

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

胡正磊 孙进平 袁运能 毛士艺
(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘 要: 该文提出了一种在 SAR 图像中有效地得到连通河流的检测方法。算法基于二进小波变换的边缘提取和脊线跟踪技术。该文应用小波变换多尺度特性进行边缘检测, 采用小波域系数直接相关的方法提取边缘。该方法比 WTMM 获取边缘点的算法更加简单高效。在解决连接不连续边缘点和水域连通问题时, 该文采用了指纹提取中的基于灰度级图像的脊线跟踪技术, 从而避免了已广泛应用于海岸线连接中的 Snake 模型的一些缺点。结果证明该文算法更高效, 对复杂的河流边缘适应性更强, 算法得到的河流检测结果连通性更好, 定位准确。

关键词: SAR 图像; 河流检测; 边缘提取; 脊线跟踪; 连通

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0524-04

River Detection in SAR Images Based on Edge Extraction in Wavelet Domain and Ridge Tracing Technique

Hu Zheng-lei Sun Jin-ping Yuan Yun-neng Mao Shi-yi
(Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper deals with automatic river detection in SAR images. A new method is proposed using the boundary extraction in wavelet domain and merging the water region by ridge tracing. In the method, edge detection is approached by direct spatial correlation of wavelet transform at several adjacent scales. It is much easier than the algorithm of WTMM proposed by Mallat and proved to be more efficient. And the ridge tracking based on gray scale image, which is applied in fingerprint tracing, is introduced here to complete the river bank linking and river connecting. This improvement avoids the disadvantages of the Snake model widely used in linking the coastline. The river detection result from the method is good at connection and location. And the method is much more efficient and adaptive to the complicated bank.

Key words: SAR image; River detection; Boundary extraction; Ridge tracing; Connection

1 引言

合成孔径雷达(SAR)广泛应用于对地观测, 对 SAR 图像中河海水域等目标的自动识别, 在地形学地图匹配, 基于地理信息系统的船舶导航等方面有很大价值。研究一种能有效去除 SAR 相干斑点噪声的影响, 准确检测水域边缘的方法是非常有意义的。当前, 对于海岸线检测研究的比较多, 河流检测有其相似性, 也必将有更广泛的实际应用价值。

目前, 对河流检测算法的研究比较少, 与此类似的海岸线检测的研究文章比较多一些, 现在的海岸线检测算法通常基于阈值分割和小波边缘检测得到主要轮廓线, 再应用 Snake 模型进行细化^[1-3]。Mallat 最早(1992)采用二次样条小波首次提出了基于小波变换局部模极大值点(WTMM)的边缘检测方法^[4,5], 较好地解决了去除图像噪声和精确定位边缘的矛盾。尤其对于 SAR 图像的相干斑点噪声应用小波方法有更好的降斑效果, 但是得到的边缘线不够连续光滑。Kass 最早(1988)提出的 Snake 动态轮廓模型可以检测特定目标的边缘线, 并得到封闭连续曲线, 被应用于海岸线的提取, 也发

展出改进的 GVF(梯度矢量流)Snake 模型和 WVF(小波变换矢量流)Snake 模型等^[6], 对 Snake 模型对曲折边缘的适应性有一定改进, 但仍然是基于迭代拟合的收敛算法, 对复杂边缘的适应性依然不强, 而且计算较复杂。

鉴于 SAR 图像的斑点噪声, 本文也采用小波边缘提取方法以得到更好的降斑效果。现有的小波边缘提取基本还是应用 Mallat 提出的 WTMM 方法, 但是由于 WTMM 算法引入了 Lipschitz 指数等数学概念, 在不同尺度间综合, 算法比较复杂。本文采用文献[7]中提出的基于小波变换系数邻近层的空间域的直接相关性进行检测。这一算法简单高效, 能够更快速地得到边缘点, 实验证明得到的边缘点可以满足进一步细化的要求。

河流具有两条河岸线, 相距较近, 局部更复杂, 边缘点连接细化时使用 Snake 模型计算量增加, 适应性差。本文中, 考虑到河岸的方向性以及在小窗口内宽度相对稳定的特点与指纹有相似之处, 而指纹识别的研究已经比较成熟, 并且 Miao 与 Maltoni^[8]又提出了一种直接从灰度级图像获取细节信息的脊线跟踪的新颖算法。因此, 针对河流检测问题本文引入了该算法, 由于小波边缘检测已经定位了边缘点, 较亮

的河岸边缘点近似于指纹的脊线,依据脊线跟踪方法可以进行河岸连接。同时,在垂直于河岸方向结合连通特性、河流宽度和阈值等因素可以直接得到连通的河流区域,该算法能适应复杂曲折的边缘且物理意义明确,简单易行。

