

文章编号: 1007-4619(2006)06-0847-07

基于融合和广义高斯模型的遥感影像变化检测

马国锐, 李平湘, 秦前清

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 提出了一种基于融合和广义高斯模型的遥感影像变化检测算法。该算法融合差值影像和比值影像的结果构造差异影像, 然后运用灰度形态学对差异影像进行顾及空间邻域关系的处理, 再对处理后的结果运用广义高斯分布模型估计变化与非变化像元的概率密度参数, 最后采用改进的 KI 算法计算最佳分割阈值, 提取变化区域。实验结果表明, 所提出的变化检测算法稳健、高效, 具有较大的实用价值。

关键词: 变化检测; 灰度形态学; 广义高斯分布模型; KI 阈值选取

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

Based on Fusion and GGM Change Detection Approach of Remote Sensing Images

MA Guo-rui LI Ping-xiang QIN Qian-qing

(National Lab for Information Engineering in Surveying, Mapping & Remote Sensing Wuhan University, Hubei Wuhan 430079, China)

Abstract This paper presents a change detection approach of remote sensing images based on fusion and general Gauss model (GGM). This method constructs difference image by fusing the results of subtraction operation and division operation, then processes difference image by gray morphology, again estimates the probability density of change pixels and no-change pixels by GGM, finally, calculates the optimal threshold by the improved KI approach and extracts the changed regions. Experiments show that the method of fusion and GGM is solid and efficacious, which has preferable application value.

Key words change detection; gray morphology; GGM; KI approach

1 引 言

遥感具有宏观、动态、快速、准确和综合的优势, 适合用于检测大范围、远距离地表的各种变化, 多时相的遥感影像变化检测技术已经广泛地应用到社会经济的各个方面, 比如农业调查、林业监测、城市规划管理、基础地理数据库更新、土地退化和荒漠化检测以及极地和海洋的探测等。

多年以来, 研究人员提出了多种遥感影像变化检测技术^[1-3], 各国学者从不同的方面进行了总结。

如李德仁提出变化检测技术可根据影像配准和变化检测的数据源两个因素, 划分为先进行影像配准的变化检测方法和变化检测与影像配准同步进行的方法两类^[4]。Lu 等按照检测策略将现有的变化检测方法归结为七类: 算术运算法、变换法、分类法、高级模型法、GIS 方法、视觉分析法和其他方法^[5]。更多的学者根据是否要先进行分类, 将现有的变化检测方法归纳为分类后比较法和直接比较检测法两类^[6], 还有学者提出分为监督的方法和非监督的方法等。不过目前的这些变化检测方法多适用中低分辨率的多光谱和高光谱图像, 多用来检测大面积目

收稿日期: 2005-08-02; 修订日期: 2006-01-23

基金项目: 国家 973 项目 (编号: 2006CB701303), 国家自然科学基金项目 (编号: 904160704)。

作者简介: 马国锐 (1979—), 男, 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室博士生, 研究方向为信号处理、遥感影像处理与应用。

E-mail: maguonrui@yahoo.com.cn

标(如森林、土地、城市等)的变化。每种方法都有各自的优点,难以确定哪种方法是最优的,应该根据具体应用的要求来选用合适的变化检测分析方法^[7]。

随着高分辨率卫星遥感应用的不断深入,应用高分辨率卫星遥感影像进行变化检测给我们带来了新的机遇和挑战,以往的变化检测算法是否适合高分辨率影像需要进一步的探索。本文针对中高分辨率单通道卫星遥感影像变化检测技术展开了一系列的研究。

影像算术运算是遥感影像最广泛使用的变化检测方法。主要包括差值和比值运算,构造差异影像,然后选取适当的阈值,提取变化区域。本文发现了在变化检测处理过程中差值法构造差异影像像素值总是大于等于比值法构造的差异影像像素值的规律,并从理论上给予了证明,经过深入分析这两种方法的特性,提出了一种差值融合比值的差异影像构造方法。

