

中图法分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)10-1549-06

索引信息: 侯彪, 胡育辉, 焦李成. SAR 图像水域的改进 Shearlet 边缘检测[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(10): 1549-1554

# SAR 图像水域的改进 Shearlet 边缘检测

侯彪, 胡育辉, 焦李成

(西安电子科技大学智能信息处理研究所和智能感知与图像理解教育部重点实验室, 西安 710071)

**摘要:** SAR 图像水域边缘检测中, 传统算法由于不能较好地克服斑点噪声影响, 因此检测出的虚假边缘较多。利用多尺度几何 Shearlet 变换对曲线精确有效检测等特点, 通过改进 Shearlet 变换并结合聚类及 Snake 模型等方法, 提出了一种新的 SAR 图像水域检测方法。实验结果表明, 该方法不仅提高了边缘检测的完整性和精确性, 而且有效克服了斑点噪声的影响, 对 SAR 图像水域边缘的检测是有效可行的。

**关键词:** Shearlet 变换; SAR 图像; 水域; 边缘检测

## Improved shearlet edge detection for waters of SAR images

HOU Biao, HU Yuhui, JIAO Licheng

(Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education of China,  
Institute of Intelligent Information Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract:** For SAR image waters edge detection, the traditional algorithm can not suppress speckle noise, so there are many false edges in the results. Based on Shearlet transform, a kind of multi-scale geometric transformations, which represent curves accurately and effectively, we propose an improved Shearlet transform. Combining improved Shearlet transform with clustering and snake model, a new method of waters edge detection for SAR image is performed. Experiments show that new method can not only reduce influence of speckle noise, but improve the integrity and accuracy of edge detection, and it is efficient and effective for SAR image waters edge detection.

**Keywords:** shearlet transform; SAR image; water; edge detection

## 0 引言

合成孔径雷达(SAR)由于其高分辨、全天候、多极化、多视角及可穿透性等优点得到了广泛应用。SAR 图像中的水域目标在军事和民用上都具有重要的意义, 多应用于目标识别、船舶导航、地图更新、灾害检测等, 而水域边缘的检测和定位则为这些应用环境提供了有效的途径。由于 SAR 图像存在严重的乘性相干斑噪声, 且随着 SAR 的发展, 空间分

辨率的提高, 使 SAR 图像的细节和纹理信息更丰富, 这导致 SAR 图像水域边缘不同于光学图像具有清晰直观、易于检测的特点。此外, 水域部分有着区域相似性和连通性等特征, 因此在进行水域边缘检测时不仅需要能够检测出边缘, 而且要尽可能保持边缘的连续性等, 这些要求增加了 SAR 图像水域边缘检测的难度。

目前的水域边缘检测主要集中在海岸线和河流边缘, 典型的方法有早期的基于微分算子的如 Canny 和 Sobel 算子等, 这类方法具有算法简单、速

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(60971128, 60672126, 60673097); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA12Z136)。

**收稿日期:** 2009-07-09; **改回日期:** 2009-12-01

**第一作者简介:** 侯彪(1974—), 男, 教授。西安电子科技大学电路与系统专业硕士生导师, IEEE 会员, 教育部创新团队骨干成员。2003 年于西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室获电路与系统工学博士学位。主要研究方向为多尺度几何分析、小波分析、SAR 图像理解与解译等。E-mail: avcodec@163.com。

度快等特点,但为获得连续边缘,需要复杂的后处理方法来实现;后来发展的边界追踪法<sup>[1]</sup>和 Markovian 分割法<sup>[2]</sup>等,速度比较慢,检测效果也不理想;之后的 Snake 算法<sup>[3]</sup>,由于其抗噪能力差,很难处理轮廓曲线分离或合并的情况,因此不能直接应用于边界细节复杂的 SAR 图像水域检测。近年来,小波变换由于其时频分析的优越性和多尺度性,也较多地应用于海岸线<sup>[4]</sup>和河流<sup>[5]</sup>的检测;随着交叉学科的发展,一些新的方法如基于人类视皮层和神经元的边缘检测方法<sup>[6]</sup>等也为 SAR 图像边缘检测提供了新思路。

