

一种多方向的合成孔径雷达图像边缘检测方法

方登建¹, 刘 伟², 吴凌华³, 丁 灿¹

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 91980 部队, 山东 烟台 264001; 3. 海军驻航天七院军代室, 成都 610100)

摘要: 经典的边缘检测方法 (Canny, Roberts, Prewitt 等) 受合成孔径雷达 (SAR) 图像斑点噪声的影响致使其检测效果不佳; 基于 SAR 图像的假设检验方法 (Ratio 算法等) 其检测性能不随图像强度的变化而变化, 边缘检测错误率低, 但检测到的边缘片段较粗; 针对上述问题, 结合小波的多分辨率特性以及 Contourlet 变换的充分捕获高维奇异信号的能力, 提出一种改进的 Contourlet 变换与改进小波变换的模极大值方法对 SAR 图像进行边缘检测, 在 16 个方向上对 SAR 图像进行边缘提取, 进而保证了边缘信息的丰富性; 试验结果表明, 该方法提取的 SAR 图像边缘位置精确, 运算速度较快, 利于后续的图像匹配。

关键词: SAR 图像; 边缘检测; 小波分析; 多孔小波算法; Contourlet 变换; 模极大值检测

A Multidirectional Edge Detection Method for SAR Image

Fang Dengjian¹, Liu Wei², Wu Linghua³, Ding Can¹

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. The 91980th Unit of PLA, Yantai 264001, China; 3. Naval Military Delegate Office Stationed in the 7th Aerospace Research Academy, Chengdu 610100, China)

Abstract: Because of the influence of SAR image's coherent noise, the classic method of edge detection (Canny, Roberts, Prewitt, etc.) does not apply to the SAR image. Detection performance of the method of hypothesis testing based on SAR image (Ratio algorithm, etc.) does not change following the changing of image intensity, and edge detection error rate is low, but the detected edge segment is thick. To solving these questions, a modulus maxima method combined with improved Contourlet transform and improved wavelet transform is presented to detect SAR image edge in 16 directions, using the characteristic of wavelet multiresolution analysis and the capability of Contourlet transform to fully capture high dimension singular information of image. The test results show that the location of exacted edge of the SAR image is precise, and the speed of computing is fast, which is help to the subsequent image matching.

Key words: SAR image; edge detection; wavelet analysis; a trous wavelet; Contourlet transform; modulus maximum detection

0 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 具有高分辨率、全天时全天候、强透射等优点, 其图像的应用研究已成为该领域的热点, 对 SAR 图像的边缘检测则是该领域的一个重要方面。边缘检测是 SAR 图像解译的基本问题之一, 也是 SAR 图像匹配的一种途径。但是, SAR 图像要受其固有相干斑噪声的严重影响, 降低了 SAR 图像的质量, 因此使得其边缘检测变得更为困难^[1]。

目前常用的边缘检测方法有: 1) 基于微分算子的边缘检测方法 (如 Canny, Roberts 算子等)^[2-3], 具有算法简单、运行速度快等优点, 但是直接将其用于 SAR 图像边缘检测效果不好。2) 基于假设检验的方法 (如 Ratio 算法等)^[4], 能较好地克服噪声的影响, 降低检测错误率; 但定位精度差, 难以判别真实边缘的位置^[5]。3) 基于小波理论边缘检测方法^[6-8], 可以提取出不同尺度的有用边缘信息。

针对上述方法的优缺点, 本文结合改进的 Contourlet 变换与模极大值方法提出了一种多方向 SAR 图像边缘检测算法, 试验表明该方法边缘检测精度相对较高, 运算速度较快, 适于以边缘检测为基础的图像匹配以及图像配准的实时运用。

