

基于局部混合滤波的 SAR 图像边缘检测

刘帅奇* 胡绍海 肖扬 安永丽
(北京交通大学信息所 北京 100044)

摘要: 该文结合基于非下采样方向滤波-双树复小波变换(NonSubsampled Direction Filter Bank-Dual-Tree Complex Wavelet Transform, NSDFB-DTCWT)的局部混合滤波算法和 Dempster-Shafet (DS)证据理论提出一种基于局部混合滤波的 SAR 图像边缘检测算法。该算法首先对 SAR 图像进行局部混合滤波, 然后对不同尺度滤波图像使用指数加权均值比(Ratio Of Exponentially Weighted Averages, ROEWA)算子检测边缘的强度, 再使用 Canny 算子检测边缘的方向, 从而得到 SAR 图像各尺度上的边缘, 最后使用 DS 证据理论融合各尺度的边缘形成原始 SAR 图像的边缘。实验结果表明: 该文所提出的算法具有很好的边缘检测效果, 检测到的 SAR 图像的边缘定位准确和完整, 且伪边缘较少。

关键词: SAR 图像边缘检测; 指数加权均值比; 局部混合滤波; 非下采样滤波

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1120-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01198

SAR Image Edge Detection Based on Local Hybrid Filter

Liu Shuai-qi Hu Shao-hai Xiao Yang An Yong-li

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A SAR image detection method is proposed based on local hybrid filter. This method combines the advantages of both local hybrid filter based NonSubsampled Direction Filter Bank-Dual-Tree Complex Wavelet Transform (NSDFB-DTCWT) and Dempster-Shafet (DS) evidence theory. First, local hybrid filter is applied to SAR image. Then edge strength is got by using Ratio Of Exponentially Weighted Averages (ROEWA) operator and edge direction is got by using Canny operator at every scale from NSDFB-DTCWT. Finally, DS theory is used to fuse the edge in all scales to get the whole edge of the original SAR image. The experimental results demonstrate its effectiveness and superiority in terms of edge positioning accuracy and integrity, and it also has a fewer false edge points.

Key words: SAR Image edge detecting; Ratio Of Exponentially Weighted Averages (ROEWA); Local hybrid filter; Nonsubsampled filter

1 引言

SAR 图像的边缘检测是一门很重要的研究课题。学者们往往将传统图像的边缘检测算法应用到 SAR 图像边缘检测中, 例如 Sobel 算子和 Canny 算子^[1]。这在对 SAR 图像目标分析准确性要求不高时起了重要的作用, 但是随着 SAR 图像分辨率的提高和人们对其中目标分析精确度提高的要求, 各国学者提出了很多适用于 SAR 图像的边缘检测算法。其中主要包括单边缘模型, 多边缘模型, 多尺度多分辨率模型和一些仿生算法^[2-4]。仿生算法进行边缘检

测时耗时很长, 不适用于实时图像处理, 因此本文不对这些方法进行讨论。

传统的边缘检测算法, 例如 Canny 算子, 使用梯度算法对图像进行边缘检测, 虽然能得到很好的边缘方向性, 但是算法不具有恒虚警性且对噪声极为敏感, 易将噪声误检为边缘。而基于多尺度多分辨率的边缘检测算法是随着小波技术发展而逐渐流行起来的, 小波具有多尺度分析的特点可以较好地抑制相干斑保持图像的纹理信息, 因此常常与传统边缘提取算法或者形态学方法一起使用以完成高质量边缘检测^[5], 如文献[4]提出的结合小波分析和 ROA (Ratio Of Average) 算子的 SAR 图像边缘提取算法, 文献[6]提出的小波模糊中值滤波去噪然后使用 Sobel 算子检测 SAR 图像的边缘, 文献[7]提出的小波与形态学相结合图像边缘检测算法。由于

2012-09-14 收到, 2012-11-02 改回

国家自然科学基金(60572093), 北京市自然科学基金(4102050)和航空科学基金与航空电子系统射频综合仿真航空科技重点实验室(201120M5007)资助课题

