

# 侧扫声纳图像的 NSCT 域模极大值边缘检测

王 敏<sup>1</sup>, 李庆武<sup>1,2</sup>, 程晓轩<sup>1</sup>

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 常州 213022; 2. 常州市传感网与环境感知重点实验室, 江苏 常州 213022)

**摘 要:** 侧扫声纳图像边缘检测较困难, 为此, 提出一种针对该图像特点的多尺度边缘检测方法。对侧扫声纳图像进行非下采样 Contourlet 变换(NSCT)分解, 根据斑点噪声在 NSCT 域分布特点, 进行局部自适应去噪。通过各方向子带沿边缘方向的插值和非极大值抑制寻找模极大值点。通过类内方差最小化法自适应确定阈值, 由阈值处理得到各子带的边缘。经边缘融合实现完整的边缘图。实验结果表明, 该方法具有边缘检测完整、定位准确、伪边缘点少等优点。

**关键词:** 侧扫声纳图像; 非下采样 Contourlet 变换域; 去噪; 模极大值; 边缘融合; 边缘检测

## NSCT Domain Modulus Maximum Edge Detection in Side-scan Sonar Image

WANG Min<sup>1</sup>, LI Qing-wu<sup>1,2</sup>, CHENG Xiao-xuan<sup>1</sup>

(1. College of Computer and Information, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environmental Sensing, Changzhou 213022, China)

**【Abstract】** To solve the problem of the difficulty in side-scan sonar image edge detection, a multi-scale edge detect method based on the characteristic of side-scan sonar image is proposed. Side-scan sonar image is decomposed in Non Sampling Contourlet Transform(NSCT) domain and image is denoised locally and adaptively according to the characteristic of speckle noise in NSCT domain. Maximum modulus points are found by interpolation in the direction of edge and non-maximum suppression. The threshold is automatically determined based on minimum interclass variance algorithm and the edge of each subband is acquired by thresholding. The binary edge map is obtained by edge fusing. Edge detection results show that the proposed method has the advantages of edge integrity, positioning accuracy and fewer false edge points.

**【Key words】** side-scan sonar image; Non Sampling Contourlet Transform(NSCT) domain; denoising; modulus maximum; edge fusion; edge detection

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.24.069

### 1 概述

近年来, 由于海洋开发和水下目标探测等国民经济的重大需求, 使得侧扫声纳成像技术得到广泛应用。侧扫声纳设备工作时, 其换能器发射的声波按球面波方式向下传播, 碰到水中目标或水底介质产生散射, 各散射回波信号在接收端叠加构成强混响信号<sup>[1]</sup>, 常常导致侧扫声纳图像斑点噪声强、目标边缘模糊, 给其边缘检测等图像处理造成困难。

目前, 专门针对侧扫声纳图像特点的边缘检测方法还少有报道, 多采用 Robert、Sobel、Canny 及小波模极大值法等光学图像边缘检测的已有算法。其中, Robert 算子和 Sobel 算子边缘检测速度快, 但得到的往往是断续的、不完整的结构信息, 且容易受噪声干扰而出现伪边缘<sup>[2]</sup>。Canny 算子对高斯噪声具有良好的抗噪性能, 并且因为具有边缘连接功能可以得到完整的边缘图像。然而, 直接将 Canny 算子应用于声纳图像边缘提取存在斑点噪声抑制效果较差与边缘定位不准的问题。基于小波理论的小波模极大值边缘检测方法, 利用小波时频分析的优越性, 检测图像在各个尺度下的边界信息, 获得多尺度分析下的图像边缘。然而, 小波点奇异性有限的方向性使其并不适合描述多方向的线奇异, 检测的边缘结果通常并不理想。近年来, 在小波变换基础上发展的多尺度几何分析理论, 不仅继承了小波变换的多分辨率时频分析特性, 而且拥有良好的各向异性特征, 能够对图像进行更好的稀疏表示, 因此, 可以近似最优地逼近任意含线性奇

