

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0511-06

基于二进小波变换的 SAR 图像湖岸线提取

范典, 郭华东, 岳焕印, 王长林

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘要: 本文阐述了一种基于二进小波变换的从 SAR 图像中提取湖岸线的方法。该方法首先利用边缘和噪声的奇异性在二进小波变换中随尺度变化具有不同的传播规律来检测边缘点, 然后利用基于梯度矢量流的主动轮廓模型进行边缘点的连接。实验结果证明, 这种方法可以有效的消除 SAR 图像中存在的斑点噪声对边缘提取的影响, 准确的提取湖岸线。

关键词: SAR 图像; 斑点噪声; 二进小波变换; 边缘检测; 主动轮廓模型; 湖岸线

中图分类号: TP751.1/TP722.6 **文献标识码:** A

1 引言

合成孔径雷达(SAR)自从出现以来, 已经广泛的应用于对地观测的许多领域。由于雷达成像的特殊性, 每一个地表单元内部都包含了很多随机分布的散射点, 这一单元的总的回波是各散射点回波的相干叠加。这样, 具有相同后向散射截面的两个相邻观测单元, 如果在细微特征上有差异, 他们的回波信号就不会相同, 因此, 本来同质的区域, 像元间会出现亮度的变化。这就是雷达图像所固有的斑点噪声。迄今为止, 仍没有一种滤波算法能在去除这种噪声的同时很好的保持边缘。由于大量斑点噪声的存在使得在雷达图像中准确的提取边缘变得非常困难。因此, 研究一种能在噪声污染比较大的 SAR 图像中准确提取边缘的方法对 SAR 图像中目标识别是非常有意义的。

由于 SAR 具有全天时、全天候对地观测成像的能力, 在 1998 年中国长江流域发生洪水期间, 合成孔径雷达成为我们获取洪水信息的重要手段之一。本研究的目的是利用合成孔径雷达图像提取湖岸线来获得洪水淹没地区的信息。国际上的相类似的研究主要集中在海岸线的提取方面, 使用了对比度

比率滤波器(contrast ratio filter)作为边缘探测器, 在连线时使用了基于主动轮廓模型的方法^[1]。

本文着重阐述了基于二进小波变换的从合成孔径雷达图像中提取湖岸线边缘点的算法原理, 以及梯度矢量流主动轮廓模型进行边缘点连接的原理。应用上述算法对 Radarsat-1 卫星的 ScanSAR 传感器在 1998-08-24 所获得的洞庭湖地区 SAR 图像进行处理, 最终提取了洞庭湖的湖岸线。

2 图像的二进小波变换

如果函数对 $\{\psi^1(x, y), \psi^2(x, y)\} \subset L^2(R^2)$ 在 $0 < A \leq B < +\infty$ (A, B 均为常数) 使得:

$$A \leq [|\hat{\psi}^1(2^j\omega_x, 2^j\omega_y)|^2 + |\hat{\psi}^2(2^j\omega_x, 2^j\omega_y)|^2] \leq B$$

成立, 则 $\{\psi^1(x, y), \psi^2(x, y)\}$ 称为二维二进小波函数。其中, $\hat{\psi}^1(\omega_x, \omega_y)$ 和 $\hat{\psi}^2(\omega_x, \omega_y)$ 分别为函数 $\psi^1(x, y), \psi^2(x, y)$ 的傅里叶变换。

图像函数 $f(x, y) \in L^2(R^2)$ 的二进小波变换定义为:

$$Wf(x, y) = \{W_{2^j}^1 f(x, y), W_{2^j}^2 f(x, y)\}_{j \in Z} \quad (1)$$

其中: $W_{2^j}^1 f(x, y) = f(x, y) * \psi_{2^j}^1(x, y)$

$$W_{2^j}^2 f(x, y) = f(x, y) * \psi_{2^j}^2(x, y)$$

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(项目号 49989001)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-312)以及 863 计划项目(2001AA132040)共同资助。

作者简介: 范典(1975—), 男, 1999 年于中国科技大学电子工程和信息科学系获学士学位, 现为中国科学院遥感所硕士研究生。主要研究领域为雷达图像处理、目标自动识别。

