



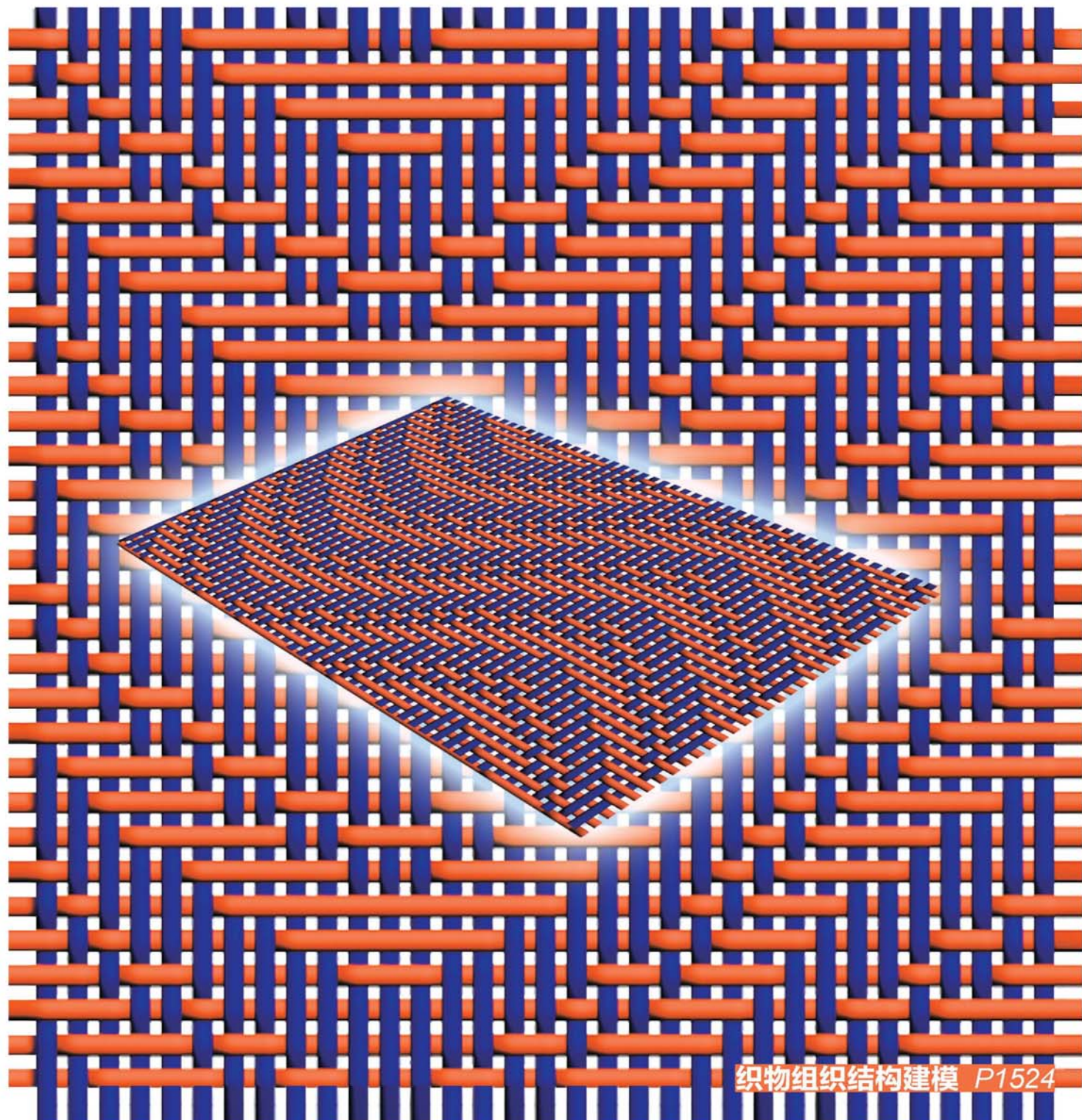
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

2014  
10  
VOL.19

ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB



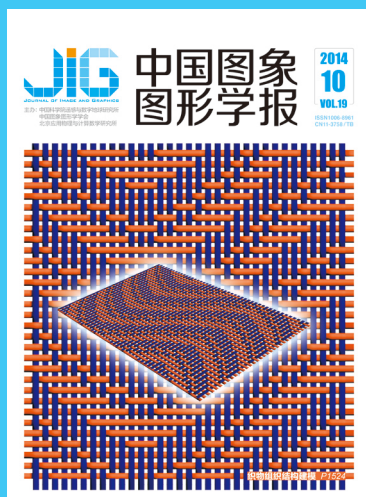
织物组织结构建模 P1524



# 中国图象图形学报

刊名题字: 宋健

月刊 (1996年创刊)



第19卷第10期 (总第222期)

2014年10月16日

中国精品科技期刊  
中国国际影响力优秀学术期刊  
中国科技核心期刊

## 版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿, 均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版, 所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用, 所有内容, 未经许可, 不得转载或以其他方式使用。

## Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司  
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

## Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS  
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of  
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation  
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

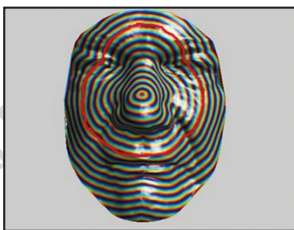
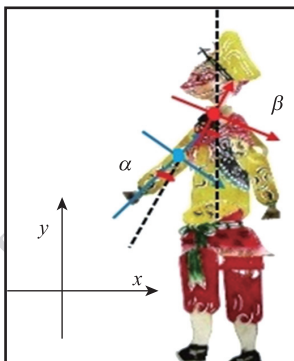
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

