

文章编号 1004-924X(2014)10-2832-08

## 结合形态学属性断面与支持向量机的 合成孔径雷达图像变化检测

张雄美<sup>1\*</sup>, 易昭湘<sup>1</sup>, 田 淞<sup>1,2</sup>, 宋建社<sup>1</sup>

(1. 第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025; 2. 重庆通信学院, 重庆 400035)

**摘要:**针对传统合成孔径雷达(SAR)图像变化检测方法存在误差大、检测率低等问题,提出了一种基于形态学属性断面(MAP)的 SAR 图像变化检测方法。该方法利用 MAP 算法提取差异图像的几何结构特征,构造深入描述图像结构化信息的特征向量空间;在利用阈值法对图像进行分割的基础上,引入偏移因子,实现训练样本的自动选取;最后,用支持向量机(SVM)在多维特征空间中对图像进行变化类与非变化类的分类。实验结果显示:本文算法的检测结果优于基于高斯模型的 KI 阈值法(GM\_KI)、基于广义高斯模型的 KI 阈值法(GGM\_KI)和大津法(Otsu)等 3 种阈值法的检测结果,Kappa 系数保持在 0.87 以上;当峰值信噪比(PSNR)介于[29,44]dB 时,抗噪性能指标保持在 0.97 以上。这些结果证明了文中方法的有效性和优越性。

**关键词:**合成孔径雷达图像;图像变化检测;形态学属性断面;阈值法;支持向量机

**中图分类号:**TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2832

## Change detection of SAR images using morphologic attribute profile and support vector machine

ZHANG Xiong-mei<sup>1\*</sup>, YI Zhao-xiang<sup>1</sup>, TIAN Song<sup>1,2</sup>, SONG Jian-she<sup>1</sup>

(1. *The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;*  
2. *Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: zxxw.ok@163.com*

**Abstract:** As classical change detection methods for Synthetic Aperture Radar (SAR) images have high error rates and low detection rates, a novel change detection method of SAR images based on Morphology Attribute Profile (MAP) was proposed. The MAP algorithm was employed to extract the geometric features of the difference images and a feature vector space was constructed to describe the image inherent structure. Then, the offsets were introduced to select the training samples automatically based on the segmentation of different images by using thresholding method. Finally, Support Vector Machine (SVM) was used to distinguish changed pixels from unchanged pixels in the multidimensional feature space. Experiment results show that the proposed method achieves better performance than the KI threshold selection criterion based on Gaussian model (GM\_KI), KI threshold selection criterion based on general Gaussian model (GGM\_KI) and Otsu methods, the lowest Kappa is

收稿日期:2014-03-13;修订日期:2014-04-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61072141, No. 61132008)

0.87, and the lowest anti-noise is 0.97 when the Peak Signal to Noise Ratio(PSNR) belongs to [29, 44]dB. These results verify the effectiveness and superiority of the proposed method.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar(SAR) image; image change detection; Morphological Attribute Profile (MAP); thresholding; Support Vector Machine (SVM)

## 1 引 言

随着合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术的日益成熟,其获取图像的时间分辨率和空间分辨率大幅提高,利用 SAR 图像变化检测技术甚至可以在对不同时期、同一地区 SAR 图像进行拍摄时获取到地物目标的实时动态信息。这些成果进一步促进了 SAR 图像变化检测技术的研究与发展<sup>[1-2]</sup>,目前,该技术已被广泛应用于土地覆盖和利用变化<sup>[3]</sup>、森林和植被变化<sup>[4]</sup>、城市变迁<sup>[5]</sup>等领域。

在众多的 SAR 图像变化检测方法中,基于差异图像的变化检测方法具有简单、直观、易于理解等优点,是目前应用较多的一种方法<sup>[6-8]</sup>。如何从差异图像中提取变化区域是此类方法的关键问题之一。传统的变化检测方法主要通过诸如大津法(Otsu)<sup>[9]</sup>、基于高斯模型的 KI 阈值法(KI threshold selection criterion based on Gaussian Model, GM\_KI)<sup>[10]</sup>、基于广义高斯模型的 KI 阈值法(KI threshold selection criterion based on General Gaussian Model, GGM\_KI)<sup>[11]</sup>等阈值法来提取变化区域。当图像质量较好且变化类与非变化类的幅值差异较大时,这些方法能有效提取变化信息。但由于阈值法仅基于图像的幅值信息,没有考虑图像的空间邻域信息,当图像受噪声影响严重或是变化类和非变化类的幅值差异较小时,这些方法通常难以获得满意的效果,特别是当变化类和非变化类的幅值分布是相互交叠时,无论如何选取阈值都难以实现变化区域的有效提取。