本文对 Guo 和 Labate 提出的 Shearlet 变换<sup>[7]</sup>——一种对图像边缘精确、有效表示的工具进行了改进,提高了其对图像中曲线检测的完整性、精确性以及噪声的抑制能力。利用改进变换,通过模糊 C 均值(FCM)和 Snake 模型等方法,对 SAR 图像水域边缘进行了检测。实验结果表明,该算法能有效克服 SAR 图像中斑点噪声影响,对图像中边缘的方向和位置均能较精确地检测和定位。

## 1 Shearlet 变换

Guo 和 Labate 通过构造一组各向异性的小波基,提出了 Shearlet 变换<sup>[7]</sup>。在  $n = 2$  时,连续 Shearlet 变换定义为如下的映射:

$$SH_{\varphi}f(a, s, t) = \langle f, \varphi_{a, s, t} \rangle \quad (1)$$

其中  $a > 0$  为尺度参数,  $s \in \mathbf{R}$  为剪切参数,  $t \in \mathbf{R}^2$  为平移参数, 分析元素  $\varphi_{a, s, t}(x) = |\det \mathbf{M}_{as}|^{-\frac{1}{2}} \times$

$\varphi(\mathbf{M}_{as}^{-1}(x - t))$  称为 Shearlets,  $\mathbf{M}_{as} = \begin{pmatrix} a & s \\ 0 & \sqrt{a} \end{pmatrix}$ 。而

$\mathbf{M}_{as}$  可以写成一个剪切矩阵  $\mathbf{B}_s = \begin{pmatrix} 1 & -s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  和一个各

向异性扩张矩阵  $\mathbf{A}_a = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{pmatrix}$  的乘积, 即  $\mathbf{M}_{as} =$

$\mathbf{B}_s \mathbf{A}_a$ 。通过扩张矩阵  $\mathbf{A}_a$  的操作, 可以使 Shearlet 像小波一样进行多尺度分析, 而剪切矩阵  $\mathbf{B}_s$  的存在, 则使方向分析成为可能。对任意的  $f \in L^2(\mathbf{R}^2)$ , 可由下式完全重构:

$$f = \int_{\mathbf{R}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \langle f, \varphi_{a, s, t} \rangle \varphi_{a, s, t} \frac{da}{a^3} ds dt \quad (2)$$

Shearlet 及其变换有如下 3 个优点: 1) 对  $C^2$  中的函数, Shearlet 可产生最优的逼近<sup>[7]</sup>; 2) Shearlet 由

于定义在 Cartesian 域, 通过剪切变换获得了各种各样的方向, 因此它对剪切操作的方向不受限制, 可在更多的方向上分析图像; 3) Shearlet 逆变换仅需要剪切滤波器的简单合成而不是方向滤波器的逆向变换, 具有简单快速的离散化实现形式。

通过对尺度参数  $a$  和剪切参数  $s$  进行离散化, 可实现离散 Shearlet 变换<sup>[8]</sup>。离散 Shearlet 的局部化特性非常好, 基函数的支撑区域满足抛物线尺度化, 随着尺度的变化, 可精确描述函数的奇异性特征<sup>[8-9]</sup>。

## 2 离散 Shearlet 变换及其改进

文献[10]的 Shearlet 变换级联(Cascade)算法中: 首先用二进小波对图像完成多尺度的剖分, 然后对剖分后的高频系数矩阵通过方向滤波器组的方向滤波来求得 Shearlet 分解系数。从小波分析理论中我们知道, 对于二进小波, 其为两方向小波, 定义为

$$\begin{cases} \psi^1(x, y) = \phi(x)\psi(y) \\ \psi^2(x, y) = \psi(x)\phi(y) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\psi(\cdot)$  为 1 维小波函数,  $\phi(\cdot)$  为尺度函数。 $\psi^1, \psi^2$  可在不同的方向上提取图像的细节, 即用  $\psi^1$  和  $\psi^2$  计算出的小波系数分别在水平和垂直边缘上取得极大值, 分别提取图像的水平与垂直特征。方向滤波器组是一些严格定义的带通滤波器, 通过对图像进行方向滤波, 可以在不同的频带和方向上来分析和研究图像。

