

# 面向 SAR 图像像素级变化检测的去模糊化处理方法

高敏, 王肖霞\*, 杨风暴, 张宗军

中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

**摘要** 针对合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像变化检测中存在的差异图细节信息丢失的问题,提出了一种面向 SAR 图像像素级变化检测的去模糊化处理方法。通过对差异图漏检像素点分布的理论分析,提出了一种新型的差异图构造方法,将新型差异图构造方法生成的差异图与经典的像素级差异图构造算法生成的差异图相融合,实现了差异图的边缘去模糊化。以均值比值算法为例,实验结果表明,新型差异图构造方法得到的差异信息与邻域变化检测算法得到的差异信息具有较强的互补性;利用新型差异图构造方法进行去模糊化处理,得到的差异图在主观上更接近真实地物的变化情况,在客观上变化检测结果的漏检数降低,变化检测的精度有所提高。

**关键词** 成像系统; 图像处理; 合成孔径雷达; 边缘去模糊化; 变化检测; 差异图

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.221105

## Deblurring Processing Method for Pixel Level Change Detection of SAR Images

Gao Min, Wang Xiaoxia\*, Yang Fengbao, Zhang Zongjun

School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In order to solve the problem about the loss of detail information of difference maps in the change detection of synthetic aperture radar (SAR) images, a deblurring processing method for the pixel level change detection of SAR images is proposed. Based on the theoretical analysis of the distribution of pixels missed from the difference map, a new method for constructing the difference map is proposed. The difference map generated by this proposed algorithm is fused with the difference map generated by the classical pixel-level change detection algorithm to realize the edge deblurring of the difference map. Taking the average ratio algorithm as an example, the experimental results show that the difference information obtained by the proposed algorithm and that by the neighborhood change detection algorithm are highly complementary. The difference map generated from deblurring by the proposed algorithm is subjectively closer to the change of the real ground object. Objectively, the numbers of the missed points of change detection results are reduced, and the accuracy of change detection is improved.

**Key words** imaging systems; image processing; synthetic aperture radar; edge deblurring; change detection; difference map

**OCIS codes** 110.2960; 280.6730

## 1 引言

遥感图像变化检测是基于不同时期覆盖同一地表区域的多幅遥感图像定量分析并确定地表变化的过程<sup>[1]</sup>。合成孔径雷达(SAR)成像系统具备全天时和全天候<sup>[2]</sup>的探测特点及对地穿透探测的能力,能

够在复杂天气状况下获取高分辨率遥感影像。SAR 图像变化检测已被广泛应用于灾害监测<sup>[3-4]</sup>、植被覆盖检测<sup>[5-6]</sup>和城市土地利用研究<sup>[7-8]</sup>等方面。

像素级 SAR 图像变化检测方法通过建立不同的变化检测算子来构建差异图,对差异图进行二值分割后得到变化检测结果图。差异图的质量直接影

收稿日期: 2020-02-27; 修回日期: 2020-04-15; 录用日期: 2020-04-23

基金项目: 山西省研究生教育创新项目(2019BY108)、中北大学研究生科技基金资助课题(20191631)、山西省研究生教育创新项目(2020SY365)

\* E-mail: 574978473@qq.com

响变化区域的检测精度,经典的差异图生成方法是差值法和比值法<sup>[9]</sup>。SAR 图像在成像过程中存在大量相干斑且混杂在图像的变化区域和背景中,散斑叠加在像素点上给真实地物变化信息的提取造成困难。为了能消除散斑噪声的干扰,许多学者通过结合邻域信息来构建差异图。Inglada 等<sup>[10]</sup>利用邻域均值信息降低散斑噪声的影响,通过结合局部窗口像素点的灰度信息,提出了均值比值(Mean-Ratio, MR)算子以构造差异图。Gong 等<sup>[11]</sup>利用局部邻域的异质性控制邻域信息对中心像素的影响权重,提出了基于邻域的比率算子(Neighborhood-Based Ratio, NR)并对差异图进行了构造。Ma 等<sup>[12]</sup>将由对数比值算子和均值比值算子生成的差异图进行小波融合,将对数法中相对平滑的背景信息与均值比值法中接近实际情况的变化信息结合起来,即可得到较高质量的差异图。

