热含量不变量的 SAR 图像点特征变化检测

罗 湾 [1, 2] 林 伟 [1] 张红波 [2]

摘 要 针对区域变化检测受分类器精度影响大、无法探测出内部细微变化这一问题, 本文提出了基于热含量不变量的合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 图像点特征变化检测. 该方法利用热核特征, 具有计算简便、矩阵扰动性小的特点, 且有效地降低了噪声的干扰. 由热核不变量的统计特性, 采用期望极大化 (Expectation maximization, EM) 算法解决了 SAR 图像的自动变化检测. 同时通过对权的讨论, 给出了适用于 SAR 图像的权函数定义. 对单波段单极化 SAR 与多极化 SAR 图像, 本文算法相比于基于像素和似然比的方法, 能够更快速更精确地检测到变化区域.

关键词 SAR 图像, 热含量不变量, 变化检测, EM 算法

引用格式 罗湾, 林伟, 张红波. 热含量不变量的 SAR 图像点特征变化检测. 自动化学报, 2014, **40**(6): 1126−1134

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01126

A Change Detection Method of SAR Image Using Point Signature Based on Heat Content Invariants

LUO Wan[1, 2] LIN Wei[1] ZHANG Hong-Bo[2]

Abstract The result of the methods of image change detection are affected by classifier precision and can hardly detect the image subtle change. To address this issue, this paper proposes a point signature change detection algorithm based on heat content invariants. This method, which uses the characteristics of heat kernel on graphs, is convenient to compute and has small matrix perturbation. It also can effectively reduce the noise disturbance. Based on the statistical characteristics of heat kernel invariants, the changes about synthetic aperture radar (SAR) image can be automatically detected by the expectation maximization (EM) algorithm. In addition, a weight function which is suitable for SAR image is put forward. Compared with the pixel-based and likelihood ratio method, our method can more quickly and accurately detect the change area of single band and single-polarization SAR image and multi-polarization SAR image.

Key words SAR image, heat content invariants, change detection, expectation maximization (EM) algorithm

Citation Luo Wan, Lin Wei, Zhang Hong-Bo. A change detection method of SAR image using point signature based on heat content invariants. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(6): 1126−1134

图像变化检测是遥感图像处理中非常活跃的研究方向, 旨在检测同一地区不同时间的变化情况. 目前变化检测技术主要应用于地震区域的定位、灾后救援与损失评估等多方面. 变化检测方法大致可分为二类: 1) 基于像素的检测方法[1−5], 如差值法、比值法以及以差图或比图为背景进行处理的检测方法[2, 5], 这类方法能够快速获取变化区域, 但易受噪声影响, 容易造成误检和漏检, 而且难以确定区域变化的性质. 2) 基于特征的检测方法[6−15], 如: 区域特征检测法[7−11]、变化向量分析法、主成份分析法[12]、纹理特征变化检测法[13−15] 等, 其中区域特征检测算法在很大程度上依赖于分类器的精度, 无法探测出某类内部的细微变化, 且分类的误差在进行变化检测阶段可能会被进一步放大; 而变化向量分析、主成分分析等算法是对多时相数据变换后的特征图像进行比较, 需要通过大量的实验进行最优特征选取, 对噪声和振动敏感. 近来 Xiao 等把热核方法用于光学图像的平滑、匹配、聚类、分割、目标识别等[16−20] 处理中, 正是由于热核系数所代表的特征可以充分表示图像的几何特征, 进而充分发挥图谱理论, 导致计算简便, 可降低矩阵的扰动等, 使得热核作为图像目标的特征具有了稳健和快速处理的特点. 在前期的工作中我们根据热核不变量的这些特点研究了区域下的合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 图像的变换检测问题[21], 然而该方法仍然存在着如下缺点: 1) 检测结果受分类器精度的影响;

收稿日期 2012-11-02 录用日期 2013-11-11
Manuscript received November 2, 2012; accepted November 11, 2013
国家自然科学基金 (60972150), 青年科学基金 (61201323, 61301196), 十二五预研项目 (402040202) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (60972150), Youth Science Foundation (61201323, 61301196), Twelve Five Pre-research Project (402040202)
本文责任编委 黄庆明
Recommended by Associate Editor HUANG Qing-Ming
1. 西北工业大学理学院 西安 710129 2. 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所 无锡 214063
1. School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi′an 710129 2. AVIC Leihua Electronic Technology Institute, Wuxi 214063

2) 热核特征的构成与图像类型有关; 3) 变化区域的阈值选取是由实验结果统计而得, 并非自动给出. 这些都影响图像的自动变化检测. 基于此, 本文主要根据点与其邻域像素点间的相关性, 每个点的热含量特征均用其图结构 (由邻域的点构成) 的热含量近似代替, 不仅克服了区域检测受分类器影响的问题, 而且有效地抑制了噪声的干扰. 其次, 热含量不变量与节点间的权是直接相关的[16], 即权对不同类型图像的检测结果有影响: 在实验中, 通过不断改进, 给出了两种对单波段单极化数据与多极化数据都适用的新的权结构, 并分析其对检测结果的影响. 由于差图的热核特征也具有混合高斯分布的特点, 本文将用 EM (Expectation maximization) 算法对差图对应的热含量信息进行初始分类 (变化与不变化), 接着用 Markov 随机场方法修正检测结果, 以实现自动检测. 金亚秋等和 Bruzzone 等曾提出了直接对差图进行上述自动变化检测[2, 5] 的算法, 在实验中将与此算法对比; 此外似然比算法[4, 7−8] 是针对 SAR 图像统计模型提出的, 具有很强的统计规律, 特别是多极化 SAR 图像具有一定的极化特征[4], 因此用似然比算法进一步验证本文算法的有效性.