*通信作者: 刘帅奇 shdkj-1918@163.com

Canny算法的理论性较强且易于实现计算速度较快,因此目前与其结合的基于多尺度多分辨率算法的边缘检测是研究的热点,例如文献[8]提出了Canny算子与小波变换相结合边缘检测算法。

但是小波变换不能最优地表示图像,为了“更优”地表示含线或者面奇异的2维图像,文献[9]提出了一种能更好地表征2维图像各向异性特征的表达式—Contourlet变换。于是各国学者结合Contourlet变换提出了很多新的边缘检测算法,例如文献[10]提出的基于Contourlet变换的Canny准则边缘提取方法,文献[11]提出了一种基于Contourlet模极大值边缘提取算法。但是,对图像进行Contourlet变换分解时会产生频率混淆和平移易变性^[12]。因此各国学者针对Contourlet变换的缺点做了大量的工作,其中最出名的是非下采样Contourlet^[12],因此非下采样Contourlet是如今应用最为广泛的多尺度多分辨率边缘检测的变换。例如文献[13]提出一种基于非下采样Contourlet域最小二乘去噪与人眼微动融合的SAR图像边缘提取算法。由此可以得知,基于多尺度多分辨率变换的边缘检测主要有3个步骤,一是如何平滑图像的噪声,另外一个则是使用什么样的边缘检测准则,再一个是各个尺度检测到的边缘的融合法则。

对于现有的基于非下采样的Contourlet变换SAR图像边缘检测算法,一是其平滑噪声的方法比较单一,且效果不佳;另一个是在选择边缘准则的时候并没有根据SAR图像的特点来选择具有恒虚警性的准则;最后是各尺度之间的融合法则比较简单。为此本文在这3个方面进行了改进,首先利用文献[14]提出的局部混合滤波进行噪声平滑,该方法利用非下采样方向滤波和双树复小波的优点提出了基于非下采样-双树复小波变换的局部混合滤波,并将其应用到SAR图像去噪中。由于在去噪过程中对高频分量和低频分量同时去噪,文献[14]的实验表明该平滑方法可以有效地去除相干斑噪声污染。单边缘模型比例边缘算子(Ratio Of Average, ROA)算子和多边缘模型ROEWA算子是根据相干斑噪声的统计特性而设计的克服了传统算法对相干斑噪声异常敏感的缺点具有恒虚警性的边缘检测算子。ROA和ROEWA提取边缘的方向性很差,而且即使使用Canny算法来改善ROA算子的方向性^[15],ROA仍不如ROEWA适用于复杂场景,因此文献[15]给出了一种ROEWA算子结合Gabor滤波的算法,利用Gabor算法来计算边缘的方向而用ROEWA计算边缘强度来提取边缘取得了很好的效果,但是,可以看到该文所述的算法的边缘方向计算复杂,计算效

率比较低。因此,本文提出一种基于Canny准则的ROEWA的SAR图像边缘检测算子。最后则是各个尺度上融合规则的选择,对于多数据融合方法来说,其中DS证据理论^[15,16]能够有效地表达推理过程中的不确定性,且推广形式简单,因而本文选用DS证据理论融合各尺度的边缘形成原始SAR图像的最终边缘。

2 局部混合滤波

Contourlet变换由两大部分组成:首先使用拉普拉斯金字塔(Laplacian Pyramid, LP)变换对图像进行多尺度分解以“捕获”奇异点,然后使用方向滤波器组(Direction Filter Bank, DFB)进行方向分解,即将分布在同方向上的奇异点合并为一个系数。因为该方法可以用类似线段的基结构逼近原图像,更有效地“捕获”了图像方向信息,因此一经提出就得到了广泛的应用,例如文献[10]和文献[11]的边缘检测。但是LP和DFB两个阶段全部采用了下采样操作,使得该变换产生频率混淆和缺乏平移不变性。针对该缺点,在文献[14]中我们提出了一种非下采样-双树复小波变换方法,该方法充分地结合了非下采样方向滤波器和双树复小波的优点,具有很好的方向性和移不变性。