上述方法通过结合邻域信息去除了散斑噪声干扰<sup>[13]</sup>,但同时不对不均匀区域进行的模糊处理引起了差异图细节信息的丢失<sup>[14]</sup>,从而造成大量漏检。针对变化区域边缘模糊的问题,本文提出了面向 SAR 图像像素级变化检测的去模糊化处理方法。该方法首先理论分析了差异图的漏检像素点分布,提出了一种新型差异图生成方法。以均值比值法为例,将均值比值法生成的差异图与本文所提算法生成的差异图相融合<sup>[15]</sup>,采用基于局部信息的模糊 C 均值(FLICM)聚类算法<sup>[16]</sup>进行图像分类并得到变化结果。实验结果表明:本文提出的算法可以对多时相 SAR 图像的变化区域进行去模糊化处理并有效提取差异图的细节信息,提高了真实变化区域的检测能力,极大降低了漏检数,从而提高了像素级变化检测算法的检测精度。

## 2 变化区域的去模糊化处理

### 2.1 新型差异图的构造方法

对两幅同一区域不同时间的 SAR 图像进行变化检测,主要包括以下几个基本步骤:几何校正、辐射校正、图像配准、图像去噪、图像差异图构建、图像分类和结果分析。一般的 SAR 图像变化检测算法都是针对配准后的图像,因此本文也针对已配准的 SAR 图像构造差异图并进行图像分类,从而得到变化区域。图像差异图的构造是变化检测的重要环节。由于 SAR 图像在成像过程中受到散斑噪声的干扰,散斑叠加在像素点上遮蔽了真实地物的变化信息,造成差异图失真。为了去除散斑噪声对差异

信息提取的影响,在 SAR 图像变化检测过程中,通常结合邻域信息进行差异图的生成。结合邻域信息的像素级变化检测算法利用了像元局部相邻区域的灰度信息,避免了单个像素点被相干斑覆盖从而引起误判的情况。但是,算法也对变化区域边缘的像元进行了同等的模糊处理,损失了不均匀区域真实的灰度信息,造成异质性区域的部分变化像素点无法被准确识别。根据上述理论分析可知,差异图的漏检像素点主要分布在异质性区域,边缘变化像素点和突变像素点的信息模糊。基于此,本文提出了一种新型的差异图构造方法,计算公式为

$$D_{ER}(x) = \frac{\partial_{n_1} I_1(x) + (1 - \partial_{n_1}) \times u'_1}{\partial_{n_2} I_2(x) + (1 - \partial_{n_2}) \times u'_2}, \quad (1)$$

式中: $D_{ER}$  为新型差异图构造方法计算得到的差异图像; $x$  为图像对应的逐像素点; $n_1$  为前一时相图像对应像素点的邻域; $n_2$  为后一时相图像对应像素点的邻域; $I_1$  与  $I_2$  分别为同一地区不同时刻获取的两幅 SAR 图像, $u'_1$  和  $u'_2$  分别为前后两幅时相图像的局部邻域除去中心像素点后对应的灰度均值; $\partial_{n_1}$  和  $\partial_{n_2}$  分别为前后时相图像同一位置对应像素点处归一化后的异质性系数,且

$$\partial_1 = \frac{\partial_1}{\partial_{\max}}, \quad \partial_2 = \frac{\partial_2}{\partial_{\max}}, \quad (2)$$

式中: $\partial_1$  为前一时相图像该像素点的异质性系数; $\partial_2$  为后一时相图像该像素点的异质性系数; $\partial_{\max}$  为前后时相图像相应局部邻域中像素点的最大异质性系数。

$\partial$  表征图像邻域中像元之间的异质程度,由邻域的方差与均值的比值构成,即

$$\partial = \frac{D(x)}{\mu(x)}, \quad (3)$$

式中: $D(x)$  为邻域的方差; $\mu(x)$  为邻域的均值。 $\partial_1$  和  $\partial_2$  可以根据(2)式计算得到。