3 基于二进小波的边缘点检测

3.1 图像的二进小波变换与边缘点检测

二进小波只对尺度进行离散化,而在时域上的平移量保持连续变化,所以二进小波具有连续小波的平移不变性。同时二进小波继承和发展了 Canny 的多尺度边缘检测的思想,是一种边缘检测有效的数学工具。

多尺度边缘检测的基本思想就是检测图像函数 $f(x, y)$ 被平滑函数 $\theta_s(x, y)$ 平滑后的边缘, s 为伸缩算子。

平滑函数定义如下:如果 $\theta(x, y) \in L^2(R^2)$ 满足条件:

$$(1) \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \theta(x, y) dx dy = 1;$$

(2) $\theta(x, y)$ 随 $|x| + |y|$ 增大而速降为零;则 $\theta(x, y)$ 为平滑函数。

定义 $\theta(x, y)$ 在 x, y 两个方向上的偏导数分别为:

$$\begin{aligned} \psi^1(x, y) &= \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \\ \psi^2(x, y) &= \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \end{aligned}$$

加入伸缩算子 s 后,记为:

$$\begin{aligned} \theta_s(x, y) &= \frac{1}{s^2} \theta\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \\ \psi_s^1(x, y) &= \frac{1}{s^2} \psi^1\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \\ \psi_s^2(x, y) &= \frac{1}{s^2} \psi^2\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \end{aligned}$$

当 $\psi^1(x, y)$ 和 $\psi^2(x, y)$ 是可允许小波时,

$$W^1 f_s(x, y) = f(x, y) * \psi_s^1(x, y)$$

$$W^2 f_s(x, y) = f(x, y) * \psi_s^2(x, y)$$

就是我们所要用到的小波变换,容易证明:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} W^1 f_s(x, y) \\ W^2 f_s(x, y) \end{pmatrix} &= s \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta_s)(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta_s)(x, y) \end{pmatrix} \\ &= s \vec{\nabla} (f * \theta_s)(x, y) \end{aligned}$$

由此可见 $W^1 f_s(x, y)$ 和 $W^2 f_s(x, y)$ 是 $f_s(x, y)$ 被 $\theta_s(x, y)$ 平滑后的梯度矢量的水平和垂直分量。

我们可以把边缘看成在图像中具有相似奇异

性、位置相邻点的集合。边缘检测实质上也就是奇异性检测。在数学上, Lipschitz 指数用来描述函数的局部奇异性。在二维的情况下, Lipschitz 指数有如下定义:

令 $0 \leq \alpha \leq 1$, 当且仅当存在 $h_0 > 0, k_0 > 0$ 和 $A > 0$, 对于任何 $h < h_0, k < k_0$ 满足条件:

$$|f(x_0 + h, y_0 + k) - f(x_0, y_0)| \leq A(h^2 + k^2)^{\alpha/2}$$

函数 $f(x, y)$ 在 (x_0, y_0) 附近就有 Lipschitz 指数 α_c 。一般来讲,如果函数 $f(x, y)$ 在 (x_0, y_0) 不连续,但有界,则 $\alpha = 0$; 如果 $\alpha < 0$, 则意味着有比不连续更大的奇异性。

将图像函数 $f(x, y)$ 进行二进小波变换后,局部的 Lipschitz 指数一致性可以由梯度矢量

$$\begin{pmatrix} W_s^1 f(x, y) \\ W_s^2 f(x, y) \end{pmatrix}$$

随尺度的衰减来体现。当 $s = 2^j$ 时, 梯度矢量的模长和辐角分别为:

$$\text{Mod}(j, x, y) = \sqrt{|W_j^1 f(x, y)|^2 + |W_j^2 f(x, y)|^2}$$

$$\text{Arg}(j, x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{W_j^2 f(x, y)}{W_j^1 f(x, y)} \right)$$