2.1 非下采样-双树复小波变换

非下采样方向滤波器组以互补扇形滤波器为基本模块,对其进行相应的上采样和线性变换而得到具有不同方向支撑特性。而双树复小波变换对任何层分解其冗余度始终为4,且有关文献证明了双树滤波的形式,既保证了完全重构性,同时保留了复小波的良好性质,通过对小波函数的设计,该方法可以达到几乎平移不变的特性。因此,可以结合非下采样方向滤波器与双树复小波构造出新的具有平移不变性和方向选择性的抗混淆多尺度多分辨率变换。

文献[14]采用非下采样方向滤波器级联2维双树复小波的方法来构造NSDFB-DTCWT变换,即先对图像进行方向滤波,得到各个方向滤波系数子带,对各方向系数子带进行DTCWT变换,得到两个低频子带和6个高频的方向子带,重构算法的顺序正好相反。文献[14]证明了NSDFB-DTCWT变换不仅可以克服Contourlet变换频率混淆的缺点,而且具有平移不变性。因此其在进行图像平滑时可有效地抑制人造纹理的产生,改善图像的视觉效果。接下来本文就来简单地介绍一下基于NSDFB-DTCWT变换的局部混合滤波算法。

2.2 基于局部混合滤波的 SAR 图像噪声平滑

文献 [14] 提出了一种新的基于 NSDFB-DTCWT 变换的噪声平滑方法, 称之为局部混合滤波。该方法不同于传统的变换域图像平滑过程, 不采用通常使用的硬阈值和软阈值进行去噪。硬阈值和软阈值噪声平滑存在明显的缺陷, 最致命的是在估计图像平滑阈值的时候两者都需要信号的先验信息, 因此该方法提出了一种新的噪声平滑思路。

该方法认为图像的平滑去噪过程中不仅要变换域的高频系数做处理, 还要对变换域的低频系数做处理。图像经过 NSDFB-DTCWT 变换以后得到的高频子带信号与其他非下采样算法相比, 不仅具有足够的方向选择性, 且得到的低频子带信号至少要多出 6 个, 这种构造方式非常有益于对低频子带系数进行噪声平滑。且在对高频和低频子带系数进行平滑处理采用是一种不需要获取图像先验知识的主成分分析法 (PCA)。

一般在变换域处理相干斑噪声之前, 先将 SAR 图像进行对数化, 将相干噪声变成了高斯加性噪声, 从而利于在频域对图像噪声作进一步平滑。基于局部混合滤波 SAR 图像噪声平滑的具体的算法步骤如下 (详细参见文献 [14]):

(1) 原始 SAR 图像进行对数化;

(2) 对每一幅图像做 NSDFB-DTCWT 变换, 得到不同子带不同方向上的变换系数;

(3) 对变换后的低频系数采用 PCA 保留主成份进行去噪, 对变换后的高频系数采用 PCA 去掉噪声部分;

(4) 将去噪后的子带进行重构, 并对每层重构后的图像进行 sigma 滤波;

(5) 将最终重构完成的图像进行指数化, 然后进行 Lee 滤波去噪, 得到最终的去噪结果。

实验证明该算法可以很好地提高噪声平滑的视觉效果, 保存 SAR 图像的边缘纹理特征, 下面, 本文就基于该算法提出一种新的 SAR 图像边缘检测算法。

3 基于局部混合滤波的 SAR 图像边缘检测

引言介绍了在多尺度变换域进行边缘检测算法的要点和难点, 上面介绍的是噪声平滑方法, 本文将基于此方法结合 ROEWA 算法和 Canny 算法来检测每一个尺度上的边缘, 再采用 DS 证据理论融合各个尺度上边缘。ROEWA 算子是多边缘模型, 具有恒虚警特性。该算子使用具有线性最小均方误差的指数平滑滤波器进行边缘检测。1 维的情况下, 该滤波器的表达式为