新型的差异图构造方法利用变化前后图像对应像素点位置的异质性系数  $\partial_{n_1}$  和  $\partial_{n_2}$  来控制邻域灰度信息对中心像元的影响权重,避免异质性区域被模糊处理而引起边缘信息丢失。采用(1)式提取差异信息时,利用异质性系数自动调节中心像元的灰度信息和邻域灰度信息所占的权重,突出了差异图中的边缘信息和突变信息。在异质性系数的控制下,多时相 SAR 图像中所提取的不均匀区域变化信息主要取决于该像元的灰度信息,边缘信息得到充分保留,而异质性较小的区域则通过结合邻域灰度信息来抑制散斑噪声。同时,异质性系数的变化可以表征区域纹理的变化情况,从而提取局部均值未改

变但局部纹理发生变化的突变像素点。新型差异图的构造方法较好保留了多时相 SAR 图像的细节变化信息,同时有效抑制了散斑噪声,增强了差异图中变化区域与未变化区域的对比度。

## 2.2 差异图的融合

SAR 图像在成像过程中存在大量散斑噪声,散斑混杂在图像的变化区域和背景中,给变化检测带来困难。经典的像素级变化检测算法在构建差异图的过程中,通过结合局部邻域像素点的灰度信息降低了散斑噪声的影响,差异图变化区域与实际情况非常接近,经典的像素级差异图生成算法具有很强的噪声鲁棒性。但通过使用局部统计值替代单像素点值来构建差异图时忽略了细节信息,甚至缺失异质性区域的变化信息,这会造成差异图的边缘模糊。在像素级变化检测算法中,较有代表性的是均值比值法,其以局部窗口平均灰度值替代单个像素点灰度值。

$$D_{ER}(x) = 1 - \min\left(\frac{\mu_1}{\mu_2}, \frac{\mu_2}{\mu_1}\right), \quad (4)$$

式中: $\mu_1$  和  $\mu_2$  分别为两幅 SAR 图像局部窗口内所有像素灰度值的平均值。

新型差异图构造算法可以较好保留变化区域的细节信息,尤其是异质性区域的变化像素点和突变像素点。将新型差异图构造方法生成的差异图与结合邻域信息的像素级变化检测算法生成的差异图相融合,可以突出差异图的边缘,实现去模糊化处理。根据以上不同算法的各自特点,将传统方法中接近实际情况的变化信息和新型差异图构造算法中的细节变化信息结合起来即可得到较高质量的差异图。图像融合按信息提取程度从低到高分为三个层次:像素级融合、特征级融合和判定级融合,这三个层次采用的融合算法各不相同。通过加权法、数学形态法、图像代数法、金字塔融合法及小波变化图像融合法等像素级融合方法对互补性较强的两幅差异图进

行双差异图融合,可以增强变化信息。本文采用简单的取大融合法对均值比值法和本文方法构建的两幅差异图进行融合,不对融合前的差异图信息进行任何增强处理,只对原图像像素进行直接取大处理,得到的融合后的差异图像可以表示为

$$D_{MER}(x) = \max\{D_{MR}(x), D_{ER}(x)\}, \quad (5)$$

式中: $D_{MER}$  为根据取大融合法融合得到的差异图像; $D_{MR}$  为根据均值比值法计算得到的差异图像。

## 2.3 基于局部信息的模糊 C 均值 (FLICM) 聚类算法

模糊 C 均值聚类 (FCM) 算法是最常用的聚类方法之一。然而,传统的 FCM 算法不考虑空间邻域信息,对噪声干扰非常敏感。FLICM 算法在 FCM 算法基础上引入了模糊因子,通过结合图像的邻域信息,可以提高抗噪性和鲁棒性。本文提出的新型差异图构造算法是在多分辨率分解算法下生成的,新型差异图构造算法和均值比值法得到的两幅差异图在融合时以不同的分辨率水平结合了图像信息,融合后的差异图的直方图统计概率模型是较为复杂的。基于此,本文采用 FLICM 算法通过对差异图进行分割得到了二值变化图,在保留图像细节的同时增强了抗噪性。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验设计