异的二维分段光滑函数。其中, 非下采样 Contourlet 变换(Non Sampling Contourlet Transform, NSCT)<sup>[3]</sup>通过使用迭代非下采样滤波器组获得了平移不变、多分辨、多方向的图像最优表示能力。因此, NSCT 具有更好的边缘捕捉和表达能力, 将其应用于图像去噪和边缘检测等领域能够获得很好的效果。

基于以上分析, 本文以 NSCT 为基础, 针对侧扫声纳图像的特点, 借鉴小波模极大值法, 提出一种 NSCT 域多尺度边缘检测方法。针对侧扫声纳图像斑点噪声强的特点, 在 NSCT 域进行局部自适应降噪, NSCT 的高维奇异性优势使其能够在有效去噪的同时保护边缘, 为完整准确地检测边缘奠定基础。采用 NSCT 域的多尺度模极大方法寻找图像在各个尺度各个方向子带的模极大值点, NSCT 的平移不变性优势有利于边缘准确定位。由于各子带系数中的元素与图像空间域中的像素是一一对应关系, 因此无需进行 NSCT 逆变换, 通过多尺度边缘融合即可得到完整的边缘图。

### 2 侧扫声纳图像的边缘检测方法原理

本文提出的侧扫声纳图像边缘检测方法具体步骤如图 1

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972101); 常州市科技支撑计划基金资助项目(CE20110094)

**作者简介:** 王 敏(1986—), 女, 硕士研究生, 主研方向: 声纳图像处理; 李庆武, 教授、博士、博士生导师; 程晓轩, 硕士研究生

**收稿日期:** 2011-06-10 E-mail: liqw@hhuc.edu.cn

所示。首先将待检测的侧扫声纳图像进行 NSCT 分解，在 NSCT 域进行针对侧扫声纳图像噪声特点的局部自适应降噪，为后期处理打下好的基础；再进行 NSCT 域多尺度模板大值点检测，得到各尺度各方向子带的模板大值点；然后，借鉴文献[4]的类内方差最小化方法，自适应确定各子带阈值，阈值处理后得到图像各尺度各方向子带的边缘图；最后进行尺度内和尺度间的多尺度边缘融合，得到最终精确的单像素宽边缘图。

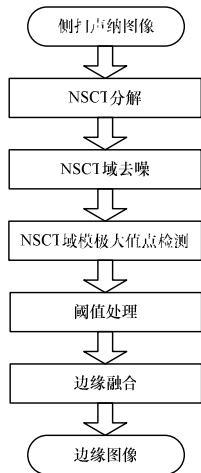


图1 具体方法步骤

### 3 侧扫声纳图像 NSCT 域去噪

对侧扫声纳而言，主要考虑由海底介质散射形成的强海底混响，可用瑞利分布乘性噪声模型描述声纳图像的斑点噪声<sup>[1]</sup>：

$$I = RZ \tag{1}$$

其中， $I$  为含斑信号； $R$  为真实信号； $Z$  为单位均值的时移瑞利分布斑点噪声随机变量。

对式(1)取对数变换，则可将乘性噪声转化为加性噪声。记  $n = \ln Z$ ，则  $n$  近似为瑞利分布。

对于代表信号的 NSCT 变换域系数的统计模型，本文采用零均值高斯分布模型近似刻画信号的 NSCT 系数分布，通过求解可得到去噪后信号的 NSCT 系数估计值<sup>[5]</sup>：

$$\hat{x} = \text{sign}(c) \cdot \left( |c| - \frac{\alpha^2 |c| + \sqrt{\alpha^4 c^2 + 4\alpha^4 \sigma_x^2 + 4\alpha^2 \sigma_x^4}}{2(\alpha^2 + \sigma_x^2)} \right) \tag{2}$$