1　图的热核

1.1　图结构的构建及热核的定义

构建图像的图结构 $\boldsymbol{G}=(V,E,W)$, $V=\{1,\cdots,N\}$ 是节点集, $E\in V\times V$ 是边缘集, $W=(w_{ij})_{N\times N}$ 是相似矩阵, ω_{ij} 是节点 i、j 之间边的连接权, 定义为

$$\omega_{ij}=\begin{cases}\exp\left(-\dfrac{d^2(s_i,s_j)}{2\sigma_i\sigma_j}-\dfrac{d^2(c_i,c_j)}{2\sigma_i\sigma_j}\right), & i\neq j\\ 0, & i=j\end{cases}\tag{1}$$

其中, 自适应的局部尺度 $\sigma_i=\sum_{j\neq i,j\in K\times K}|s_i-s_j|$, 即: 像素点 i 与其 $K\times K$ 邻域像素的灰度差值之和[22]; s_i 是点 i 对应的灰度信息, $c_i=(x_i,x_j)$ 是像素点 i 在图中的空间坐标.

由此可得, 度矩阵 D、Laplace 矩阵 $L=D-W$、归一化 Laplace 矩阵 $\widehat{L}=D^{-\frac{1}{2}}LD^{-\frac{1}{2}}$, 将 $\widehat{L}$ 谱分解得 $\widehat{L}=\Phi\Lambda\Phi^{\mathrm{T}}$, 对角阵 $\Lambda=\mathrm{diag}\{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_N\}$, $(\lambda_1<\lambda_2<\cdots<\lambda_N)$, $\Phi=(\phi_{ij})=(\boldsymbol{\phi}_1,\boldsymbol{\phi}_2,\cdots,\boldsymbol{\phi}_N)$, 其中列向量 $\boldsymbol{\phi}_i$ 是特征值 λ_i 对应的特征向量.

与 Laplace 矩阵相关的热方程的定义为

$$\frac{\partial\boldsymbol{h}_t}{\partial t}=-\widehat{L}\boldsymbol{h}_t\tag{2}$$

其中, $\boldsymbol{h}_t$ 是热核, t 是时间, 解式 (2) 得:

$$\boldsymbol{h}_t=\exp(-tL)\tag{3}$$

热核是热方程的本质, 描述的是不同时间通过图边缘的信息流, 信息流动的比率是由图的 Laplace 矩阵决定的. 通过研究发现, 图的热核可以用 Laplace 特征谱的指数计算, 即:

$$\boldsymbol{h}_t=\sum_{i=1}^{N}\exp(-\lambda_i t)\phi_i\phi_i^{\mathrm{T}}=\Phi\exp(-\Lambda t)\Phi^{\mathrm{T}}\tag{4}$$

1.2　热含量不变量

图谱的研究表明: 谱可以直接界定某些图类的特征[23], 而热核不变量中热含量不变量也与 Laplace 特征谱有关, 因此本文根据各点对应图结构的热含量不变量来描述该点的特征.

热含量不变量描述的是通过图上所有节点之间的热核含量之和. 表达式为

$$Q(t)=\sum_{u\in V}\sum_{v\in V}\boldsymbol{h}_{tuv}=\sum_{u\in V}\sum_{v\in V}\sum_{k=1}^{N}\exp(-\lambda_k t)\phi_{uk}\phi_{vk}\tag{5}$$

McDonald 等[24] 提到热含量可以表示为

$$Q(t)=\sum_{m=0}^{\infty}q_m t^m\tag{6}$$

把 $\exp(-\lambda_k t)$ 的麦克劳林展开式代入式 (5) 得:

$$Q(t)=\sum_{u\in V}\sum_{v\in V}\sum_{k=1}^{N}\exp(-\lambda_k t)\phi_{uk}\phi_{vk}=\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{u\in V}\sum_{v\in V}\sum_{k=1}^{N}\phi_{uk}\phi_{vk}\frac{(-\lambda_k)^m t^m}{m!}\tag{7}$$

对比式 (6) 与式 (7) 可得:

$$q_m=\sum_{k=1}^{N}\left\{\left[\sum_{u\in V}\phi_{uk}\right]^2\right\}\frac{(-\lambda_k)^m}{m!}\tag{8}$$

由于每个图都有其特有的热含量系数 q_m, 因此, q_m 被视为不变量的集合用于描述图结构[16].

本文将根据邻域像素构造各点对应的图结构, 并分析研究把热含量不变量作为变化检测的特征, 又由于它与图结构的节点数有关[16], 因此点结构中的节点是由其 $k\times k$ 邻域的像素点来表示, 避免因节点数不同影响实验的结果.

2 基于热含量不变量的点特征提取算法

图像一般用比图或差图来提取变化特征, 对于 SAR 图像为了消除噪声, 用对数差图 $G = |\log G_1 - \log G_2|$ 来研究其各点对应的热含量不变量特征, 其中 G_1、G_2 分别为变化前后的数据.

2.1 节点间权的构成

在一些实验研究中, 对节点间权的定义有一些不同之处, 式 (1) 是一种非常普遍的定义权的公式, 多用于一维数据的处理中, 但对于多极化数据, 考虑到它对应数据的特征, 直接利用式 (1) 不能得到合理的可用于变化检测的结果. 在用谱图分割思想进行极化数据的分类研究中, 为了考虑图像的多种特征 (如轮廓、强度、不同目标散射特性等)、灵活地定义节点间的相似性, 给出了新的节点间权的定义[25]:

$$\omega_{ij} = \exp\left(-\frac{\chi^2(h_i, h_j)}{2\sigma_i\sigma_j}\right) \tag{9}$$

其中, $\chi^2(h_i, h_j) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{K_0}[h_i(k) - h_j(k)]^2/(h_i(k) + h_j(k))$, h_i 表示节点 i 对应的窗, K_0 表示窗内包含的像素点数.