为了验证本文算法的有效性,实验选择了两组不同地区的真实 SAR 图像数据进行测试。第一组实验数据是由 Landsat 7 卫星拍摄的墨西哥 (Mexico) 郊外同一区域大火前后的 SAR 图像,图像大小为  $577 \text{ pixel} \times 577 \text{ pixel}$ 。图 1(a) 和图 1(b) 对应的时间分别是 2000 年 4 月和 2002 年 5 月。图 1(c) 为地物变化参考图,白色像素表示变化像素点,共有 332929 个像素点,其中包含 45036 个实际变化的像素点。

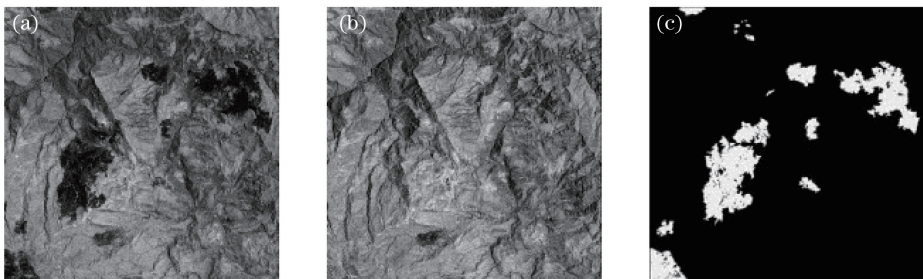


图 1 墨西哥数据集。(a) 2000 年 4 月影像;(b) 2002 年 5 月影像;(c) 变化参考图

Fig. 1 Mexico dataset. (a) Image from April 2000; (b) image from May 2002; (c) reference map

第二组实验数据是由 Radarsat SAR 卫星拍摄的加拿大渥太华(Ottawa)地区同一区域经洪水影响前后的 SAR 图像, 图像大小为  $324 \text{ pixel} \times 386 \text{ pixel}$ 。图 2(a) 和图 2(b) 对应的时间分别为 1997 年 5 月和 1997 年 8 月。图 2(c) 为地物变化参考图, 白色像素表示变化像素点, 共有 125064 个像素点, 其中含有 2409 个实际变化的像素点。

采用以上两个数据集进行实验仿真。首先采用

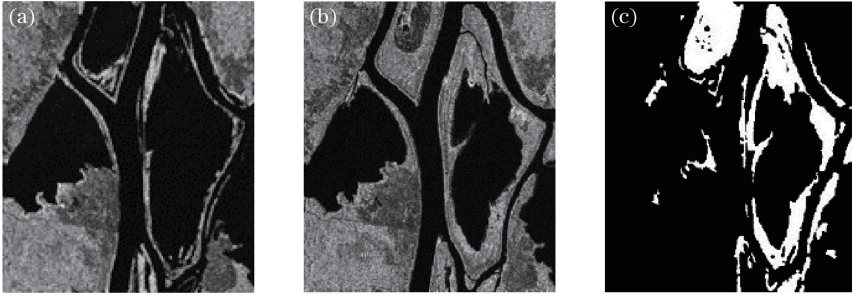


图 2 渥太华数据集。(a) 1997 年 5 月影像; (b) 1997 年 8 月影像; (c) 变化参考图

Fig. 2 Ottawa dataset. (a) Image from May 1997; (b) image from August 1997; (c) reference map

### 3.2 评价指标

为了对不同的变化检测算法进行全面量化评估, 本文采用漏检数(False Negative, FN)、虚警数(False Positive, FP)、检测变化数(Detected Change Points, DC)、准确率(PCC)和 Kappa 系数对变化检测的性能进行量化评估。其中, FN 为变化像素中被错分为未变化像素的像素点个数; FP 为未变化像素中被错分为变化像素的像素点个数; DC 表示变化检测结果中被检测为变化像素的像素点个数; PCC 表示总体的分类正确率; Kappa 系数综合考虑了准确检测出的变化

