

文章编号: 1001-9014(2009)06-0466-06

基于两时相图像联合分类的 SAR 图像变化检测

李金基, 焦李成, 张向荣, 杨咚咚

(西安电子科技大学 智能信息处理研究所和智能感知与图像理解教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 传统分类后比较法 (post classification comparison PCC) 存在分类累积误差问题, 且对单幅图像分类精度要求较高, 对此, 根据不同时相图像的不变信息所具有的相关性, 提出了一种基于两时相图像联合分类的 SAR 图像变化检测方法. 该方法以灰度值作为输入信息, 通过相似度计算可得两时相图像对应位置像素的灰度相似度, 然后求解全局相似度阈值, 并用于控制基于 K-均值的联合分类器对两时相图像进行联合分类, 最后通过类别比较获得变化检测结果. 实验结果表明本文方法不但可提高单幅图像的分类精度, 而且能够精确地把不同时相图像的不变地物信息划分为同一类别, 减少了分类累积误差的影响, 提高了变化检测性能.

关键词: 变化检测; SAR 图像; 联合分类; 相似度

中图分类号: TP751 文献标识码: A

CHANGE DETECTION FOR SAR IMAGES BASED ON JOINT-CLASSIFICATION OF BI-TEMPORAL IMAGES

LI Jin-Ji JIAO Li-Cheng ZHANG Xiang-Rong YANG Dong-Dong

(Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education,
Institute of Intelligent Information Processing, Xi'an University, Xi'an 710071, China)

Abstract Since the classical post classification comparison (PCC) technique was affected by a significant cumulative error and high classification precision was needed for single image, a change detection method based on joint classification of bi-temporal SAR images was presented according to the correlation of the unchanged information in different temporal images. The proposed method took gray levels as an input. The similarity of gray levels relating to two pixels at the corresponding position for bi-temporal images was obtained through similarity operator. Then the global threshold value of similarity was got, which was used to control the joint classifier based on K-means to classify the bi-temporal images. Finally, the change detection map was produced by comparing with both classified images. Experimental results confirm that the proposed method not only improves the precision of classification for single image but also accurately classifies the unchanged geographical information in different temporal images into the same class. The proposed method reduces the influence of the cumulative error and improves the performance of change detection.

Key words change detection; SAR image; joint classification; similarity

引言

随着合成孔径雷达 (synthetic aperture radar SAR) 技术的快速发展, SAR 系统可以全天候、全天时获取图像数据, 是较好的变化检测图像源. 遥感图像变化检测是通过同一地区的不同时期的两幅遥感图像进行比较分析, 根据图像之间的差异得到所需的地物变化信息^[1, 2]. SAR 图像变化检测技术在

森林覆盖变化^[3]、土地利用/覆盖^[4]、城市环境变化^[5]等领域具有广泛的应用前景.

近年来, 国内外学者在变化检测技术研究方面做了不少工作^[6, 7], 其中, 分类后比较法 (PCC)^[2, 8]是一种比较直观的方法. PCC 方法的优点是可以回避基于差异影像分析方法所要求的影像系列时相一致性条件, 以及影像间辐射校正、匹配等问题. 同时, 可确定变化信息的空间位置, 及提供变化信息的类型, 但 PCC 方法很难获得不同时相图像的不变信息具有

收稿日期: 2008-09-27, 修回日期: 2009-05-27

Received date: 2008-09-27, revised date: 2009-05-27

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60672126, 60673097, 60702062, 60803097); 国家 863 项目 (No. 2007AA12Z136, 2007AA12Z223, 2009AA12Z210); 教育部长江学者和创新团队支持计划资助 (PCSIRT, IRT0645); 陕西省自然科学基金 (No. 2007F09); 国家教育部重点项目 (No. 108115)

作者简介: 李金基 (1981-), 男, 广东湛江人, 博士生, 主要从事模式识别、遥感图像处理等方面的研究. E-mail: jinji_lj@126.com

相同类别的分类结果,且会夸大变化的程度.同时,由于分类累积误差问题降低了变化检测精度.

结合不同时相图像的不变信息所具有的相关性,本文提出了一种基于两时相图像联合分类比较 (Joint classification Comparison, JCC) 的 SAR 图像变化检测方法.该方法采用传统 K-均值分类器构造联合分类器,并对不同时相的两幅相图像进行联合分类,克服了 PCC 方法的缺点,精确地检测地表变化信息及变化信息的类型.