基于上述分析,本文引入形态学属性断面(Morphological Attribute Profile, MAP)算法,在此基础上提出了一种基于 MAP 与支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的 SAR 图像变化检测方法。该方法利用 MAP 算法提取差异图像的几何结构特征,构造深入描述图像结构化信

息的特征向量空间;在此基础上,用 SVM 来实现变化检测,把变化检测问题转换成多维特征空间中最优分类面的选择问题,进而得到最优变化检测结果。

## 2 形态学属性断面

MAP 算法<sup>[12]</sup>是 Pesaresi 等人于 2010 年在形态学属性滤波的基础上提出的一种特征提取算法,其基本思想是利用一系列不同属性的形态学属性滤波器对图像进行滤波来提取图像的结构信息,通过对不同属性滤波结果进行综合,可以近似全面地描述图像的空间几何结构。

MAP 算法基于灰度属性细化运算和灰度属性闭运算进行特征提取。由于属性细化运算是非递增的,使得基于其获得的属性细化运算断面不满足吸收性,从而导致断面中的顺序元素缺乏有序性。为了建立有序的属性断面,需对属性细化运算中的滤波准则作如下限制:1)用于计算断面的非递增准则集  $U = \{U_\lambda; \lambda = 0, \dots, n\}$  是有序集;2)对连通分量  $X \subseteq E, \tau_i \leq \tau_j (i \leq j)$ , 准则对于  $U_\lambda = a(X) > \tau_\lambda$  或  $U_\lambda = a(X) < \tau_\lambda$  是一致的,其中:  $a$  为连通分量  $X$  上提取的非递增属性;  $\tau_\lambda$  为  $\lambda$  级断面上的阈值。此时,对于有序准则集  $U = \{U_\lambda; \lambda = 0, \dots, n\}$ , 可定义属性细化运算断面  $\Pi_{\tilde{\gamma}^U}$ :

$$\Pi_{\tilde{\gamma}^U}(f) = \{ \Pi_{\tilde{\gamma}^U_\lambda}; \Pi_{\tilde{\gamma}^U_\lambda}(f) = \tilde{\gamma}^U_\lambda(f), \forall \lambda \in [0, \dots, n] \}, \quad (1)$$

$$\tilde{\gamma}^U_\lambda(f)(x) = \max\{k; x \in \tilde{\Gamma}^U_\lambda(F)\}, \quad (2)$$

式中:  $\tilde{\Gamma}^U_\lambda(F)$  为二值属性细化运算;  $F = Th_k(f)$  为阈值化二值图像。

根据对偶性,可定义属性闭运算断面  $\Pi_{\tilde{\phi}^U}$ :

$$\Pi_{\tilde{\phi}^U}(f) = \{ \Pi_{\tilde{\phi}^U_\lambda}; \Pi_{\tilde{\phi}^U_\lambda}(f) = \tilde{\phi}^U_\lambda(f), \forall \lambda \in [0, \dots, n] \}, \quad (3)$$

$$\tilde{\phi}^U_\lambda(f)(x) = \min\{k; x \in \tilde{\Phi}^U_\lambda(F)\}, \quad (4)$$

式中:  $\tilde{\Phi}^U_\lambda(F)$  为二值属性粗化运算。

将属性细化运算断面与属性闭运算断面串联

起来,便可得到形态学属性断面  $\Pi(f)$ :

$$\Pi(f) = \left\{ \Pi_i : \begin{cases} \Pi_i = \Pi_{f_\lambda}^{\lambda}, \lambda = (n-i+1), \forall i \in [1, \dots, n] \\ \Pi_i = \Pi_{f_\lambda}^{\lambda}, \lambda = (i-n-1), \forall i \in [n+1, \dots, 2n+1] \end{cases} \right\}. \quad (5)$$