为了给出一种新的对单波段单极化 SAR 数据与多极化 SAR 数据都适用的节点间权的定义, 参考式 (1) 与式 (9), 本文提出了如下公式:

$$\omega_{ij} = \exp\left(-\frac{\frac{1}{2}\frac{\sum_{t=1}^{n}(s_{\mathrm{t}i} - s_{\mathrm{t}j})^2}{\frac{1}{n}\left(\sum_{t=1}^{n}(s_{\mathrm{t}i} + s_{\mathrm{t}j})\right)}}{2\sigma_i\sigma_j} - \frac{\|c_i - c_j\|^2}{2\sigma_i\sigma_j}\right) \tag{10}$$

其中, n 表示遥感数据的维数, $s_i = (s_{ti})$ 表示像素点 i 对应的灰度信息, $\sigma_i = \sum_{j\neq i, j\in K\times K}|s_i - s_j|$ 为自适应局部尺度 (考虑的是各像素与邻域像素的相关性, 在图谱聚类[22] 中分析了局部尺度大小对实验结果的影响, 结合该分析在本文实验中窗口大小 K 取为 11)、$c_i = (x_i, x_j)$ 为像素点 i 的空间坐标.

由于局部尺度 σ_i 是采用自适应的方式确定的, 本身具有图像的灰度信息, 因此本文对上述节点间权的定义 (式 (10)) 进一步修正, 得:

$$\omega_{ij} = \exp\left(-\frac{\|c_i - c_j\|^2}{2\sigma_i\sigma_j}\right) \tag{11}$$

相比于一般节点间权的定义公式, 考虑到它可能会缺失一定的数据信息, 影响变化检测的精度, 因此在实验中将讨论当节点间的权定义为式 (11) 时, 对检测结果的影响.

2.2 点结构对应热含量不变量的提取

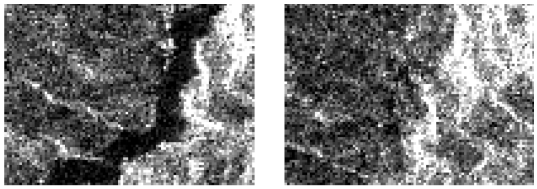
对于差图中的任一点 m, 根据其相应 $k\times k$ 邻域的点构建点 m 对应的结构图 $\boldsymbol{X}_m = (V_m, E_m, W_m)$, 由相似矩阵 W_m 求出度矩阵 D_m、Laplace 矩阵 L_m、归一化 Laplace 矩阵 $\widehat{L}_m = D_m^{-\frac{1}{2}} L_m D_m^{-\frac{1}{2}}$, 并对 $\widehat{L}_m$ 进行谱分解得 $\widehat{L}_m = \Phi_m\Lambda_m\Phi_m^{\mathrm{T}}$, 接着由式 (8) 求出该点的热含量不变量 $\boldsymbol{B}_m = (q_{m1}, q_{m2}, q_{m3}, q_{m4})$, 并用其描述点 m 的结构特征.

3 实验结果及其分析、修正

为了说明本文基于热含量不变量点特征算法用于变化检测的可行性, 分别对单波段单极化 SAR 图像与多极化 SAR 图像进行可行性分析与修正, 并分析两种新的权结构对检测结果的影响. 且在实验中分别与基于像素和似然比的方法进行对比, 验证本文算法的快速准确性.

3.1 基于特征的变化检测算法的可行性分析

实验采用的单波段单极化数据是由 RADARSAT-1 卫星获取的 2008 年 2 月 17 日与 2008 年 5 月 19 日四川唐家山地区的两幅 SAR 图像, 图 1 中给出了其中该地区的一组 SAR 图像, 图像尺寸为 246×178, 其中 2 月份得到的是震前图, 5 月份得到的是震后图, 如图 1 (a) 和 (b) 所示.



(a) 震前图 (a) Image before the earthquake　(b) 震后图 (b) Image after the earthquake

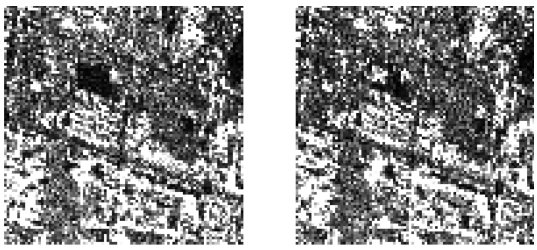
图 1 唐家山地区 SAR 图像 1

Fig. 1 SAR images of Tangjiashan area

相应地, 实验采用的多极化数据是由 EDRASSAT-2 获取的北京老山地区 9 月 (变化前的图像) 与 10 月 (变化后的图像) 的两组图像, 图像的尺寸为 200×200, 其强度图如图 2 所示.