$$f(x) = A \exp\{-\alpha(x)\} \quad (1)$$

其中 $x = 1, \dots, N$, N 表示信号的长度, $\alpha(x)$ 为滤波系数, A 为归一化系数。其离散形式可以通过一个因果滤波器和一个非因果滤波器实现, 如式 (2) 所示。

$$f(x) = \frac{1}{1+b} f_1(x) + \frac{b}{1+b} f_2(x-1) \quad (2)$$

其中 $f_1(x) = a \cdot b^x H(x)$ 为因果滤波器, $f_2(x) = a \cdot b^{-x} \cdot H(-x)$ 为非因果滤波器, 其中 $0 < b = \exp(-\alpha) < 1$, $a = 1 - b$, $H(x)$ (当 $x \geq 0$ 其值为 1) 为 Heaviside 函数。设 $e(x)$ 为输入信号, $s_1(x)$ 为 $e(x)$ 与 $f_1(x)$ 卷积, $s_2(x)$ 为 $e(x)$ 与 $f_2(x)$ 卷积, 则有如下迭代公式:

$$\left. \begin{aligned} s_1(x) &= a[e(x) - s_1(x-1)] + s_1(x-1) \\ s_2(x) &= a[e(x) - s_2(x+1)] + s_2(x+1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对于 SAR 图像 $R(x, y)$ 进行 ROEWA 滤波, 首先使用 1 维平滑滤波器 $f(y)$ 对图像的每一列进行滤波, 然后利用 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 对每一行进行滤波, 这样将得到图像水平方向边缘强度, 其中分为因果部分 $\hat{\mu}_{x1}$ 和非因果部分 $\hat{\mu}_{x2}$:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mu}_{x1}(x, y) &= f_1(x) * (f(y) \cdot R(x, y)) \\ \hat{\mu}_{x2}(x, y) &= f_2(x) * (f(y) \cdot R(x, y)) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 $*$ 表示水平方向的卷积, \cdot 表示垂直方向的卷积, 卷积迭代的过程可由式 (3) 获得, 则可以得到水平方向的边缘强度为 $r_{x \max}(x, y)$, 如式 (5):

$$r_{x \max}(x, y) = \max \left\{ \frac{\hat{\mu}_{x1}(x-1, y)}{\hat{\mu}_{x2}(x+1, y)}, \frac{\hat{\mu}_{x2}(x+1, y)}{\hat{\mu}_{x1}(x-1, y)} \right\} \quad (5)$$

同理可以求得垂直方向的强度 $r_{y \max}(x, y)$, 最后得到整个 SAR 图像的边缘强度的幅值:

$$|r_{\max}(x, y)| = \sqrt{r_{x \max}^2(x, y) + r_{y \max}^2(x, y)} \quad (6)$$

从上面的描述可知, 虽然 ROEWA 算子可以很方便地计算边缘的强度, 但是, 其所计算的有效方向只有两个, 这大大地影响了边缘检测的效果。因此, 本文将采用 Canny 算子计算 SAR 图像边缘的方向。众所周知, Canny 算法由如下几个步骤构成:

(1) 先对原始图像进行高斯滤波, 平滑掉噪声;

(2) 利用梯度算子计算每一像素点的梯度估计值, 得到水平方向或者垂直方向的梯度模值, 设 G_x 为水平方向梯度算子, G_y 为垂直方向梯度算子, 则可得如下梯度的幅值:

$$M = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (7)$$

(3) 利用 (2) 的结果计算梯度的方向:

$$\theta = \arctan \left(\frac{G_x}{G_y} \right) \quad (8)$$

(4) 一旦确定边缘方向, 就可将边缘梯度方向分

为4种,即水平、竖直、斜对角方向。即将 180° 分为5部分: $0^\circ \sim 22.5^\circ$ 和 $157.5^\circ \sim 180^\circ$ 记为水平方向; $22.5^\circ \sim 67.5^\circ$ 记为 45° 方向; $67.5^\circ \sim 112.5^\circ$ 记为竖直方向; $112.5^\circ \sim 157.5^\circ$ 记为 135° 方向。需要注意的是,这些方向是梯度方向,即是可能的边缘方向的正交方向。通过梯度方向,就可找到该像素梯度方向的邻接像素;