从差异影像中提取变化区域是变化检测的另一个关键问题,经典的变化检测算法是通过确定变化阈值来提取的,然而变化阈值的确定一直没有得到很好的解决。传统的图像分割方法,如循环分割、最大类间方差自动分割、最佳熵自动分割、矩不变自动分割等并不能得到好的结果,目前,变化阈值大多数是通过人机交互选择经验性数值来确定的,需要反复试验,才能得到令人满意的结果。针对变化阈值难以有效地自动确定的问题,Bruzzone等率先应用统计模式识别中的 Bayes决策理论加以解决^[8],通过估计变化与未变化两类的先验概率和类条件概率密度函数,所选取的最优变化阈值在理论上使得变化检测的总体错误率达到最低。通常,假定差异影像近似服从高斯分布,不过由于实际地物光谱特征的复杂性,在很多情况下这两类像元的分布很难用单一的高斯密度分布来描述,简单高斯分布模型,有可能产生较大的偏差,得到错误的变化检测结果。因此,本文选用以 Gaussian分布、Laplacian分布为特例,以 δ 函数和均匀分布为极限形式的广义高斯分布模型作为差异影像中变化类和没变化类的分布模型,提出了一种广义高斯分布模型(GGM)的差异影像变化阈值选取方法。

2 算法关键技术

2.1 差值融合比值的差异影像构造

差值法和比值法操作简单,应用最为广泛^[9,10]。图像差值法对多时相图像中对应的像素值进行相

减,结果图像代表了两个时间图像的变化。根据检测对象的不同,差值法又分为灰度差值法、纹理差值法^[11,12]、矩特征差值法^[13]、植被指数差值法、反射率差值法和小波变换系数差值法^[14]等。本文以灰度差值法为例进行阐述,其他方法可以类推。常用的灰度差值法表达式如下:

$$A(i,j)=255-|f(i,j)-g(i,j)| \quad (1)$$
$$0\leq f(i,j)\leq 255, 0\leq g(i,j)\leq 255$$

式中, i,j 为像素坐标值; $f(i,j)$ 、 $g(i,j)$ 分别为不同时相的两幅遥感影像; $A(i,j)$ 为差值法构造的差异影像。如果在一个像素上没有发生变化,则 $A(i,j)=255$,如果在此像素上发生的变化程度越大,则 $A(i,j)$ 越接近0。

图像比值法计算已配准的多时相图像对应像素值的比值,结果图像代表了两个时间图像的变化。常用的灰度比值法表达式如下:

$$B(i,j)=\begin{cases} 255*f(i,j)/g(i,j) & f(i,j)\leq g(i,j), g(i,j)\neq 0 \\ 255*g(i,j)/f(i,j) & f(i,j)>g(i,j), f(i,j)\neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$B(i,j)$ 为比值法构造的差异影像,其他参数意义同上。如果在一个像素上没有发生变化,则 $B(i,j)=255$,如果在此像素上发生的变化程度越大,则 $A(i,j)$ 越接近0。

上述算法是典型的差异影像构造法,得到的结果与实际的变化和非变化趋势大体一致,不过本文发现在对差异影像不进行任何拉伸处理时,差值法构造差异影像像素值总是大于等于比值法构造差异影像像素值,即总有

$$A(i,j)\geq B(i,j) \text{ 成立。}$$

下面用反证法从理论上给出证明。

$$\text{假设 } A(i,j)<B(i,j)$$

$$\text{当 } f(i,j)\geq g(i,j)$$

$$A(i,j)=255-f(i,j)+g(i,j)$$

$$B(i,j)=255*g(i,j)/f(i,j)$$

$$\text{由于 } A(i,j)<B(i,j)$$

$$\text{得 } (f(i,j)-255)*(f(i,j)-g(i,j))>0$$

$$\text{得解 } f(i,j)>255 \text{ 或 } f(i,j)<g(i,j)$$

两个解均与条件矛盾,同理可证 $f(i,j)<g(i,j)$ 时,也无解,所以总有 $A(i,j)\geq B(i,j)$ 成立。

根据这个结论,可以看出在没有发生变化的区域,差值法构造差异影像像素值等于比值法构造差异影像像素值,即 $A(i,j)=B(i,j)=255$,而发生变化的区域,差值法构造差异影像像素值总是大于等于比值法构造差异影像像素值,所以差值法构造的