如果 $f(x, y)$ 中没有快速震荡的奇异值, 当且仅当 $\text{Mod}(j, x, y) \leq k(2^j)^\alpha$ 时, $f(x, y)$ 在 (x_0, y_0) 点有一致 Lipschitz 指数^[2]。对上式两边同取对数, 得到:

$$\log_2(\text{Mod}(j, x, y)) \leq \log_2(k) + \alpha * j \quad (2)$$

3.2 边缘点和噪声点的奇异性在小波变换中的特性

正如前面所述, SAR 图像的主要问题就是大量存在斑点噪声。由于斑点噪声一般仅影响单个像元, 因此我们可以将斑点噪声看成乘以随机权重的 $\delta(x, y)$ 函数。 $\delta(x, y)$ 函数的 Lipschitz 指数 $\alpha_\delta < 0$ 。由式(2)可知: 属于噪声的局部模极大值点的模值将会随着尺度 j 增大而减小; 阶跃状边缘处的函数 $f(x, y)$ 不连续, 但有界, 则 $\alpha_{\text{edge}} = 0$, 所以属于边缘的局部模极大值点的模值将不会随着尺度 j 变化。我们将每一层小波变换的模值都进行阈值处理, 如果小于阈值则赋为 0。

由此可见, 如果一个点在每一层小波变换上的模值都是局部极大值, 则该点是真正的边缘点; 如果经过几次变换以后一个模值本来为局部极大值的点, 模值变为 0, 则认为是噪声, 不是边缘。这就是空间一致性条件。利用这一约束条件, 我们可以有效的将斑点噪声和阶跃型边缘区分开, 提取出真正的边缘。

3.3 二进小波分解塔型算法

由于直接用每一个尺度上的小波函数与原图像进行卷积计算量太大,提出了塔型快速算法^[3]。在这种算法中,引入了尺度函数 $\phi(x, y) = \varphi(x) \times \varphi(y)$ 。两个小波函数分别定义为:

$$\psi^1(x, y) = \varphi(x)\psi(y)$$

$$\psi^2(x, y) = \psi(x)\varphi(y)$$

文献[3]中证明:

$$\hat{\varphi}(2\omega) = H(\omega)\hat{\varphi}(\omega)$$

$$\hat{\psi}(2\omega) = G(\omega)\hat{\varphi}(\omega)$$

其中,我们将 $\varphi(x), \psi(x)$ 的傅里叶变换记为 $\hat{\varphi}(\omega)$ 和 $\hat{\psi}(\omega)$ 。由上式可以推出:

$$\hat{\varphi}(\omega) = \prod_{p=1}^{+\infty} H(2^{-p}\omega) \quad (3)$$

而 $\hat{\psi}(\omega)$ 也可以由 $H(\omega)$ 和 $G(\omega)$ 求得。由式(3)可见,整个小波变换可以用一个由 $H(\omega)$ 和 $G(\omega)$ 组成的滤波器组实现(如图1)。

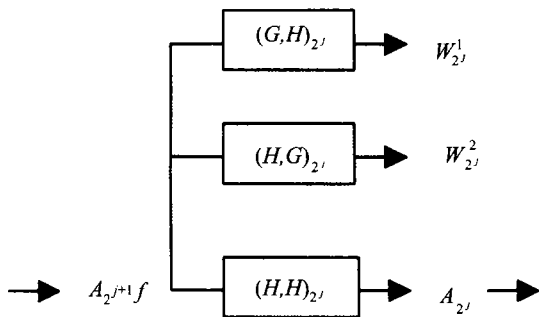


图1 分解滤波器组示意图
Fig.1 Decomposition filter bank

4 基于梯度矢量流主动轮廓模型的连线算法

文献[2]中提出的连线算法,很难应用于有较大噪声干扰的图像,尤其是较为复杂的边缘,比如湖岸线,使用这种方法不能将边缘很好的连接起来。

主动轮廓模型,又称 snake 模型^[4],用来连接边缘点取得了良好的效果。由于本文的目的是提取湖岸线,而湖岸线一般较为曲折,传统的主动轮廓模型在凹度较大的边缘处不能很好的收敛,所以我们使用了基于梯度矢量流的主动轮廓模型^[5]来更好的拟合湖岸线。

主动轮廓模型是在图像力和外部约束力作用下移动的变形轮廓线。用 $\vec{X}(s) = [x(s), y(s)]$ 表示

轮廓 $s \in [0, 1]$ 。当 $\vec{X}(s)$ 变化到使能量函数 E 为:

$$\int_0^1 0.5(\alpha |\vec{X}'(s)|^2 + \beta |\vec{X}''(s)|^2) + E_{\text{ext}}(\vec{X}(s)) ds$$

达到最小值时, $\vec{X}(s)$ 就是检测出的边缘。 α, β 是控制模型张力和弹力的权重。要做到能量最小,模型必须满足:

$$\alpha \vec{X}''(s) - \beta \vec{X}'''(s) - \nabla E_{\text{ext}} = 0 \quad (4)$$