自适应梯度重建分水岭分割  
算法(第1430页)基于特征点针对表情变化的  
3维人脸识别(第1459页)数字皮影的交互仿真和动画  
绘制(第1490页)

## 综述

2维至3维图像/视频转换的深度图提取方法综述

李可宏, 姜灵敏, 龚永义 ..... 1393

## 图像处理和编码

优化参数化二元模映射信息隐藏

廖琪男, 柯琦, 赖振丹 ..... 1407

基于分数阶微积分的噪声检测和图像去噪

杨柱中, 周激流, 郎方年 ..... 1418

## 图像分析和识别

自适应梯度重建分水岭分割算法

张志禹, 孟令辉, 雷涛 ..... 1430

鲁棒空间约束的模糊聚类图像分割

刘金尧, 纪则轩 ..... 1438

灰度级信息的目标边界精确周长估算

吴秦, 周琪, 梁久祯 ..... 1449

基于特征点表情变化的3维人脸识别

李燕春, 达飞鹏 ..... 1459

## 图像理解和计算机视觉

曲率无穷范数约束的曲线3维重建

贺磊盈, 武传宇, 杜小强 ..... 1468

光照变化条件下的光流估计

刘骏, 祖静, 张瑜, 张红艳 ..... 1475

GPU近实时线性双目立体代价聚合

陈彬, 陈和平, 李晓卉 ..... 1481

## 计算机图形学

数字皮影的交互仿真和动画绘制

陈璇, 张明敏, 潘志夷 ..... 1490

## 遥感图像处理

由航空影像自动重建大范围3维地形

杨阿华, 李学军, 谢剑薇, 李东岳 ..... 1500

结合结构相似度的自适应多尺度SAR图像变化检测

崔莹, 熊博莅, 蒋咏梅, 匡纲要 ..... 1507

## 第11届全国智能CAD与数字娱乐学术会议专栏

特征驱动先验的归一化卷积超分辨率重建

徐枫, 严锡君, 黄陈蓉, 郑胜男, 黄凤辰, 徐立中 ..... 1514

机织物组织图的数学描述与3维几何建模

杨允出, 李基拓, 陆国栋 ..... 1524

虚拟手术流血模拟的GPU加速实现

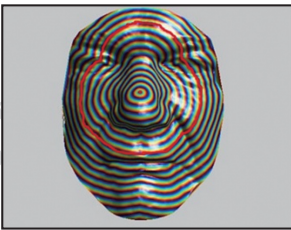
赖颢升, 向辉 ..... 1532

# CONTENTS

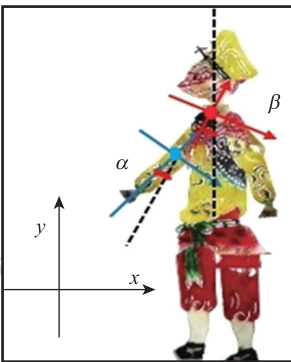
## JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Adaptive gradient reconstruction for watershed based image segmentation (P1430)



Expression-insensitive 3D face recognition method based on facial fiducial points(P1349)



Interaction and animation simulation of digital shadow play(P1490)

### Review

- Depth map extraction methods in 2D-3D image/video conversion  
Li Kehong, Jiang Lingmin, Gong Yongyi ..... 1393

### Image Processing and Coding

- Optimal parameterized binary modulo mapping steganography  
Liao Qinan, Ke Qi, Lai Zhendan ..... 1407
- Noise detection and image de-noising based on fractional calculus  
Yang Zhuzhong, Zhou Jiliu, Lang Fangnian ..... 1418

### Image Analysis and Recognition

- Adaptive gradient reconstruction for watershed based image segmentation  
Zhang Zhiyu, Meng Linghui, Lei Tao ..... 1430
- Robust spatial factor based fuzzy clustering for image segmentation  
Liu Jinyao, Ji Zexuan ..... 1438
- Accurate perimeter estimation of target boundary based on gray-level information  
Wu Qin, Zhou Qi, Liang Jiuzhen ..... 1449
- Expression-insensitive 3D face recognition method based on facial fiducial points  
Li Yanchun, Da Feipeng ..... 1459

### Image Understanding and Computer Vision

- Three dimensional curve reconstruction under the L-infinity norm of curvatures  
He Leiying, Wu Chuanyu, Du Xiaoqiang ..... 1468
- Optical flow estimation method under the condition of illumination change  
Liu Jun, Zu Jing, Zhang Yu, Zhang Hongyan ..... 1475
- Near real time linear stereo cost aggregation on GPU  
Chen Bin, Chen Heping, Li Xiaohui ..... 1481

### Computer Graphics

- Interaction and animation simulation of digital shadow play  
Chen Xuan, Zhang Mingmin, Pan Zhigeng ..... 1490

### Remote Sensing Image Processing

- Automatic reconstruction of large area 3D terrain from aerial imagery  
Yang Ahua, Li Xuejun, Xie Jianwei, Li Dongyue ..... 1500
- Multi-scale approach based on structure similarity for change detection in SAR images  
Cui Ying, Xiong Boli, Jiang Yongmei, Kuang Gangyao ..... 1507