差异影像灰度范围比较集中,比值法的差异影像灰度范围相对分散一些。如果考虑进行变化检测的两幅图像灰度级的各种情况,令 $f(i,j)$ 和 $g(i,j)$ 分别

为 x 和 y 坐标轴,分别从 0 至 255 变化, $A(i,j)$ 和 $B(i,j)$ 分别为 z_1 和 z_2 坐标轴,可以得到差值和比值差异影像的三维分布,如图 1 所示。

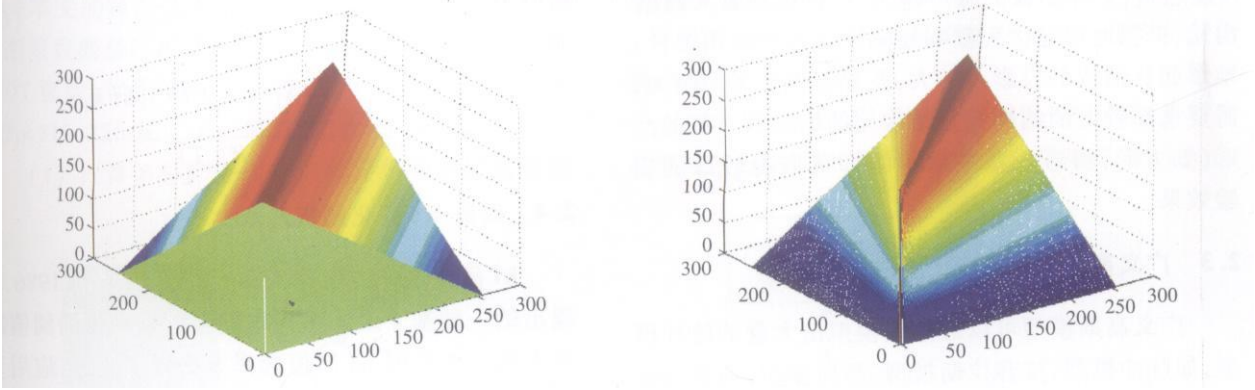


图 1 差值和比值差异影像的分布
Fig 1 Distribution of difference images

从图 1 中可以看出,在没有变化时,差值与比值的
结果一样,即 $x=y$ 时, $z_1=z_2$, 在 x 和 y 均比较大
时, z_1 与 z_2 很接近,但是当 x 和 y 中有一个值较小
时,差值与比值的差异影像的差别就很大了,即比值
法夸大了这种变化,图中可见,在平行于 $x=y$ 的平
面上,差值法的值 $A(i,j)$ 处处相等,而比值法的值
 $B(i,j)$ 却从 0 到 $A(i,j)$ 非线性变化,这就是这两种
方法的区别与联系。

由于量化过程一般为非线性变换,故差值法并
不能完全反映地面地物的辐射能量变化,如对灰度
值从 50 到 20 与从 250 到 220 的变化,地面相应处
的地物辐射能量变化并不等量^[15],所以不能等同看
待;比值法运算结果在增强变化信息、抑制背景信息
的同时可以帮助减少大气条件造成的影响,但有时
会过于夸大部分的变化,如对灰度值从 200 到 20 与
从 20 到 2 的变化,比值法不能区分出来,而差值法
差异却非常大。考虑两种方法各自的局限和人眼视
觉特性,本文提出差值融合比值的差异影像构造方
法。融合可以基于简单的代数运算,也可以基于复
杂的如小波变化融合法,本文采用乘积变换融合法
来构造差异影像。融合公式为:

$$C(i,j)=A(i,j)*B(i,j)/\max(B(i,j))$$

无论是差值法、比值法还是融合法,最后都得到
一幅结果差异图像。结果差异图像最大程度地抑制
了背景,增强了变化区域,接下来对结果差异图像进
行分割,即能将变化区域提取出来。