1 模极大值边缘检测

目标的边缘反映在图像上就是灰度的变化, 灰度变化有多种

形式, 最基本的是图 1 所示的理想化模型, 依据这个模型生成的理想边缘是一组相连像素的集合, 每个像素都处在灰度级跃变的一个近似垂直的台阶上。实际上, 由于图像采集的不完善性使得到的边缘很模糊。对 SAR 图像来说, 由成像机制导致的乘性相干斑噪声进一步恶化了边缘。图 2 是实测 SAR 图像边缘的一条水平灰度剖面线, 相干斑噪声模糊了相邻区域的对比度, 使得相邻区域的跃变趋于平缓, 边缘处出现了一个明显的过渡带, 不再是理想情况下的单像素边缘, 因此难以确定边缘的准确位置。

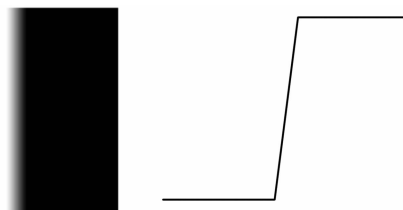


图 1 理想边缘模型及水平灰度剖面线

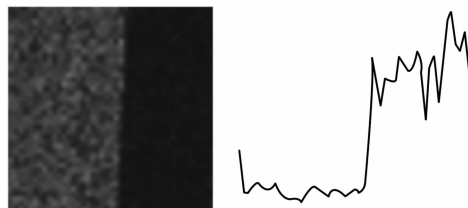


图 2 实测 SAR 图像边缘及其灰度剖面线

实际上, 边缘像素是局部范围内灰度的奇异点, 而图像边缘就是这些奇异点的集合。对于 SAR 图像, 一维有噪边缘 $S(x)$ 可表示为:

收稿日期: 2014-01-05; 修回日期: 2014-02-24。

作者简介: 方登建 (1977-), 男, 四川成都人, 讲师, 硕士, 主要从事图像处理、信息化技术应用方向的研究。

$$S(x) = Cu(x) * n(x) \tag{1}$$

其中: C 为常数, $u(x)$ 为单位阶跃函数, $n(x)$ 为乘性噪声。边缘检测在本质上就是在有噪边缘上卷积一个滤波器 $f(x)$, 如 (2) 式, $o(x_0)$ 的局部极大值就是边缘所在位置。

$$o(x_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(x)f(x_0 - x)dx \tag{2}$$

不同边缘检测器的差别为滤波器形式的不同。对于 SAR 图像边缘检测来说, 待解决的问题就是设计能检测局部极大值的滤波器, 同时由于乘性斑点噪声的影响, 检测方法应该有区分真实边缘点和虚警局部极大值的能力。

1.1 基于小波变换的边缘检测

假设存在实函数 $\theta(x)$ 满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(x)dx = 1$ 且 $\theta(x) = o\left(\frac{1}{(1+x^2)}\right)$, 则 $\theta(x)$ 被称为光滑函数。光滑函数 $\theta(x)$ 的能量主要集中于低频段, 因此可视光滑函数为低通滤波器。信号 $f(x)$ 与其进行卷积不会改变 $f(x)$ 的低频部分, 但会衰减其高频部分, 从而使 $f(x)$ 光滑。光滑函数的各阶导数为带通函数, 因此, 可以将其作为小波函数的基本小波。

对小波分析来讲, 正交性和线性相位不可兼得, 一般的, 边缘检测的小波函数应具有紧支撑、对称 (反对称) 和一阶消失距。B 样条小波滤波器属于双正交小波, 尽管失去了正交性, 但具有广义线性相位, 是对称或反对称的, 更能适合边缘检测^[9]。实际计算中, 采用二维可分离的样条函数, 具体计算借助滤波器组, 对应的滤波如表 1 所示。

表 1 样条小波滤波器

二次样条小波滤波器			三次样条小波滤波器		
n	h	g	n	h	g
-2	0.000 0	-0.006 1	-3	0.000 0	-0.000 08
-1	0.125 0	-0.008 69	-2	0.062 5	-0.016 43
0	0.375 0	-0.597 8	-1	0.250 0	-0.108 72
1	0.125 0	0.597 8	0	0.375 0	-0.592 61
2	0.375 0	0.086 9	1	0.250 0	0.592 61
3	0.000 0	0.006 1	2	0.062 5	0.108 72
			3	0.000 0	0.016 43
			4	0.000 0	0.000 08