1 基于联合分类后比较的变化检测

1.1 基于相似度的 K-均值联合分类器

假设 X^1 和 X^2 为同一地区不同时相已配准的两幅 SAR 图像,同一地物在不同时相图像的灰度值呈现一定相似性.为了有效地描述两时相图像的差异信息,本文引入两时相图像对应位置 (i, j) 两像素的相似度.

$$S_{ij} = \frac{|X_{ij}^1 - X_{ij}^2|}{X_{ij}^1 + X_{ij}^2}, \quad (1)$$

其中, X_{ij}^t 和 S_{ij} ($S_{ij} \in [0, 1]$) 分别表示位置 (i, j) 第 t 时相的灰度值 ($t=1, 2$) 和两时相图像灰度值的相似度.由公式 (1) 可知,如果两像素的灰度值越接近,则相似度值越趋于 0 否则趋于 1 即相似度值越小,则变化信息的强度越小;否则,变化信息的强度越大.

K-均值聚类算法^[9]是一种基于样本间相似性

度量的间接聚类方法,在遥感图像的非监督分类中具有较强的实用性.但 K-均值聚类算法对初始中心敏感,而且在两时相图像两次独立分类中存在分类累积误差.因此,为了把不同时相图像的不变信息划分为相同的类别信息,本文采用 K-均值构造两幅图像的联合分类器,并对两幅图像进行联合分类,经过联合分类,可获得两幅图像的联合分类结果, $\Omega = \{\Omega^1, \Omega^2\}$, 其中 $\Omega^l = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c\}, Z_{w_l}$ 为第 l 类 ($l \in [1, c]$, c 为类别数) 的聚类中心.

首先联合分类器根据方差最小原则选取分类参考点,并对该分类参考点做分类 (如图 1 所示); 然后,本文采用迭代阈值选取方法^[10]对相似度矩阵 (S) 求解全局相似度阈值 T , 并用来控制联合分类器的分类操作.若 $S_{ij} \leq T$, 则另一时相对应位置 (i, j) 像素点的类别信息与该参考像素点对应的类别信息一致; 否则,对另一时相对应像素点做单独分类.经过 M 次迭代分类,每次分类都采用相似度阈值控制联合分类,减少了分类累积误差的影响.

$$\sigma_{ij}^t = w_{ij}^t (X_{ij}^t - E_{ij})^2, \quad (2)$$

其中, σ_{ij}^t 是第 t 时相 (i, j) 位置的方差, $w_{ij}^t = X_{ij}^t / (X_{ij}^1 + X_{ij}^2)$ 为其灰度值权重, $E_{ij} = \sum_{t=1}^2 w_{ij}^t X_{ij}^t$ 为灰度加权平均.由式 (2) 可得:

$$\sigma_{ij}^t = \frac{X_{ij}^t}{X_{ij}^1 + X_{ij}^2} \left[X_{ij}^t - \frac{(X_{ij}^1)^2 + (X_{ij}^2)^2}{X_{ij}^1 + X_{ij}^2} \right]^2. \quad (3)$$

由式 (1)、(3) 可得:

$$\sigma_{ij}^1 = X_{ij}^2 \frac{X_{ij}^1 X_{ij}^2}{X_{ij}^1 + X_{ij}^2} (S_{ij})^2, \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}^2 = X_{ij}^1 \frac{X_{ij}^1 X_{ij}^2}{X_{ij}^1 + X_{ij}^2} (S_{ij})^2. \quad (5)$$

由式 (4)、(5) 可知: 如果 $\sigma_{ij}^1 \geq \sigma_{ij}^2$ 则有 $X_{ij}^1 \leq X_{ij}^2$. 假设以方差最大原则选取分类参考点,那么 X_{ij}^1 为分类参考点,如果 $S_{ij} \leq T$ (即非变化或存在微变化信息),则 $\Omega_{ij}^2 = \Omega_{ij}^1$; 若 $S_{ij} > T$ (即变化信息), $\Omega_{ij}^2 \neq \Omega_{ij}^1$. 不管是 $S_{ij} \leq T$ 还是 $S_{ij} > T$, 由于 $X_{ij}^1 \leq X_{ij}^2$ 和两幅图像的初始聚类中心一致,所以经过多次分类后, X_{ij}^2 所属类的聚类中心值比 X_{ij}^1 所属类的聚类中心值要大,即 $Z_{w_l}^2 \geq Z_{w_l}^1$ (其中 $l \in [1, c]$), $Z_{w_l}^2$ 偏离 $Z_{w_l}^1$, 从而引起单幅图像分类精度的下降以及变化信息在不同时相的图像中具有相同类别的可能性变大,进而导致变化信息丢失,若以方差最小原则选取分类参考点,即 X_{ij}^2 为分类参考点,如果 $S_{ij} \leq T$ (即非变化或存在微变化信息), $\Omega_{ij}^2 = \Omega_{ij}^1$; 如果 $S_{ij} > T$ (即变化信息), $\Omega_{ij}^2 \neq \Omega_{ij}^1$. 由于 $X_{ij}^1 \leq X_{ij}^2$ 和两幅图像的初始聚类中心一致,