### Column of CIDE'2014

- Normalized convolution based super-resolution reconstruction using feature-driven prior  
Xu Feng, Yan Xijun, Huang Chenrong, Zheng Shengnan, Huang Fengchen, Xu Lizhong ..... 1514
- Mathematical expression and 3D geometrical modeling of weave diagram  
Yang Yunchu, Li Jituo, Lu Guodong ..... 1524
- Bleeding simulation of virtual surgery implemented on GPU  
Lai Haosheng, Xiang Hui ..... 1532

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)10-1507-07

论文引用格式: Cui Y, Xiong B L, Jiang Y M, Kuang G Y. 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, 匡纲要. 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. ] [DOI:10.11834/jig.20141013]

## 结合结构相似度的自适应多尺度 SAR 图像变化检测

崔莹, 熊博莅, 蒋咏梅, 匡纲要

国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

**摘要:** 目的 结合高斯核函数特有的性质, 提出一种基于结构相似度的自适应多尺度 SAR 图像变化检测算法。

**方法** 本文提出的算法包括差异图像获取、高斯多尺度分解、基于结构相似性的最优尺度选择、特征矢量构造以及模糊 C 均值分类。首先, 通过对多时相 SAR 图像进行对数比运算获取差异图像, 然后, 利用基于图像的结构相似度估计高斯多尺度变换的最优尺度, 继而在该最优尺度参数下逐像素构建变化检测特征矢量, 最后通过模糊 C 均值聚类方法实现变化像素与未变化像素的分离, 生成最终的变化检测结果图。**结果** 在两组真实的 SAR 图像数据上测试本文算法, 正确检测率分别达到 0.995 2 和 0.962 3, Kappa 系数分别为 0.820 0 和 0.854 0, 相比传统算法有了较大的提高。**结论** 本文算法充分利用了尺度信息, 对噪声的鲁棒性有所提高。实测 SAR 数据的实验结果表明, 本文算法可以智能获取最优分解尺度, 显著提高了 SAR 图像变化检测性能。

**关键词:** 变化检测; 多尺度信息; 结构相似度; 特征矢量; 模糊 C 均值聚类

## Multi-scale approach based on structure similarity for change detection in SAR images

Cui Ying, Xiong Boli, Jiang Yongmei, Kuang Gangyao

College of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China

**Abstract:** **Objective** Synthetic Aperture Radar (SAR) is suitable for dynamic monitoring because it is unaffected by weather conditions. SAR image change detection is the key technology for the dynamic monitoring of targets. However, multi-scale SAR images contain more details than single-scale images. Thus, we integrate multi-scale analysis in the change detection algorithm to obtain accurate results. Gaussian multi-scale theory is easy to understand and has advantages. Despite its capacity to preserve image details, it is seldom used in change detection. This study proposes a new adaptive multi-scale change detection method on the basis of the structure similarity (SSIM) of SAR images. **Method** The proposed method includes five steps, namely, obtaining difference images (DIs), multi-scale decomposition based on Gaussian kernel, optimal scale estimation by SSIM, building feature vectors for each pixel, and fuzzy C-means (FCM) clustering to obtain the final change map. DIs are obtained using a log-ratio operator. A median filter is utilized to suppress the speckle noise. The optimal Gaussian scale is estimated by finding the maximum SSIM of the DIs through iterations. The optimal Gaussian kernel scale and its differential forms are convoluted with the DIs to generate change detection feature vectors at the pixel level. FCM is introduced to classify the changed and unchanged pixels using the feature vectors, and the change detection map is achieved. **Result** Experiments on two pairs of real SAR images of Bern and Ottawa areas show that the proposed method outperforms state-of-the-art algorithms. The correct detection rates of the two pairs of SAR images reach 0.995 2

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61201338)

第一作者简介: 崔莹 (1989—), 女, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院摄影测量与遥感专业硕士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像变化检测。E-mail: C\_200804014@126.com



and 0.962 3, and their kappa coefficients reach 0.820 0 and 0.854 0. **Conclusion** This study proposes an effective multi-scale change detection method based on the SSIM of SAR images. This method fully utilizes the scale information of SAR images and is robust to speckle noise. The proposed method is effective in finding the optimal scale of DI and in detecting changes.

**Key words:** change detection; multi-scale information; structure similarity; feature vector; fuzzy C-means clustering

## 0 引言

合成孔径雷达(SAR)作为一种主动式微波遥感手段,具有全天时、全天候、高分辨等成像优势,非常适合对地面各类地物和感兴趣目标进行动态监视,如进行植被的生长监测、灾情估计、城市规划、目标检测及战场态势监控等,而实现这一过程的关键就是实现 SAR 图像的变化检测,提取感兴趣的信息。

随着对变化检测精度要求的不断提高,尺度空间的理论被学者们引入到变化检测技术中来。广义上讲,尺度就是研究某一现象或问题时所处的时间或者空间单位,最早是被应用于计算机视觉中。在 SAR 图像处理中,不同尺度下图像所表现的特征是不一样的,在某一尺度空间认为无明显变化的,在另一尺度空间就可能被判定为变化区域。由于多尺度分析具有充分利用各个尺度下信息和特征的优势,近年来,它已被广泛地应用到 SAR 图像处理各个领域<sup>[1]</sup>,学者们也开始把目光投向了利用图像的多尺度信息来实现高精度的变化检测。而小波作为多尺度分析的有力工具,被广泛地应用于变化检测的研究中。如 Celik<sup>[2]</sup>通过对差异图像进行非抽取离散小波分解(UDWT)来构建尺度特征矢量,进而利用 k 均值分类对其进行划分,得到变化类与未变化类,取得了较好的效果;Bovolo 和 Bruzzone<sup>[3]</sup>利用 2 维静态小波(2D-SWT)对差异图像进行分解,而后通过自适应尺度融合的策略,较高精度地实现了 SAR 图像的变化检测。但是使用的这种 2 维可分小波是 1 维小波的简单张成,方向选择性差,并且由于它是一种稀疏表示方法,无法有效地捕捉轮廓信息。