通过计算基于方差的一致性测度自适应确定邻域窗口大小，避免固定大小的窗口难于在噪声去除和系数“过扼杀”之间保持平衡的问题。

### 4 NSCT 域模板大值点检测

设 NSCT 滤波器组 LP 分解级数为  $J$ ，那么在  $2^{-j}$  尺度上， $l$  级 DFB 分解获得的第  $k$  个方向子带系数矩阵  $H_{j,k}^{(l)}$  ( $0 \leq j \leq J$ ,  $0 \leq k \leq 2^l$ ) 包含  $\text{Arg } H_{j,k}^{(l)}$  方向的边缘信息，在  $H_{j,k}^{(l)}$  子带上沿与边缘方向相垂直的梯度方向检测出的局部模板大值点落在  $\text{Arg } H_{j,k}^{(l)}$  方向的边缘上。因此，NSCT 不像小波通过模的相位角确定边缘的梯度方向，各方向子带的系数矩阵已经包含有边缘的梯度方向信息。NSCT 模板大值边缘检测方法比小波模板大值边缘检测方法简化了许多。

每个模板大值点检测只需将其与所在梯度方向上相邻 2 个像素的模值进行比较检测。通常，将每个区域对应的梯度中线方向(即图 2 中箭头方向)认为是该子带系数的梯度方向。若沿着梯度方向上像素的模值均大于相邻 2 个像素的值，则将该点记为模板大值点；如不满足，则其为 0。

因为数字图像具有有限的分辨率，子带中每个点  $H_{j,k}^{(l)}$  仅被邻近的 8 个像素包围，同时子带方向具有对称性，只有 4 个方向的模值可以直接与它们的邻近点做比较，这并不是以描述图像的各个边缘方向。特别是当分解方向数为 16、32 时，只限于 4 个方向的模值比较就更不能满足需要了。为了与任意方向进行模值比较，本文采用基于插值的方法。

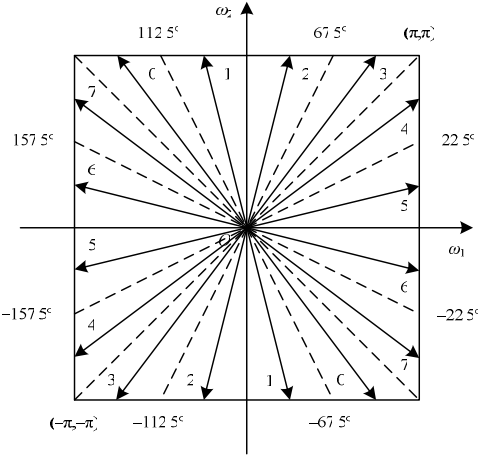


图2 方向子带的等效梯度

### 5 阈值处理与多尺度边缘融合

借鉴类内方差最小化方法<sup>[4]</sup>，自适应确定各子带阈值，对检测得到的模板大值点进行阈值处理即可得到各尺度边缘图。

边缘信息包含在图像的不同尺度中。小尺度时，图像的边缘细节信息较为丰富，边缘定位精度高，但易受到噪声干扰；大尺度时，图像的边缘稳定，可以很好地体现出图像整体轮廓，抗噪声性能好，但定位精度差。将各个尺度的边缘信息融合起来，通过尺度内和尺度间的融合，利用小尺度时的边缘信息作为大尺度时边缘信息的补偿修正，可得到理想的图像边缘。

首先，将同一尺度不同方向的边缘用“或”规则融合得到各高频边缘图像，高频图像中会出现双边现象，采用形态学的膨胀处理后再细化即可得到单像素宽的高频图像；然后，以低频的边缘图像为基准，下一尺度边缘图像中的边缘点如果在低频边缘点的四邻域或八邻域中，则将其添加到边缘图像中，依此逐层类推；最后，细化得到最终的边缘图像。

### 6 实验结果与分析

为全面准确地评价本文方法的性能，使用了模拟声纳图像及实际声纳图像进行边缘提取实验，并同 Sobel 算子、Canny 算子、小波模板大等经典边缘检测方法进行对比。本文方法的 NSCT 分解层数取为 3，从低分辨率层到高分辨率层，方向分解数依次取为 4、8 和 16，尺度分解采用“9-7”滤波器，方向分解采用“dmaxflat”滤波器。