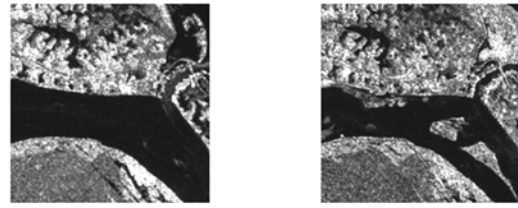
在 MAP 算法中,属性的选择具有多样性,可以是与区域形状相关的属性,如面积、外接矩、惯性矩等,也可以是与诸如灰度均值、熵及标准差等区域灰度相关的属性。因此,通过选择不同的属性,MAP 算法便可捕获图像中不同类型的特征。将这些不同类型的特征综合起来,便能近似全面地描述图像的空间几何结构。

### 3 基于 MAP 与 SVM 的 SAR 图像变化检测

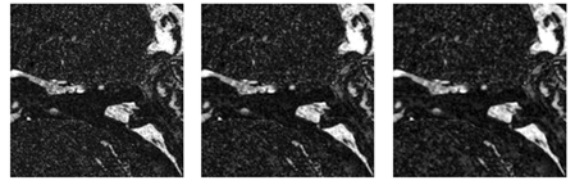
将 MAP 引入变化检测,本文提出了一种基于 MAP 与 SVM 的无监督 SAR 图像变化检测方法。首先,利用中值对数比方法构造差异图像;接着提取差异图像的多维 MAP 特征来对其进行描述,并利用阈值法对差异图像进行变化类与非变化类的粗分类;在此基础上引入偏移因子,自动选取训练样本,对 SVM<sup>[13-14]</sup> 分类器进行训练;最后用训练好的 SVM 分类器在多维特征空间中对差异图像进行变化类与非变化类的分类。详细步骤如下:

步骤 1:构造中值对数比差异图像。由于斑点噪声的影响,SAR 图像变化检测方法一般采用对数比方法构造差异图像,而地物检测通常只需检测出大致的变化区域,对细节变化要求较低,因此本文采用中值对数比来构造差异图像,即  $I_\Delta = |\log(u_2/u_1)|$ ,其中: $u_2$  和  $u_1$  分别为图像  $I_2$  和图像  $I_1$  的邻域中值,邻域大小为  $3 \times 3$ 。这样既不会改变图像轮廓,也不会造成图像模糊,又可以将斑点噪声转变成加性噪声,极大地减少了噪声对检测精度的影响。图 1(c)~(e)分别给出了对红河水灾 SAR 图像(如图 1(a)和图 1(b)所示)采用不同尺寸窗口获得的中值对数比差异图像。可以看出,随着窗口尺寸的增大,差异图像轮廓变得模糊。

步骤 2:特征提取。利用 MAP 算法提取差异



(a)1999 年 8 月 14 日图像 (b)1999 年 8 月 24 日图像  
(a)Image for 14<sup>th</sup> Aug., 1999 (b)Image for 24<sup>th</sup> Aug., 1999



(c)3×3 大小图像 (d)5×5 大小图像 (e)7×7 大小图像  
(c)Image with size of 3×3 (d)Image with size of 5×5 (e)Image with size of 7×7

图 1 不同尺寸窗口的差异图像

Fig. 1 Change images with different window sizes

图像的多维 MAP 特征,并对得到的特征进行归一化处理,同时利用 PCA 算法对特征进行降维处理,以提高算法的运行效率;

步骤 3:自动阈值选取。利用 Otsu 法获取差异图像的分割阈值  $T$ ;

步骤 4:自动样本选取。根据阈值可将差异图像中的像素分为变化类  $S_c$  和非变化类  $S_n$  两部分。基于差异图像幅值信息的阈值分割法在对两类幅值不相近部分的判定较为简单,对相近部分的判定较为困难,且有时由于两类的幅值分布是交叠的,无论如何选取阈值总会造成错误分类。基于上述考虑,引入偏移因子  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ ,则最终的粗分类结果可表示为(如图 2 所示):