应用本文的方法对真实 SAR 图像中的河流进行检测,结果表明在纹理结构复杂的城市郊区图像和自然江水流域中都能较完整和准确地检测出河流,具有很好的高效性和适应性。

2 算法介绍

2.1 河流特性分析及算法思路简介

在 SAR 数字图像中,本文对河流模型有以下基本认识:(1)河流像素点灰度值较低,方差较小,并且有连通性;(2)河岸灰度值较高,多成阶跃状边缘,并有一定的方向性和平行关系。

河流检测的研究论文目前比较少,多为研究海岸线或河流入海口的检测^[1-3]。河流检测与海岸线检测有相似之处,但也有自身的特点,由于河流像素在图像中的比例并不很大,灰度值的区分还会受SAR图像中一些其它类型的水域,阴影等因素的影响,从图像的灰度直方图可看出,采用简单的阈值分割很难有效得到感兴趣的河流区域,也就为进一步处理带来困难。针对上述河流模型(1)中的连通性,本文利用河流的连通性与阈值相结合进行河流区域的初步确定。对分割后感兴趣的部分再进行小波变换提取边缘点,再在原灰度图像中由脊线跟踪法进行河流区域的检测,将小波变换提取的不连续的河岸边缘点连接,同时连通河流水域。得到的二值图像经过标记连通区域,最终找出河流的部分,从而定位。算法框图如图1所示。

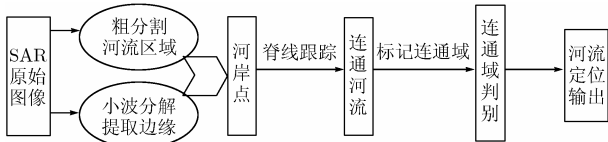


图1 算法框图

2.2 河流区域粗分割

本文的河流区域分割,主要考虑河流区域的连通特性,以及水域灰度值低于其它目标的特点。对于二维数字图像,利用传统的二维窗口中计算均值方差可以进行阈值分割。本文同时考虑连通特性,分别在 x 、 y 两个方向上用一定大小的一维窗检测图像,当有连续数点的阈值低于门限时,就将窗口内标记为河流区域,最后将两个方向上的连通区域综合,结合之前的阈值分割,可以得到较完整的河流区域,并尽可能去除非河流目标的部分。

2.3 小波变换域中边缘提取

(1)小波边缘检测简介 基于小波分析的边缘检测方法的最突出优点就是它的多尺度特性。图像的每个尺度的小波变换都提供了一定的边缘信息,多尺度边缘检测就是利用一

平滑函数 $H(t)$,在不同的尺度下平滑所检测的信号,根据一次微分、二次微分找出它的突变点。一次微分的极值点对应二次微分的零交叉点和平滑后信号的拐点,一次微分的极大值就对应了边缘点,因此以平滑函数的一阶导作为小波基对信号作小波变换,对于得到的小波变换的系数可以得到模值和辐角,则认为沿辐角方向的模值的极大值点就是图像可能的边缘点。Mallat根据边缘检测这一原理,结合小波变换理论提出了利用小波变换局部模极大值点(Wavelet Transform Modulus Maxima, WTMM)来判断边缘^[4]。在较小尺度时,图像边缘细节信息较为丰富,边缘定位精度较高,但也容易受噪声干扰得到伪边缘。在较大尺度下,图像的边缘确定,抗噪性能好,但定位精度下降。因此,结合不同尺度的边缘图像的结果,只有那些在多个尺度下都为边缘的点才是真正的边缘点,即多尺度综合提取边缘,从而得到比较精确的图像边缘。本文在小波变换中采用的小波基为二进小波,与Mallat做小波边缘检测时相同。

(2)小波变换邻近层直接相关提取边缘 Mallat的方法,在不同尺度下根据极值对信号的奇异性的分析可以有效地去噪和提取边缘,但是在对小波数据的处理上引入Lipschitz指数等数学概念,并在不同尺度间综合,算法比较复杂。由小波分解后系数特性可知,较强的边缘在小波变换多个尺度上都会有较大的模值,本文采用文献[7]中提出的基于小波变换系数邻近层的空间域的直接相关性进行检测。算法采用将邻近尺度下的小波变换系数直接相乘的方法来提取图像中的主要边缘。算法介绍如下:

对于一维 n 点数据,利用小波变换相邻尺度下的系数的空间相关函数 $\text{Corr}_l(m,n)$ 检测边缘的定位:

$$\text{Corr}_l(m,n) = \prod_{i=0}^{l-1} W(m+i,n), \quad n=1,2,\dots,N \quad (1)$$