在实际中, 特别是 SAR 图像中, 由于纹理信息特别丰富, 线状目标错综复杂, 二进小波不能很好地对斜向曲线进行表示, 则之后在此基础上的方向滤波也会受其局限而影响 Shearlet 的检测能力。因此, 引入平稳小波分解来克服二进小波分解在图像分析中遇到的问题。平稳小波在保持二进小波对图像中水平和垂直边缘特征较好表示的基础上, 增加了一个对角特征的分析, 成为一个三方向小波, 其定义为

$$\begin{cases} \psi^1(x, y) = \phi(x)\psi(y) \\ \psi^2(x, y) = \psi(x)\phi(y) \\ \psi^3(x, y) = \psi(x)\psi(y) \end{cases} \quad (4)$$

小波  $\psi^3$  能在角点上产生大的系数, 提取对角边缘。

因此, 通过充分利用平稳小波和方向滤波器组各自的优点, 将平稳小波变换与方向滤波器组结合, 提出了基于平稳小波变换的 Shearlet 变换。

本文提出的改进变换也是具有迭代结构的多尺度几何变换,优点是:1)平稳小波变换不仅具有平移不变性,而且其在高频部分相比于二进小波分解多出的斜向系数矩阵增大了信息的冗余度,使每个子带中的信息相互补充,有利于检测出图像中较多的几何信息;2)平稳小波和方向滤波都具有完全重构的特性,所以本文构造的 Shearlet 变换满足完全重构特性。改进后的 Shearlet 变换不仅保持了原变换的多方向、多尺度和良好的时频局部性等优点,而且对图像边缘更具分析能力,能够较好地捕捉和跟踪图像中重要的几何特征。下面给出了改进 Shearlet 变换的 Cascade 算法:

1) 对图像做平稳小波分解:

$$S_0 u = u$$

$$S_j u = S_{j-1} u * (H_j, H_j), j \geq 1, u \in l^2(Z_N^2)$$

$$V_j^{(0)} u = S_j u * (G_j, \delta)$$

$$V_j^{(1)} u = S_j u * (\delta, G_j)$$

$$V_j^{(2)} u = S_j u * (G_j, G_j)$$

2) 对平稳小波分解的高频系数通过方向滤波,得到改进的离散 Shearlet 分解系数:

$$SH^{(d)} u[j, m, k] = V_j^{(d)} u * w_{j,m}^{(d)}[k]$$

式中,  $j \geq 0$ ,  $-2^j \leq m \leq 2^j - 1$ ,  $k \in \mathbf{R}^2$ ,  $d = 0, 1, 2$ ,  $\delta = \{\delta_n\}$  为 Dirac 滤波器,  $w_{j,m}^{(d)}$  为第  $j$  层  $m$  方向上的方向滤波器<sup>[10]</sup>,  $H_j$  和  $G_j$  分别为平稳小波变换的低通和高通滤波器,  $V_j^{(2)}$  为平稳小波分解第  $j$  层的斜向系数矩阵,  $V_j^{(1)}$  为垂直像,  $V_j^{(0)}$  为水平像,  $S_j u$  为模糊像。  $Z_N^2$  表示 2 维实数平面  $Z^2$  中的整数格。对于重构,仅通过剪切滤波器的合成和平稳小波的逆变换即可完成。

为了验证改进 Shearlet 变换在线检测方面的性能,采用多尺度检测算法中的一种通用简易的模极大值算法——只执行算法 1(见第 3 节)的第 1)~3)步对其进行测试,并通过 Pratt's Figure of Merit (FOM)<sup>[11]</sup> 函数来进行评价。FOM 的取值为 0~1 之间的任意数, FOM 值越接近于 1 证明检测到的边缘越多越精确; FOM 值越趋近于 0 证明检测到的边缘点越少越不精确。表 1 是对 1 幅通过分析已知边缘点的图像(如图 1 所示)在不同噪声下作边缘检测的 FOM 值,其中改进 Shearlet 和文献[10]的 Shearlet 采用相同的检测方法, Wavelet<sup>[4]</sup> 为小波模极大值方法, Prewitt 和 Sobel 为 Matlab 工具箱中自带的函数,参数设置为默认值。从表中可以看出,改