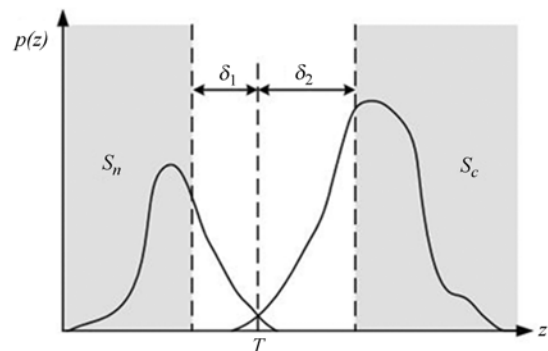


图 2 引入偏移因子的粗分类

Fig. 2 Rough classification by introducing offsets

$$S_n = \{ \mathbf{x}_n \in \mathbb{R}^d \mid i_n \leq T - \delta_1 \}_{n=1}^{M \times N}, \quad (6)$$

$$S_c = \{ \mathbf{x}_n \in \mathbb{R}^d \mid i_n \geq T + \delta_2 \}_{n=1}^{M \times N}, \quad (7)$$

式中:  $M \times N$  为图像大小;  $i_n$  为差异图像中位置  $n$  处的幅值;  $\mathbf{x}_n$  为多维特征向量空间中位置  $n$  处的特征向量;  $d$  为特征向量的维数。  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的值越大,  $S_c$  和  $S_n$  中的样本数量越少, 可靠性越高; 反之, 则样本的数量越多, 可靠性越低。文中将  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别设为阈值与最小幅值  $I_{\Delta_{\min}}$  和  $I_{\Delta_{\max}}$  最大幅值间差异的  $d$  倍, 即  $\delta_1 = d | I_{\Delta_{\min}} - \tau |$ ,  $\delta_2 = d | I_{\Delta_{\max}} - \tau |$ 。

为避免图像尺寸过大而导致训练样本的维数偏高, 训练时间偏长、程序运行效率低下, 本文只随机选取  $S_c$  和  $S_n$  中的部分样本作为最终的训练样本。

步骤 5: SVM 分类。SVM 是在统计学习理论基础上发展起来的一种有效的分类方法, 具有良好的非线性分类及泛化能力, 故选用 SVM 分类器来对差异图像进行变化类与非变化类的分类。基于 SVM 的变化检测结果为:

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn} \left( \sum_{i=1}^t \alpha_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + b \right), \quad (8)$$

式中:  $\alpha_i (i=1, \dots, t)$ ;  $b$  为确定最优划分超平面的参数;  $y_i \in \{-1, +1\}$  为类别标号;  $\mathbf{x}_i$  为支持向量,  $K(\cdot)$  为核函数。

步骤 6: 虚警滤除。由于 SAR 图像受斑点噪声影响严重, 一些由噪声引起的变化会被当成变化信息被提取出来, 与真实的变化区域相比, 这些由噪声引起的变化区域通常较小。因此, 对于这部分虚警, 可通过设定面积阈值进行滤除。

### 4 实验结果及分析

为了验证所提方法的有效性, 进行了相关实验。主要对本文所提方法和基于中值对数比差异图像分割的变化检测方法——Otsu、GM\_KI 和 GGM\_KI 所得到的变化检测结果进行了比较分析。

本文方法中需要设置的参数有偏移因子  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  中的  $d$  和 MAP 算法中属性的选择及  $\lambda$ , 其中  $d$  经过多次实验设为 0.2。在 MAP 算法中, 主要考虑了区域的面积、外接矩和惯性矩 3 种属性, 分别记为  $\text{MAP}_a$ 、 $\text{MAP}_d$  和  $\text{MAP}_i$ , 对应的参数分别为  $\lambda_a$ 、 $\lambda_d$ 、 $\lambda_i$ 。SVM 采用 RBF 核函数, 惩罚系数  $C$

和核宽度  $\sigma$  采用交叉验证法确定。算法的开发环境为 Matlab 7.11, CPU 为 P-IV 2G, 内存为 2G, 独立运行 20 次实验。