在实验中, 构造点结构时考虑 3×3 的邻域. 相应地, 当节点间的权为式 (10) 时, 得到热含量不变量信息图如图 3 (c) 与图 5 (c) 所示, 其中在计算自适应局部尺度 $\sigma_i = d(s_i, s_K)$ 时, 由第 2.1 节可知 $K = 11$. 对于单波段单极化 SAR 数据, 由于它本身只具有幅值与强度, 在实验中取 $n = 1$; 但对于多极化数据, 具有不同于一般单极化 SAR 数据的多极化模式、多极化特征以及不同极化模式间的相关性等特点, 需要有效地提取目标散射特性. 而现有的目标

特征参数有 Huynen 目标特征分解、Pauli 分解参数、Krogager 分解参数、Cloude-Poitter 散射熵散射角以及 Yang 相似性参数等, 它们对应分解得到的矩阵一定程度上可以相互转化, 为了避免出现信息冗余, 本文主要考虑了强度信息与一些典型形状: 如平面、0° 及 45° 方向的二面角、线、左旋与右旋螺旋体对应散射矩阵计算得到的相似性参数, 形成 7 维特征数据.



(a) 变化前的强度图像
(a) Image before the change

(b) 变化后的强度图像
(b) Image after the change

图 2　老山地区

Fig. 2　SAR images of Laoshan area

在图 3 (c) 与图 4 (c) 中: 灰色区域与变化区域对应, 黑色区域与未变化区域对应. 由此可得: 基于特征的变化检测思想无论是处理单波段单极化数据还是多极化数据都是可行的, 只是需要进一步修正检测结果, 提高检测精度.

3.2　阈值的自动选取

首先, 根据图 3 (c) 与图 4 (c) 对应的热含量不变量信息图对应的直方图 (图 3 (d)、图 4 (d)) 可知: 本文可以利用 EM 算法[2, 5, 26] 对热含量不变量信息进行分类 (变化与不变化), 从而确定出初始的变化区域, 如图 3 (e) 与图 4 (e) 所示. 其中, 初始未变化像素的阈值为: $T_n = M(1-\gamma)$, 变化的阈值为: $T_c = M(1+\gamma)$, γ 是一个用来定义那些不容易识别的像素在 M 周围变化范围的初始参数, 我们取 $\gamma = 0.8$、$M = [\max(R) + \min(R)]/3$, R 是热含量不变量信息图对应的灰度数据. 当均值与协方差均满足迭代的终止条件 $\varepsilon = 10^{-6}$ 时, 相应地处理单波段单极化数据时的迭代收敛次数如表 1 所示, 而对多极化数据处理的结果如表 2 所示.

表 1　单波段单极化数据: 权不同时 EM 算法迭代收敛次数与时间

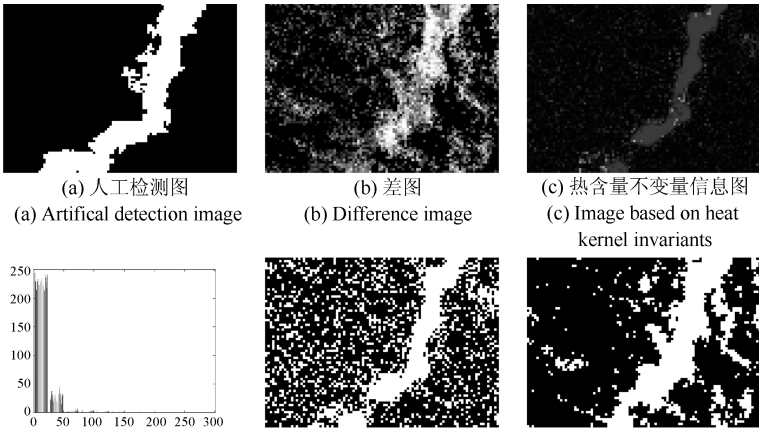
Table 1　The single band and single-polarization data: frequency and duration of iterative convergence of EM algorithm when the weight function is different

	EM 迭代收敛次数	EM 迭代收敛时间 (s)
权 1 (式 (10))	66	1.063
权 2 (式 (11))	36	0.562

表 2　多极化数据: 权不同时 EM 算法迭代收敛次数与时间

Table 2　The multi-polarization data: frequency and duration of iterative convergence of EM algorithm when the weight function is different

	EM 迭代收敛次数	EM 迭代收敛时间 (s)
权 1 (式 (10))	43	0.687
权 2 (式 (11))	30	0.391



(a) 人工检测图
(a) Artifical detection image

(b) 差图
(b) Difference image

(c) 热含量不变量信息图
(c) Image based on heat kernel invariants

(d) 热含量不变量信息图对应的直方图
(d) The histogram of image based on heat kernel invariants

(e) EM 算法提取的变化区域
(e) Change detection image of EM method

(f) 变化检测图
(f) Change detection image

图 3　单波段单极化数据 (权为式 (10) 时)

Fig. 3　The single band and single-polarization data (The weight function is (10).)