2 2 差异影像的灰度形态学处理

常规的变化检测技术在应用变化阈值提取变化

区域时,很少顾及到相邻像元之间的相互依赖关系,
对单个像元鉴别变化或未变化的过程是相互独立
的。实际上,对于一个像元,如果它的邻域像元均属
于变化类,则此像元也为变化类型的概率大于其属
于未变化类型的概率,反之,若其邻域像元均未变
化,则此像元也应趋向于未变化类。从空间邻域角
度出发,考虑到当前像素的周围邻域像元对该像素
的影响,有学者提出利用概率松弛迭代算法和马尔
科夫随机场算法^[16]进行变化检测并取得了较好的
效果。不过这些算法均需要初始值,均需要不断地
迭代处理。甚至由于不收敛而无法处理。要达到类
似的效果,灰度数学形态学运算也是不错的选择。
本文对差异影像采用灰度重构开运算光滑变化区
域的边界,填充变化区域内部的小孔洞;采用灰度闭
运算用来断开变化区域间的细小连接,去除噪声和
配准误差引起的小斑点,同样取得了很好的实验效
果。

灰度形态学算法的应用可分解为形态学运算和
结构元素选取两个基本问题,形态学运算的规则已
由定义确定,于是形态学算法的性能和目的就取决
于结构元素的选择。结构元素是欧氏空间或其他空
间上一个指定的集合,具有一定的几何形状,在形态
变换中的作用类似于信号处理中的滤波窗口,可以
认为是一种收集目标信息的探针,是形态运算的关
键所在。结构元素的选取异常灵活和多变,原则上
可选取任意尺寸、形状和幅度的结构元。本文针对
变化检测的差异影像形态学处理,提出了几条结构
元尺寸的选择建议。

根据变化检测研究的对象的尺寸和图像分辨率

选择:研究对象在图像上所占像素数目越多,结构元尺寸可以越大;根据两时相遥感影像的几何配准精度和辐射校正精度选择:几何配准精度和辐射校正精度越差,差异影像的噪声越大,可以选择较大的结构元;根据地形起伏程度和遥感影像拍摄视角选择:地形起伏造成的投影差越大,差异影像的噪声越大,需要选择较大的结构元。结构元的形状取一般的凸形(如方形,圆形)、幅度取等幅即可取得较好的实验效果。

2.3 广义高斯分布模型的参数估计

广义高斯模型可以近似地模拟出大量的统计模型,如脉冲模型,拉普拉斯模型,高斯模型,均衡分布模型等,具有灵活、适用面广和稳健性好的特点,只需要估计三个参数,因此本文选择广义高斯模型作为差异图像中变化类和没变化类的分布模型。

在广义高斯分布模型假设下,差异影像上未变化的像元类 ω_n 和变化的像元类 ω_c 的似然概率密度 $p(X_i/\omega_n)$ 和 $p(X_i/\omega_c)$ 可描述为如下式:

$$P(X_i|\omega_i) = a_i \exp\{-[b_i|X_i - m_i|]^{\beta_i}\} \quad i \in \{n, c\}$$
(3)

常数 a_i, b_i 的值按如下公式给出:

$$a_i = \frac{b_i \beta_i}{2\Gamma\left(\frac{1}{\beta_i}\right)} \quad b_i = \frac{1}{\sigma_i} \sqrt{\frac{\Gamma\left(\frac{3}{\beta_i}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta_i}\right)}}$$
(4)

参数 m_i, σ_i^2, β_i 分别为广义高斯分布的均值、方差和形状控制参数。公式(4)中的 $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数,其表达式为 $\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt$ 形状参数 $\beta_i (\beta_i \geq 0)$ 描述了该分布的衰减程度。

设选择的初始分割阈值为 $T, T \in \{0, 1, \dots, L-1\}$, 定义 $P_c(T), m_c(T)$ 和 $\sigma_c(T)$ 用来描述变化类先验概率、均值和方差,其具体的公式如下(变化类和没变化类的参数估计方法相同,以变化类为例来说明该方法, $h(X_i)$ 表示变化类的直方图)。

$$c(x|T) = \begin{cases} -2 \ln(P_n(T) a_n(T) \exp\{-[b_n(T)|x - m_n(T)|]^{\beta_n}\}) & \text{if } x \leq T \\ -2 \ln(P_c(T) a_c(T) \exp\{-[b_c(T)|x - m_c(T)|]^{\beta_c}\}) & \text{if } x > T \end{cases}$$
(12)

