

一种新的 SAR 图像的边沿检测方法研究¹

赵志钦 韩春林 王建国 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

摘 要 该文针对合成孔径雷达 (SAR) 图像的特点, 利用小波变换的高频分量能反映边沿细节的特性, 提出了一种结合小波变换、模糊中值滤波、自适应门限判决和微分梯度算子的边沿检测的新方法, 在采用模糊中值滤波时, 提出了一种自适应选择模糊中值滤波系数的方法。实验研究的结果表明该方法具有良好的边沿检测效果和稳定性。

关键词 合成孔径雷达, 小波变换, 模糊中值滤波, 边沿检测

中图分类号 TN951, TN911.73

1 引 言

合成孔径雷达 (SAR) 具有高分辨力、全天候、强透射等优点, 现已被广泛地应用于军事和民用领域。由于 SAR 图像与通常的光学图像在成像机理上是完全不同的, 因此, 对 SAR 图像中目标的检测和识别方法也有很大差别, 目前 SAR 图像的应用研究已成为 SAR 领域的研究热点。

SAR 的边沿检测是 SAR 应用领域的一个重要课题, 由于合成孔径雷达是一种相干成像系统, 因此 SAR 图像要受其固有的相干斑 (Speckle) 噪声的严重影响, 这种噪声的存在, 降低了 SAR 图像的信噪比, 使 SAR 的边沿检测变得更为困难^[1]。随着 SAR 应用的推广, 国际上正在广泛开展 SAR 目标的自动识别研究, 如自动进行区域划分、识别桥梁、河流、道路、海洋中的内波等, 边沿检测是开展这些方面研究的基础。通常对 SAR 图像的边沿检测采用单一的方法基本上是不可能的, 本文结合小波变换、模糊中值滤波、门限判决和通常在光学图像边沿检测中采用的 Sobel 微分算子, 提出了一种组合式的边沿检测新方法, 并且在采用模糊中值滤波时, 提出了自适应选择模糊中值滤波系数的方法, 该方法充分利用了 SAR 图像的地形信息。我们利用真实的 SAR 图像进行了实验研究, 结果表明该方法具有良好的边沿检测性能, 从直观上可以看出检测的边沿与实际边沿吻合得相当好。

2 小波变换的应用

小波变换 (WT) 具有多尺度分析等优点, 特别在给出小波的 Mallat 塔式算法后, WT 在信号处理领域占据了很重要的位置^[2-5]。

如果信号 $f \in L^2(R)$, 则信号 f 的连续小波变换 $W_f(a, b)$ 定义为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

其中 ψ 是基本小波。在实际工程中用得最为广泛的是离散的二进制小波。

SAR 图像 $I(m, n)$ 是可测的且具有有限能量, $I \in L^2(R)$, I 可看作二维的离散信号 $I(m, n)$, 在适当的选择一组小波基下, 可以对 $I(m, n)$ 进行多尺度的二维离散小波分解, 由于不

¹ 1999-10-15 收到, 2000-03-06 定稿

可分离的二维小波变换还不够成熟, 目前图像处理用得最多的是可分离的二维离散小波变换。设二维小波的镜像滤波器为 $h(m, n)$ 和 $g(m, n)$, m 表示行, n 表示列, 二维可分离时, 有

$$h(m, n) = h(m)h(n), \quad (2a)$$

$$g(m, n) = g(m)g(n), \quad (2b)$$

令

$$g^1(m, n) = h(m)g(n) \quad (3a)$$

$$g^2(m, n) = g(m)h(n) \quad (3b)$$

$$g^3(m, n) = g(m)g(n) \quad (3c)$$

$$h_j(m, n) = 2^j h(2^j m, 2^j n) \quad (3d)$$

$$g_j^k(m, n) = 2^j g^k(2^j m, 2^j n), \quad k = 1, 2, 3 \quad (3e)$$

所以, 对信号空间的分解可表示为

$$V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1}^1 \oplus W_{j+1}^2 \oplus W_{j+1}^3 \quad (4)$$