像素级变化检测方法中经典的均值比值算子和邻域比值算子生成对应的差异图; 然后通过绝对值取大对均值比值算子和本文算法得到的差异图进行融合, 得到融合差异图; 针对均值比值法、邻域比值法和本文方法在两个数据集上得到的差异图, 利用 FLICM 聚类算法得到变化图。在同一数据集下对本文算法与经典的两种像素级变化检测算法进行了主观评价和客观指标评价。

像素点以及虚警或漏检造成的错误检测, 是衡量检测精度的关键性指标。Kappa 的值在  $0 \sim 1$  范围内, 值越大代表变化检测精度越高。

### 3.3 实验结果与分析

图 3 所示为三个像素级变化检测算法在墨西哥数据集上的差异图, 该数据集的变化主要由于火灾烧毁了大量植被, 部分森林严重烧毁, 变为裸露地区。图 4 所示为利用 FLICM 聚类算法得到的变化检测结果图, 其中白色像素点表示两时相间发生变化的区域。

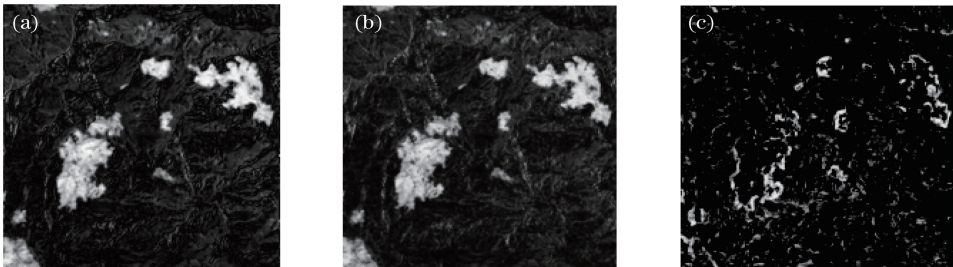


图 3 各算法在墨西哥数据集上的差异图。(a) 均值比值法; (b) 邻域比值法; (c) 本文算法

Fig. 3 Difference maps of different algorithms on Mexico dataset. (a) Mean-ratio method; (b) neighborhood-ratio method; (c) proposed method

定量评价结果如表 1 所示, 成片烧毁的植被区域易于检测, 但变化与未变化的边界十分模糊, 检测过程中存在漏检和误检。

图 5 所示为三个像素级变化检测算法在渥太华数据集上生成的差异图, 该数据集的变化主要源于洪水冲毁了地面建筑。图 6 所示为利用 FLICM 聚

类算法得到的变化检测结果图, 其中白色像素点表示两时相间发生变化的区域。定量评价结果如表 2 所示。

从图 3(c)、图 5(c) 可以看出, 本文提出的新型差异图生成算法所提取的变化区域很好地增强了差异图中变化区域的边界, 本文算法得到的变化检测

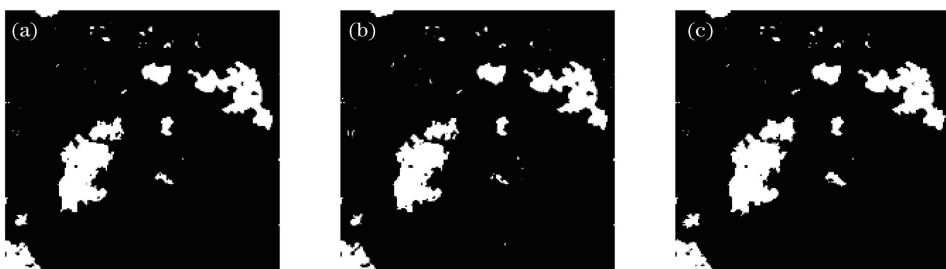


图4 各算法在墨西哥数据集上的变化检测结果。(a)均值比值法;(b)邻域比值法;(c)本文算法  
Fig. 4 Change detection results of different algorithms on Mexico dataset. (a) Mean-ratio method;  
(b) neighborhood-ratio method; (c) proposed method