高斯多尺度分解作为多尺度分析的另一个有力工具,却很少被利用到变化检测中。它的理论简单,高斯函数具有的独特性质,使其在多尺度分析中能够较好地保持图像的细节信息。而在评价图像差异的诸多标准中,结构相似度较相关性、峰值信噪比等客观评价因子,更符合人眼主观视觉效果<sup>[1]</sup>。鉴于此,根据 SAR 图像受固有斑点噪声影响,信噪比与

光学遥感图像相比偏低,图像中地物细节信息易被噪声湮没的特点,利用高斯核算子对差异图构建多尺度信息特征量,进而通过结构相似性度量寻得最优尺度因子。再利用模糊 C 均值聚类的方式对差异图进行分割,有效地提高了图像变化检测的精度和抗噪性。

## 1 算法过程描述

针对同一地区、不同时相获取的两幅 SAR 图像,经过严格的配准,以及几何校正、辐射校正等一系列预处理之后,进行变化检测的研究。

本文算法包括 5 个步骤:1) 获取差异图;2) 对差异图进行高斯多尺度分解;3) 利用相似性度量得到最优尺度;4) 构造变化检测特征矢量;5) 对特征矢量聚类得到变化检测结果图。

### 1.1 差异图像获取

对于 SAR 图像来说,存在着大量的相干斑噪声,它是以乘性噪声的形式存在。通常通过对数比值运算将其转化为加性噪声,可以有效地降低斑点噪声,进而有利于后续处理<sup>[4]</sup>,它也是变化检测中最为常用的一种差异图获取方法。

设  $I_1$ 、 $I_2$  是不同时间获取的同一地区的 SAR 图像,且是经过严格配准的。对数比图像的表示形式为

$$I_{LR} = \left| \frac{\ln I_1}{\ln I_2} \right| = |\ln I_1 - \ln I_2| \quad (1)$$

在得到对数比图像后,进行中值滤波处理,它可以降低图像中的噪声干扰。

### 1.2 多尺度分解

多尺度分解,也称为多尺度变换,就是通过特定的多尺度变换模型,对原始图像进行变换,生成不同分辨率的图像。对多分辨率图像进行综合分析,提取对象的多尺度特征,从而满足特征提取、分割、分类的需求。常用的多尺度变换模型包括小波变换、高斯多尺度变换,以及直接抽取处理等<sup>[5-6]</sup>,下面就实验中用到的高斯多尺度变换作重点介绍。

高斯多尺度变换是一种重要的多尺度变换,其定义为

$$L_{\sigma}(x, y) = G_{\sigma}(x, y) * I(x, y) \quad (2)$$

式中,  $I(x, y)$  是原始图像,  $x, y$  表示像素坐标,  $G_{\sigma}(x, y)$  是高斯核函数, 即

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  是尺度参数。通过尺度参数的改变, 可以获得不同分辨程度的图像。对同一个像素来说, 综合不同尺度上的特征即组成最终的目标特征。 $\sigma$  影响差异图像的分辨率, 导致最终的变化检测精度也不同。如何选择尺度因子  $\sigma$ , 使得变化检测的精度最优, 是研究中应当考虑的问题。文中, 利用图像的结构相似性度量来确定尺度因子的最优值, 具体过程在实验部分描述。

### 1.3 结构相似度

结构相似度<sup>[7]</sup> (SSIM), 是一种基于结构信息衡量信号之间相似程度的评价准则。它比均方误差、峰值信噪比等客观评价方法更适合人眼主观视觉效果<sup>[7]</sup>。它用于评价两幅图像的相似程度时, 是通过计算两幅图像的均值、方差, 结合灰度对比指标、对比度对比指标和结构对比指标来构造的。两幅图像  $X, Y$  中对应像元  $x, y$  的 SSIM 为

$$R_{\text{SSIM}}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy}^2 + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (4)$$

式中,  $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}^2$  分别表示像元  $x, y$  邻域的均值、标准差和协方差,  $C_1, C_2$  是经验选取的正常数, 实验中, 取  $C_1 = C_2 = 1$ 。对于图像的所有对应点求出  $R_{\text{SSIM}}(x, y)$ , 而后求平均就得到图像  $X, Y$  的结构相似性值  $R_{\text{SSIM}}(X, Y)$ 。 $R_{\text{SSIM}}(X, Y)$  值越大, 表明两幅图像越相似。当其值达到最大值 1 时, 说明两幅图像完全相同。可见, 结构相似度能够很好地表征两幅图像的相似性。

### 1.4 特征矢量的构造

研究发现, 图像中任意点的邻域特征信息可以通过它的微分数据集来描述<sup>[8-9]</sup>。

高斯核函数可以进一步表示为

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) = G_{\sigma}(x) \cdot G_{\sigma}(y) \quad (5)$$

用高斯核函数及其微分形式, 通过与差异图像卷积

的方式, 构造一系列算子  $\{L, L_x, L_y, L_{xx}, L_{xy}, L_{yy}\}$ , 由于高阶微分易受噪声干扰, 因此这里只利用前两阶微分。