其中

$$V_j[I(m, n)] = \langle I(m, n), h_j(m, n) \rangle \quad (5a)$$

$$W_j^1[I(m, n)] = \langle I(m, n), g_j^1(m, n) \rangle \quad (5b)$$

$$W_j^2[I(m, n)] = \langle I(m, n), g_j^2(m, n) \rangle \quad (5c)$$

$$W_j^3[I(m, n)] = \langle I(m, n), g_j^3(m, n) \rangle \quad (5d)$$

根据以上的式子, 可以逐级对信号进行多层分解, $W_j^1[I(m, n)]$, $W_j^2[I(m, n)]$ 和 $W_j^3[I(m, n)]$ 分别对应二维信号 $I(m, n)$ 的离散小波变换, 这 3 个分量分别称为 HG, GH 和 GG 分量; $V_j[I(m, n)]$ 则称为 HH 分量。HH 代表 $I(m, n)$ 的低频分量的小波分解系数; HG 代表 $I(m, n)$ 垂直方向的高频分量的小波分解系数; GH 代表 $I(m, n)$ 水平方向的高频分量的小波分解系数。GG 代表 $I(m, n)$ 对角线的高频分量的小波分解系数, GG 包含了图像更多的细节, 而 SAR 图像中的边沿含有丰富的高频成分, 因此, 本文所提的边沿检测的第一步就是利用 SAR 图像小波变换后的 GG 分量, 得到主要的边沿信息。但由于 SAR 存在严重的相干斑, 分解后的图像存在大量的奇异点。奇异点的存在将影响边沿的检测, 因此, 对 GG 分量, 下面首先进行滤波处理, 希望不仅能滤除大部分的奇异点, 而且不要过多地损失边沿。为此, 提出了一种自适应的模糊中值滤波方法。

3 自适应的模糊中值滤波

中值滤波是一种非线性滤波, 它不仅能滤除杂波, 而且有良好的边沿保持能力, 所以在滤波时我们选择了中值滤波, 并且考虑 SAR 图像边沿信号的随机性较大, 提出了一种自适应选择参数的模糊中值滤波方法。

假设输入信号矢量 $x(i)$ 为

$$x(i) = [x(i-N), \dots, x(i), \dots, x(i+N)] \quad (6)$$

N 的大小与处理所取窗口的大小有关。假设 $x(i)$ 有 M 个值, $0 \leq x(i) \leq M-1$ 。根据门限, $x(i)$ 可以分解为 $x^{(1)}(i), \dots, x^{(M-1)}(i)$ 分解准则为

$$x^{(m)}(i) = \begin{cases} 1, & x(i) \geq m \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

$R^{(m)}(i)$ 定义为

$$R^{(m)}(i) = \frac{\sum_{j=-N}^N W_j \cdot x^{(m)}(i+j)}{\sum_{j=-N}^N W_j} \quad (8)$$

$x^{(m)}(i)$ 的定义由 (7) 式给出, W_j 为加权因子。

对应的 Boole 函数为

$$f(R^{(m)}(i)) = \begin{cases} 1, & R^{(m)}(i) \geq 0.5 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

加权中值滤波的输出为

$$y(i) = \sum_{m=0}^{M-1} f(R^{(m)}(i)) \quad (10)$$

(9) 式给出的 Boole 函数只有两个值 (0 和 1), 如果要得到更好的效果, 我们采用模糊 Boole 函数, $f(R^{(m)}(i))$ 是连续变化的值, (11) 式是采用的模糊 Boole 函数。

$$f_{\text{FWM}}(R^{(m)}(i)) = \begin{cases} 1/[1 + \exp\{\alpha_1(R^{(m)}(i) - \beta)\}], & R^{(m)}(i) > \beta \\ 1/[1 + \exp\{\alpha_2(R^{(m)}(i) - \beta)\}], & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

当 $\alpha_1 = \alpha_2 = -\infty$, $\beta = 0.5$ 时, (11) 式与 (9) 式是统一的。

图 1 给出了一些特定的 α_1 , α_2 和 β 时的 Boole 函数曲线, α_1 和 α_2 的值越小, 曲线越平缓, 当 $\alpha_1 = \alpha_2 = 100$ 时, (11) 式给出的函数就基本上近似为 (9) 所给出的。有研究表明^[6], 在噪声的方差较大时, 应采用较平缓的曲线, 所以, 本文在设置 α_1 和 α_2 时, 采用 (12) 式:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 100 \cdot [1 - \sigma[x(i)]/\sigma_{\max}] \quad (12)$$

$\sigma[x(i)]$ 表示窗口内 $x(i)$ 的方差, σ_{\max} 是整个图像中所有 $\sigma[x(i)]$ 的最大值, 这样做的目的是将 α_1 和 α_2 归一化到 0~100, 并可以使设置的 Boole 函数自适应地与地形特征相匹配。