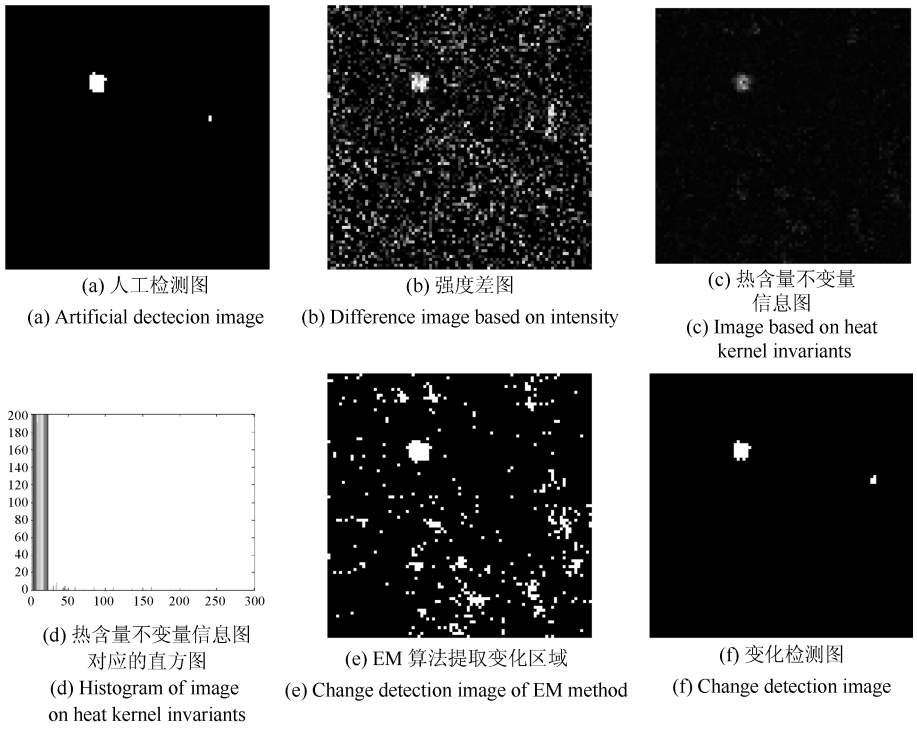


图 4 多极化数据 (权为式 (10) 时)

Fig. 4 The multi-polarization data (The weight function is (10).)

由实验结果可知, 经过 EM 算法处理后可以自适应地提取变化区域, 但是对于差图中各点对应的热含量信息, EM 算法考虑的仅仅是各点对应热含量不变量的统计独立性. 事实上, 当一个像素是变化点时, 它相邻的像素也很有可能是变化点, 各像素是空间结构相关的. 考虑到这种空间相关性能改善检测性能, 得到更可靠的结果. 接着利用 Markov 随机场 (Markov random field, MRF) 思想[2, 5, 27] 修正初始分类结果, 即假设像素点与其邻域像素有关, 而与邻域外的像素点无关, 建立差值图像的局部分布特征与像素间的空间结构相关的模型, 通过迭代条件模式算法 (Iterated conditional mode, ICM) 迭代[28] 不断地更新各像素点的类别标号, 快速实现差值图像的 Gibbs 能量局部最小, 进而修正检测的结果, 提高变化检测的精度.

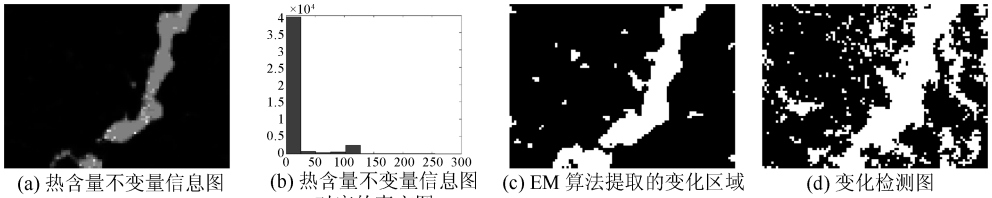
在实验时, 以 EM 算法收敛时得到的结果 (图 3 (e) 和图 4 (e)) 为初始值, 根据 MRF-ICM 算法不断地更新迭代, 当相应的能量达到局部最小时迭代结果如图 3 (f) 与图 4 (f) 所示. 实验结果表明: EM 算法与 MRF 随机场思想都可以得到对应的变化检测结果, 且 MRF 随机场思想可以进一步修正检测的结果.

3.3 对比分析权函数对实验结果的影响

考虑到自适应局部尺度在计算时所具有的特征, 本节将分析当节点间的权定义为 $\omega_{ij} = \exp\left(-\frac{\|c_i - c_j\|^2}{2\sigma_i\sigma_j}\right)$ 时, 是否可以进一步改善检测的结果. 实验处理结果如图 5 和图 6 所示.

由热含量不变量信息图 (图 5 (a) 与图 6 (a)) 可知, 当节点间的权定义为式 (11) 时, 用本文方法处理单波段单极化 SAR 数据与多极化 SAR 数据同样也是可行的. 对比图 3 (f) 与图 4 (d)、图 5 (f) 与图 6 (d) 可以得出: 这两种不同的节点间的权的定义对最终变化检测结果的影响不明显, 即 MRF 随机场方法可以很好地修正检测结果, 其中对单波段单极化 SAR 数据进行处理时, 检测精度均达到 84 % 以上 (如表 3 所示), 而对多极化 SAR 数据的检测精度达到了 99.882 % (如表 4 所示).

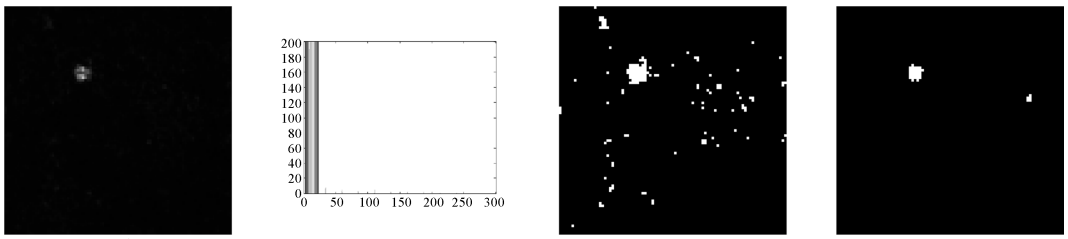
但对比图 3 ∼ 图 6 中的热含量不变量信息图、相应直方图与 EM 算法提取的初始检测结果可知: 当权不同时, EM 算法处理得到的检测结果差别明显, 其中节点间的权为式 (11) 时, 对应的 EM 算法处理结果的检测精度高于权为式 (10) 时的检测精度 (表 4 中多极化 SAR 数据的检测结果恰好说明了这一点). 在实验中, EM 算法的初始条件一致, 相应的收敛次数与收敛时间如表 1 和表 2 所示: 其中当权为式 (11) 时, EM 算法的收敛次数明显较低. 因此, 对单波段单极化 SAR 数据与多极化 SAR 数据检测时, 当节点间的权定义为式 (11) 时, 具有相对较好的时效性和检测精度, 相应地也提高了 MRF 随机场修正时的收敛速度.