这时也可以看成内力与外力达到平衡:

$$\vec{F}_{\text{int}} + \vec{F}_{\text{ext}} = 0$$

其中,内力是 $\vec{F}_{\text{int}} = \alpha \vec{X}''(s) - \beta \vec{X}'''(s)$,外力是 $\vec{F}_{\text{ext}} = \nabla E_{\text{ext}}$ 。

基于梯度矢量流的主动轮廓模型就是将外力定义为矢量场(GVF):

$$\vec{V}(x, y) = (u(x, y), v(x, y))$$

$\vec{V}(x, y)$ 能使能量函数 ϵ :

$$\iint \mu(u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2) + |\nabla f|^2 |\vec{V} - \nabla f|^2 dx dy$$

达到最小值。将 $\vec{V}(x, y)$ 看成一个与 t 有关的函数, $\vec{V}(x, y, t)$ 可以由下式求得:

$$u_t(x, y, t) = \mu \nabla^2 u(x, y, t) - b(x, y)u(x, y, t) + c^1(x, y)$$

$$v_t(x, y, t) = \mu \nabla^2 v(x, y, t) - b(x, y)v(x, y, t) + c^2(x, y)$$

其中:

$$b(x, y) = f_x(x, y)^2 + f_y(x, y)^2$$

$$c^1(x, y) = b(x, y)f_x(x, y)$$

$$c^2(x, y) = b(x, y)f_y(x, y)$$

为了用迭代计算梯度矢量流,用 $\Delta x, \Delta y$ 代表像素间的增减,用 Δt 代表每一次迭代的时间轴增减。可以用下面公式计算梯度矢量流:

$$u_{i,j}^{n+1} = (1 - b_{i,j}\Delta t)u_{i,j}^n + r(u_{i+1,j}^n + u_{i,j+1}^n + u_{i-1,j}^n + u_{i,j-1}^n - 4u_{i,j}^n) + c_{i,j}^1\Delta t$$

$$v_{i,j}^{n+1} = (1 - b_{i,j}\Delta t)v_{i,j}^n + r(v_{i+1,j}^n + v_{i,j+1}^n + v_{i-1,j}^n + v_{i,j-1}^n - 4v_{i,j}^n) + c_{i,j}^2\Delta t$$

为了使这个迭代收敛,必须满足条件:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x \Delta y}{4\mu}$$

这样计算出梯度矢量流之后,就可以求出边界 $\vec{X}(s)$ 。

5 实验步骤与结果分析

在本次实验采用了 Radarsat-1 卫星的 scanSAR

传感器在 1998-08-24 所获得的洞庭湖地区图像,空间分辨率为 50m。其强度图如图 2。由于水体对雷达波的反射几乎为零。在图像上表现为灰度值很小的区域,而陆地对雷达波的反射回波功率较大,在图像上灰度值也较大,因此湖岸线在强度图像上反映为阶跃状边缘。所以 SAR 图像中湖岸线的提取可以等价于图像中阶跃边缘的提取。使用上述检测阶跃型边缘的方法就可以探测出湖岸线。

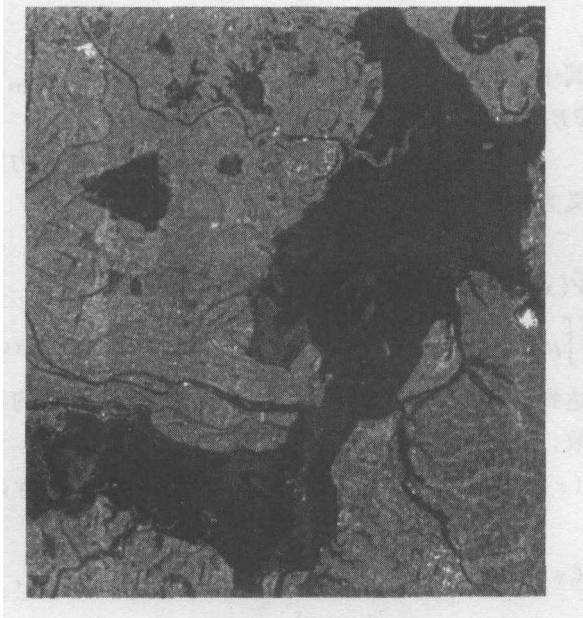


图 2 洞庭湖地区 Radarsat ScanSAR 图像
Fig.2 Radarsat ScanSAR Image of Dongting Lake

将原始图像记为: $D = \{d(n, m)\}$ 。整个实验步骤为:

(1)对原始图像做 3 个尺度的小波变换。滤波

器 $h(n)$, $L(n)$ 和 $g(n)$ 的取值分别为: $h(n) = [0.0625, 0.25, 0.375, 0.25, 0.0625]$

$L(n) = [0.00727, 0.03118, 0.06623, 0.079119, 0.06623, 0.03118, 0.00727]$

$g(n) = [-0.01643, -0.10872, -0.59261, 0, 0.59261, 0.10872, 0.01643]$

其中, $h(n)$ 和 $L(n)$ 是低通滤波器, $g(n)$ 是用来检测阶跃型边缘的高通滤波器。

(2)利用小波变换的结果,计算每一层变换的模值和辐角。使用模值图和辐角图来检测局部极大值。具体算法描述如下:

①计算 3 个尺度上的模值图像,结果如图 3。

②如果 $|\text{Mod}(j, x, y)| < \epsilon$, 则令 $\text{Mod}(j, x, y) = 0$

③计算辐角时,将辐角分为 4 个方向:水平方向、45°方向、竖直方向和 135°方向。结果如图 4。

④沿辐角方向检测局部极大值。结果如图 5。由图 5 中可见,第 1 层小波变换的边缘点较多,之后,随着层数的增加,噪声点的模值很快小于所设阈值,被置为 0,不再出现在局部极大值点图像中。因此随着尺度的增加,边缘点越来越少。

(3)利用空间一致性条件,选取这 3 层变换的公共边缘点,由于噪声点在第 2、3 层上被抑制,所以可以得到真正的阶跃型边缘点,见图 6。通过这样的处理,SAR 图像中的斑点噪声对边缘提取的影响被消除。所得到的边缘点基本上属于真正的阶跃边缘。

(4)利用基于梯度矢量流主动轮廓模型对已经检测出的边缘点进行连线,迭代 100 次后,得到湖岸线。将湖岸线与原图合成后得到图 7。由图 7 可见,即使是凹度较大的湖岸线也可以检测出来。