如果加权因子 W_j 为定值, 则为通常的中值滤波, 否则为加权中值滤波。本文采用的加权矩阵为

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

4 门限判决和边沿检测

将中值滤波后的信号 $y(i)$ 做门限判决, 进行二值化处理, 门限定义为

$$y_0(i) = \begin{cases} 1, & y(i) \geq T \\ 0, & y(i) < T \end{cases} \quad (13)$$

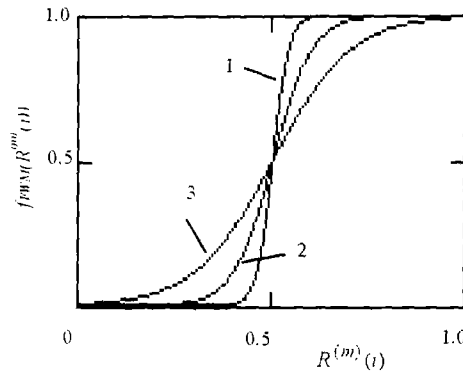


图1 模糊 Boolean 函数与系数的关系
 1: $\alpha_1 = \alpha_2 = 50.0$; 2: $\alpha_1 = \alpha_2 = 20.0$;
 3: $\alpha_1 = \alpha_2 = 10.0$; $\beta = 0.5$ 。

T 的选择和所检测的边沿类型有关, 因此, T 值应由统计分析得到。在下面的实验研究中, 经统计, 为检测出陆地和海洋边沿, T 选择为 $E[y(i)]$ 。 $E[y(i)]$ 表示一个统计区域中的均值。如果检测的边沿不是陆地和海洋边沿, T 值应当改变, T 值的选择应由统计得到。不同的 SAR 系统, 其信噪比不一样, 因而 T 值肯定不相同, 不过, 一旦 SAR 系统确定, 就可由局部的图象, 统计得到某一类目标的 T 值。

图像经二值化后, 通过微分梯度算子可获得相应的边沿, 我们选择 Sobel 梯度算子做边沿检测, 它由水平模板和垂直模板组成, 如图 2 所示。经 Sobel 算子后的输出信号幅度为

$$I_{\text{输出}} = [G_h^2 + G_v^2]^{1/2} \tag{14}$$

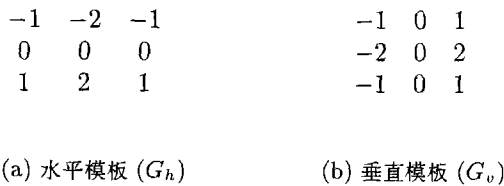


图 2

5 边沿检测的总框图

经上面的分析, 我们提出了一种组合的边沿检测的新方法, 如图 3 所示。小波变换采用的小波基为 Haar 小波, 中值滤波的窗的大小为 5×5 。

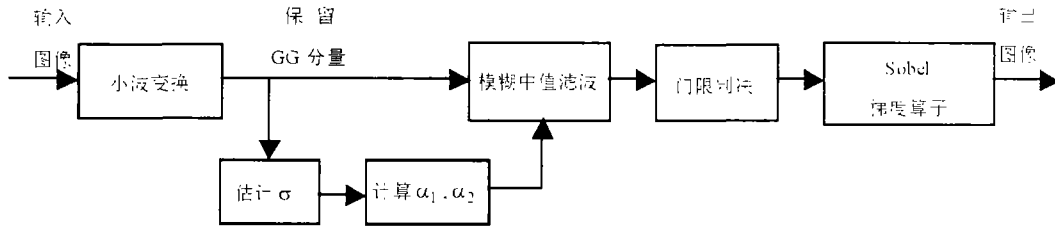
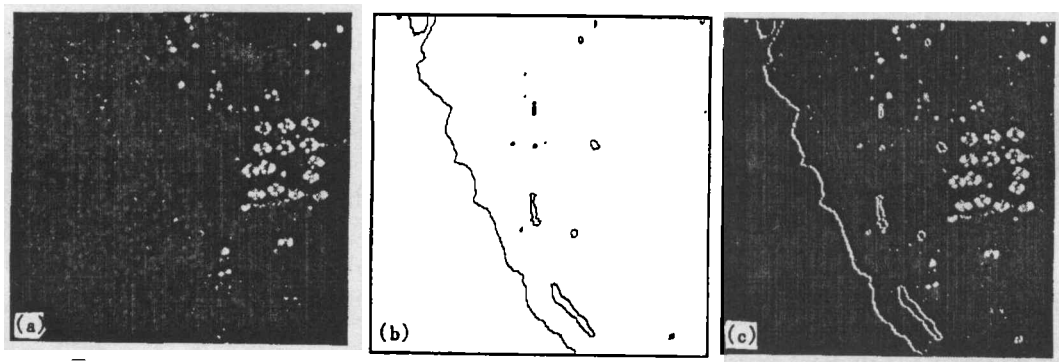