表1 各算法在墨西哥数据集上的变化检测结果的定量分析

Table 1 Quantitative analysis on change detection results of different algorithms on Mexico dataset

Algorithm	FN	FP	DC	PCC /%	Kappa
Mean-ratio method	3505	3450	44981	97.91	0.91
Neighborhood-ratio method	4572	3604	44068	97.54	0.89
Proposed method	303	3877	48610	98.74	0.95

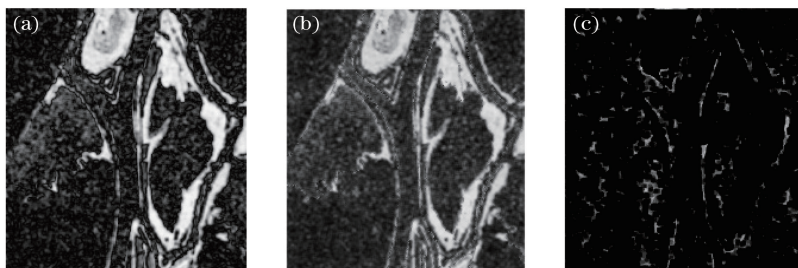


图5 各算法在渥太华数据集上的差异图。(a)均值比值法;(b)邻域比值法;(c)本文算法  
Fig. 5 Difference maps of different algorithms on Ottawa dataset. (a) Mean-ratio method;  
(b) neighborhood-ratio method; (c) proposed method

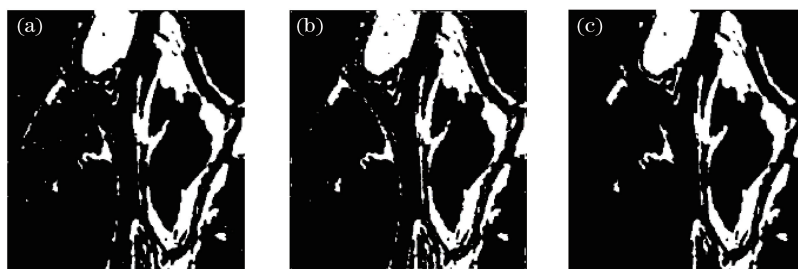


图6 各算法在渥太华数据集上的变化检测结果。(a)均值比值法;(b)邻域比值法;(c)本文算法  
Fig. 6 Change detection results of different algorithms on Ottawa dataset. (a) Mean-ratio method;  
(b) neighborhood-ratio method; (c) proposed method

表2 各算法在渥太华数据集上的变化检测结果的定量分析

Table 2 Quantitative analysis on change detection results of different algorithms on Ottawa dataset

Algorithm	FN	FP	DC	PCC /%	Kappa
Mean-ratio method	372	453	2490	99.34	0.82
Neighborhood-ratio method	207	948	3150	99.07	0.78
Proposed method	54	459	2814	99.59	0.90

结果图相比其他两种算法在主观上更准确完整,接近于真实地物变化。根据表1和表2可知,在墨西哥

数据集上,相比均值比值法,本文算法的漏检像素数减少了3202个,相比邻域比值法,本文算法的漏

检像素数减少了 4269 个;在渥太华数据集上,相比均值比值法,本文算法的漏检像素数减少了 318 个,相比邻域比值法,本文算法的漏检像素数减少了 153 个。相比均值比值法和邻域比值法,本文算法的漏检像素数均大量减少,对应的变化检测结果图中的噪声点明显减少,检测到的变化像素数最接近真实变化情况,提高了变化检测的正确率和 Kappa 系数。说明本文提出的新型差异图生成方法可以增强多时相 SAR 图像的差异图边缘信息,提升了像素级变化检测算法的检测精度。

## 4 结 论

研究分析了 SAR 图像像素级变化检测算法漏检率较高的原因,提出了新型差异图生成方法,以均值比值法为例进行了差异图融合的实验仿真,并利用 FLICM 聚类算法得到变化检测结果图。从实验结果可以看出,所提方法生成的差异图不但保留了较强的噪声鲁棒性,而且增强了差异图中变化区域与未变化区域的对比度,提高了差异图清晰度,解决了 SAR 图像像素级变化检测中差异图细节信息模糊的问题,为大面积国土资源调查提供了可行的理论基础和技术手段。

