

基于反对称二进小波的 SAR 图像海洋表面油膜检测方法

薛浩洁 种劲松

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

摘 要: 海洋表面油膜检测是合成孔径雷达 (SAR) 很重要的应用领域之一。小波方法是近年来研究较多的图像边缘检测方法。通常的 SAR 图像油膜检测采用高斯函数一阶导和二阶导作为小波基函数, 运算速度慢; 该文采用反对称二进小波, 利用小波变换多分辨率分析 (MRA) 思想, 经多尺度综合得到油膜边缘图像。实验证明这是一种有效、有前途的 SAR 图像海洋表面油膜检测方法。

关键词: 合成孔径雷达, 油膜检测, 小波变换

中图分类号: TN959.72, TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)04-0574-03

Zero-Antisymmetrical Dyadic Wavelet-Based Oil Spill Detection Method in SAR Images

Xue Hao-jie Chong Jin-song

(The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology,
Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Oil spill detection is one of the very important application fields in Synthetic Aperture Radar (SAR) images. Wavelet method is an edge detection method broadly researched in recent years. Normal oil spill detection uses the first and second derivatives of a Gaussian function as the basic wavelet function, which has slow computing speed. This paper utilizes zero-antisymmetrical dyadic wavelet, using multi-resolution analysis and multi-scale integration to get oil spill edge images. The results demonstrate that it is a useful and promising method for oil spill detection in SAR images.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Oil spill detection, Wavelet transform

1 引言

每年, 海洋水体都遭受着大量原油泄漏污染。SAR 图像具有全天候、全天时、覆盖面积大等优点, 应用于海洋表面油膜检测, 利于保护海洋环境, 对全球生态环境具有重要意义。

SAR 图像往往含有大量斑点噪声, 图像边缘和噪声在空间域均表现为灰度起伏较大, 在频率域则都反映为高频分量, 这就给油膜边缘检测带来了困难。

小波变换是近年来研究较多的边缘检测方法, 它良好的时频局部特性非常适合于边缘检测。小波变换的核心是多分辨率分析(MRA)^[1,2], 它可以在大尺度下抑制噪声, 小尺度下精确定位边缘。

目前已有的 SAR 图像海洋表面油膜检测大多数采用阈值方法^[3,4], 也有采用小波变换方法的^[5], 其小波基函数选用高斯函数一阶导和二阶导。实验证明, 高斯函数的一阶导和二阶导作为卷积核, 算法计算量太大^[6]。本文基于反对称二进小波^[7]对油膜图像进行小波变换, 并经过边缘链接得到油

膜边缘图像。

2 基于小波变换的 SAR 图像海洋表面油膜检测方法

2.1 油膜边缘检测方法流程图

基于小波变换的 SAR 图像海洋表面油膜检测方法流程参见图 1。

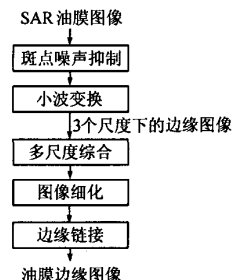


图 1 基于小波变换的 SAR 图像海洋表面油膜检测方法流程图

本文使用增强 Lee 滤波^[8]和中值滤波相结合的方法抑制 SAR 图像中的斑点噪声。

2.2 二进小波变换与边缘检测

设 $\theta(x, y)$ 是光滑函数, 此时, $\psi^1(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x}$ 和 $\psi^2(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y}$ 可作为小波函数。二维小波函数定义如下: 若 $f \in L^2(R^2)$, 记

$$\begin{cases} W_{2^j}^1 f(x, y) = (f * \psi_{2^j}^1)(x, y) \\ W_{2^j}^2 f(x, y) = (f * \psi_{2^j}^2)(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

令 $Wf = \{W_{2^j}^1 f(x, y), W_{2^j}^2 f(x, y)\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 为 $f(x, y)$ 的二维二进小波变换, 其中 $\mathbb{Z}$ 为自然数, $*$ 是卷积符号。显然, 小波变换具有天生的多尺度特性。由式(1)可知, $f(x, y)$ 二维二进小波变换实际上就是 $f(x, y)$ 经 $\theta(x, y)$ 光滑后的梯度:

$$\begin{bmatrix} W_{2^j}^1 f(x, y) \\ W_{2^j}^2 f(x, y) \end{bmatrix} = 2^j \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta_{2^j})(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta_{2^j})(x, y) \end{bmatrix} = 2^j \nabla (f * \theta_{2^j})(x, y) \quad (2)$$

二维离散二进小波变换可通过滤波器的卷积运算实现。记 $f * (G, H)$ 表示这样的运算, 图像 f 与一维滤波器 G 作行卷积, 再与一维滤波器 H 作列卷积。