进 Shearlet 变换的边缘检测能力不仅比其他几个算子要完全、精确,而且抑噪能力也进一步提高。

表 1 图 1 在不同噪声下的 FOM 值

Tab. 1 The pratt's FOM of figure 1 under different noise

PSNR/dB	改进 Shearlet	文献 [10] 的 Shearlet	Wavelet	Prewitt	Sobel
28.12	<b>0.959 7</b>	0.955 5	0.940 3	0.926 6	0.939 9
24.63	<b>0.956 9</b>	0.954 1	0.937 9	0.834 8	0.808 2
22.11	<b>0.953 4</b>	0.950 2	0.937 1	0.750 9	0.736 1
20.19	<b>0.950 4</b>	0.941 0	0.935 0	0.679 3	0.673 2
18.61	<b>0.945 6</b>	0.916 9	0.901 8	0.636 6	0.614 3

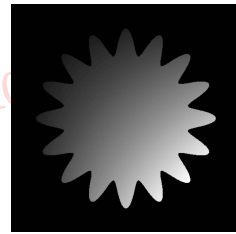


图 1 边缘已知的图像

Fig. 1 The image of known edges

### 3 基于改进 Shearlet 变换的 SAR 图像水域边缘检测

由以上分析可知,改进 Shearlet 变换在边缘检测方面具有较好的性能,将其应用于 SAR 图像进行水域边缘检测。通过实验结果发现:对于简单的 SAR 图像,简易的改进 Shearlet 变换模极大值算法即可获得相比其他方法较好的检测结果。如图 2(a)为一幅 Washington DC 某区的 SAR 图像,分别采用 Sobel 算子、Canny 算子、Wavelet<sup>[4]</sup> 模极大值、Shearlet<sup>[10]</sup> 模极大值和改进 Shearlet 模极大值进行检测,各种方法检测结果如图 2(b)~(f)所示。可以看出,改进后的 Shearlet 变换不仅能精确地检测出水域的边缘,而且对图 2(a)中的桥梁(对应于图 2(f)中椭圆部分)边缘也可以清晰地检测到。

但对于复杂的 SAR 图像,尽管改进 Shearlet 的方向敏感性和冗余性使其可以检测到比 Wavelet<sup>[4]</sup> 和 Shearlet<sup>[10]</sup> 更完全且精确的边缘,但是当检测水域边缘时会不可避免的检测到其他非水域的边缘,而且由于 Shearlet 边缘检测本身是一种多尺度检测方法,因此检测的边缘会不可避免的出现断裂、不连续。通过分析发现,本文所研究的 SAR 图像的水域

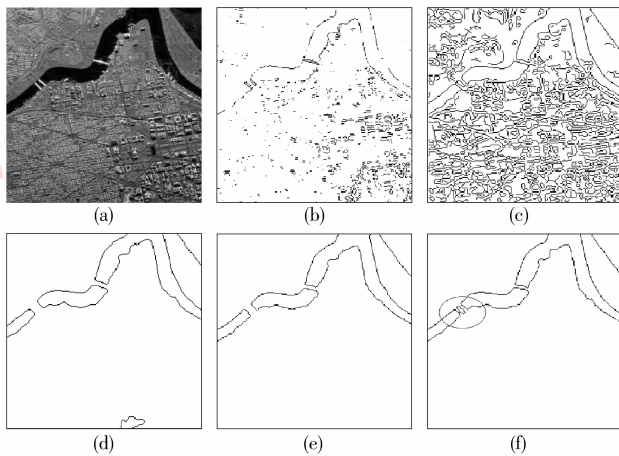


图 2 某 SAR 图像水域边缘检测

Fig. 2 Results of water edges detection for a SAR image

部分具有如下 3 个特点:1) 像素点灰度值较低, 方差较小;2) 和陆地的对比度比较明显;3) 有较强的连通性。因此, 采用改进的 Shearlet 变换, 结合 FCM 方法和 Snake 模型, 提出了一种 SAR 图像水域边缘检测算法, 具体步骤如下:

#### 算法 1 SAR 图像水域边缘检测算法

1) 对输入图像在第  $j$  层计算改进 Shearlet 变换系数  $SH^{(d)}u[j, m, k]$ ,  $d=0, 1, 2$ ;

2) 按照式(3)计算第  $j$  层候选边缘点  $e_j u$ ;

$$e_j^2 u[k] = \sum_{j=0,1,2} \left( \sum_m SH^j u[j, m, k] \right)^2 \quad (5)$$

3) 对候选边缘点  $e_j u$  进行极大值抑制和双阈值选择;

4) 用 FCM 对原图像进行聚类, 在此基础上分割出水域边缘区域。对在此区域内检测出的边缘予以保留并去掉较短的边缘, 区域外的边缘丢弃;

5) 后处理, 即用 Snake 模型最小能量函数<sup>[3]</sup>准则的邻域边界跟踪<sup>[12]</sup>连线法来连接断裂的边缘并去掉一些短边缘和小区域, 得到最终感兴趣边缘。

对于算法中的第 4) 步, 由于本文所研究的 SAR 图像中水域和陆地特征的差异性, 当对图像用 FCM 进行两类的聚类后, 基本上会将二者分割出来。本文感兴趣的是水域边缘, 即水陆交界线, 因此对聚类后两类区域交界处的小区域进行提取, 通过判断, 对属于此区域的边界点予以保留, 否则丢弃。如图 3 所示, FCM 聚类后会将图中水域(深灰色区域)和陆地(白色区域)分开, 接着提取包含二者边界(黑色曲线)的小区域(浅灰色窄带区域), 后续的步骤只在此区域内进行。通过这一步的处理, 使检测的范

围缩小、目标明确, 去除了非水域边缘的干扰, 然而在处理速度上会有所影响, 本文算法的运算时间主要花费在第 4) 步上。

对于算法中的第 5) 步, 尽管 Shearlet 变换检测出的边缘有断裂、不连续的情况, 但已经检测出绝大部分的边缘, 断裂边缘处只占较少的像素点(如图 4 和图 5 中的 (g) (h) (i) 所示), 因此, 本文的连线不像 Snake 模型那样需要多次迭代, 而只需在一个小的邻域(本文为 8 邻域)内按照 Snake 模型中的能量最小准则进行跟踪连线即可, 在很大程度上减小了运算量。