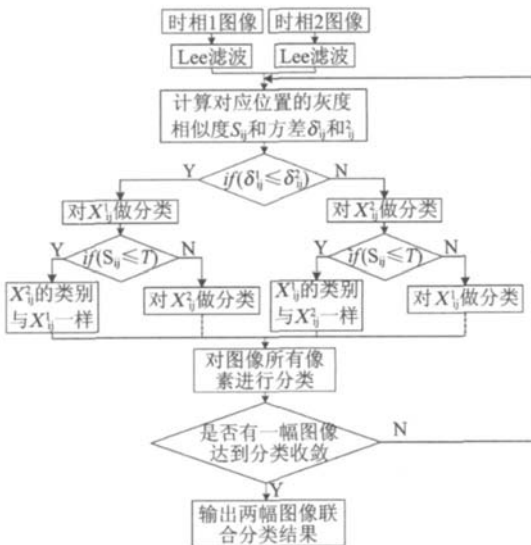


图 1 基于 K-均值的两时相图像联合分类

Fig. 1 Joint classification for b i temporal images based on K-means

而且是以 X_{ij}^2 为分类参考点, 所以经过多次分类后, 不管是 $S_{ij} \leq T$ 还是 $S_{ij} > T$, Ω_{ij}^1 都保持在 Ω_{ij}^2 的范围, 则保持了不同时相图像的不变信息具有相同的类别, 变化信息具有不同的类别信息.

1.2 基于联合分类比较法的变化检测

在分类比较法中, 如果两时相图像对应位置两像素具有相同的类别信息, 则不是变化像素; 否则, 为变化像素. 通过比较分类结果可得变化影像 B .

$$B_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } (\Omega_{ij}^1 \neq \Omega_{ij}^2) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

本文算法的流程如下:

步骤 1 分别对两幅 SAR 图像做 Lee 滤波^[11]处理, 以减少相干斑噪声的影响, 窗口大小为 $N \times N$;

步骤 2 计算两时相图像对应位置像素的灰度值相似度, 然后采用迭代阈值法求解相似度阈值 T ;

步骤 3 根据式 (2) 得到灰度值方差, 并根据最小方差原则选取分类参考点;

步骤 4 初始化聚类中心 (两幅图像的初始聚类中心一致), 首先对参考点分类, 并以其类别作为参考, 若 $S_{ij} \leq T$, 则另一时相对应位置 (i, j) 像素的类别信息与该参考点所对应的类别信息一致; 否则, 对另一时相对应位置的像素做单独分类;

步骤 5 不断重复步骤 4 直到有一幅图像的分类达到收敛时, 停止迭代分类, 经过 M 次迭代分类, 获得两幅图像联合分类的分类结果;

步骤 6 通过公式 (6) 进行类别比较得到变化信息.

在步骤 5 中, 如果遇到一幅图像分类收敛, 联合分类器停止分类. 假如有一幅图像分类结果已达到收敛条件, 再继续做联合分类, 可能会导致本身收敛的分类结果的分类精度降低, 这不利于识别变化信息的类型; 同时也存在丢失真实变化信息的可能性.

2 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性和可行性, 本文进行了相关实验, 分别分析 3 类和 5 类的实验结果, 并与 K-means-PCC 和 ISODATA-PCC 方法进行比较分析.