以  $x$  方向为例, 系列算子为

$$\begin{aligned} L_x &= \left(\frac{\partial G_{\sigma}(x)}{\partial x}\right) * I(x, y) \\ L_{xx} &= \left(\frac{\partial^2 G_{\sigma}(x)}{\partial x^2}\right) * I(x, y) \\ L_{xy} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial G_{\sigma}(x)}{\partial x}\right) * I(x, y) \end{aligned} \quad (6)$$

$L_y, L_{yy}$  的构造方法同理。

而后进行适当的组合, 构造出基于微分不变量的特征描述子

$$V_0 = \begin{bmatrix} L \\ L_x^2 + L_y^2 \\ L_{xx} + L_{yy} \\ L_{xx}^2 + 2L_{xy}^2 + L_{yy}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, 第 1 个分量代表平均亮度, 第 2 个分量代表梯度幅值的平方, 第三个分量是 Laplace 算子。由于  $V_0$  描述的是邻域内的微分结构信息, 只与点的邻域内容有关, 而与点在图像中的位置无关, 所以  $V_0$  是平移不变的, 同时  $V_0$  是旋转不变的。因此这种描述子在图像检索和目标检测中得到了广泛的应用<sup>[9]</sup>。采用这样的方式, 有利于克服噪声的影响, 实现图像的稳定计算。

可以看出, 尺度因子影响特征描述子的每个分量, 在得到最优尺度  $\sigma$  后, 再进行分类即可得到最佳变化检测结果图。

结合像素邻域内的点, 可以获取比单个点更充分的信息。实验中采取的是十字抽样的邻域构造方式, 这种方法在保证算法检测性能的前提下, 可以提高算法的计算效率。这样就构造了同时包含尺度信息和邻域信息的特征矢量, 即

$$V(i, j) = [V_0(i, j), V_0(i-1, j), V_0(i, j-1), V_0(i+1, j), V_0(i, j+1)] \quad (8)$$

### 1.5 模糊 C 均值分类

模糊 C 均值 (FCM) 分类算法是目前广泛应用的一种模糊聚类算法<sup>[10-12]</sup>, 其过程可以概括为通过对隶属度矩阵和聚类中心的迭代更新, 使准则函数实现最优化, 进而确定每个样本对类中心的隶属度, 从而决定样本归属的这样一个过程。文中, 对构造的上述特征矢量进行模糊聚类, 聚类数为 2, 分为变化类和非变化类, 当两次目标函数值之差小

于设定的阈值或者迭代次数超过 100 时,聚类过程结束。

## 2 评价指标

在变化检测中,为了评估得到的变化检测图像的质量以及算法的好坏,一般从检测准确率(PCC),虚检率( $F_a$ ),Kappa 系数(KC)<sup>[13]</sup>等几个指标进行评价。

检测准确率是指检测出来的变化信息与地面真实变化相比,检测正确的百分比。

虚检率是指实际未发生变化,却被检测为变化的像素个数所占的百分比。

KC 一般用来评价遥感图像的分类精确度,分析两幅图像的相似性程度。

在变化检测中,Kappa 系数可用来评估变化检测得到结果与地面真实二者之间的相似性程度。Kappa 系数越大,则表明两幅图像的相似程度就越高,即变化检测得到的结果与地面真实越接近。如果 Kappa 系数为 1,则说明完全一致。对于变化区域在整幅遥感图像中相对较大过较小的情况下,Kappa 系数的变化比其他评价标准型敏感,更能反应检测性能的差异。

## 3 实验和结果

### 3.1 实验数据介绍

实验中采用的是两组真实的 SAR 图像。

第 1 组数据是 ERS-2 获取的两幅 SAR 图像。

处理的数据是已经几何配准、辐射校正的图像,如图 1(a)(b)所示。成像地点是瑞士伯尔尼市(Bern),在两次成像的时间间隔内,洪水袭击了该市,其中图 1(a)为洪水前的 SAR 图像,作为本实验的基准图像,而图 1(b)为洪水后的 SAR 图像,作为本实验的待检测图像,图 1(c)是地面真实变化的参考图像(白色表示真实变化区域)。3 幅图像大小均为  $359 \times 359$ ,灰度级为 256。

第 2 组数据来自 Radarsat 获取的 SAR 图像。

如图 2(a)(b)所示,成像地点是加拿大 Ottawa 地区。在两次成像之间,由于水淹没了部分陆地地区,而产生了变化的信息。图 2(a)是水淹没陆地前的图像,作为本实验的基准图像;图 2(b)则是待检测图像;图 2(c)是真实变化的区域参考图,其中白