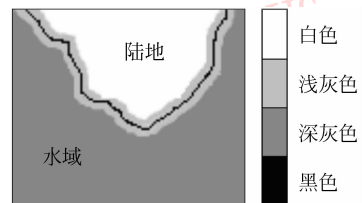


图 3 FCM 聚类后提取的水域边缘区域示意图

Fig. 3 Schematic of waters edge region extraction using FCM

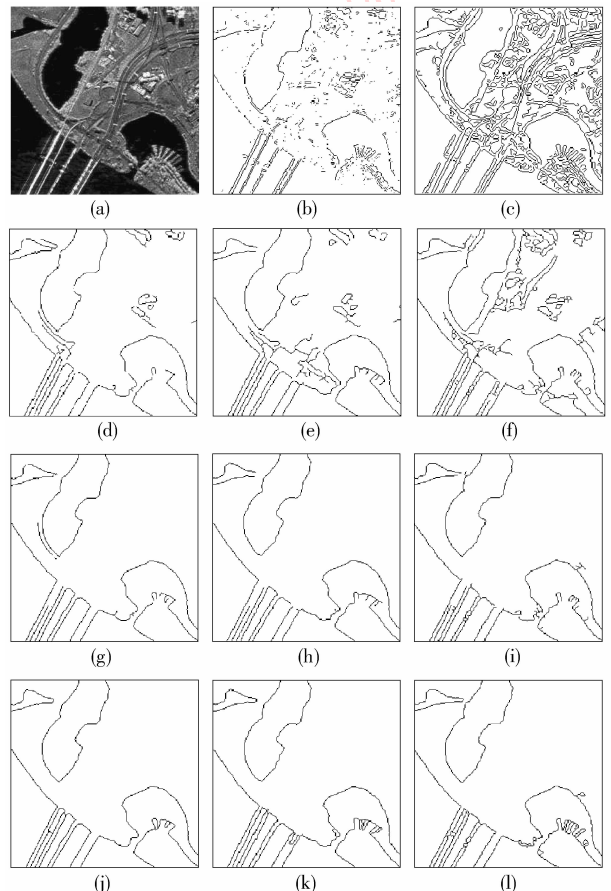


图 4 某 SAR 图像水域边缘检测结果

Fig. 4 Results of waters edge detection for a SAR image

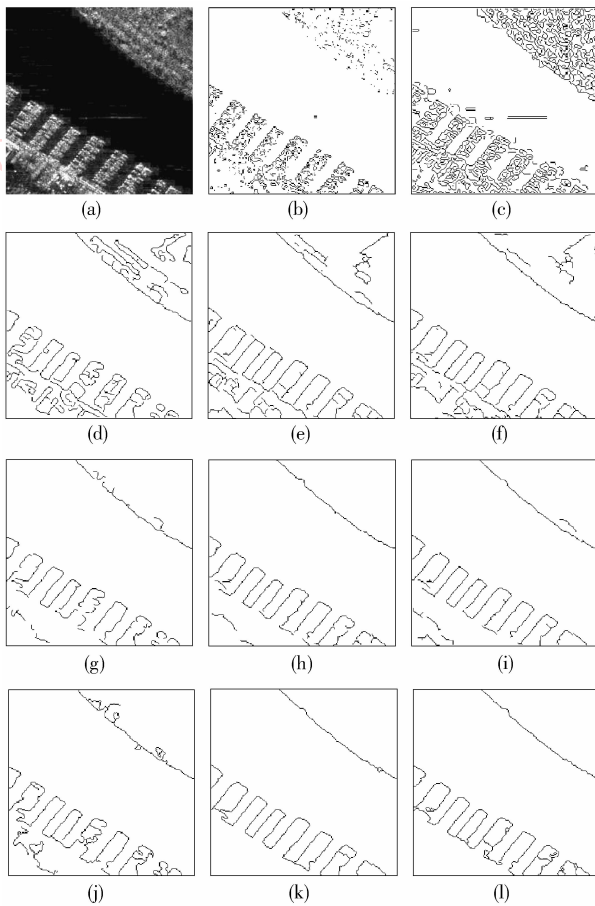


图 5 某 SAR 图像水域边缘检测结果

Fig. 5 Results of waters edge detection for a SAR image

## 4 实验结果及分析

为了验证本文算法的有效性,选取了 3 幅大小为  $256 \times 256$  的测试 SAR 图像,如图 4(a)、图 5(a)和图 6(a)所示。分别采用 Sobel 算子、Canny 算子、Wavelet<sup>[4]</sup>、Shearlet<sup>[10]</sup>和改进的 Shearlet 方法进行检测。

改进 Shearlet 方法采用算法 1; Wavelet<sup>[4]</sup>、Shearlet<sup>[10]</sup>采用类似算法(Wavelet<sup>[4]</sup>和 Shearlet<sup>[10]</sup>模极大值之后再采用算法 1 的步骤 4)~6)处理); Sobel 算子和 Canny 算子因初次检测的目标太杂乱,没有对其进行相应的处理。

参数设置如下:Shearlet<sup>[10]</sup>变换和改进 Shearlet 变换分解两层、窗口大小  $16 \times 16$  像素、方向滤波为 10 个方向,双阈值对图 4、图 5 和图 6 分别取  $(0.55, 5)$ 、 $(0.5, 5)$  和  $(0.6, 5.5)$ 。小波分解由于在第 2 层时仍然会有很大的噪声干扰,因此取第 3 层,阈值