1.2 多孔小波变换

在利用传统离散小波变换对信号进行分析时, 其尺度按 2 的幂级数增长, 每经过一级小波变换后, 尺度系数与小波系数减半, 即逐级对分, 这种操作有利于信号的压缩与传输, 对应于图像边缘或不连续点的小波系数可能被抽采样掉, 直接造成了图像分解和合成的非稳定性^[10]。因此, 在实际应用中, 特别是在图像边缘检测中, 需要将离散二进制小波变换的计算时间间隔加密, 或利用某种处理方法对传统的小波变换加以改进以达到相应的时间间隔加密效果。同时, 又可以在实际应用中方便的利用滤波器组实现 Mallat 算法。因此引入多孔小波算法即为基于 Mallat 算法的离散二进制小波变换的一种改进, 该算法是通过有限滤波器的内插近似, 从而达到无抽取离散小波变换, 其主要特点是冗余性和平移不变性, 多孔小波变换通过对滤波器组的改进, 利用合适的滤波器对信号进行分析, 在分解过程中对输出不进行下采样, 因此, 每一级多孔小波变换得到与原始信号大小相等的尺度系数和小波系数。

在多孔小波实现过程中, 对经典小波变换的低通和高通滤

波器进行修改, 定义 Z 为插零算子, 即

$$(Zx)_{2j} = x_j, (Zx)_{2j+1} = 0, j = 0, 1, \dots, J \tag{3}$$

$H^{[r]}, G^{[r]}$ 为低通和高通滤波器的第 r 次插零运算, 即

$$H^{[r]} = Z^r h, G^{[r]} = Z^r g \tag{4}$$

于是, 对于给定的信号序列 c_n , 多孔小波变换的尺度系数 c^j , 小波系数 d^j 的递推关系如式 (5) 所示:

$$c^{j+1} = H^{[j]} c^j, d^{j+1} = G^{[j]} d^j \tag{5}$$

多孔算法的基本过程是: 一幅图像与一低通滤波窗口进行滤波运算, 得到与原图像大小近似相同的近似细节。该近似图像与前一级图像进行差分运算, 得到近似图像丢失掉的细节信息图像, 对近似图像进行多级滤波、差分运算, 可以得到一系列的细节图像。每级多孔小波运算得到两个分解图像: 近似图像与细节图像, 细节图像体现了各个方向的细节信息。因此, 多孔小波变换十分适合于 SAR 图像边缘的特征提取。

2 改进的 Contourlet 变换

Contourlet 变换是一种新的图像多尺度几何分析工具, 它由一种双滤波器组结构来实现, 在用于图像处理时并不需要图像本身几何特征的先验知识^[11]。Contourlet 变换使用拉普拉斯塔形分解 (LP 分解) 对图像进行多尺度分解, 它的每一级分解都会产生一个带通图像, 通过迭代可以得到非常细致的频率划分。Contourlet 变换具有多尺度、多分辨率、局部定位、多方向性、各向异性以及计算高效等特性, 因此在图像去噪领域具有很好的应用前景。

但是 Contourlet 变换也存在较明显的缺点: LP 滤波器存在过采样 (近邻界采样) 和非正交特性, 从而使数据量有所扩充。在实际的应用中, 信号经变换后的系数会进行量化或阈值截断等处理, 最后经过反变换对原始信号进行重构。在该过程中, 如果存在噪声, 那么重构算法的性能将会迅速降低, 导致不能实现对原始信号的精确逼近。

因此, 本文根据 Contourlet 变换和小波变换的优缺点对 Contourlet 变换进行改进, 如图 3 所示。图中虚线框内, A 为一层分解后的近似图像, D 为一层分解后包含 3 个方向 (水平、垂直、对角) 的细节图像, AA 为原图像大小的重建图像。