(a) 热含量不变量信息图 (a) Image based on heat kernel invariants　(b) 热含量不变量信息图对应的直方图 (b) Histogram of image based on heat kernel invariants　(c) EM 算法提取的变化区域 (c) Change detection image of EM method　(d) 变化检测图 (d) Change detection image

图 5　单波段单极化数据 (权为式 (11) 时)

Fig. 5　The single band and single-polarization data (The weight function is (11).)



(a) 热含量不变量信息图 (a) Image based on heat kernel invariants　(b) 热含量不变量信息图对应的直方图 (b) Histogram of image based on heat kernel invariants　(c) EM 算法提取的变化区域 (c) Change detection image of EM method　(d) 变化检测图 (d) Change detection image

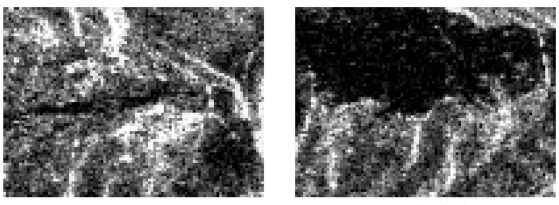
图 6　多极化数据 (权为式 (11) 时)

Fig. 6　The multi-polarization data (The weight function is (11).)

3.4　对比实验

在前面对单波段单极化数据进行分析时, 文中只给出了唐家山地区一组 SAR 数据的检测结果, 其检测精度相对于整个唐家山地区的变化检测精度较低, 仅为 84 %. 为了进一步说明本文基于热含量不变量特征变化检测算法的普适性, 在图 7 中给出了唐家山地区另一组由 RADARSAT-1 卫星获取的两幅 SAR 图像, 并对其进行分析处理, 图像尺寸为 245×178.

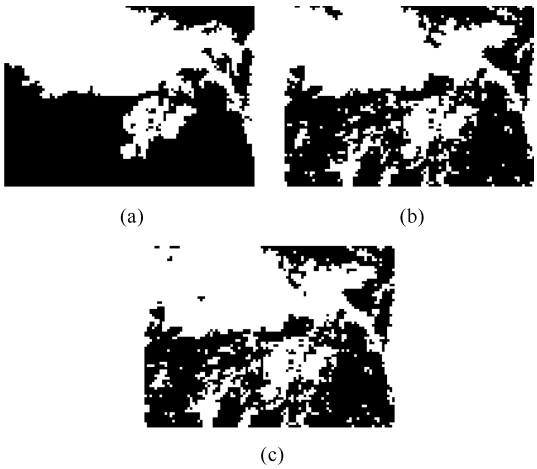
检测结果如图 8 所示, 该地区包含两种变化: 1) 地震发生后堰塞湖变宽; 2) 周围地形的移位. 由检测结果图 8 (b)、图 8 (c) 可知, 本文算法可以很好地检测出这两种变化, 且当权的定义不同时, 正确检测率 (如表 3 所示) 均达到 86 % 以上.



(a) 震前图 (a) Image before the earthquake　(b) 震后图 (a) Image after the earthquake

图 7　唐家山地区 SAR 图像 2

Fig. 7　The second group of SAR images of Tangjiashan area



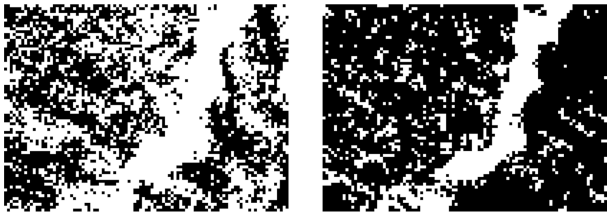
(a)　(b)　(c)

图 8　单波段单极化数据 (唐家山地区 SAR 图像 2) ((a) 人工检测图; (b) 权为式 (10) 时, 基于特征的变化检测图; (c) 权为式 (11) 时, 基于特征的变化检测图)

Fig. 8　The single band and single-polarization data (the second group of SAR images of Tangjiashan area) ((a) Artificial detection image; (b) Change detection image of feature-based method (The weight function is (10).); (c) Change detection image of feature-based method (The weight function is (11).)

为了充分验证本文算法的有效性, 本文依次利用基于像素和似然比的检测算法分别对两组单波段单极化 SAR 数据与一组多极化 SAR 数据进行处理, 结果如图 9～11 所示.

对比基于特征的变化检测结果 (图 5 (d)、图 6 (d)、图 8 (c)) 可得: 基于像素的变化检测结果受噪声的干扰大, 由表 3 可以看出过检率很高; 而似然比方法对单波段单极化 SAR 数据处理的结果 (图 9 (b) 和图 10 (b)) 受噪声的影响严重, 且检测精度不稳定, 有时偏高: 正确率达到 85.3 %; 有时偏低: 正确检测率为 79.72 %, 但是本文基于特征的变化检测算法的检测精度比较稳定, 均达到 84 % 以上 (如表 3 所示), 对于多极化数据: 极化似然比的变化检测结果 (图 11 (b)) 又有太多的漏检点 (表 4 中多极化数据的检测结果说明了该结论).