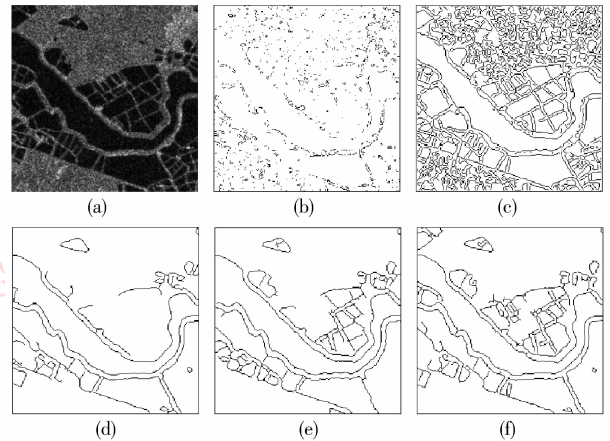


图 6 某 SAR 图像水域边缘检测结果

Fig. 6 Results of waters edge detection for a SAR image

和前面的一致。对多尺度分析:尺度越小,噪声干扰越强,检测到的边缘多,但虚假边缘多、干扰大;尺度越大,噪声干扰越小,检测到的边缘少,基本上为真实边缘,但检测到的边缘位置不精确;滤波窗口越大,运算速度越慢,窗口越小,图像区域特征不能很好地体现。

图 4、图 5 中的 (b)(c) 为 Sobel 算子和 Canny 算子检测的结果。由于 SAR 图像强烈的斑点噪声影响,使 Sobel 算子检测出的边缘短小、不连续,而 Canny 算子检测出的边缘则太繁多,不能得到期望的目标。

图 4、图 5 中的 (d)(e)(f) 分别为 Wavelet<sup>[4]</sup> 模极大值、Shearlet<sup>[10]</sup> 模极大值和改进 Shearlet 模极大值方法检测的结果。从图中可以看出,相对于 Sobel 和 Canny 算子, Wavelet<sup>[4]</sup>、Shearlet<sup>[10]</sup> 及改进 Shearlet 方法由于多尺度分析的原因,对 SAR 图像中的斑点噪声得到了较好的抑制,使水体的轮廓均能较好地检测。而改进 Shearlet 方法检测出的边缘连续性更好,边缘也更精细。

图 4、图 5 中的 (g)(h)(i) 为未经后处理的 Wavelet<sup>[4]</sup>、Shearlet<sup>[10]</sup> 和改进 Shearlet 方法所检测到的水域边缘结果。从图中可以看出,经过算法 1 的第 4) 之后,去掉了干扰的目标,使期望的目标得到了较好的保留。

图 4、图 5 中的 (j)(k)(l) 为经过后处理的 Wavelet<sup>[4]</sup>、Shearlet<sup>[10]</sup> 和改进 Shearlet 方法所检测到的水域边缘结果。从图中可以看出,经后处理之后,使得原来一些断裂的边缘得到较好的连接,边缘也更加完整。

图 6 中的 (b) (c) 为 Sobel 算子和 Canny 算子检测的结果, (d) (e) (f) 为 Wavelet<sup>[4]</sup>、Shearlet<sup>[10]</sup> 和改进 Shearlet 方法所检测到的最终水域边缘结果。从中也可以得到以上相似的结论。