准则函数 $J(T)$ 变为

$$J(T) = \sum_{x_i=T}^{L-1} h(X_i) [b_n(T)|X_i - m_n(T)|]^{\beta_n(T)} + \sum_{x_i=0}^T h(X_i) [b_c(T)|X_i - m_c(T)|]^{\beta_c(T)} + H(\Omega, T) - [P_n(T) \ln a_n(T) + P_c(T) \ln a_c(T)]$$

$$P_c(T) = \sum_{x_i=0}^T h(X_i)$$
(5)

$$m_c(T) = \frac{\sum_{x_i=0}^T X_i h(X_i)}{P_c(T)}$$
(6)

$$\sigma_c(T) = \frac{\sum_{x_i=0}^T (X_i - m_c(T))^2 h(X_i)}{P_c(T)}$$
(7)

2.4 改进 KI 变化阈值选取

KI 阈值选择方法是 Kilter 和 Illingworth 1986 年提出的一种基于最小错误率的贝叶斯理论的阈值选择方法。本文把 KI 阈值选择方法做了改进,应用于 GGM 图像的变化检测阈值选择中。

定义一个准则函数 $J(T)$ 来描述整幅图像上平均的正确分类性能

$$J(T) = \sum_{x=0}^{L-1} h(x) c(x|T)$$
(8)

式中, $c(x|T)$ 为代价函数,它是反映分类性能的一种测量量,其公式为:

$$c(x|T) = \begin{cases} -2 \ln p(\omega_n | x, T) & \text{if } x \leq T \\ -2 \ln p(\omega_c | x, T) & \text{if } x > T \end{cases}$$
(9)

$p(\omega_i | x, T) (i = n, c)$ 代表了在给定阈值 T 和灰度值 X_i 时,没变化和变化类的后验概率密度。最佳阈值的选择就是要使图像的平均分类性能 $J(T)$ 达到最小值。即:

$$T^* = \arg \min_{T=0, 1, \dots, L-1} (J(T))$$
(10)

根据贝叶斯理论,后验概率密度函数可以用先验概率和似然概率来表示,即:

$$p(\omega_i | x, T) = \frac{p(\omega_i) p(x | \omega_i, T)}{\sum_{j \in \{n, c\}} p(\omega_j) p(x | \omega_j, T)} = \frac{p(\omega_i) p(x | \omega_i, T)}{p(x)}, \quad i = n, c$$
(11)

在假设差异图像中变化类和没变化类的似然概率分布模型为泛高斯模型后,代价函数

$$P_c(T) \ln a_c(T)]$$
(13)

式中, $H(\Omega, T)$ 表示类别 Ω 的熵, $\Omega = \{\omega_n, \omega_c\}$, 具体表达式:

$$H(\Omega, T) = -2[P_n(T) \ln P_n(T) + P_c(T) \ln P_c(T)]$$
(14)

使得 $J(T)$ 达到极小值的 T 值即为最佳的阈值。

3 算法流程与实验

本文的算法流程以实验为例,待进行变化检测的图像数据是已配准好的 1987 年和 1992 年的两幅 SPOT 影像,如图 2 中 (a)和 (b)所示,影像大小为 512×512 , 256 灰度级。算法流程为:

(1) 计算差异影像。差值差异影像和比值差异

影像为图 2(c)和 (d)所示,乘积融合的差异影像见图 2(e)所示;

(2) 灰度形态学处理。经过灰度形态学处理后的结果为图 2(f)所示;

(3) 运用广义高斯模型估计变化与非变化类的概率密度;