(a) (b)

图 9 单波段单极化数据 (唐家山地区 SAR 图像 1) ((a) 基于像素的变化检测图; (b) 似然比算法变化检测图))

Fig. 9 The single band and single-polarization data (the first group of SAR images of Tangjiashan area) ((a) Change detection image of pixel-based method; (b) Change detection image of likelihood ratio method)

(a) (b)

图 10 单波段单极化数据 (唐家山地区 SAR 图像 2) ((a) 基于像素的变化检测图; (b) 似然比算法变化检测图))

Fig. 10 The single band and single-polarization data (the second group of SAR images of Tangjiashan area) ((a) Change detection image of pixel-based method; (b) Change detection image of likelihood ratio method)

上述检测结果表明: 本文基于热含量不变量的变化检测算法是可行的; 且节点间权的两种不同构造, 对单波段单极化的 SAR 图像与多极化的 SAR 图像最终的检测结果影响不明显, 但当权为式 (11) 时, EM 自适应获取的分类效果较好、收敛速度较快, 一定程度上降低了计算的复杂度. 此外, 本文算法的检测精度明显优于基于像素和似然比的变化检测算法.

(a) (b)

图 11 多极化数据 ((a) 基于像素的变化检测图; (b) 极化似然比算法变化检测图)

Fig. 11 The multi-polarization data ((a) Change detection image of pixel-based method; (b) Change detection image of polarization likelihood ratio method)

表 3 单波段单极化数据: 对比人工检测图 (图 3 (a) 和图 8 (a)) 得到的不同算法的检测结果

Table 3 The single band and single-polarization data: detection results of different algorithms obtained by comparing the artificial detection image (Fig. 3 (a), Fig. 8 (a))

唐家山地区	检测算法	漏检数	过检数	正确检测率 (%)
SAR 图像 1	基于特征的检测 (权为式 (10))	1 620	5 314	84.165
SAR 图像 1	基于特征的检测 (权为式 (11))	1 631	5 327	84.11
SAR 图像 1	基于像素的变化检测	398	16 435	61.558
SAR 图像 1	似然比算法	1 540	4 897	85.3
SAR 图像 2	基于特征的检测 (权为式 (10))	2 743	2 861	87.15
SAR 图像 2	基于特征的检测 (权为式 (11))	2 622	3 339	86.331
SAR 图像 2	基于像素的变化检测	1 123	17 013	58.413
SAR 图像 2	似然比算法	3 842	5 002	79.72

表 4 多极化数据: 对比人工检测图 (图 4 (a)) 得到的不同算法的检测结果

Table 4 The multi-polarization data detection results of different algorithms obtained by comparing the artificial detection image (Fig. 4 (a))

检测算法	漏检数	过检数	正确检测率 (%)
EM 处理的结果 (权为式 (10))	14	2 115	94.678
基于特征的检测 (权为式 (10))	29	18	99.882
EM 处理的结果 (权为式 (11))	14	615	98.428
基于特征的检测 (权为式 (11))	29	18	99.882
基于像素的变化检测	3	16 226	59.428
极化似然比算法	104	1	99.738

4 结论

由于热核不变量可以用来描述图的结构特征, 且有计算简便、矩阵扰动小等优点, 本文提出了热含量不变量的遥感图像点特征的变化检测算法. 对单

波段单极化 SAR 数据与多极化 SAR 数据的检测结果表明: 本文方法可以有效地改善区域检测的缺点、抑制噪声干扰, 且实现了自动快速精确的检测. 但应注意: 在实验中虽然不同方法的检测效果差别明显, 但仍需作进一步的比较实验证明本文算法的优越性, 并对其精度进行对比分析; 此外, 节点间权的定义不同时对结果产生的影响仍需作更深层次的研究, 相信热核思想在 SAR 图像处理研究领域会有很好的应用前景.

References

1 Rignot E J M, Van Zyl J J. Change detection techniques for ERS-I SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**(4): 896−906

2 Bruzzone L, Prieto D F. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(3): 1171−1182

3 Chen Fu-Long, Zhang Hong, Wang Chao. The art in SAR change detection — a systematic review. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, **22**(1): 109−115
(陈富龙, 张红, 王超. SAR 变化检测技术发展综述. 遥感技术与应用, 2007, **22**(1): 109−115)

4 Conradsen K, Nielsen A A, Schou J, Skriver H. A test statistic in the complex wishart distribution and its application to change detection in polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(1): 4−19

5 Jin Ya-Qiu, Wang Da-Fang. Automatic detection of terrain surface change after Wenchuan earthquake, May 2008, from ALOS SAR images using 2EM-MRF method. *Progress in Nature Science*, 2009, **19**(4): 412−420
(金亚秋, 王大芳. ALOS SAR 图像 2EM-MRF 方法自动检测 2008 年 5 月中国汶川地震区域三类地表变化. 自然科学进展, 2009, **19**(4): 412−420)

6 Huo Chun-Lei, Cheng Jian, Lu Han-Qing, Zhou Zhi-Xin. Object-level change detection based on multiscale fusion. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(3): 251−257
(霍春雷, 程健, 卢汉清, 周志鑫. 基于多尺度融合的对象级变化检测新方法. 自动化学报, 2008, **34**(3): 251−257)

7 Cai Chun, Sun Hong, Cao Yong-Feng. Change detection technique based on region likelihood ratio for SAR images. *Journal of Wuhan University (Natural Sciences Edition)*, 2005, **51**(1): 109−113
(蔡纯, 孙洪, 曹永峰. 基于区域似然比的 SAR 图像变化检测. 武汉大学学报 (理学版), 2005, **51**(1): 109−113)