首先对模拟声纳图像进行边缘提取实验以获得定量比较结果。实验所用的模拟声纳图像(图 3(b))由合成的无噪参考图像(图 3(a))采用文献[6]的方法添加瑞利分布的斑点噪声得到，其中包括多方向的边缘。依据误检边缘点数和边缘检测品质因数<sup>[7]</sup>等客观评价指标，结合主观视觉效果评价各种边缘检测方法的性能。其中，误检边缘点数为实际检测边缘点数减去有效检测边缘点数(与原图对应边缘点的距离不超过 1 像素的检测边缘点数目)。品质因数的定义式为：

$$R = \frac{1}{\max\{I_T, I_A\}} \sum_{i=1}^{I_T} \frac{1}{1 + ad^2} \tag{3}$$

其中,  $I_l$  和  $I_d$  分别表示理想和实际检测到的边缘像素点的数量;  $a$  是一比例常数, 通常取  $1/9$ ;  $d$  为实际边缘点到理想边缘点连线的垂直距离。该指标衡量边缘定位准确性, 越大代表定位越准确, 理想情况为 1。为了更客观地比较各种方法边缘定位的准确性, 本文计算  $R$  时未包括误检边缘点。各种方法对模拟声纳图像的边缘检测结果如图 3(c)~图 3(f)所示, 均为各种方法得到完整边缘的最佳提取结果。与图 3 相关的边缘检测定量指标如表 1 所示。

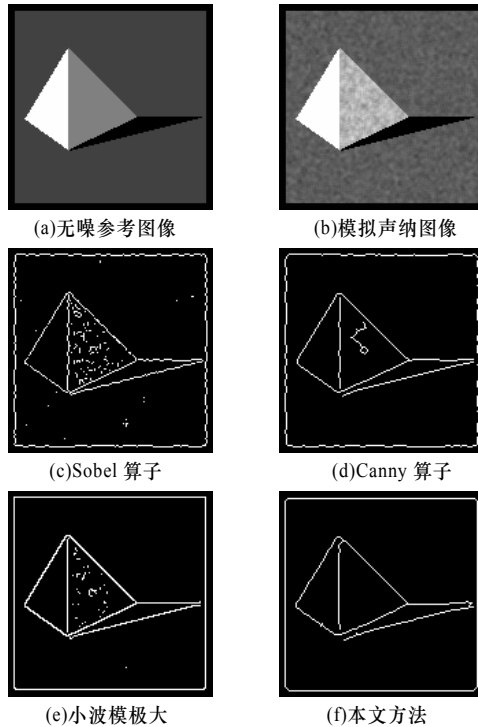


图 3 模拟声纳图像不同方法边缘提取效果

表 1 模拟侧扫声纳图像不同方法边缘提取结果的定量比较

比较项	Sobel 算子	Canny 算子	小波模极大	本文方法
误检边缘点数	157	38	66	5
品质因数 $R$	0.947 2	0.945 7	0.960 2	0.970 6

从图 3 可以明显看出: Sobel 算子由于没有去噪, 存在很多噪声点和边缘抖动现象; 由于高斯平滑的模糊特性, Canny 算子得到的各目标边缘大都存在定位抖动现象, 同时受到斑点噪声的影响, 存在多检边缘; 小波模极大边缘检测方法由于降噪效果仍不理想和缺乏弱边缘连接, 存在较多的孤立噪声点; 本文方法得到的边缘则最为完整和平直, 几乎没有定位抖动, 噪声点也非常少。

由表 1 可知: Sobel 算子误检边缘点数最多, 定位准确性最差; Canny 算子误检边缘点数较少, 但定位准确性较差; 小波模极大边缘检测方法定位准确性较好, 但误检边缘点数较多; 本文的 NSCT 域模极大值边缘检测方法的误检边缘点数最少, 定位准确性最好。