(4) 用改进的 KI 算法计算最优分割阈值,进行变化区域的分割提取,得到变化检测结果如图 2(g)所示。

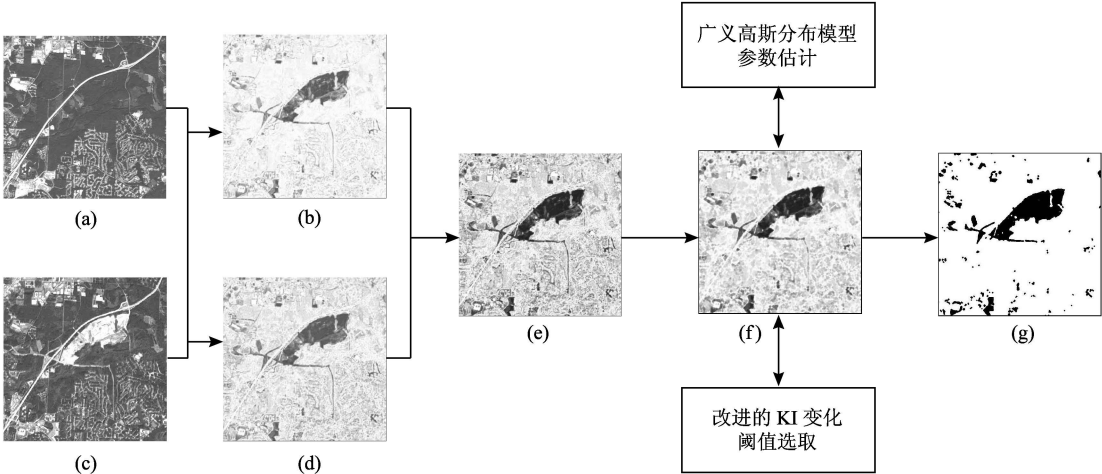


图 2 本文算法流程框图
Fig 2 Flowchart of this paper's method

3.1 试验一:灰度形态学处理

形态学多用于变化检测后处理操作中,本文将灰度形态学应用于分割前的差异影像上,图 3(a)为没有进行形态学处理的差异影像直接分割结果,图 3(b)为经过形态学重构开和闭运算处理后的分割结果。从图中可以看出:经形态学处理后再分割,可以明显地去除小斑点,填平小孔洞,光滑边界,断开区域间的细小连接,便于后续的变化区域描述,效果较好。在实际应用中,常常只对面积超过一定大小的变化感兴趣,检测影像的地面分辨率也决定了只能分辨大于某一面积的地面变化,形态学处理相当

于设定了一个面积阈值,大于阈值的变化为有效变化,否则被认为是噪声予以剔除。

3.2 试验二:形态学处理后的差异影像直方图

从图 4 可以看出,处理后的差异影像呈现较为明显的双峰,双峰之间有一个缓慢变化的过渡带,没变化像元近似高斯分布,变化像元则更接近拉普拉斯分布。

3.3 试验三:GM 和 GGM 的参数估计对比

对差异影像根据上述算法计算出的 GM 和 GGM 的估计参数见表 1 和表 2。根据这些参数拟合出来的差异影像灰度分布如图 5 所示。

表 1 高斯模型的估计参数
Table 1 Parameter estimated of GM

m_n	σ_n	$p(\omega_n)$	m_c	σ_c	$p(\omega_c)$
112 3513	32 3557	0.0578	234 2472	21.4694	0.9422

表 2 广义高斯模型的估计参数
Table 2 Parameter estimated of GGM

m_n	σ_n	β_n	$p(\omega_n)$	m_c	σ_c	β_c	$p(\omega_c)$
111.0929	33 8929	1.4459	0.0559	234.0762	21.8283	1.6230	0.9441