第一组实验所用图像是红河水灾 SAR 图像 (如图 1(a)、图 1(b)所示), 大小为 473 pixel  $\times$  473 pixel, 其中真实变化的目标数为 26 516。洪水消退后, 原本被淹没在水中的沙洲显露出来, 表现为两幅图像间的变化。图 3(a)给出了变化参考图。实验中,  $\lambda_a$  设为 [100, 500, 1 000, 1 500, 2 000],  $\lambda_d$  设为 [10, 25, 50, 80, 90],  $\lambda_i$  设为 [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6]。图 3(b)~(e)分别给出了本文方法中分别以  $\text{MAP}_a + \text{MAP}_d$ 、 $\text{MAP}_d + \text{MAP}_i$ 、 $\text{MAP}_a + \text{MAP}_i$  与  $\text{MAP}_a + \text{MAP}_d + \text{MAP}_i$  (MAP all) 为特征进行变化检测的结果, 图 3(f)~(h)分别给出了 Otsu、GM\_KI 和 GGM\_KI 3 种阈值法。从图中可以看出, 相对于 GM\_KI、GGM\_KI 及 Otsu 法的变化检测结果, 本文算法的变化检测结果均具有较好的视觉效果, 比较接近参考变化检测结果。

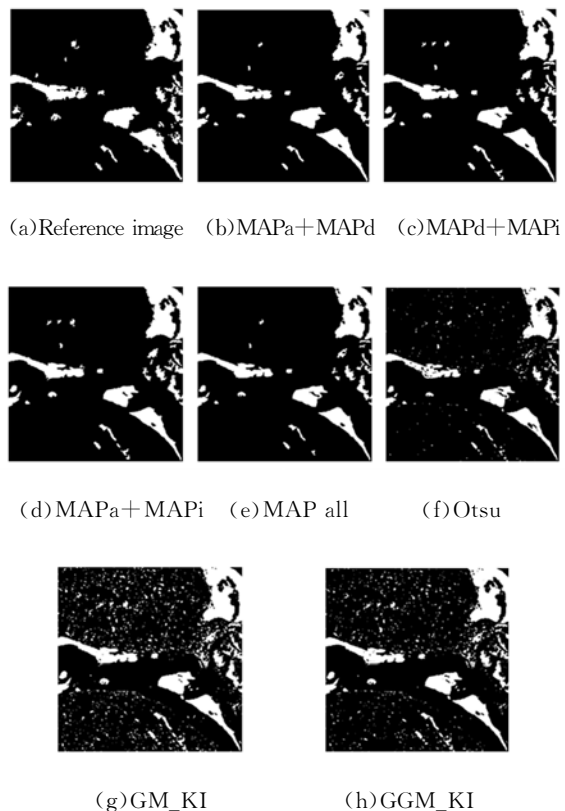


图 3 红河水灾变化检测结果

Fig. 3 Change detection maps of flooding in Red River

表 1 给出了红河水灾图像变化检测结果的定量分析结果。从表中可知, GM\_KI 和 GGM\_KI 法获取的阈值偏低, 导致检测结果中虚警数分别

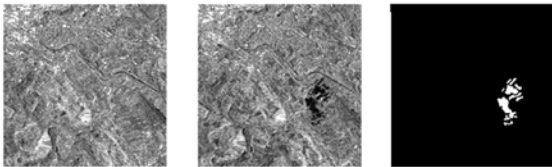
达到 11 956 和 8 183,而 Otsu 法获取的阈值偏高,导致检测结果中的漏检数达到 4 865。本文算法中,各种特征组合的变化检测结果均获得了优于 3 种阈值法的检测结果,尤其是基于 MAPa+MAPd 的变化检测结果,总错误数与 Kappa 系数分别为 5 093 和 0.888 3。但本文算法较为复杂,为了达到良好的检测效果,运行时间比 3 种阈值法长。

表 1 红河水灾图像变化检测结果分析

Tab.1 Analysis of change detection results for flooding in Red River

算法	阈值	漏检数	虚警数	总错误数	Kappa 系数	时间 /s
MAPa+MAPd		3 289	1 804	5 093	0.888 3	14.312
MAPd+MAPi		3 245	2 731	5 976	0.871 1	14.351
MAPa+MAPi		2 318	3 750	6 068	0.873 2	14.330
MAP all		3 307	2 210	5 517	0.879 8	16.578
Otsu	90	4 865	2 615	7 480	0.833 9	0.457
GM_KI	61	2 146	11 956	14 102	0.734 0	1.175
GGM_KI	68	2 715	8 183	10 898	0.786 0	1.193