8 Lombardo P, Oliver C J. Maximum likelihood approach to the detection of changes between multitemporal SAR images. *IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation*, 2001, **148**(4): 200−210

9 Bovolo F, C-Valls G, Bruzzone L. A support vector domain method for change detection in multitemporal images. *Pattern Recognition Letters*, 2010, **31**(10): 1148−1154

10 Bovolo F, Bruzzone L, Marconcini M. A novel approach to unsupervised change detection based on a semisupervised SVM and a similarity measure. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(7): 2070−2082

11 Hu H, Ban Y. Urban land-cover mapping and change detection with radarsat SAR data using neural network and rule based classifiers. In: Proceedings of the 21st ISPRS Congress. Beijing, China: ISPRS, 2008.

12 Deng Jin-Song, Li Jun, Wang Ke. Detecting land use change using PCA-enhancement and multi-source classifier from SPOT images. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(6): 1627−1631
(邓劲松, 李君, 王珂. 基于多时相 PCA 光谱增强和多源光谱分类器的 SPOT 影像土地利用变化检测. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(6): 1627−1631)

13 Ghosh S, Bruzzone L, Patra S, Bovolo F, Ghosh A. A context-sensitive technique for unsupervised change detection based on Hopfield-type neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(3): 778−789

14 Marchesi S, Bovolo F, Bruzzone L. A context-sensitive technique robust to registration noise for chance detection in very high resolution multispectral images. In: Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, USA: IEEE, 2008. PartIII, 150−153

15 Gamba P, Acqua F D, Lisini G. Change detection of multitemporal SAR data in urban areas combining feature-based and pixel-based techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(10): 2820−2827

16 Bai X, Hancock E R, Wilson R C. Graph characteristics from the heat kernel trace. *Pattern Recognition*, 2009, **42**(11): 2589−2606

17 Zhang F, Hancock E R. Graph spectral image smoothing using the heat kernel. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(11): 3328−3342

18 Qiu H J, Hancock E R. Graph matching using commute time spanning trees. In: Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Hong Kong, China: IEEE, 2006. 1224−1227

19 Bai X, Hancok E R, Wilson R C. Geometric characterization and clustering of graphs using heat kernel embeddings. *Image and Vision Computing*, 2010, **28**(6): 1003−1021

20 Qiu H J, Hancock E R. Clustering and embedding using commute times. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, **29**(11): 1873−1890

21 Luo Wan, Lin Wei, Wen Jin-Huan. Change detection based on region heat kernel invariants for SAR image. *Journal of Astronautics*, 2011, **32**(11): 2410−2416
(罗湾, 林伟, 温金环. 基于区域热核不变量的 SAR 图像变化检测. 宇航学报, 2011, **32**(11): 2410−2416)

22 Zelnik-Manor L, Perona P. Self-tuning spectral clustering. In: Proceedings of the Eigtheenth Annual Conference on Neural Information Processing Systems. Whistler, B. C.: NIPS, 2004

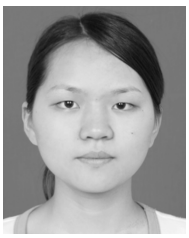
23 Liu Bo-Lian. *Combinatorial Matrix Theory*. Beijing: Science Publishing House, 1994. 8−16
(柳柏濂. 组合矩阵论. 北京: 科学出版社, 1994. 8−16)

24 McDonald P, Meyers R. Diffusions on graphs, Poisson problems and spectral geometry. *Transactions of the American Mathematical Society*, 2002, **354**(12): 5111−5136

25 Ersahin K, Cumming I G, Yedlin M J. Classification of polarimetric SAR data using spectral graph partitioning. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, CO: IEEE, 2006. 1756−1759

26 Han Shou-Dong, Zhao Yong, Tao Wen-Bing, Sang Nong. Gaussian super-pixel based fast image segmentation using graph cuts. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(1): 11−20
(韩守东, 赵勇, 陶文兵, 桑农. 基于高斯超像素的快速 Graph Cuts 图像分割方法. 自动化学报, 2011, **37**(1): 11−20)

27 Yao Ting-Ting, Xie Zhao. Top-down inference with relabeling and mapping rules in hierarchical MRF for image segmentation. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(10): 1581−1593
(姚婷婷, 谢昭. 多层次 MRF 重标记及映射法则下的图像分割. 自动化学报, 2013, **39**(10): 1581−1593)



罗 湾 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所设计员. 2012 年获得西北工业大学硕士学位. 主要研究方向为合成孔径雷达系统设计与信号处理. 本文通信作者. E-mail: luohaiwan@163.com
(**LUO Wan** Designer at AVIC Leihua Electronic Technology Institute. She received her master degree from Northwestern Polytechnical University in 2012. Her research interest covers the synthetic aperture radar (SAR) system design, and signal processing. Corresponding author of this paper.)

林 伟 西北工业大学副教授. 主要研究方向为统计信号处理, SAR 及极化 SAR 图像处理. E-mail: linwei@nwpu.edu.cn
(**LIN Wei** Associate professor at Northwestern Polytechnical University. Her research interest covers statistical signal processing, SAR, and polarimetric SAR image processing.)

张红波 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所工程师. 主要研究方向为合成孔径雷达系统设计与信号处理.
E-mail: zhanghongbo217@sina.com
(**ZHANG Hong-Bo** Engineer at AVIC Leihua Electronic Technology Institute. Her research interest covers the synthetic aperture radar (SAR) system design, and signal processing.)