其中 l 是做直接相乘的频率层的数目, m 是要得到的频率层的序数, $m < M-l+1$, M 是频率层的总数。多尺度间的相关运算可以锐化和增强主要的边缘并同时压制噪声和较弱的边缘。相关函数 $\text{Corr}_l(m,n)$ 由于包含了多尺度的信息可以改进边缘的定位的精确性。文献[7]中指出通常 $l=2,3$ 就可得到较好的边缘定位,当用于相关的层数过多后反而会产生负效应,丢失一些边缘。本文中考虑相邻两层间的相关,即 $l=2$ 。

算法原理如下: m 与 $m+1$ 层间系数相乘相关后的数据为 $\{\text{Corr}_2(m,n)\}$,将其能量用 $\{W(m,n)\}$ 的能量数据归一化。对于调整后的 $W(m,n)$,通过比较 $\text{Corr}_2(m,n)$ 和 $W(m,n)$ 的绝对值来确定边缘的位置。对于任意点 n ,

$$\text{edge} = \begin{cases} 1, & |\text{Corr}_2(m,n)| > |W(m,n)| \\ 0, & |\text{Corr}_2(m,n)| \leq |W(m,n)| \end{cases} \quad (2)$$

对于已被标记为边缘的点,记下它的灰度值和位置,再把他的灰度值在 $\text{Corr}_2(m,n)$ 和 $W(m,n)$ 中均置为0,得到 $\text{Corr}_2(m,n)'$ 和 $W(m,n)'$,归一化后重复上面边缘检测的算

法, 这样可以得到次强的边缘定位, 以上步骤可以多次迭代直到置0处理后的数据能量接近噪声能量, 则看作边缘提取完成。

把算法推广到二维图像的情况, 对于点数为 $N_x \times N_y$ 的二维数字图像, 相关函数如下:

$$\text{Corr}_l(m, n_x, n_y) = \prod_{i=0}^{l-1} W(m + i, n_x, n_y),$$

$$1 \leq n_x \leq N_x, \quad 1 \leq n_y \leq N_y \quad (3)$$

在本文实际的图像处理中, 一般频率层分解到3层就可以达到较好的边缘检测效果, 在去噪和定位间实现较好的平衡, 本文中即取 $M=3$, $l=2$ 。而对于河流检测这一特定目的, 由于河流的边缘在图像的边缘中属于能量较强的部分, 因此不同尺度间第一轮的空间相关就可以得到足够的河流边缘的信息, 不需要多次迭代提取图像中的所有边缘, 这样又大大降低了计算量, 提高了效率。

2.4 基于脊线跟踪的边缘连接和河流连通

(1)Snake算法简介及分析 在海岸线检测中, 解决连接不连续边缘点的问题时, 使用较多的是Snake动态轮廓模型法^[1-3]。Snake算法的基本思想, 其实是对曲线的拟合。Snake模型就是一条可变形的参数曲线及其相应的能量函数, 以最小化能量函数为目标, 控制参数曲线变形, 具有最小能量的闭合曲线就是目标轮廓。因此算法就采用基于收敛判断的迭代算法来调整参数, 能量函数也涉及曲线的一阶导数和二阶导数比较复杂。

对于河流检测来说, 处理过程中有两条河岸线需要拟合。同时, 河岸曲折, 边缘较复杂, 当两岸边缘点相距较近时还会互相影响。这种情况下, 采用Snake模型算法不仅计算量增加, 对复杂边缘的适应性也有待改进。由于河流的方向性和带状特性与指纹提取有一定的相似性, 而指纹识别研究已经比较成熟, 本文引用了指纹提取中的技术, 从而避免了使用Snake模型的缺点。

(2)脊线跟踪法介绍 本文在河流检测中连接边缘点这一步骤, 主要利用了指纹脊线跟踪技术中计算脊线方向的思想。由于直接应用灰度级图像提取方向进行脊线跟踪, 处理过程更充分地应用了已有的信息, 尤其是在通过小波边缘检测得到了边缘点的位置之后, 较亮的河岸边缘点可以看作局部区域极大值, 类似于指纹的脊线特征, 依据脊线跟踪方法可以进行河岸边缘连接。在得到河岸方向后, 在垂直于河岸方向上考虑连通特性及河流宽度, 可以通过阈值法直接得到连通的河流区域。

从数学上看, 可以将灰度级图像视为一个定义在二维平面上的一个曲面。沿脊线方向, 灰度变换相对平缓, 沿垂直于脊线的法线方向就应该对应为具有一定宽度的河流水域, 文中算法正是建立在上述特征分析的基础上。对脊线方向的计算方法采用最小方差估计和梯度计算法。