为进一步验证本文方法的效果, 对实际的侧扫声纳图像进行了边缘提取实验。图 4(a)是 RUDE 侧扫声纳在纽约港口杰斐逊附近扫描的海底失事飞机侧扫声纳图(左舷图像), 混响等干扰严重, 图像对比度低、噪声强、边缘模糊。各种方法的边缘检测结果如图 4(b)~图 4(e)所示。Sobel 算子得到的边缘破碎, 存在大量误检和漏检边缘; Canny 算子得到的边缘虽然较为完整连续, 但存在较多的多检边缘; 小波模极大边缘检测方法得到的边缘断续现象较明显, 噪声干扰点也较

多; 本文方法得到的边缘较使用 Canny 算子所得到的边缘更为连续和平滑, 误检与漏检边缘较少。

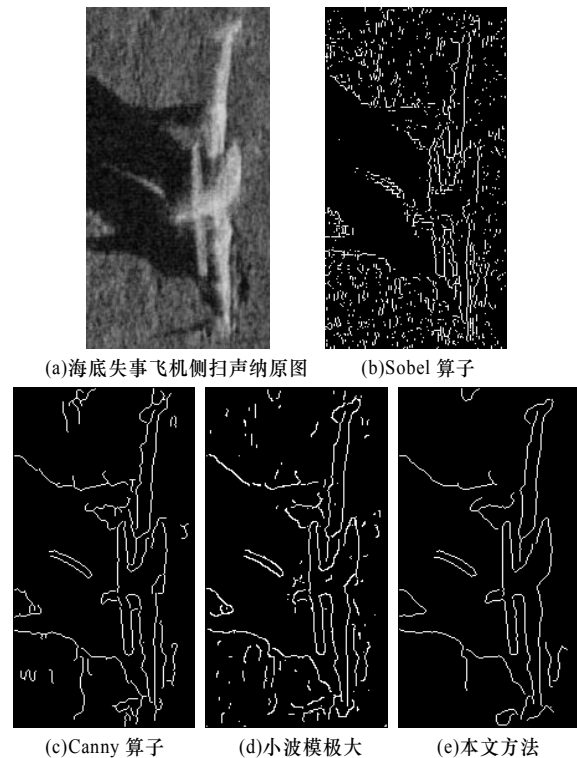


图 4 飞机侧扫声纳图像不同方法边缘提取效果

## 7 结束语

本文提出了一种侧扫声纳图像的 NSCT 域模极大值边缘检测方法。该方法通过 NSCT 分解、降噪、寻找模极大值点、阈值处理、边缘融合等步骤, 实现侧扫声纳图像的边缘检测。实验结果表明, 本文方法具有边缘检测完整、定位准确、伪边缘点较少等优点。另外, 本文方法相对比较复杂, 实时性不如已有的一些简单算法。但是计算机软硬件发展速度很快, 而且在侧扫声纳的很多应用场合对实时性要求并不高, 声纳数据现场采集后, 主要是进行后期分析处理。所以, 本文方法也有较大的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] Hellequin L, Boucher J M. Processing of High-frequency Multi-beam Echo Sounder Data for Seafloor Characterization[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2003, 28(1): 78-89.
- [2] 郭芳侠, 梁 娟, 王 晖. 基于模糊推理的噪声图像边缘检测[J]. 计算机工程, 2010, 36(15): 194-195.
- [3] Cunha L D, Zhou Jianping, Do M N. The Nonsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [4] 李 牧, 臧希喆, 闫继宏, 等. 基于类内方差最小化及模糊控制算法的小波边缘检测技术[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1741-1745.
- [5] 霍冠英, 李庆武, 王 敏, 等. Curvelet 域贝叶斯估计侧扫声纳图像降噪方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 32(1): 170-177.
- [6] Pizurica A, Philips W, Lemahieu I, et al. A Versatile Wavelet Domain Noise Filtration Technique for Medical Imaging[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(3): 323-331.
- [7] Lim D H. Robust Edge Detection in Noisy Images[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2006, 50(3): 803-812.

编辑 顾逸斐