同时, 由于本文采用 Lee 滤波对 SAR 图像进行预处理, 为了分析不同窗口的 Lee 滤波对变化检测结果的影响, 在实验中, 经验地选取窗口大小, 选取规则为: (1) 含噪声严重时适宜选取大窗口; (2) 分辨率越高, 选取的窗口应当越小^[12]. (3) 变化区域小

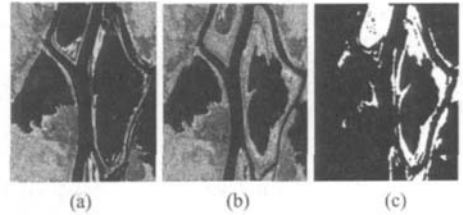


图 2 Ottawa 地区的 Ladarsat SAR 图像 (a)1997 年 5 月的图像 (b)1997 年 8 月的图像 (c)变化参考图
Fig.2 Ladarsat SAR images of Ottawa (a) image in May, 1997 (b) image in August, 1997 (c) the ground true reference

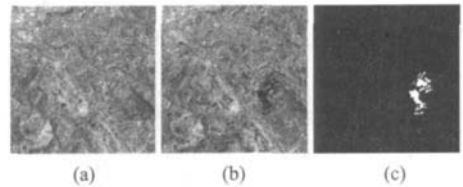


图 3 Bern 城市水灾的 SAR 图像 (a)1999 年 4 月的图像 (b)1999 年 5 月的图像 (c)变化参考图
Fig.3 SAR images for flood in Bern city (a) image in April, 1999 (b) image in May, 1999 (c) the ground true reference

时适合采用小窗口. 实验分别分析了不同窗口 ($3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9, 11 \times 11$) 的检测结果.

2.1 实验数据描述

实验一是 Ottawa 地区水灾的 Radarsat SAR 图像 (如图 2 所示), 大小为 290×350 其中变化目标数为 16049

另一组实验数据是 Bern 城市水灾的 SAR 图像, 大小为 301×301 , 如图 3 所示, 真实变化目标数为 1155 在 1999 年 5 月水灾引起的变化区域中, 存在部分小面积的变化区域.

2.2 联合分类实验结果与分析

(1) Ottawa 地区 Ladarsat SAR 图像联合分类结果及分析.

由于图 2(a)、(b) 所含噪声不严重, 且存在部分小面积的变化区域, 因此, 本文经验选取 Lee 滤波的窗口大小为 3×3 经过迭代阈值分析, 相似度阈值选取为 0.448049 联合分类迭代 15 次, 联合分类结果如图 4(e)、(f).

表 1 Ottawa 图像类别转移矩阵 (K-means PCC, 3×3)
Table 1 Classes transfer matrix of Ottawa (K-means PCC, 3×3)

T_1 分类图	T_2 分类图		
	深水区	陆地区	浅水区
深水区	0	8862	6763
陆地区	14	0	4289
浅水区	483	4456	0

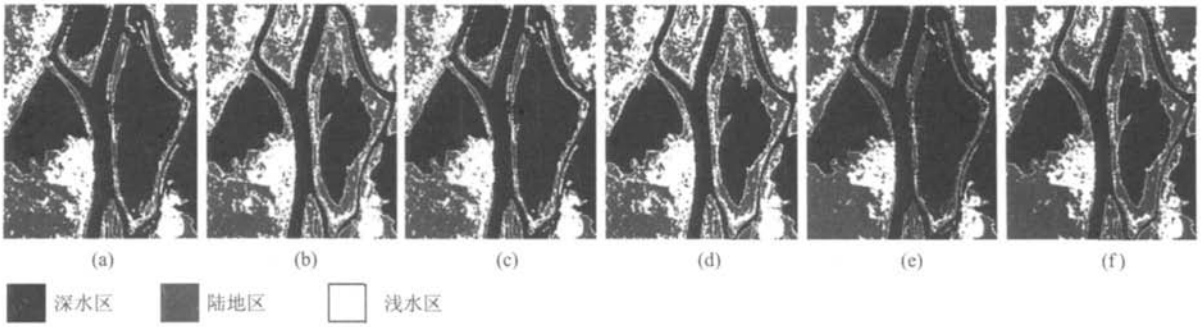


图 4 Ottawa 地区图像分类结果 ($N=3$) (a)(b)为 K-means 两时相单独分类结果 (c)(d)为 ISODATA 两时相单独分类结果 (e)(f)为本文提出的联合分类算法的分类结果

Fig. 4 Classification of Ottawa ($N=3$) (a)(b)classification based on K-means independently (c)(d) classification based on ISODATA independently (e)(f) classification of the proposed method.