对于灰度图像中的每一个像素, 首先利用Sobel算子分别得到 x 方向和 y 方向上的梯度矩阵 G_x , G_y 。使用适当大小的窗口(本文采用 8×8)作为求脊线方向的窗口, 中心元素为 (i_0, j_0) , 窗口 $\text{win}(i_0, j_0)$ 内平均梯度向量 t 应该是与窗口内各向量 $n_{i,j}$ 最接近正交的单位向量, 也就是最小方差的准则, 则向量 t 在 ij 二维平面上的投影方向 θ 即为所求的脊线方向^[8], 方向计算依据下式^[9]:

$$A = \sum_{(i,j) \in \text{win}(i_0, j_0)} G_y(i, j)^2, \quad B = \sum_{(i,j) \in \text{win}(i_0, j_0)} G_x(i, j)^2$$

$$C = \sum_{(i,j) \in \text{win}(i_0, j_0)} G_y(i, j)G_x(i, j), \quad \theta(i_0, j_0) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{B-A}{2C} \right) \quad (4)$$

得到了脊线方向后, 即可在垂直于脊线方向上以一定步长搜索水域, 即沿垂直河岸方向确定河流水面的宽度。实验证明, 本方法更有效全面地利用了灰度信息, 物理意义明确, 比Snake方法连接边缘更简单易行, 对河岸边缘复杂度的适应性也更强。

2.5 连通区域标记

对于经过边缘连接和水域连通处理后的二值图像, 本文采用八邻域连通的区域标记将像素标记。连通区域的最后分辨, 可以有两种思路, 一是基于连通像素点数的阈值, 去除连通较少的部分, 得到相对图像中的其它目标连通像素较多的河流部分; 二是基于河流灰度值的特点, 对连通区域的灰度值进行阈值比较以提取河流的部分。基于阈值的考虑是为了去除一些大片的阴影或低地造成的连通区域, 在最终的连通结果输出中, 本文考虑保留大片水域的部分(如湖泊等), 因为这些信息通常与河流分布也是有联系的, 是有意义的。

3 结果分析

最后, 采用Software公司的机载X-Band的SAR图像(图2(a)), 对经过英国南部Pershore的Avon河进行检测, 结果如图2(b), 与Software公司利用其研究组提出的基于模拟退火降斑和Hough变换得到的检测结果(图2(c))相比, 本文检测出更完整的河流(图2(d))。

对不同场景下含有河流的SAR图像也应用同样算法进行检测, 结果如图3和图4。其中图3(b)右下角A区域, 连通像素较多, 并且由阈值判断可知为水域, 因此将其保留。而在图4(b)中的a和b区域为阴影造成的较低灰度值区域, 虽然连通像素数较大, 但经过对连通区域的阈值判断可知并非水域因而被去除, 最终得到检测结果如图4(c)。结果表明本文方法可以较好地保留水域, 并同时去除非水域连通区域的干扰。