实验二所用数据是 Bern 城市水灾 SAR 图像(如图 4 所示),大小为 301 pixel×301 pixel,其中真实变化目标数为 1 155。图 4(a),图 4(b)中存在部分小面积、由水灾引起的变化区域。



(a)1999 年 4 月图像 (b)1999 年 5 月图像 (c)变化参考图  
(a)Image of Apr. 1999 (b)Image of May, 1999 (c)Reference image

图 4 Bern 城市水灾 SAR 图像

Fig. 4 SAR images of flooding in Bern city

实验过程中, $\lambda_a$  设为 $[9,16,25,36,49]$ , $\lambda_d$  设为 $[3,5,7,9,11]$ , $\lambda_i$  设为 $[0.1,0.2,0.3,0.4,0.5]$ 。图 5(a)~(d)分别给出了本文方法中分别以 MAPa+MAPd、MAPd+MAPi、MAPa+MAPi 与 MAPa+MAPd+MAPi (MAP all)为特征的变化检测结果,图 5(e)~(g)分别给出了 Otsu、GM\_KI 和 GGM\_KI 法的变化检测结果。可以看出,相对于 3 种阈值法,本文算法较为完整地提取了变化区域。

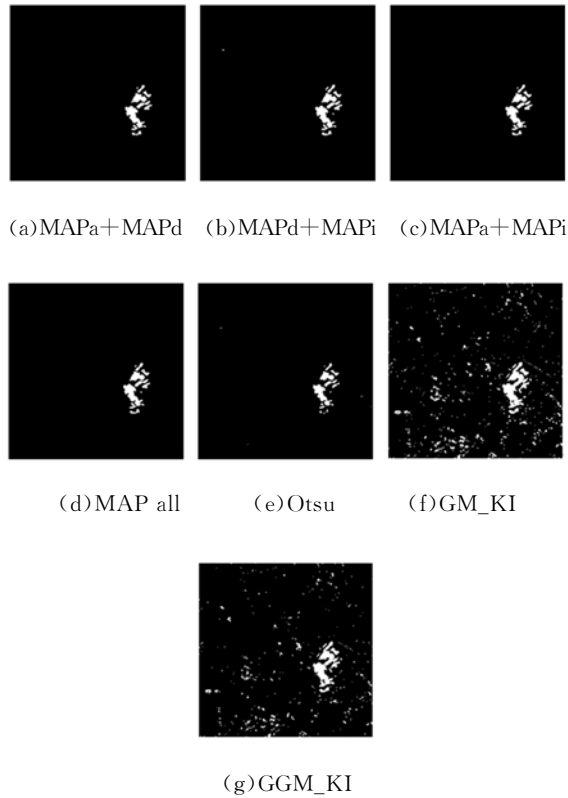


图 5 Bern 城市水灾变化检测结果

Fig. 5 Change detection maps of flooding in Bern city

表 2 给出了实验二的定量分析。由表 2 可以看出,GM\_KI 和 GGM\_KI 算法的虚警数过高,导致 Kappa 系数值较低,分别为 0.448 3 和 0.537 5。这是由于这两种算法都是基于模型进行检测,而此模型与实际分布有差异,从而导致获取的阈值偏低,虚警数较大。Otsu 法虽然总错误数只有 312,但漏检数较高,达到 236。本文算法同时具有较低的总错误数和较高的 Kappa 系数,其中基于 MAPa+MAPd 的变化检测结果的总错误数与 Kappa 系数分别为 279 和 0.878 2。

表 2 Bern 城市水灾图像变化检测结果分析

Tab.2 Analysis of change detection results for flooding in Bern city

算法	阈值	漏检数	虚警数	总错误数	Kappa 系数	时间 /s
MAPa+MAPd		134	145	279	0.878 2	8.499
MAPd+MAPi		111	177	288	0.877 2	8.503
MAPa+MAPi		127	155	282	0.877 8	8.505
MAP all		119	171	290	0.875 6	9.912
Otsu	69	236	76	312	0.853 1	0.366
GM_KI	27	36	2 601	2 637	0.448 3	0.802
GGM_KI	30	46	1 799	1 845	0.537 5	0.921