设 G, H, L 是由选用的小波函数推导出来的滤波器系数, G_j, H_j, L_j 分别表示在 G, H, L 的相邻数间插入 $2^{j-1}-1$ 个零而得到的离散滤波器系数。给定图像 $S_{2^j} f$, 有如下分解算法:

(J 是最大分解层次)

$$\begin{aligned} & j = 1; \\ & \text{if } j \leq J \{ \\ & \quad W_{2^{j+1}}^1 f = S_{2^j} * (G_j, L_j); \\ & \quad W_{2^{j+1}}^2 f = S_{2^j} * (L_j, G_j); \\ & \quad S_{2^{j+1}} f = S_{2^j} * (H_j, H_j); \\ & \quad j = j + 1; \} \end{aligned}$$

上述算法将图像 $S_{2^j} f$ 分解到某一层 J , 得到了一个多尺度表示:

$$\{W_{2^j}^1 f, W_{2^j}^2 f\}_{1 \leq j \leq J}, S_{2^J} f \quad (3)$$

其中 $W_{2^j}^1 f$ 和 $W_{2^j}^2 f$ 分别是原图像水平和垂直方向的高频边缘信息, $S_{2^j} f$ 是原图像的一个逼近图像, 式(3)完备地描述了原信号。

定义1 模

$$M_{2^j} f(x, y) = \sqrt{|W_{2^j}^1 f(x, y)|^2 + |W_{2^j}^2 f(x, y)|^2} \quad (4)$$

定义2 幅角

$$A_{2^j} f(x, y) = \text{Arctg}(W_{2^j}^2 f(x, y) / W_{2^j}^1 f(x, y)) \quad (5)$$

小波变换进行边缘检测的基本思想是: $M_{2^j} f(x, y)$ 的局部极大值点对应原图像的边缘点, 而 $A_{2^j} f(x, y)$ 描述了边缘点的梯度方向。实际处理中还需要进行边界延拓以防止产生边界效应。

利用小波变换进行 SAR 图像油膜检测的一个关键问题是小波基的选择, 不同的小波基决定了不同的处理效果。

SAR 图像中油膜的边缘为阶跃状边缘。文献[7]指出, 反对称二进小波适合检测阶跃状边缘, 本文采用的反对称二进小波系数为

$$H = [0 \quad 0 \quad 1/16 \quad 1/4 \quad 3/8 \quad 1/4 \quad 1/16 \quad 0 \quad 0];$$

$$G = [0.08005 \quad -0.110086 \quad 0.112836 \quad -0.556418 \quad 0 \quad 0.556418 \\ -0.112836 \quad 0.110086 \quad -0.08005];$$

$$L = [0.000035 \quad 0.007269 \quad 0.031165 \quad 0.06619 \quad 0.7906821 \\ 0.06619 \quad 0.031165 \quad 0.007269 \quad 0.000035];$$

2.3 多尺度综合提取边缘

多尺度是小波变换的天然特性。一幅图像可以在多个尺度下进行分解, 每个尺度都提供一定的边缘信息。小尺度时, 图像的边缘信息较为丰富, 边缘定位精度较高, 但易受噪声干扰; 大尺度时, 图像的边缘稳定, 抗噪性能好, 但定位精度差。一个显然的思路是多尺度综合提取边缘, 具体步骤如下: (j 代表分解层次, $j = 1, 2, \dots, J$)

(1) 对原图像进行小波变换, 生成各个尺度下的模图像 M_j ;

(2) 在模图像 M_j 中寻找模的局部极大值点, 生成可能的边缘图像 P_j ;

(3) 综合多个层次上的 P_j , 只有那些在多个尺度下都为边缘的点才是真正的边缘点。

另外, 还需要考虑如何确定分解层次。一般地, 图像分解到3层即可, 如果继续向下分解, 图像变得相当模糊, 边缘信息过宽, 对边缘综合的意义已经不大。

2.4 边缘链接

大块的、完整的油膜边缘应该是闭合的。多尺度综合后的边缘图像往往并不闭合, 这就需要进行边缘链接。

边缘链接之前需要对二值图像进行细化, 以方便边缘链接和以后需要进行的油膜特征提取。细化中寻找骨架点的原则是孤立点是骨架, 端点是骨架, 中心点是骨架。

有时, 边缘图像还会出现多叉树结构, 即从1个点出发, 有3个或更多分支方向。这也是油膜检测中不希望出现的情况, 必须去除。去除多叉树结构的思路为先检测出多叉点, 再从这些点出发搜索边缘链, 链长短的作为噪声链去除掉。

图像进行边缘链接的方法为 (参见图2)

(1) 搜索边缘链端点, 形成 $N \times 2$ 大小的端点数组 (N 为端点数, 每行记录端点在图像中的行、列位置), 并建立一个与图像尺寸一致的标记数组 F , 其初始值为零。