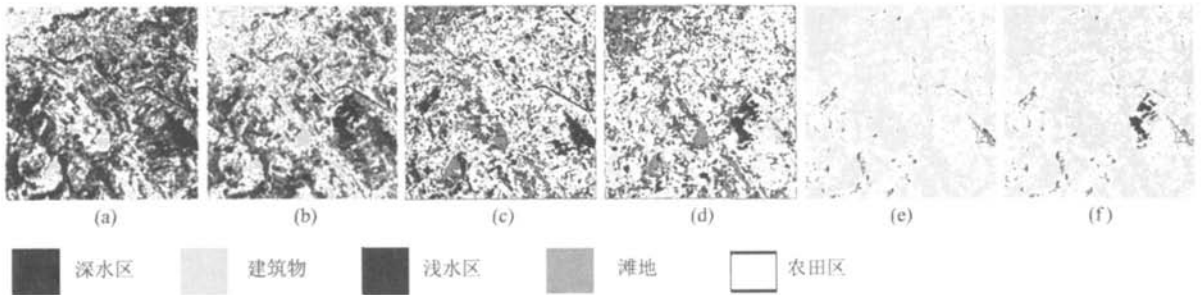


图 5 Bern 城市图像分类结果 ($N=3$) (a)(b)为 K-means 两时相单独分类结果 (c)(d)为 ISODATA 两时相单独分类结果 (e)(f)为本文提出的联合分类算法的分类结果

Fig. 5 Classification of Bern city ($N=3$) (a)(b)classification based on K-means independently (c)(d)classification based on ISO DATA independently (e)(f)classification of the proposed method

表 2 Ottawa 图像类别转移矩阵 (ISODATA-PCC, 3×3)

Table 2 Classes transfer matrix of Ottawa (ISODATA-PCC, 3×3)

T_1 分类图 \ T_2 分类图	深水区	陆地区	浅水区
深水区	0	8692	6831
陆地区	12	0	4343
浅水区	529	4480	0

表 3 Ottawa 图像类别转移矩阵 (本文方法, 3×3)

Table 3 Classes transfer matrix of Ottawa (The proposed method, 3×3)

T_1 分类图 \ T_2 分类图	深水区	陆地区	浅水区
深水区	0	9886	4890
陆地区	4	0	12
浅水区	63	405	0

表 1、表 2 和表 3 分别是不同分类算法的类别转移分析结果。比较各表看出本文方法从陆地区到浅水区和浅水区到深水区的伪变化信息远远少于其它两种方法

(2) Bem 城市水灾的 SAR 图像联合分类结果及分析

由于 Bem 城市存在水灾引起的小面积变化区域, 文中经验选取大小为 3×3 的 Lee 滤波窗口。由迭代阈值分析相似度矩阵, 可得相似度阈值为 0.41515; 通过迭代 20 次的联合分类, 本文的联合分类结果如图 5 (e)、(f)。

从图 5 (a)、(b) 和 (c)、(d) 单独分类结果来看, 分类精度不高, 且分类结果的一致性不好, 同时也存在很多误分类信息。而本文的联合分类结果如图 5 (e)、(f) 所示, 不但提高了单幅图像的分类精度, 分类结果的类内一致较好; 而且联合分类器能把不同时相图像的不变信息划分为同一类别信息, 减少了独立分类所带来的分类累积误差现象。

表 4 表 5 和表 6 分别为不同分类算法的类别转移矩阵。但对比各表看出本文方法获得的变化信息类型与客观情况更为接近。

2.3 变化检测结果与分析

(1) Ottawa 地区变化检测结果及分析

表 4 Bem城市分类结果类别转移矩阵 (K-means-PCC, 3 × 3)

Table 4 Classes transfer matrix of Bem city (K-means-PCC, 3 × 3)

T ₁ 分类图 \ T ₂ 分类图	深水区	建筑物	浅水区	滩地	农田区
深水区	0	1	5829	2364	337
建筑物	31	0	14	158	1381
浅水区	825	83	0	12340	3949
滩地	646	628	3802	0	12616
农田区	227	3418	848	3797	0

表 5 Bem城市分类结果类别转移矩阵 (ISODATA-PCC, 3 × 3)

Table 5 Classes transfer matrix of Bem city (ISODATA-PCC, 3 × 3)

T ₁ 分类图 \ T ₂ 分类图	深水区	建筑物	浅水区	滩地	农田区
深水区	0	6821	181	0	1790
建筑物	1333	0	2262	28	12831
浅水区	225	1007	0	2205	4139
滩地	17	20	1122	0	169
农田区	843	5370	8785	272	0