为分析算法对噪声的鲁棒性,本文用评价指标抗噪性能  $\tau^{[15]}$  对几种算法进行了定量比较。对于大小为  $M \times N$  的图像  $I_1$  及其加了噪声的图像  $\bar{I}_1$ , 两幅图像间的峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 定义为:

$$PSNR = 10 \lg \left[ \frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_1(i, j) - \bar{I}_1(i, j))^2} \right]. \quad (9)$$

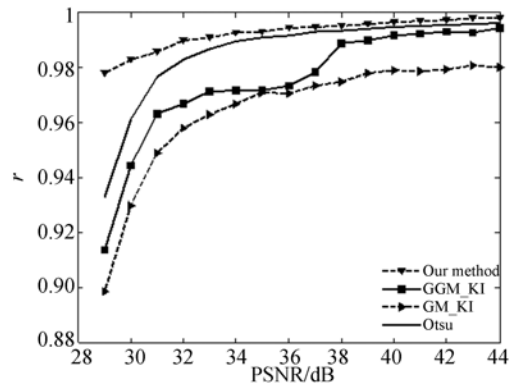
变化检测算法的抗噪性能  $\tau$  由两幅变化检测结果图像  $C_1$  和  $C_2$  的差异来衡量,其中  $C_1$  为输入图像  $I_1$  与  $I_2$  的变化检测结果,  $C_2$  为对  $I_1$  添加噪声后得到的图像  $\bar{I}_1$  与  $I_2$  的变化检测结果。抗噪性能  $\tau$  的具体计算公式如下:

$$\tau = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |C_1(i, j) - C_2(i, j)|}{M \times N}. \quad (10)$$

$\tau \in [0, 1]$ , 其值越大,说明算法对噪声的鲁棒性越好,反之则越差。

图 6(a)、(b)以图 1(a)、图 1(b)为例、分别对图 1(a)加入不同程度的斑点噪声和零均值高斯噪声时,各算法的抗噪性能  $\tau$  随 PSNR 的变化曲线图。从图中可以看出,当  $PSNR \in [29, 44]$  时,本文算法(以 MAPa+MAPd 为特征)的  $\tau$  值最低为 0.978 0,均高于其他 3 种算法,这表明本文算法受噪声影响较小,对噪声的鲁棒性更好。

需要指出的是,本文算法由于需要进行特征提取和样本训练,复杂度高,在 Matlab 环境中对



(b)零均值高斯噪声

(b) Zero mean Gaussian noise

图 6 不同算法对噪声的鲁棒性

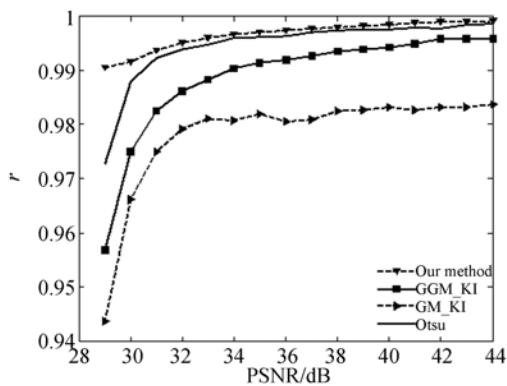
Fig. 6 Comparison of robustness against noise for different methods

一幅大小为  $301 \text{ pixel} \times 301 \text{ pixel}$  的图像进行处理时,耗时约为 10 s。在实际应用中,如果将代码移植到 C 或 C++ 等执行效率较高的环境中或是采用通用图形计算显卡 (GPGPU) 进行算法并行化实现后,算法的运行效率将大大提高。

## 5 结 论

本文将 MAP 和 SVM 相结合,提出了一种新的 SAR 图像变化检测方法。该方法在提取对数比差异图像 MAP 特征的基础上,用 SVM 把变化检测问题转换成多维特征空间中最优分类面的选择问题,从而实现了变化区域的精确提取。该方法在利用 Otsu 法获取阈值时,引入偏移因子,实现了分类器训练样本的自动选取,是一种无监督的方法。实验结果证明,本文算法获得了优于 GM\_KI、GGM\_KI 和 Otsu 3 种方法的检测结果, Kappa 系数保持在 0.87 以上;且当  $PSNR \in [29, 44]$  时,本文算法的值保持在 0.97 以上,均高于 3 种阈值法,这表明其对斑点噪声和零均值高斯噪声均具有较强的鲁棒性。