图 3 边沿检测的总的框图

6 实验研究

为了验证方法的可行性, 我们利用真实的数据进行了研究, 目标是检测出水域和陆地的边沿。

如图 4(a) 是 SAR 原始的图像, 图 4(b) 是利用本文方法得到的边沿, (图中的黑线是检测出的边沿), 可以看出, 利用该新方法检测后的边沿的奇异点很少, 图 4(c) 是将检测后的边沿与原图像叠加在一起的结果, (图中的亮白线是检测出的边沿), 可以看出, 检测出的边沿与原图像的边沿符合得很好。



(a) 原始的 SAR 图像;

(b) 检测出的边沿;

(c) 叠加在一起显示的结果

图 4 实验结果

7 结束语

小波变换后的高频分量反映了图像的细节, 中值滤波具有较好的滤波效果及边沿保持能力, 本文针对 SAR 图像的特点, 提出了一种结合小波变换, 模糊中值滤波, 门限判决和微分梯度算子的边沿检测新方法, 采用模糊中值滤波时, 提出了自适应选择模糊中值滤波系数的方法。通过真实的 SAR 图像的实验研究表明, 该方法具有良好的边沿检测能力, 很好地区分了水域和陆地边沿, 如果在门限判决时, 改变门限, 同样可以较好地检测出其它类型的边沿, 但由于 SAR 的动态范围很大, 一种方法往往只能适应一种类型的目标, 要完整地检测出不同类型目标, 其检测方法亦不同。

参 考 文 献

- [1] V. V. Zaitsev, Analysis of the speckle suppression algorithms based on the MAP approach. EU-SAR(Conference of European Synthetic Aperture Radar), Berlin, Germany, 1996, 159-162.
- [2] Yang Jinhao, *et al.*, Speckle filtering for SAR images based on orthonormal wavelet transform, EUSAR(Conference of European Synthetic Aperture Radar), Berlin, Germany, 1996, 151-154.
- [3] F. Samuel, *et al.*, Unsupervised multiscale speckle filtering. IEEE Int. Conference on Image Processing, Seattle, U. S. A., 1996, 391-394.
- [4] 李建平, 小波分析与信号处理, 重庆, 重庆出版社, 1997, 第 9 章.
- [5] 秦前清, 杨宗凯, 实用小波分析, 西安, 西安电子科技大学出版社, 1994, 第 2 章.
- [6] T. Akira, A design method of fuzzy weighted median filter, IEEE Int. Conference on Image Processing, Seattle, U. S. A., 1996, 423-426.

A NEW APPROACH TO EDGE DETECTION OF SAR IMAGES

Zhao Zhiqin Han Chunlin Wang Jianguo Huang Shunji

(Dept. of Electron. Eng., Univ. of Elec. Sci. and Tech. of China, Chengdu 610054, China)

Abstract The high frequency part of wavelet transform reflects the detail of edges. And median filter is a kind of nonlinear stack filter, it has good abilities in keeping edge and filtering clutter. Based on the analysis of the characteristics of the images of Synthetic Aperture Radar (SAR), this paper puts forward a combined method for edge's detection of SAR images. This method is composed of wavelet transform, fuzzy median filter, adaptive thresholding and differential gradient operator. In using fuzzy median filter, this paper gives out a new method for adaptive selecting the factors of fuzzy median filter. The experimental results show the effectiveness and stability of this method.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Wavelet transform, Fuzzy median filter, Edge detection

赵志钦: 男, 1969 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达成像技术、目标分类与识别。
韩春林: 男, 1962 年生, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理。
王建国: 男, 1954 年生, 硕士, 副教授, 主要研究方向为雷达成像技术、目标分类与识别。
黄顺吉: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达成像技术、导航等。