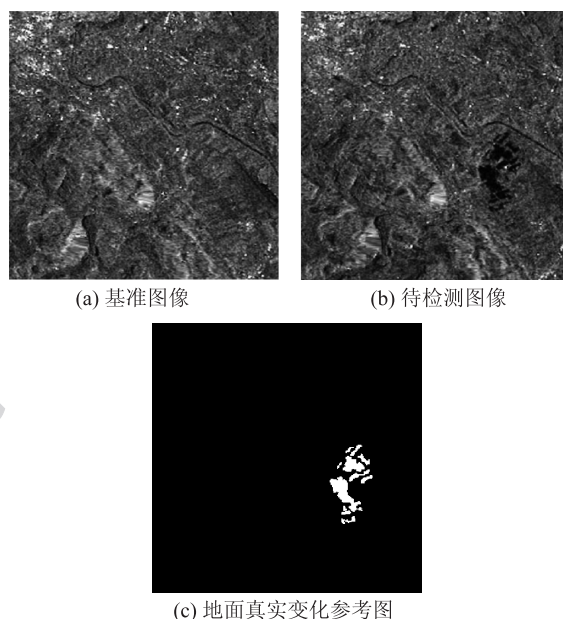


图 1 瑞士 Bern 地区 SAR 图像

Fig. 1 SAR image of Bern area in Switzerland

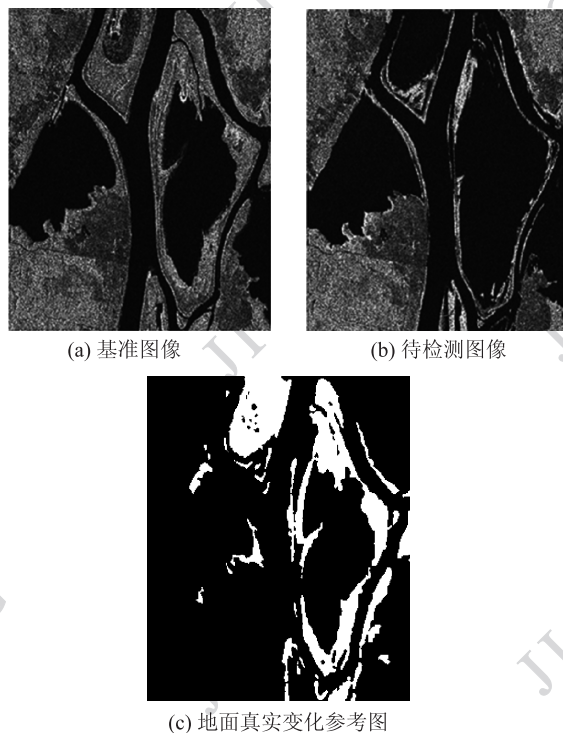


图 2 加拿大 Ottawa 地区 SAR 图像

Fig. 2 SAR image of Ottawa area in Canada

色区域代表真实变化部分。图像大小为  $353 \times 287$ ,灰度级为 256。

### 3.2 实验过程描述及结果分析

首先构造基于对数比的差异图像,而后利用自适应方法寻得最优尺度因子  $\sigma$ ,而后在该尺度因子



下构造基于微分不变量的特征描述子,通过模糊 C 均值聚类得到最终的变化检测结果图。其中最优尺度因子,是通过计算相邻尺度下构造的变化结果图之间的结构相似性来判定选取的。如果 SSIM 值很小,说明该尺度因子是不稳健的,应该继续改变  $\sigma$  后进行上述的计算,直到在  $\sigma$  变化范围内 SSIM 达到最大时,说明此时两幅结果图之间的差异最小,变化检测效果已趋于稳定。取 SSIM 达到最大值时对应的两幅图为最佳结果图,其中的第 1 幅图所对应的尺度因子  $\sigma$  就是所寻找的最优尺度因子  $\sigma_{\text{opt}}$ 。

实验中发现,  $\sigma$  取值超过 2 时对变化检测的结果几乎不产生什么影响,综合考虑算法效率和精度,选取的  $\sigma$  变化范围是  $[0.5, 1.5]$ , 增长步长为 0.1。按照上述方法,得到两组数据的最优尺度因子  $\sigma_{\text{opt}}$  分别为 1.4 和 1.3 (见表 1)。

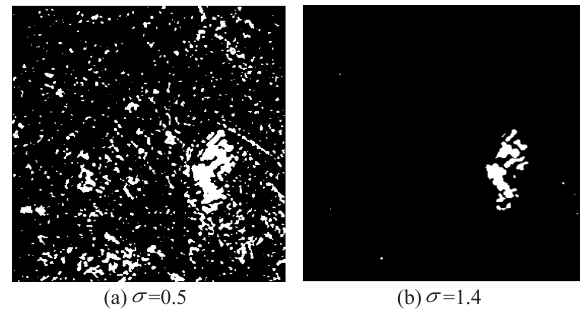
表 1 最佳尺度因子和阈值

Table 1 Optimal scales and thresholds

|                              | 数据源     |           |
|------------------------------|---------|-----------|
|                              | Bern 地区 | Ottawa 地区 |
| 最优尺度因子 $\sigma_{\text{opt}}$ | 1.4     | 1.3       |
| 手动最佳灰度阈值 $T_{\text{opt}}$    | 20      | 18        |

为表明利用最优尺度因子得到结果的有效性,以数据 1 为例,将  $\sigma$  取  $\sigma_{\text{opt}}$  时与  $\sigma$  取 0.5 时得到的变化检测结果图对比如图 3 所示,可以看出,采用最优尺度得到的变化检测结果图,其效果比不采用时有了很大提高。

实验中将本文算法与手动阈值分割法和利用 2 维静态小波 (2D-SWT) 构建特征矢量聚类法得到的结果进行对比。手动阈值分割法是逐级进行灰度实验,取使得到的变化检测结果与真实变化参考图之间的 SSIM 达到最大时的阈值为最优,而后进行二

图 3 不同  $\sigma$  值下的变化检测结果Fig. 3 Change Maps of different  $\sigma$ 

值分割得到结果图,两组数据得到的阈值分别为 20 和 18 (见表 1); 2 维静态小波分解 (2D-SWT) 法是对差异图进行两层静态小波分解,联合差异图的灰度值以及除对角线分量外的其他分量构成该像素点的特征矢量,而后利用 FCM 聚类得到变化结果图。FCM 算法迭代停止的条件是两次目标函数值之差小于  $1E-5$  或者迭代次数超过 100 次。