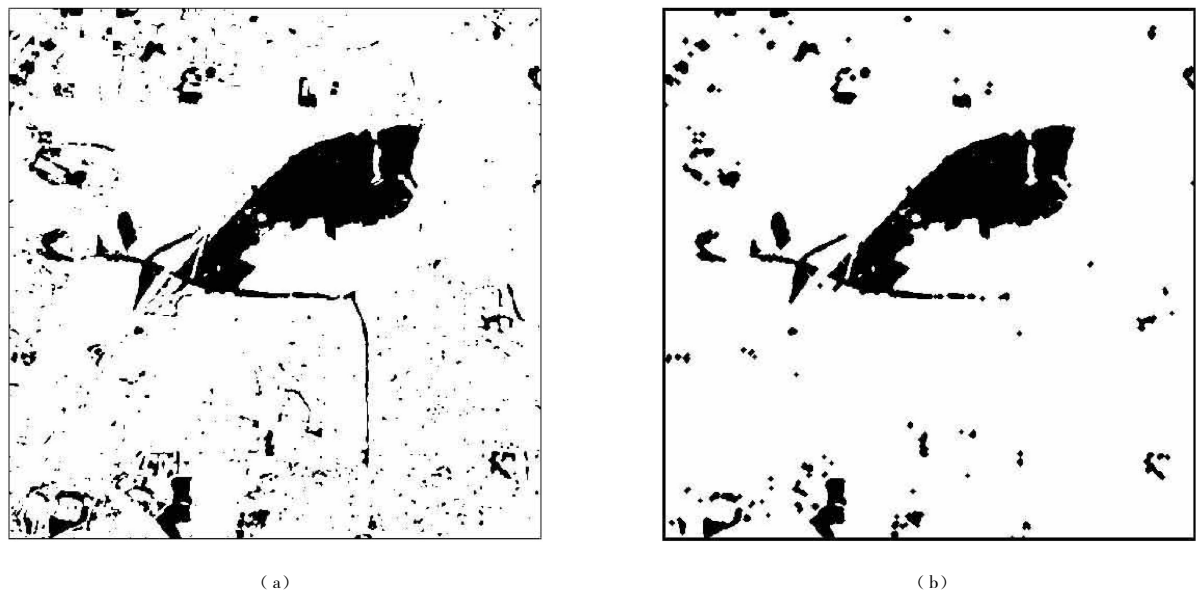


图 3 用或不用形态学处理的分割结果
Fig 3 Segment result of different method

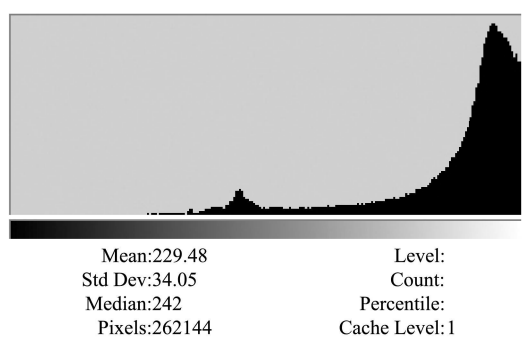


图 4 差异影像直方图
Fig 4 Histogram of difference image

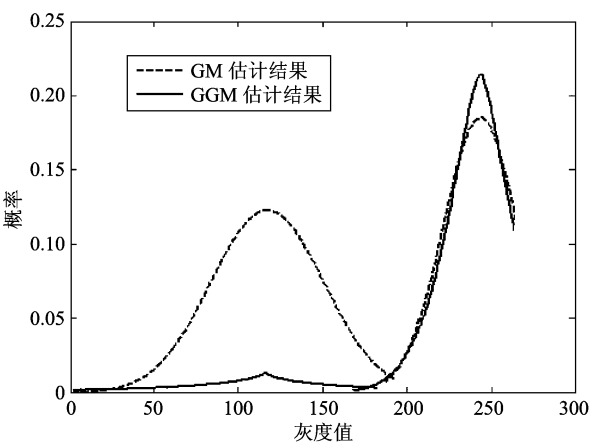


图 5 GM 和 GGM 模拟出的差异影像灰度分布
Fig 5 Distribution of difference image simulated by GM and GGM

变化区域,两种模型都估计得较好,但在灰度值较小的区域即变化的区域,GM 出现较大的偏差,而 GGM 则能较好地反应真实情况。对其他影像的试验也能得到类似的结果,只是 GM 和 GGM 的偏差程度不同,有些图像差别很大,有些差别较小。这是因为光学遥感影像中每一地物类别通常可以假设近似高斯分布^[17],基于融合后的差异影像非剧烈变化区域同样近似高斯分布,但变化区域带有极大的随机性,变化范围的大小、变化程度的强弱等属性不可预测,所以简单的高斯模型已不足以描述其分布特性。所以 GGM 能更准确地描述差异影像的分布,更有利于变化阈值的选取。