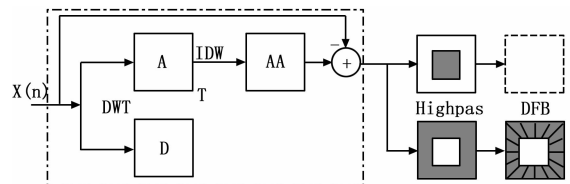


图 3 改进的 Contourlet 变换结构示意图

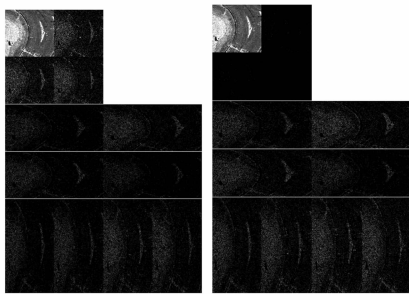
首先, 采用虚线框内的变换方法代替原来的 LP 分解。该变换方法能够将低频部分移出, 加之小波变换具有临界采样和正交特性, 所以虚线框内的变换方法有利于后面的方向滤波器组对高频部分进行方向划分。

其次, 采用扇形滤波器的 DFB 结构取代原来钻石形滤波器的 DFB 结构。因为钻石形滤波器的 DFB 结构实现起来较为复杂, 并且易产生频域混叠的现象。

图 4 为改进前后轮廓波分解图像的结果, 可以看到改进后的轮廓波分解图像后高频方向子带上的纹理比改进前的丰富, 这对于后续边缘特征的提取也非常有用。

3 试验分析

本文先对图像进行改进 Contourlet 变换得到 8 个方向子带细



(a) 轮廓波图像分解 (b) 改进轮廓波图像分解
图 4 轮廓波改进前后的图像分解

节图像，然后对这 8 个子带图像采用上述方法进行边缘检测（每个方向子带检测出的边缘将会不同），最后对其进行融合得到最终结果。图像未进行 Contourlet 变换之前，模板大值方法只能对图像进行 x, y 两个方向上进行运算进而得到目标边缘，本文方法使得模板大值方法可在 $8 \times 2 = 16$ 个方向上进行运算，因此使得边缘信息更为丰富，有利于进一步的应用。使用 Intel core 2 Duo 主频为 2.2 GHz，内存为 504 MB 的计算机，Matalab7.04 环境进行编程实验。试验所用 SAR 图像为 MiniSAR 在 Ku 波段拍摄的某地区的实时图像，分辨率为 0.1 m，如图 5 所示。

如图 6 所示 8 个方向子带所检测出的边缘有一定的不同，这也就验证了前文所说的每个方向上检测到的边缘不同，将其融合后就会得到更为丰富的边缘信息。

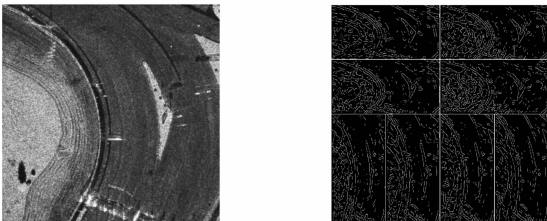


图 5 SAR 图像 图 6 8 个方向子带图像边缘检测结果

如图 7 所示，融合后的边缘信息更为丰富，且定位相对精确，如图 8 所示。为比较本文方法提取 SAR 图像边缘的有效性与其优越性。本试验分别对微分算子方法（canny）、假设检验方法（ROA），以及普通小波算法对图 5 的 SAR 图像进行边缘检测，结果如图 9 所示。