图 7 给出了 3 组实验中本文算法所检测的边缘图与原图的叠加结果。

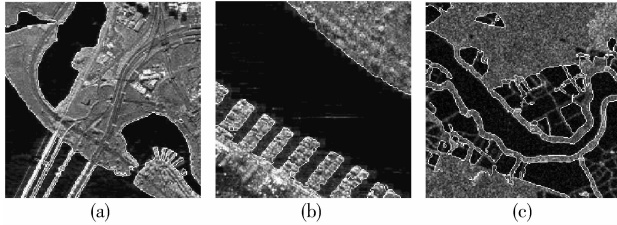


图 7 本文算法检测结果与原图叠加

Fig. 7 Edge detection results by the proposed method is added to original images

从图 4、图 5 和图 6 的 3 组实验可以看出,一方面由于改进 Shearlet 变换的方向敏感性及冗余性,在水域边缘的检测中相比 Wavelet<sup>[4]</sup> 变换和 Shearlet<sup>[10]</sup> 变换可以检测出更多、更微弱的目标;另一方面通过边缘区域的提取,使目标区域和检测范围缩小,减少了许多不必要的干扰,便于快速准确地检测到感兴趣目标。在整个算法过程中,改进 Shearlet 变换的时间复杂度基本上与传统 Shearlet 变换相同,主要的时间消耗在步骤 4) 中的分割水域区域上,因此更好的水域区域分割算法将给本算法带来算法复杂度上的优势。

## 5 结 论

作为一种新的图像多尺度几何分析工具,改进 Shearlet 变换具有多尺度、多方向、良好的空域和频域局部化等特性;相对于其他多尺度几何分析工具,它理论性强,算法实现简单,变换的时间复杂度也较低,在图像处理方面应用比较广阔。

在改进变换的基础上,针对含水域的 SAR 图像提出了一种水域边缘检测算法,通过 FCM 分割出水域边缘区域,丢弃区域外的边缘,对区域内的边缘通过基于 Snake 模型能量最小化函数准则进行邻域跟踪连接,从而得到水域边缘。对比实验结果表明,本文算法可以有效地对 SAR 图像水域边缘进行检测,

同时也能较地克服斑点噪声对 SAR 图像水域边缘的影响。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Jongsen L, Jurkevich I. Coastline detection and tracing in SAR image [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4): 662-668.
- [ 2 ] Descombes X, Moctezuma M, Maitre H, et al. Coastline detection by a markovian segmentation on SAR images [ J ]. Signal Processing, 1996, 1(55): 123-132.
- [ 3 ] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour models. international journal of computer vision [ J ]. 1988, 1(4): 321-331.
- [ 4 ] Niedermeier A, Romaneeben E. Detection of coastlines in SAR images using wavelet methods [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2270-2281.
- [ 5 ] Hu Zhenglei, Sun Jinping, Yuan Yunneng, et al. River detection in SAR images based on edge extraction in wavelet domain and ridge tracing technique. journal of electronics & information technology [ J ]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 39(3): 524-527. [ 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. 电子与信息学报, 2007, 39(3): 524-527. ]
- [ 6 ] Sang Nong, Tang Qiling, Zhang Tianxu. Contour detection based on inhibition of primary visual cortex [ J ]. Infrared Millim. Waves, 2007, 26(16): 307-310. [ 桑农, 唐奇伶, 张天序. 基于初级视皮层抑制的轮廓检测方法. 红外与毫米波学报, 2007, 26(16): 307-310. ]
- [ 7 ] Labate D, Lim W, Kutyniok G, et al. Sparse multidimensional representation using shearlets [ C ]//Proceedings of SPIE conference on Wavelet Applications in Singal and Image Processing XI. San Diego, USA: SPIE, 2005, 5914: 254-262.
- [ 8 ] Easley G R, Labate D, Lim W. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform [ J ]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2008, 1(25): 25-46.
- [ 9 ] Sheng Y, Labate D, Easley G R, et al. Edge detection and processing using shearlets [ C ]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. San Diego, USA: IEEE Signal Processing Society, 2008: 1148-1151.
- [ 10 ] Sheng Y, Labate D, Easley G R. A shearlet approach to edge analysis and detection [ J ]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(5): 929-941.
- [ 11 ] Pratt W K. Digital Image Processing [ M ]. New York: Wiley-InterScience Publications, 1978: 497-499.
- [ 12 ] Yao Min. Digital Image Processing [ M ]. Beijing: China Machine Press, 2006: 233-235. [ 姚敏. 数字图像处理 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 233-235. ]