4 结 论

本文研究中高分辨率的遥感影像变化检测方法,提出了一种差值融合比值的差异影像构造方法和一种广义高斯分布模型的变化与非变化像元的概率密度估计方法。克服了单一的差值法或比值法的不足,提高了概率密度估计的精度。初步的试验效果表明,本文的方法是有效和可行的,具有较大的实用价值。不过,对本文方法精度的定量分析及与其他变化检测方法的比较还有待下一步更详尽的探索。

参 考 文 献 (References)

[1] Richard J Radke, Srinivas Aravamudan, Omar Al-Kofahi, et al. Image

从图 5 中可以看出:在灰度值较大的区域即没

Change Detection Algorithms: A Systematic Survey [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(3): 294—307.

[2] Ma J W, Tian G L, Wang C Y, et al. Review of the Development of Remote Sensing Change Detection Technology [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(2): 192—196 [马建文, 田国良, 王长耀等. 遥感变化检测技术发展综述 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 192—196]

[3] Liao M S, Zhu P, Gong J Y. Multivariate Change Detection Based on Canonical Transformation [J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(3): 197—201 [廖明生, 朱攀, 龚健雅. 基于典型相关分析的多元变化检测 [J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 197—201]

[4] Li D R. Change Detection from Remote Sensing Images [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(3): 7—12 [李德仁. 利用遥感影像进行变化检测 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2003, 28(3): 7—12]

[5] Lu D, Mausel P, Brondízio E, et al. Change Detection Techniques [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12): 2365—2407.

[6] Coppin P, Lambin E, Jonckheere I, et al. Digital Change Detection Methods in Natural Ecosystem Monitoring: A Review. In Proceedings of the First International Workshop on Multitemp, 2001, World Scientific Publishing, 2001: 3—36.

[7] Sunar F. An Analysis of Changes in a Multi-date Data Set: A Case Study in the Ikitelli Area, Istanbul, Turkey [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(2): 225—235.

[8] Lorenzo Bruzzone. Automatic Analysis of the Difference Image for Unsupervised Change Detection [J]. IEEE Trans Image Process, 2000, 38(3): 1171—1182.

[9] Fan H S, Ma A N, Li J. Case Study on Image Differencing Method for Land Use Change Detection Using Thematic Data in Renhe District of Panzhihua [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(1): 75—80 [范海生, 马蔼乃, 李京. 采用图像差值法提取土地利用变化信息方法——以攀枝花仁和区为例 [J]. 遥感学报, 2001, 5(1): 75—80]

[10] Zhang J X. Study on Change Detection Framework of Land Use and Land Cover by Remote Sensing [J]. China Land Science, 2003, 17(4): 31—36 [张继贤. 论土地利用与覆盖变化遥感信息提取技术框架 [J]. 中国土地科学, 2003, 17(4): 31—36]

[11] Chen Z P, Deng P, Chong J S, et al. Application of Textural Features to Change Detection in SAR Image [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(3): 162—166 [陈志鹏, 邓鹏, 种劲松等. 纹理特征在 SAR 图像变化检测中的应用 [J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(3): 162—166]

[12] Li L Y, Maylor K, Leung H. Integrating Intensity and Texture Differences for Robust Change Detection [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2002, 11(2): 105—112.

[13] Liu S C, Fu C W, Chang S. Statistical Change Detection with Moments Under Time-varying Illumination [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1998, 7(9): 1258—1268.

[14] Feng D J, Li Y S, Deng F. Detecting Change Information Automatically by Method of Wavelet Coefficient Difference [J]. Remote Sense Information, 2004, (2): 13—15 [冯德俊, 李永树, 邓芳. 基于小波系数差值法的变化信息自动发现 [J]. 遥感信息, 2004, (2): 13—15]

[15] Chen S P, Tong Q X, Guo H D. The Study of Remote Sensing Mechanisms [M]. Beijing: Science Press, 1998.

[16] Teerasit Kasetkasem, Pramod Kumar Varshney. An Image Change Detection Algorithm Based on Markov Random Field Models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(8): 1815—1823.

[17] David Landgrebe. Information Extraction Principles and Methods for Multispectral and Hyperspectral Image Data [M]. World Scientific Publishing, New Jersey, USA, 2000.