表 6 Bem城市分类结果类别转移矩阵 (本文方法, 3 × 3)

Table 6 Classes transfer matrix of Bem city (the proposed method, 3 × 3)

T ₁ 分类图 \ T ₂ 分类图	深水区	建筑物	浅水区	滩地	农田区
深水区	0	0	30	25	6
建筑物	293	0	264	13	0
浅水区	1	4	0	0	0
滩地	31	4	2	0	0
农田区	382	0	102	0	0

比较图 4由同一算法所获得的两幅分类结果, 变化检测影像如图 6所示. 图 6(a)错误检测数相当大; 图 6(b)视觉效果也比较差, 错误检测数比较多; 图 6(c)是本文算法的检测结果, 与图 2(c)非常接近, 视觉效果比较好, 有利于精确地定位真实变化信息的位置.

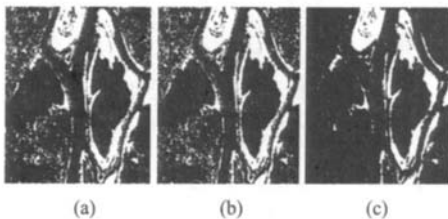


图 6 Ottawa地区水灾检测结果 (a) K-means-PCC 检测结果 (b) ISODATA-PCC检测结果 (c)本文方法的检测结果
Fig 6 Change detection map of Ottawa (a) change detection map based on K-means-PCC (b) change detection map based on ISODATA-PCC (c) change detection map of the proposed method

表 7 Ottawa地区图像变化检测结果分析 (3 × 3)

Table 7 Analysis of change detection for Ottawa (3 × 3)

	运行时间	漏检测数	错误检测数	总错误数
K-means-PCC	74m s	1024	9842	10866
ISODATA-PCC	39m s	1095	9933	11028
本文方法	32m s	1341	552	1893

与图 2(c)比较, 变化检测分析如表 7所示. 由表 7分析可知, 本文方法的结果能精确地检测真实变化信息, 检测精度达到 91.64%.

为了分析本文方法对 Lee滤波窗口的敏感性, 图 7(a)给出了在不同窗口的 Lee滤波预处理条件下的变化检测结果.

(2) Bem城市水灾变化检测结果及分析

从图 8(a)、(b)、(c)可知, 基于同样的 Lee滤波预处理, 本文算法的检测结果比基于传统分类器的 PCC的检测效果好, 视觉效果好, 目标轮廓清晰.

通过与图 3(c)对比, 检测分析如表 8所示, 本文

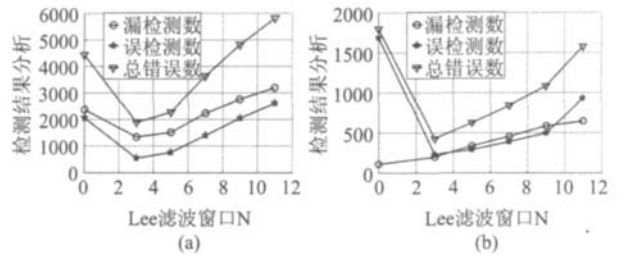


图 7 基于不同的 Lee 滤波窗口的检测结果 (a) Ottawa 地区水灾的检测结果 (b) Bem 城市水灾的检测结果
Fig.7 Change detection results with different window sizes of Lee filter. (a) change detection result of Ottawa (b) change detection result of Bem city

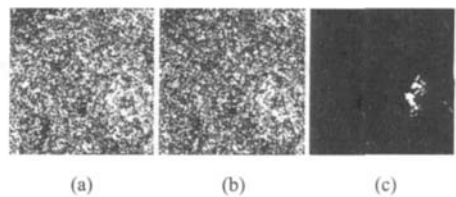


图 8 Bem 城市水灾变化检测结果 (a) K-means-PCC 检测结果 (b) ISODATA-PCC 检测结果 (c) 本文方法的检测结果
Fig.8 Change-detection map of Ottawa (a) change-detection map based on K-means-PCC (b) change-detection map based on ISODATA-PCC (c) change-detection map of the proposed method

表 8 Bem城市变化检测结果分析 (3 × 3)

Table 8 Analysis of change detection for Bem city (3 × 3)

	运行时间	漏检测数	错误检测数	总错误数
K-means-PCC	76m s	83	52222	52305
ISODATA-PCC	50m s	105	48550	48655
本文方法	39m s	199	228	427

算法可以精确定位真实变化信息的位置, 且漏检测目标数只有 19% 远远小于其他两种方法. 由图 8 (b)可知, 当窗口大小为 3×3 时, 检测结果最优.