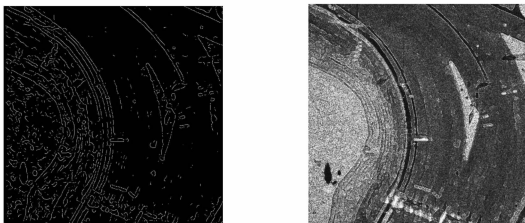


图 7 融合后检测结果 图 8 边缘定位检验结果

Canny 算子在 SAR 图像中不具有恒虚警的特性，在高亮度区域边缘检测虚警率将高于低亮度区域，如图 9 所示 Canny 算子提取的边缘受斑点噪声的影响较大，产生许多虚假边缘，并且连续性也很差。针对 SAR 图像的边缘提取算子 ROA 具有较高的检测率，但定位精度差，主要表现在实际边缘点附近总存在一定的错检，边缘片段粗，难以判别真实边缘的位置，而且运算速度极较慢不适于实时应用。基于小波变换的边缘检测方法能较好的解决图像噪声和精确定位边缘的矛盾，但是要得到图像中特定目标连续光滑的边缘线还十分困难。如图所示部分大目标的边

缘检测效果较好，但同时也漏检了部分目标的边缘。

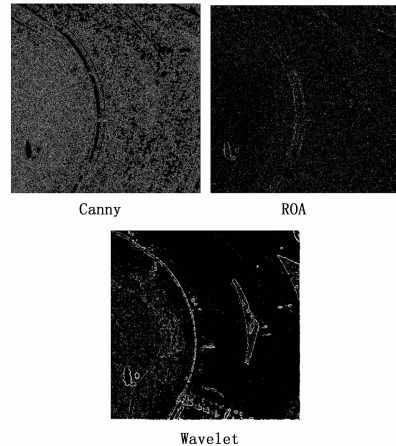


图 9 其它边缘检测算法检测结果

4 结论

在一幅图像中，边缘有方向和幅度两个特性。沿边缘走向的灰度变化缓慢，而沿法线方向灰度变化剧烈。边缘方向在检测前是未知的，因此需要对给定区域内的多个方向进行检测。因此本文结合改进的轮廓波变换与模板大值方法对 SAR 图像进行边缘检测，首先对 SAR 图像进行改进 Contourlet 变换得到八方向子带细节图像，然后对这 8 个子带图像采用二进多孔小波模板大值方法进行边缘检测（每个方向子带检测出的边缘将会不同）最后对其进行融合得到最终结果。试验结果表明，该方法得到的边缘定位准确，运算速度快，有利于后续 SAR 图像匹配、配准。

参考文献：

- [1] 赵志钦, 王建国, 黄顺吉. SAR 图像的边沿检测方法研究 [J]. 电子科技大学学报, 2000, 29 (3): 225 - 228.
- [2] 刘景正, 余旭初, 张鹏强, 等. 新型 Canny 算法的 SAR 图像边缘检测 [J]. 测绘科学, 2008, 33 (1): 132 - 134.
- [3] 张 祥, 邓喀中, 范洪冬. 融合 Canny 边缘检测技术的 SAR 图像改进滤波方法 [J]. 黑龙江工程学院学报, 2011, 25 (2): 6 - 9.
- [4] Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR image [J]. IEEE Trans on Geosci. Remote Sensing, 1988, 26 (6): 762 - 773.
- [5] Oliver C J, Blacknell D, White R G. Optimum edge detection in SAR [J]. IEEE Radar, Sonar and Navigation, 1996, 143 (1): 31 - 40.
- [6] 毕 雪, 陈向东, 张 雷. 基于小波域内层间系数反向相关提取图像边缘 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (2): 362 - 365.
- [7] 胡正磊, 孙进平, 袁运能, 等. 基于小波边缘提取和脊线跟踪技术的 SAR 图像河流检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29 (3): 524 - 527.
- [8] 周树道, 王 敏, 刘志华, 等. 基于多方向小波变换及形态学重构的 SAR 图像边缘检测 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 2011, 12 (5): 436 - 439.
- [9] 阮秋琦. 数字图像处理学 (第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [10] 文 艳, 丁建丽, 塔西甫拉提 特依拜. 基于 atrous 小波分解的 SAR 图像噪声去除方法 [J]. 测绘科学, 2009, 34 (1): 103 - 105.
- [11] Do M N, Vetterli M. The Contourlets Transform: An Efficient Directional Multiresolution Image Representation [J]. IEEE Trans on Image Processing (1057-7149), 2005, 14 (12): 2091 - 2106.