4 结束语

本文基于对SAR图像中河流特性的分析, 利用小波变换提取边缘点, 由于采用了相邻层间空域直接相关的边缘提

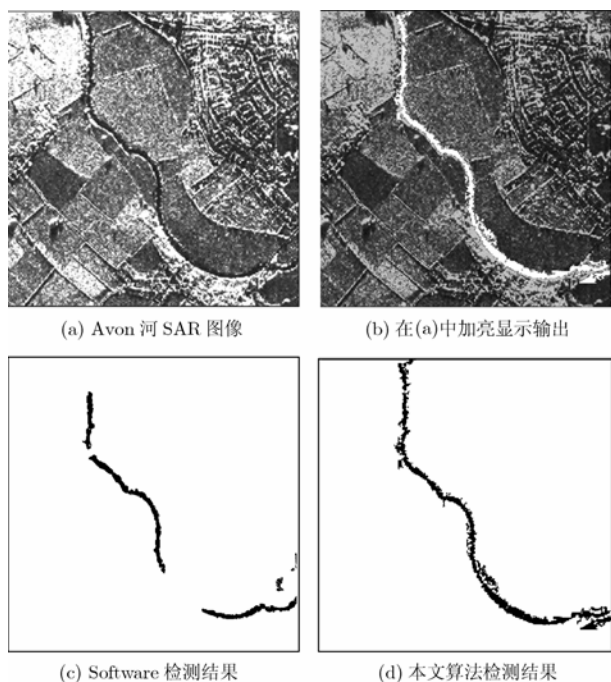


图2 Avon 河 SAR 图像检测结果

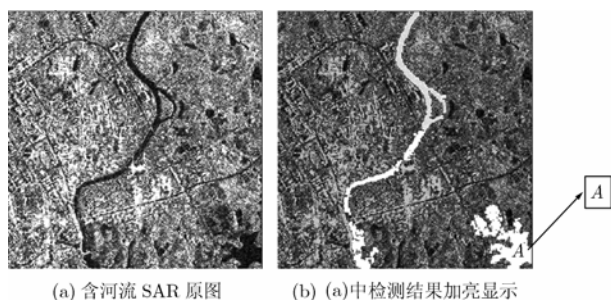


图3 含河流及水体的 SAR 图像检测结果

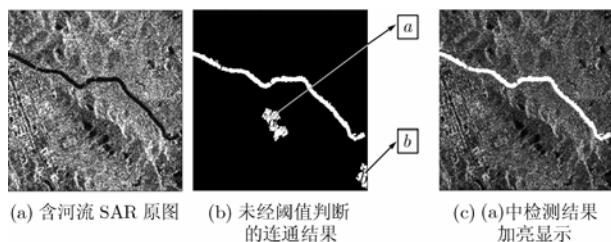


图4 含河流及低地的 SAR 图像检测结果

取算法,比由 Mallat 提出的传统的 WTMM 算法更简便易行,并能有效地检测和定位边缘。为了得到连续精确的河流定位,在解决小波检测得到的边缘点的不连续问题上,并没有采用广泛应用于海岸线连接的 Snake 动态轮廓模型法对河岸进行连接,而是充分考虑了河流模型在 SAR 图像中的特点,利用其与指纹提取的相似性,采用了指纹脊线跟踪技术。这一方法利用灰度级图像的梯度信息确定河流方向,并进一步利用灰度阈值在垂直于河岸方向上确定河流的宽度,最终得到连通的河流区域。这一改进,对河流的长宽和方向都有很好的适应性,能够得到连续完整的河流定位。由于对小波边缘提取方法的改进大大降低了计算复杂度,边缘连接上也避免了 Snake 方法中迭代运算和收敛判断等复杂的运算,本

文提出的算法实现起来更简单高效。同时,算法充分利用了河流的连通及带状等特性,有更清晰的物理意义,针对性强,为 SAR 图像中的河流检测问题提供了一个较实用的解决办法。

参考文献

- [1] Mason D C and Davenport I J. Accurate and efficient determination of the shoreline in ERS-1 SAR images. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1243-1253.
- [2] Niedermeier A, Romaneeßen E, and Lehner S. Detection of coastlines in SAR images using wavelet methods. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2270-2281.
- [3] Niedermeier A, Lehner S, and van der Sanden J. Monitoring big river estuaries using SAR images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International, July 9-13, Sydney, Australian, vol 4: 1756-1758.
- [4] Mallat S and Hwang WenLiang. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1992, 38(2): 617-643.
- [5] Malla S and Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges. *IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intell*, 1992, 14(7): 710-732.
- [6] 成金勇, 范延滨, 宋洁, 潘振宽. 基于小波分析与Snake模型的图像边缘检测方法. *青岛大学学报(自然科学版)*, 2005, 18(1): 77-81.
- Cheng Jin-yong, Fan Yan-bin, and Song Jie, *et al.* Images edge detection based on wavelets transform and snake model. *Journal of Qingdao University(natural science edition)*, 2005, 18(1): 77-81.
- [7] Xu Yansun, Weaver J B, Healy D M, Jr and Lu Jian. Wavelet transform domain filters: A spatially selective noise filtration technique. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1994, 3(6): 747-758.
- [8] Maio D and Maltoni D. Direct gray-scale minutiae detection in fingerprints. *IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intell*, 1997, 19(1): 27-40.
- [9] 杨小冬, 宁新宝, 谭台哲. 基于纹线跟踪的指纹细节提取算法. *计算机应用*, 2004, 24(3): 75-78.
- Yang Xiao-dong, Ning Xin-bao, and Tan Tai-zhe. Fingerprint minutiae extraction by following its ridge. *Journal of Computer Applications*, 2004, 24(3): 75-78.

胡正磊: 女, 1982年生, 硕士生, 研究方向为合成孔径雷达图像处理。

孙进平: 男, 1975年生, 副教授, 主要研究领域为高分辨率雷达成像及图像处理。

袁运能: 男, 1962年生, 副教授, 主要研究领域为小波分析及其应用、高分辨率雷达成像。

毛士艺: 男, 1935年生, 教授, 主要研究领域为高分辨率雷达成像、信号建模与谱分析、信号检测与分类、多目标跟踪和数据融合等。