(2) 从每一端点开始进行边缘链接, 链接对象为相邻的像素值为255、标记值为0的点。链接后的像素标记为起始端点的行号, 避免重复链接, 且可区分由不同端点链接而成的链。

(3) 若紧邻像素中没有满足条件的点,则沿着该链的切线方向及其附近继续搜索若干步。若搜索到边缘点,则把这两个边缘点的间隙作为边缘链接好,否则不作任何修改。

(4) 对整幅边缘图像进行封闭化链接。

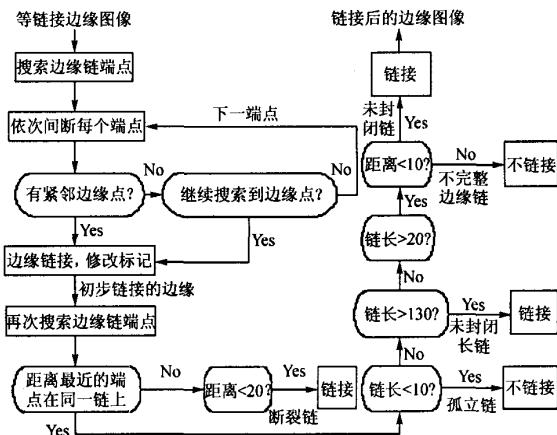
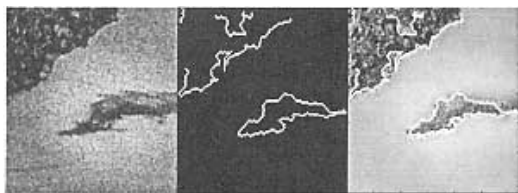


图2 边缘链接方法流程图

3 实验结果

3.1 实验1

2003年5月31日,一艘中国货船在丹麦海域沉没,泄漏的原油随即漂至瑞典东南海岸。2003年6月6日,该油膜在瑞典东南海域的ERS-2 SAR图像如图3(a)所示(图3(a)左上角为陆地,右边为漏油)。图3(b)为本文方法检测结果,图3(c)为小波方法勾边效果图。可以看出,在该实验中,本文方法能精确定位油膜,检测效果较好。试验表明,若选用高斯函数一阶导和二阶导作为小波基函数,所需运算时间大约为本文方法的2.3倍。

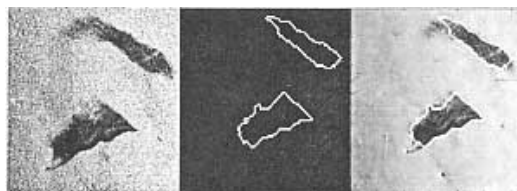


(a) 原始SAR图像 (b) 小波方法结果 (c) 小波方法勾边效果图

图3 试验1

3.2 实验2

1996年7月18日,挪威Bergen西北部ERS-2 SAR油膜图像如图4(a)所示,图4(b)为本文方法检测结果,图4(c)为本文方法勾边效果。试验表明,若选用高斯函数一阶导和二阶导作为小波基函数,所需运算时间大约为本文方法的3.5倍。



(a) 原始SAR图像 (b) 小波方法结果 (c) 小波方法勾边效果图

图4 试验2

4 结论

反对称二进小波变换是实现SAR图像海洋表面油膜检测的一种新方法。与通常采用高斯函数一阶导和二阶导作为小波基函数的检测方法比较而言,本文方法有运算速度上的优势。而且从检测效果上来看,本文方法是一种有效的、有前途的SAR图像海洋表面油膜检测方法。

参考文献

- [1] Mallat Stephane, Zhong Sifen. Characterization of signals from multiscale edges. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(7): 710-732.
- [2] Canny John. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [3] Fiscella B, Giancaspro A, Nirchio F, et al.. Oil spill detection using marine SAR images. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(18): 3561-3566.
- [4] Solberg Anne H. Schistad, et al.. Automatic detection of oil spill in ERS SAR images. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(4): 1916-1924.
- [5] Liu A K, Wu S Y, Tseng W Y, et al.. Wavelet analysis of SAR images for coastal monitoring. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2000, 26(6): 494-500.
- [6] 章国宝,叶桦,陈维南. 基于正交小波变换的多尺度边缘提取. *中国图像图形学报*, 1998, 3(8): 651-654.
- [7] 许传祥,石青云,程民德. 零对称和反对称二进小波及其在边缘检测中的应用. *中国图象图形学报*, 1996, 1(1): 4-11.
- [8] Ristau J P, Moon Wooil M. Adaptive filtering of random noise in 2-D geophysical data. *Geophysics*, 2001, 66(1): 342-349.

薛浩洁: 女, 1975年生, 硕士, 研究方向是遥感图像处理和模式识别。

种劲松: 女, 1969年生, 副研究员, 博士, 从事遥感图像处理与模式识别的研究。