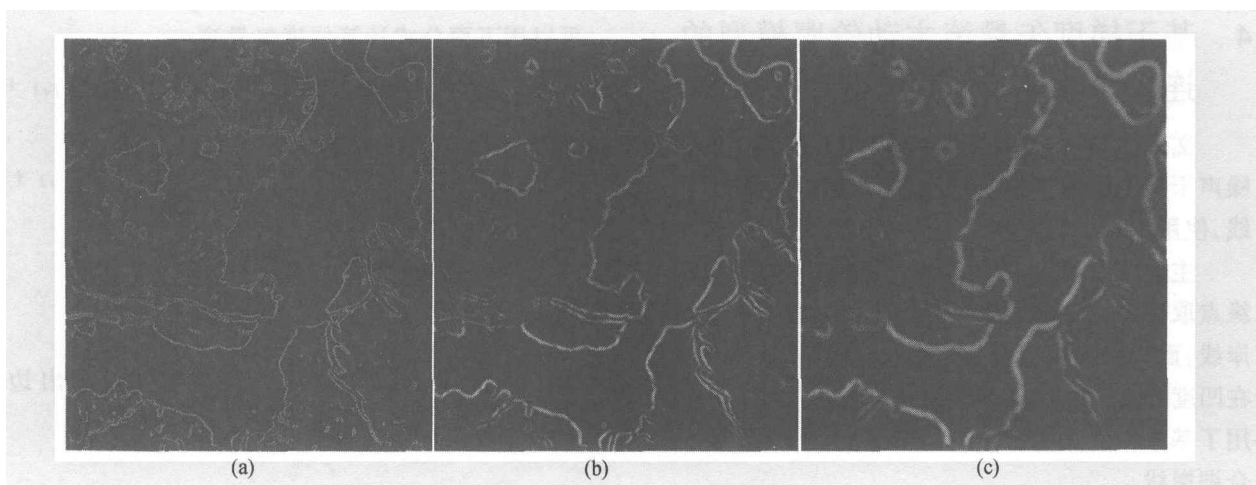


图 3 模值图
(a)第 1 层;(b)第 2 层;(c)第 3 层
Fig.3 Module Image $J = 1, 2, 3$

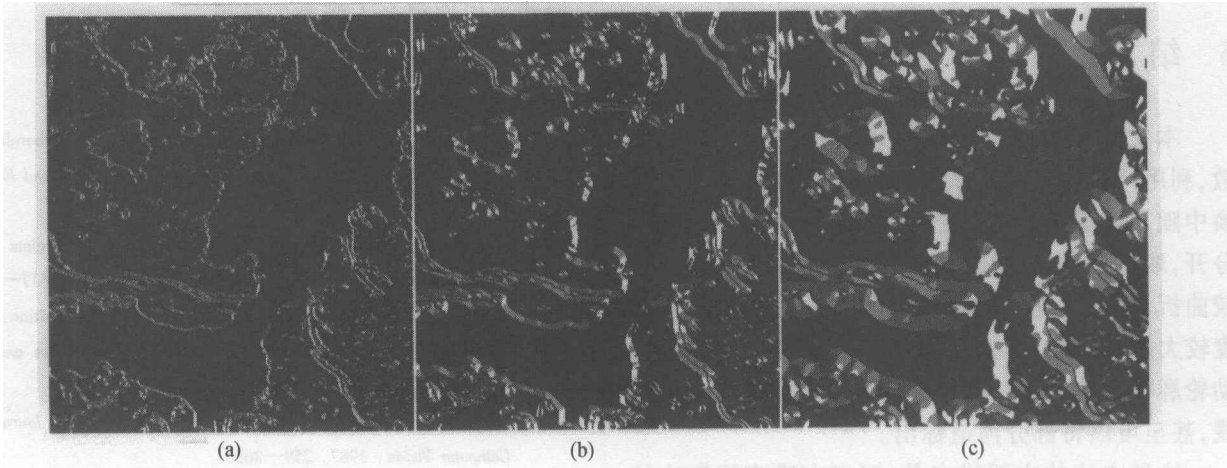


图 4 辐角图
(a)第 1 层;(b)第 2 层;(c)第 3 层
Fig.4 Angle Image $J = 1, 2, 3$

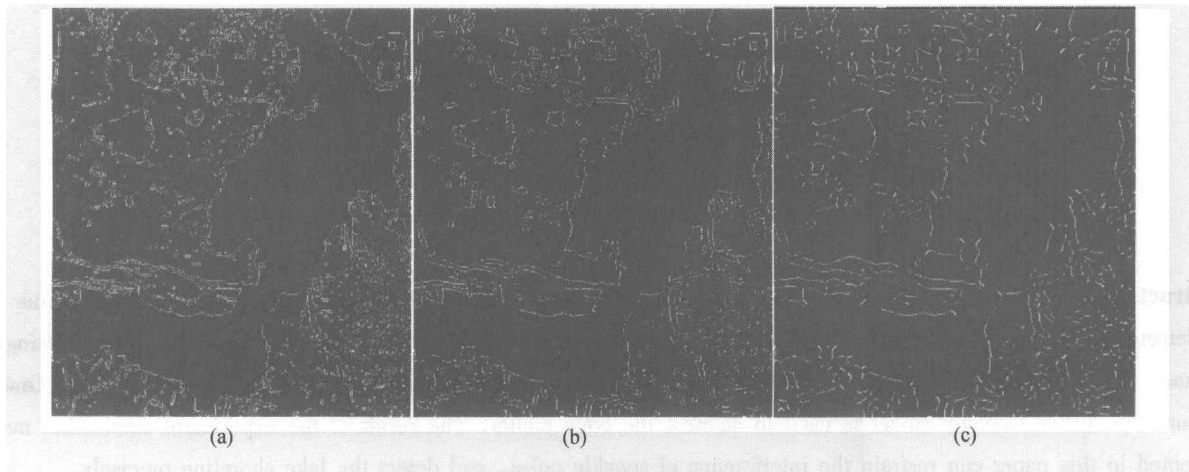


图 5 局部极大值图
(a)第 1 层;(b)第 2 层;(c)第 3 层
Fig.5 Edge Point Image $J = 1, 2, 3$

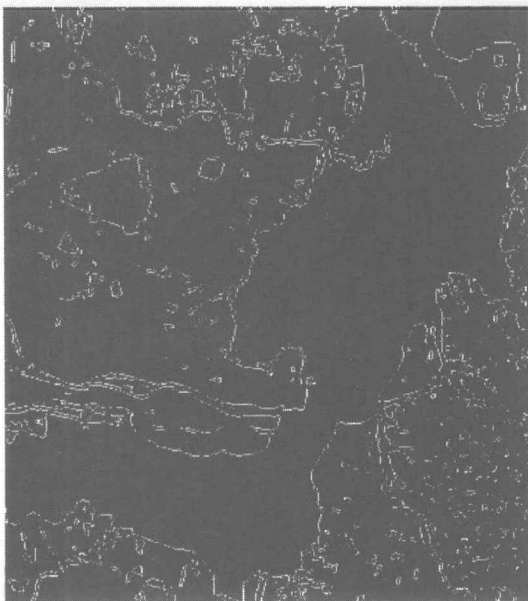


图 6 利用空间一致性条件得到的边缘点图像
Fig.6 True Edge Point Image

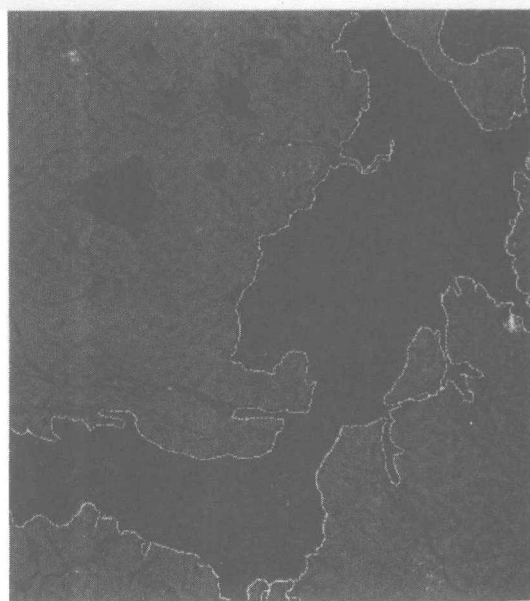


图 7 结果合成图
Fig.7 Result Image

6 结 论

本文将斑点噪声看成乘以随机权重的冲激函数,利用冲激函数和阶跃型边缘的奇异性在小波变换中随尺度变化的不同变化规律将噪声点和边缘点分开,取得了良好的结果。在连线时,由于湖岸线比较曲折,基于传统主动轮廓模型的方法很难拟合凹度较大的湖岸线,本文使用了基于梯度矢量流的主动轮廓模型的方法。这种方法可以更好的拟合湖岸线,甚至可以将部分河道标出。

这种方法的主要优点是:可以在噪声污染比较严重的图像中准确的提取出边缘,并且能拟合比较曲折的边缘线。实验证明,本文的方法用于提取湖

岸线可以取得令人满意的结果。

参 考 文 献 (References)

- [1] Mason D C. Accurate and Efficient Determination of the Shoreline in ERS-1 SAR Image[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34:1243—1253.
- [2] Mallat S. Singularity Detection and Processing with Wavelets [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(2):617—643.
- [3] Mallat S. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 1989, 11(7):674—693.
- [4] Kass M. Snake: Active Contour Models [J]. *Internal Journal of Computer Vision*, 1987, 259—268.
- [5] Xu Chenyang. Snake, Shapes, and Gradient Vector Flow[J] *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998 7(3): 359—369.

Detection of Lake Shoreline in SAR Image Based on Wavelet

FAN Dian, GUO Hua-dong, YUE Huan-yin, WANG Chang-lin

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Application, CAS. Beijing 100101, China)

Abstract: In the field of map production, flood surveillance, and change study of lakeshore, the lake shoreline must be detected. A new method is explored in this paper, which can detect the lake shoreline in SAR images. Using this method, The edge points are detected by Mallat's Wavelet-based edge detection method firstly, and then the Gradient Vector Flow Active Contour Model is used to connect the edge points. The result of the experiment shows that method presented in this paper can restrain the interference of speckle noise, and detect the lake shoreline precisely.

Key words: SAR image; speckle noise; wavelet; edge detection; active contour model; lake shoreline