## 参 考 文 献

- [1] Sui H G, Feng W Q, Li W Z, et al. Review of change detection methods for multi-temporal remote sensing imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1885-1898.  
 眭海刚, 冯文卿, 李文卓, 等. 多时相遥感影像变化检测方法综述 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 1885-1898.
- [2] Huang C X, Yin J J, Yang J. Polarimetric SAR change detection with  $l_1$ -norm principal component analysis [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(10): 2214-2220.  
 黄晨霞, 殷君君, 杨健. 基于  $l_1$  范数主成分分析的极化 SAR 图像变化检测 [J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(10): 2214-2220.
- [3] Jin Q H, Wang Y P, Yang J Y. Remote sensing image change detection based on density attraction and multi-scale and multi-feature fusion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121003.  
 金秋含, 王阳萍, 杨景玉. 基于密度引力和多尺度多特征融合的遥感影像变化检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 121003.
- [4] Baik H, Son Y, Kim K. Detection of liquefaction

phenomena from the 2017 Pohang ( Korea ) earthquake using remote sensing data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2184.

- [5] Perbet P, Fortin M, Ville A, et al. Near real-time deforestation detection in Malaysia and Indonesia using change vector analysis with three sensors [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(19): 7439-7458.
- [6] Shimizu K, Ota T, Mizoue N. Detecting forest changes using dense landsat 8 and sentinel-1 time series data in tropical seasonal forests [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1899.
- [7] Zhang Q Y, Li Z, Peng D L. Detecting land use change by object-oriented change vector analysis (OCVA) [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(6): 166-174.  
 张沁雨, 李哲, 彭道黎. 利用面向对象变化向量分析 (OCVA) 检测土地利用变化 [J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(6): 166-174.
- [8] Wu Y Q, Cao Z Q, Tao F X. Change detection of multi-temporal remote sensing images based on Contourlet transform and ICA [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(4): 1284-1292.  
 吴一全, 曹照清, 陶飞翔. 基于 Contourlet 变换和 ICA 的多时相遥感图像变化检测 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(4): 1284-1292.
- [9] Wang S N, Jiao L C, Yang S Y. SAR images change detection based on spatial coding and nonlocal similarity pooling [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(8): 3452-3466.
- [10] Inglada J, Mercier G. A new statistical similarity measure for change detection in multitemporal SAR images and its extension to multiscale change analysis [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1432-1445.
- [11] Gong M G, Cao Y, Wu Q D. A neighborhood-based ratio approach for change detection in SAR images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 307-311.
- [12] Ma J J, Gong M G, Zhou Z Q. Wavelet fusion on ratio images for change detection in SAR images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(6): 1122-1126.
- [13] Su Q, Yang J Y, Wang Y P. Synthetic aperture radar image change detection based on intuitionistic fuzzy C-core mean clustering algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 192805.

- 宿强, 杨景玉, 王阳萍. 基于直觉模糊 C 核均值聚类算法的合成孔径雷达图像变化检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 192805.
- [14] Mu C H, Huo L L, Liu Y, et al. Change detection for remote sensing images based on wavelet fusion and PCA-kernel fuzzy clustering [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(7): 1375-1381.  
慕彩红, 霍利利, 刘逸, 等. 基于小波融合和 PCA-核模糊聚类的遥感图像变化检测 [J]. 电子学报, 2015, 43(7): 1375-1381.
- [15] Zhang Q C, Tong G F, Li Y, et al. River detection in remote sensing images based on multi-feature fusion and soft voting [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0628002.  
张庆春, 佟国峰, 李勇, 等. 基于多特征融合和软投票的遥感图像河流检测 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0628002.
- [16] Zhao Z G, Xiong C H, Wang K, et al. Conceptions, methods and applications on information fusion [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 283.  
赵宗贵, 熊朝华, 王珂, 等. 信息融合概念、方法与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 283.