3 结论

本文提出了一种基于两时相图像联合分类的 SAR 图像变化检测方法, 用 K-均值构造联合分类器, 并且由相似度阈值控制联合分类结果的精度, 最后通过比较分类结果获得变化检测影像. 与 K-means-PCC 和 ISODATA-PCC 检测法相比, 本文方法不但可提高单幅图像的分类精度, 而且能把同一地物信息在不同时相的图像划分为相同的类别信息, 减少了由于独立分类所引起的分类累积误差的影响, 从而有效地降低变化检测的误检数和漏检数, 并能确定变化信息的类型, 与客观的变化信息比较相近.

今后的工作将采用基于纹理特征的联合分类, 进一步改善分类精度, 提高变化检测性能.

REFERENCES

- [1] Singh A. Digital change detection techniques using remotely sensed data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, **10**(6): 989—1003
- [2] Radke R J, Andra S, Atkofah iO, et al. Image change detection algorithms—a systematic survey[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(3): 294—307.
- [3] Fransson J E S, Walter F, Blennow K, et al. Detection of storm-damaged forested areas using airborne CARABAS-II VHF SAR image data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(10): 2170—2175.
- [4] M as J F. Monitoring land-cover changes—a comparison of change detection techniques[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(1): 139—152.
- [5] Ridd M K, Liu J J. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment[J]. *Remote Sensing Environment*, 1998, **63**(2): 95—100.
- [6] Lu D, Mausel P, Brondizio E, et al. Change detection techniques[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(12): 2365—2407.
- [7] LI DeRen. Change detection from remote sensing images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (李德仁. 利用遥感影像进行变化检测. 武汉大学学报(信息科学版)), 2003, **28**(3): 7—12.
- [8] H aboudane D, Bahri E M. Deforestation detection and monitoring in cedar forest of the moroccan Middle Atlas mountains[C]. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Jul 2007, 23-28, 4327—4330.
- [9] MA Xi-Li, JIAO Li-Cheng. SAR image segmentation based on watershed and spectral clustering[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马秀丽, 焦李成. 基于分水岭-谱聚类的 SAR 图像分割. 红外与毫米波学报), 2008, **27**(6): 452—456.
- [10] Sezgin M, Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 146—165.
- [11] Lee J. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images[J]. *Optical Engineering*, 1986, **25**(6): 636—643.
- [12] 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.

(上接 439 页)

REFERENCES

- [1] LENG Han-Bing, TANG Xi-rYi, PENG Ding-Xiang. Research on nonuniformity correction of IRFPA based on integral time adjust[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (冷寒冰, 汤心溢, 彭鼎祥. 基于积分时间调整的红外焦平面阵列非均匀校正算法研究. 红外与毫米波学报), 2007, **26**(4): 246—250.
- [2] Pezoa J E, Hayat M M. Multinodel Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared sensors[J]. *J. Opt Soc Am. A*, 2006, **23**(6): 1282—1291.
- [3] Torres E, Torres S N, Martin C S. A recursive least square adaptive filter for nonuniformity correction of infrared image sequences[J]. *LNCS*, 2005, **3773**: 540—546.
- [4] XU Tian-Hua, ZHAO Yi-Gong. Iterative least square-based algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Acta Photonica Sinica* (徐田华, 赵亦工. 基于递推最小二乘的红外焦平面非均匀校正算法. 光子学报), 2006, **35**(2): 261—264.
- [5] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, et al. Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(8): 1241—1250.
- [6] Hayat M M, Torres S N, Armstrong E, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal plane arrays[J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(8): 772—780.
- [7] ZHANG Tian-Xu, SHI Chang-Cheng, LI Ji-Jun, et al. Overview of research on the adaptive algorithms for nonuniformity correction of infrared focal plane array[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序, 施长城, 李洁珺, 等. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究进展. 红外与毫米波学报), 2007, **26**(6): 409—413.
- [8] Dunne B E, Willan son G A. QR-based TLS and mixed LS-TLS algorithms with applications to adaptive IR filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, **51**(2): 386—394.
- [9] H uffel S V, V andewalle J. *The total least squares problem: computational aspects and analysis* [M]. Philadelphia: PA: SIAM, 1991.