图 4 和图 5 是利用本文算法和对比算法对上述两组数据进行变化检测的结果图。

为了更直观地说明本文方法的优势,对局部区域进行放大。图 6,图 7 分别针对两组数据,给出真实变化区域与手动分割法,2D-SWT 特征分类法,以及文中方法所得到变化检测结果的局部放大图,选取矩形框所标识的区域。

从局部放大图可以直观地看出,本文算法与地面真实的变化图像是最为接近的,它可以很好地保留边缘的信息,对细节的保持比较出色,尤其对于圆圈所标识的部分,手动分割法漏检的较多,对变化区域的检测不完整;而 2D-SWT 特征分类法误检的较多,无法将两部分单独的变化子块区分开。

而后,对利用 3 种算法得到的变化结果图进行了准确性的比较,结果如表 2 所示。

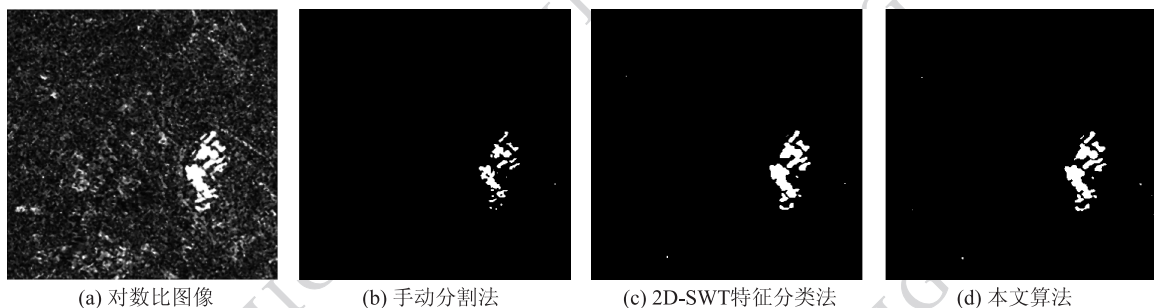


图 4 瑞士 Bern 地区变化检测结果图

Fig. 4 Change detection results of Bern area in Switzerland

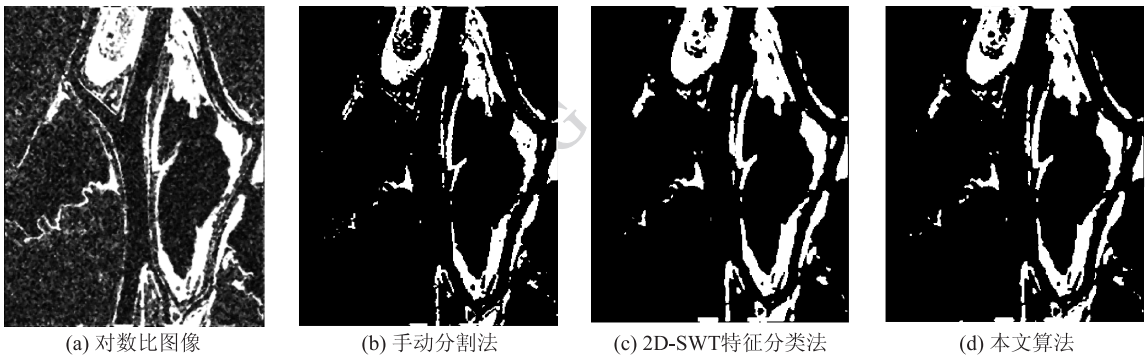


图 5 加拿大 Ottawa 地区变化检测结果图

Fig. 5 Change detection results of Ottawa area in Canada

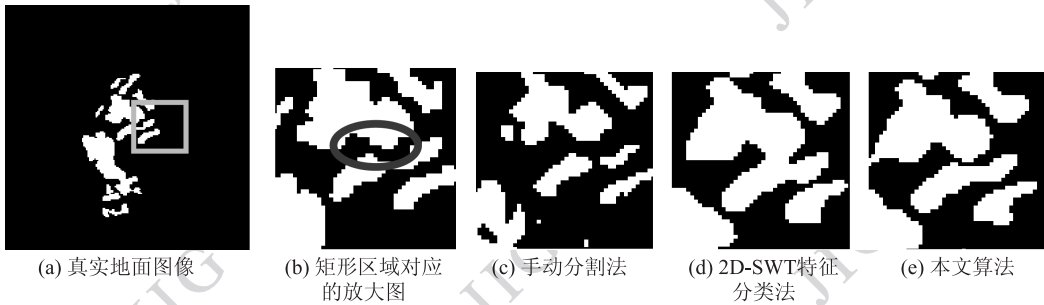


图 6 瑞士 Bern 地区变化检测结果局部放大图

Fig. 6 Detail of enlarged-scale results of Bern area in Switzerland

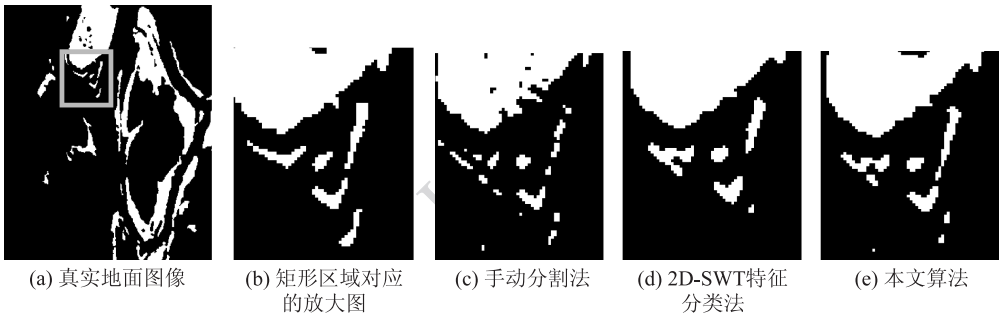


图 7 加拿大 Ottawa 地区变化检测结果局部放大图

Fig. 7 Detail of enlarged-scale results of Ottawa area in Canada

表 2 评价指标计算

Table 2 Values of measurements

| 评价指标 | Bern 地区   |              |         | Ottawa 地区 |              |         |
|------|-----------|--------------|---------|-----------|--------------|---------|
|      | 手动分割法     | 2D-SWT 特征分类法 | 本文算法    | 手动分割法     | 2D-SWT 特征分类法 | 本文算法    |
| PCC  | 0.993 9   | 0.994 5      | 0.995 2 | 0.946 3   | 0.951 9      | 0.962 3 |
| Fa   | 5.426 e-4 | 0.003 3      | 0.002 7 | 0.007 2   | 0.026 9      | 0.014 8 |
| KC   | 0.716 0   | 0.797 2      | 0.820 0 | 0.774 6   | 0.818 2      | 0.854 0 |

从图 6、图 7 以及表 2 可以看出,本文算法能够很好地检测出变化的区域,并且细节信息保持得更

加完整。正确检测率 PCC 和 KC 相比其他算法都有了较大的提高,鲁棒性提高。进一步验证了通过高

斯多尺度方法构造的特征量可以很好地表征像素的特性,进而实现了高精度的变化检测。

## 4 结 论

基于图像结构相似性的多尺度 SAR 图像变化检测算法,通过寻取最大的 SSIM 值,可以有效得到最优的高斯尺度因子。进而在该最优尺度下,构造基于微分不变量的特征矢量,这样的方式较好地利用了图像的尺度信息和邻域信息,有效地克服了单一尺度下尺度信息不充分的缺点,最后通过模糊 C 均值聚类的方法,实现了变化像素与未变化像素的分离,得到最终的变化检测结果。

实验结果表明,本文算法实现了较高精度的变化检测,性能优于其他算法,说明结合图像多尺度信息的特征描述能够更加充分地利用图像信息,实现更为稳健和有效的变化检测。该算法适用于对大场景的自然地物进行监测,如文中 SAR 数据中水体的变化,不仅能够很好地提取出变化信息,并且对边缘的保持也具有一定优势。由于本文是从高斯多尺度分解的角度出发,下一步的研究重点将考虑小波多尺度变换,结合图像的统计特性,构造更具代表性的低维度特征描述子,使其在变化检测算法的精度和效率方面都能有所改善。

## 参考文献 (References)

- [1] Gonzalez R C. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005:277-325. [冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 第二版. 北京:电子工业出版社, 2005:277-325.]
- [2] Celik T. Multiscale change detection in multitemporal satellite images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4):820-824.
