随窗口大小的变化曲线, 大部分都存在极小值, 说明纹理窗口过大或过小, 都会造成检测精度的下降。实验中发现: 纹理窗口取 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 时, 各纹理特征均能获得较理想的检测结果。为进一步确定最优纹理特征与窗口大小, 对两组图像不同纹理特征的总误差数进行了比较, 如图 5 所示, 并计算了不同窗口大小下不同纹理特征的 PCC, 结果见表 1, 2。

由图 5 可知, 对比度的检测总误差数是 4 个特征中最大的, 检测效果最差, 表明对比度不适用于此类 SAR 影像; 均值的总误差数是 4 个特征中最小的, 表明在此类 SAR 影像中, 利用均值能够得到较为理想的变化检测结果; 纹理窗口的大小对 ASM 和熵的总误差数有很大影响, 存在最优窗口大小。当 PCC 大于 90% 时, 说明检测的变化结果可靠。由表 1, 2 可知: 在渥太华 SAR 影像中, $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 窗口的均值纹理

特征取得了最佳的检测结果;在孟加拉国地区 SAR 影像中,3 pixel×3 pixel 窗口的均值纹理特征表现最佳。两组实验的最优变化检测图如图 6 所示,检测精度评价结果见表 3。

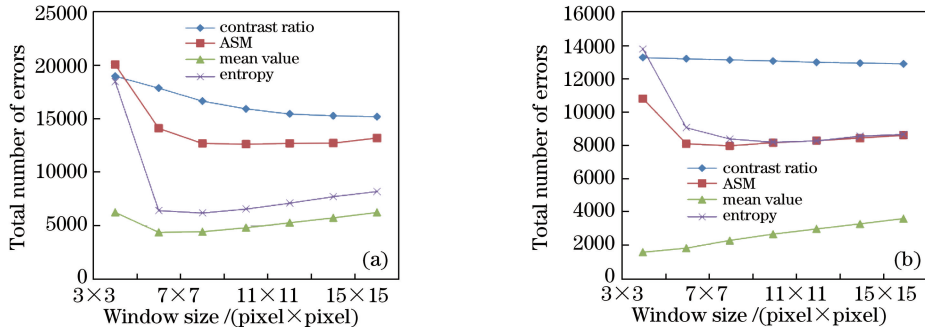


图 5 不同窗口大小下各纹理特征的总误差数。(a)渥太华地区;(b)孟加拉国地区

Fig. 5 Total number of errors of each texture feature under different window sizes. (a) Ottawa area; (b) Bangladesh area

表 1 渥太华地区 SAR 影像各纹理特征的 PCC

Table 1 PCC of each texture feature of SAR image in Ottawa area

Window size / (pixel×pixel)	PCC /%			
	Contrast ratio	ASM	Entropy	Mean value
3×3	81.29	80.23	81.80	93.84
5×5	82.39	86.11	93.69	95.69
7×7	83.59	87.49	93.91	95.63
9×9	84.31	87.56	93.54	95.27
11×11	84.78	87.49	93.00	94.80
13×13	84.95	87.46	92.40	94.36
15×15	85.04	87.00	91.93	93.85

表 2 孟加拉国地区 ASAR 影像各纹理特征的 PCC

Table 2 PCC of each texture feature of ASAR image in Bangladesh area

Window size / (pixel×pixel)	PCC /%			
	Contrast ratio	ASM	Entropy	Mean value
3×3	85.22	87.98	84.65	98.26
5×5	85.30	91.00	89.92	97.99
7×7	85.38	91.14	90.68	97.48
9×9	85.45	90.93	90.89	97.05
11×11	85.54	90.79	90.81	96.70
13×13	85.59	90.62	90.48	96.36
15×15	85.64	90.43	90.37	96.01

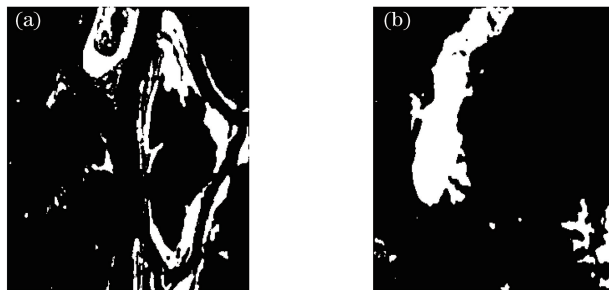


图 6 最优 SAR 影像变化检测图。(a)渥太华地区;(b)孟加拉国地区

Fig. 6 Optimal change detection image of SAR images. (a) Ottawa area; (b) Bangladesh area

表 3 检测精度评定结果

Table 3 Evaluation results of detection accuracy

Experimental area	Image size / (pixel×pixel)	Total number of errors	PCC /%
Ottawa	290×350	4372	95.69
Bangladesh	300×300	1567	98.26

5 结 论

利用 4 种 GLCM 纹理特征(均值、熵、对比度、ASM),对两组中低分辨率 SAR 影像进行了变化检测实验。针对具有不同特点的不同区域的影像,选择适当的纹理特征及纹理窗口构造纹理差异图,并利用 Otsu 阈值分割法,得到最终变化检测结果。对比真实变化图,发现较小的窗口结合均值纹理特征能够取得较好的变化检测结果。当检测区域地物单一时,可以利用中低分辨率 SAR 影像来降低检测成本。