下一步的研究目标有以下 2 个方面:1) 利用 CUDA 编程语言在 NVIDIA 公司的 Tesla K20X 上实现算法的并行化,以提高算法的运行效率;2) 将基于灰度均值、熵及标准差等的 MAP 属性引入变化检测来进一步提高检测效果。



(a)斑点噪声

(a) Speckle noise

## 参考文献:

- [1] PAUL L, RAMAMOORTHY D P. Synthetic aperture radar image change detection using fuzzy C-means clustering algorithm[J]. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2013, 2(3): 1374-1379.
- [2] MEGHANA P M K, RAVIKUMAR A V. Robust technique for change detection in multitemporal synthetic aperture radar images [J]. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2013, 4(7): 2228-2235.
- [3] MAS J F. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(1): 139-152.
- [4] 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.
- [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] 李金基, 焦李成, 张向荣, 等. 基于融合和 T-分布的 SAR 图像水灾变化检测[J]. *计算机研究与发展*, 2011, 48(2): 271-280.
- LI J J, JIAO L CH, ZHANG X R, et al. . Detection for flood change with SAR images based on fusion and T-distribution[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2011, 48(2): 271-280. (in Chinese)
- [7] 胡召玲. 广义高斯模型及 KI 双阈值法的 SAR 图像非监督变化检测[J]. *测绘学报*, 2013, 42(1): 116-122.
- HU ZH L. An unsupervised change detection approach based on KI dual thresholds under the generalized Gauss model assumption in SAR images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 116-122. (in Chinese)
- [8] 李阳阳, 吴娜娜, 焦李成, 等. 基于量子免疫克隆聚类的 SAR 图像变化检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(4): 372-376.
- LI Y Y, WU N N, JIAO L CH, et al. . Change detection for SAR images based on quantum-inspired immune clonal clustering algorithm[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(4): 372-376. (in Chinese)
- [9] 何志勇, 孙立宁, 黄伟国, 等. 基于 Otsu 准则和直线截距直方图的阈值分割[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2315-2323.
- HE ZH Y, SUN L N, HUANG W G, et al. . Thresholding segmentation algorithm based on Otsu criterion and line intercept histogram[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2315-2323. (in Chinese)
- [10] KITTLER J, ILLINGWORTH J. Minimum error thresholding[J]. *Pattern Recognition*, 1986, 19(1): 41-47.
- [11] BAZI Y, BRUZZONE L, MELGANI F. An unsupervised approach based on the generalized Gaussian model to automatic change detection in multitemporal SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 874-887.
- [12] DALLAMURA M, BENEDIKTSSON J A, RNWASKE B, et al. . Extended profiles with morphological attribute filters for the analysis of hyperspectral data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(22): 5975-5991.
- [13] 张宇洋, 刘满华, 韩韬. 基于 Mean Shift 图像分割和支持向量机判决的候梯人数视觉检测系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 1079-1085.
- ZHANG Y Y, LIU M H, HAN T. Elevator-waiting people counting system based on Mean Shift segmentation and SVM classification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1079-1085. (in Chinese)
- [14] 李伟红, 龚卫国, 杨利平, 等. 人脸特征选择中的

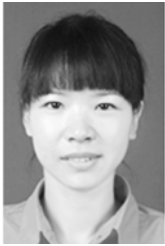
SVM 泛化误差估计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(8):1452-1458.

LI W H, GONG W G, YANG L P, *et al.*. SVM generalization error estimation for facial feature selection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):

1452-1458. (in Chinese)

[15] CELIK T. Multiscale change detection in multi-temporal satellite images [J]. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 820-824.

#### 作者简介:



张雄美(1983—),女,浙江丽水人,博士,讲师,2005、2008、2012年于第二炮兵工程大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: zzw.ok@163.com



宋建社(1954—),男,陕西富平人,博士,教授,博士生导师,1982年于陕西师范大学获得学士学位,1989年于西安电子科技大学获得硕士学位,2001年于西北工业大学获得博士学位,主要研究方向为合成孔径雷达信号处理、图像处理、信息建模和系统工程。E-mail: songjsshe@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)