- [3] Bovolo F, Bruzzone L. A detail-preserving scale-driven approach to change detection in multitemporal SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(12):2963-2972.
- [4] Huang S Q, Liu D Z, Hu M X, et al. Multi-temporal SAR image change detection technique based on wavelet transform [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(2):180-186. [黄世奇,刘代志,胡明星,等. 基于小波变换的多时相 SAR 图像变化检测技术[J]. 测绘学报,2010,39(2):180-186.]
- [5] Wu T, Chen X, Niu L, et al. Latest development of research on unsupervised change detection in SAR images [J]. Remote Sensing Information, 2013, 1:110-118. [吴涛,陈曦,牛蕾,等. 非监督 SAR 图像变化检测研究最新进展[J]. 遥感信息,2013, 1:110-118.]
- [6] Zhan Q Q, You H J, Hong W. Multiscale methods on SAR image change detection [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35:136-139. [詹芊芊,尤建洪,洪文. SAR 图像变化检测的多尺度方法研究[J]. 测绘科学,2010, 35:136-139.]
- [7] Sun J X. Image Processing [M]. Beijing: Science Press, 2009:216-219. [孙即祥. 图像处理[M]. 北京:科学出版社,2009:216-219.]
- [8] Chang B, Zhang G. An unsupervised approach based on geometrical structures to automatic change detection in multitemporal SAR images [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9):2125-2129. [常宝,张弓. 基于几何结构的 SAR 图像无监督变化检测方法[J]. 电子学报,2011, 39(9):2125-2129.]
- [9] Fang Z L. Research based on structure information to change detection in multitemporal SAR images [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. [房自立. 基于结构信息的多时相遥感图像变化检测方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.]
- [10] Li M. Research based on fuzzy C-means algorithm to change detection in remote-sensing images [D]. Changsha: Hunan University, 2009. [李敏. 基于模糊 C 均值算法的遥感图像变化检测的研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.]
- [11] Liu Y, Kou W D, Mu C H. Change detection for SAR images based on fuzzy clustering using multilevel thresholding [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(6):13-18. [刘逸,寇卫东,慕彩红. 结合多阈值法的模糊聚类用于 SAR 图像变化检测[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版,2013,40(6):13-18.]
- [12] Jia C J. Change detection of SAR image based on fuzzy clustering [J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(10):23-26. [贾彩杰. 基于模糊聚类的 SAR 图像变化检测[J]. 电子科技,2012,25(10):23-26.]
- [13] Xiong B L. Study of registration and change detection in SAR images [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. [熊博莅. SAR 图像配准及变化检测技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.]