参 考 文 献

- [1] Zhang Jianwei. High-precision extended object tracking based on region feature matching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(5): 051004.
张建伟. 基于区域特征匹配的扩展目标高精度跟踪[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(5): 051004.
- [2] Wang Hongqiao, Cai Yanning, Fu Guangyuan, *et al.* Recognition and tracking of multiple slowly-moving ground targets based on image series[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051501.
汪洪桥, 蔡艳宁, 付光远, 等. 基于图像序列的地面慢动多目标识别与跟踪[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051501.
- [3] Zhao Zhiwei, Jin Lihua. Inspiration from development of overseas SAR satellites system technologies[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(4): 86-91.
赵志伟, 金丽花. 国外 SAR 卫星总体技术发展现状及启示[J]. *航天器工程*, 2010, 19(4): 86-91.
- [4] Jia Chengli, Kuang Gangyao. Automatic extraction of roads from low resolution SAR images[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(10): 1218-1223.
贾承丽, 匡纲要. SAR 图像自动道路提取[J]. *中国图象图形学报*, 2005, 10(10): 1218-1223.
- [5] Wang Dongguang, Xiao Pengfeng, Song Xiaoqun, *et al.* Change detection method for high resolution remote sensing image in association with textural and spectral information[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2012, 24(4): 76-81.
王东广, 肖鹏峰, 宋晓群, 等. 结合纹理信息的高分辨率遥感图像变化检测方法[J]. *国土资源遥感*, 2012, 24(4): 76-81.
- [6] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, 3(6): 610-621.
- [7] Liu Li, Kuang Gangyao. Overview of image textural feature extraction methods[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(4): 622-635.
刘 丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(4): 622-635.
- [8] Bo Hua, Ma Fulong, Jiao Licheng. Research on computation of GLCM of image texture[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(1): 155-158.
薄 华, 马缚龙, 焦李成. 图像纹理的灰度共生矩阵计算问题的分析[J]. *电子学报*, 2006, 34(1): 155-158.
- [9] Ulaby F T, Kouyate F, Brisco B, *et al.* Textural information in SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1986, 24(2): 235-245.
- [10] Baraldi A, Parmiggiani F. Investigation of the textural characteristics associated with gray level cooccurrence matrix statistical parameters[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1995, 33(2): 293-304.
- [11] Du P, Samat A, Waske B, *et al.* Random forest and rotation forest for fully polarized SAR image classification using polarimetric and spatial features[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2015, 105: 38-53.
- [12] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2007, 9(1): 62-66.
- [13] Zeng Zifang, Pan Jianpin. A change vector analysis based on OSTU for threshold[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2013, 36(3): 50-52.
曾子芳, 潘建平. 基于天津法求阈值的变化矢量分析法[J]. *测绘与空间地理信息*, 2013, 36(3): 50-52.
- [14] Xiao Shichen, Liao Jingjuan, Shen Guozhuang. Speckle filtering for polarimetric SAR data based on self-cross bilateral filter[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 400-408.
肖世忱, 廖静娟, 沈国状. 自交叉双边滤波的极化 SAR 数据相干斑抑制[J]. *遥感学报*, 2015, 19(3): 400-408.

- [15] Cai Changqing, Zhang Yongshan. Windowed Fourier transform filter method with improved threshold[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031204.
蔡长青, 张永山. 改进阈值的窗口傅里叶变换滤波[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031204.
- [16] Dong Y, Milne A K, Forster B C. A review of SAR speckle filters: Texture restoration and preservation[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000, 7: 633-635.
- [17] Hirsch J. The utility of texture analysis to improve per-pixel classification for high to very high spatial resolution imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(4): 733-745.
- [18] Shokr M E. Texture measures for sea-ice classification from radar images[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1989, 2: 763-768.
- [19] Chen Zhipeng. The study of the differencing change detection method based on textural features[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2002.
陈志鹏. 基于纹理特征的差值变化检测方法研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2002.
- [20] Shang Ronghua, Qi Lipin, Jiao Licheng. Change detection in SAR images by artificial immune multi-objective clustering[EB/OL]. (2014-02-27)[2016-12-05]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201402-580>.
尚荣华, 齐丽萍, 焦李成. 基于人工免疫多目标聚类的 SAR 图像变化检测[EB/OL]. (2014-02-27).[2016-12-05]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201402-580>.
- [21] Cui Ying, Xiong Boli, Jiang Yongmei, *et al.* Multi-scale approach based on structure similarity for change detection in SAR images[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(10): 1507-1513.
崔莹, 熊博莅, 蒋咏梅, 等. 结合结构相似度的自适应多尺度 SAR 图像变化检测[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(10): 1507-1513.
- [22] Zhuang Huifu, Deng Kazhong, Fan Hongdong. SAR images unsupervised change detection based on combination of texture feature vector with maximum entropy principle[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(3): 339-346.
庄会富, 邓喀中, 范洪冬. 纹理特征向量与最大化熵法相结合的 SAR 影像非监督变化检测[J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 339-346.