(5)非极大值抑制:遍历边缘点,若此点在某方向角上梯度值最大,则保留;

(6)使用双阈值分割边缘。

从上面Canny算子的描述可以看出,要使Canny算子适合于SAR图像边缘检测,则需要对(2)进行改进,因为(2)得到的梯度幅值不具有恒虚警性,因此本文采用ROEWA算法计算图像的幅值强度图。当然,Canny算法中(1)的平滑算法对于后面的边缘提取也是至关重要的,因此本文将高斯滤波换成混合滤波进行噪声平滑。因此,则基于Canny准则的ROEWA边缘检测算子步骤如下:

(1)先对原始图像进行混合滤波,平滑掉噪声;

(2)利用式(6)计算图像的边缘强度;

(3)利用式(8)计算图像的边缘方向,按照Canny算法第(4)步规范化边缘方向;

(4)采用文献[17]中提出的基于类间方差最大准则自适应地确定双阈值分割边缘。

在多尺度分解的每一个尺度进行基于Canny准则的ROEWA边缘检测,然后再将它们融合成一个完整的边缘,这就涉及到多尺度融合准则问题。由于受到噪声和杂波的干扰,简单的融合准则经常出现伪边缘或者边缘断裂的现象,因此本文采用DS证据理论进行各尺度边缘的融合。本文将{边缘,非边缘}定义为辨识框架 Θ ,用 h_1 和 h_2 表示,则{边缘,非边缘,不确定}为其幂集记为 2^Θ ,用 H 表示其中的不确定,则有 $2^\Theta = \{h_1, h_2, H\}$ 。

幂集 2^Θ 中的每一个元素都可以看成是一个命题,设在幂集上基本可信度分配函数为 m ,此时 $m:2^\Theta \rightarrow [0,1]$,对于任意的命题 A ,其基本可信函数需满足式(9)中的两个条件:

$$m(\Phi) = 0, \sum_{A \subseteq 2^\Theta} m(A) = 1 \quad (9)$$

其中 Φ 表示空集,设 $B(A)$ 为信任测度是命题 A 成立的概率下界, $P(A)$ 为似然测度是命题 A 成立的概率上界,它们的表达式如式(10)和式(11):

$$B(A) = \sum_{D \subseteq A} m(D) \quad (10)$$

$$P(A) = \sum_{A \cap D \neq \Phi} m(D) \quad (11)$$

其中 D 为命题 A 的一个证据体。对于任意的 A ,都

有 $P(A) > B(A)$,其中前者减去后者的差表示 A 的置信区间,置信区间越大, A 的不确定性越大。DS证据理论采用融合多个证据体得到命题的总可信度,然后根据总的可信度进行决策。设 m_1, m_2, \dots, m_n 是命题 A 的 n 个证据体的基本可信度分配函数,则可得总的可信度分配函数式(12):

$$M(A) = \sum_{\cap D_i = A} \prod_{i=1}^n m_i(D_i) / \left(\sum_{\cap D_i \neq \Phi} \prod_{i=1}^n m_i(D_i) \right) \quad (12)$$

本文采用文献[18]中所提到的边缘检测的3种信息测度描述边缘特征构造证据体,设 $R = \{(x, y) | |x - i| \leq L, |y - j| \leq L\}$ 为像素 (i, j) 的领域,其中 L 为领域的半径,如果半径足够小,则可以假设经过该像素点的边缘为一条与水平方向成 θ ($0 \leq \theta \leq \pi$)的直线 l_θ ,而该边缘会将 R 分成两个半领域 S_{θ_1} 和 S_{θ_2} ,用 g_{xy} 表示该像素点处的梯度幅值,令 $f(s_{\theta_1}) = \sum_{(x,y) \in S_{\theta_1}} f(x, y)$, $f(s_{\theta_2}) = \sum_{(x,y) \in S_{\theta_2}} f(x, y)$ 表示各个半领域的灰度值相加,则可以定义如下的边缘信息测度,其中 R_{ij} , M_{ij} 和 C_{ij} 分别代表领域一致性、方向性和结构性信息测度:

$$R_{ij} = \max_{0 \leq \theta \leq \pi} \left\{ |f(s_{\theta_1}) - f(s_{\theta_2})| / [L(2L + 1)] \right\} \quad (13)$$

$$M_{ij} = \max_{0 \leq \theta \leq \pi} |f(s_{\theta_1}) - f(s_{\theta_2})| - \min_{0 \leq \theta \leq \pi} |f(s_{\theta_1}) - f(s_{\theta_2})| \quad (14)$$

$$C_{ij} = \max_{0 \leq \theta \leq \pi} \left[\sum_{(x,y) \in l_\theta} g_{xy} / (2L + 1) \right] \quad (15)$$

由定义可知这3个信息测度很有代表性,可以很全面地反应出边缘的特点。例如,领域一致性信息测度反映了该像素邻域内灰度分布不同,对于含有边缘的区域其值较大,但是对于不含边缘的平滑区其值较小。同理,方向和结构信息测度也具有平滑噪声突出边缘的特点。

本文采用归一化的邻域一致性、方向性和结构性3种信息测度作为基于Canny准则的ROEWA边缘检测算子的边缘值是否是边缘这一命题的某一尺度上证据体 $X_l = \{R_{ij}^l, M_{ij}^l, C_{ij}^l\}$,其中 $l = 1, 2, \dots, N$ 表示NSDFB-DTCWT变换的某一尺度, N 为分解的最大尺度,则可令 $R_l = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 表示NSDFB-DTCWT变换各个尺度上证据体。一般情况下只能从概率上描述边缘检测算子的检测结果与真实值之间的关系。基于常识可知,边缘检测算子产生的边缘与检测门限越接近,则检测的不确定性越大;反之,则像素属于边缘或非边缘的可信度就越大。因此,将 R_l 对命题 $\{h_1, h_2, H\}$ 的基本可信度分配函数设计成图1的形式。

在门限处将不确定性设为极大值,离门限左右距离最远的位置将像素属于边缘或非边缘的可信度

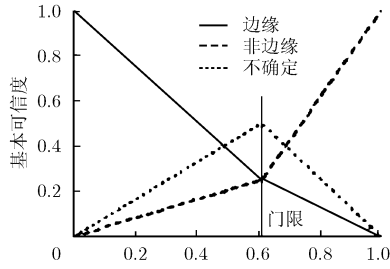


图 1 各级尺度边缘检测算子输出的基本可信度分配

设成极大值，其他部分都成线性形式。对于每一像素，边缘可信度、非边缘可信度及不确定性的总和为1，其中各级边缘检测算子自适应检测门限采用OTSU方法^[18]计算，该方法通过最大化类间方差计算最优的门限，最大类间方差可以定义为

$$\sigma^2(T) = \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 + \omega_2(\mu_2 - \mu)^2 \quad (16)$$

其中 μ_1 和 μ_2 分别表示门限 T 分割的两个区域的均值，而 μ 是整体均值， ω_1 和 ω_2 分别是两个区域的概率分布。采用数值试验，在0和1之间不断地改变门限 T ，当式(16)取得最大值的时候，则得到了最优门限。根据各尺度的基本可信度分配函数，经过基本可信度分配，得到各像素对应于 N 级尺度的各信息测度的边缘可信度、非边缘可信度以及不确定性为

$$\{m_l(h_1), m_l(h_2), m_l(H)\}, l = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

然后通过式(12)融合各信息测度，得到总的可信度为 $\{m(h_1), m(h_2), m(H)\}$ ，再根据式(10)和式(11)计算边缘和非边缘的似然测度和信任测度：

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{edge}} &= m(h_1) \\ P_{\text{edge}} &= m(h_1) + m(H) \\ B_{\text{not-edge}} &= m(h_2) \\ P_{\text{not-edge}} &= m(h_2) + m(H) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

本文设计的判决规则为对于任意的像素点，如果 $m(h_1) > m(h_2)$ 且 $m(H) < \varepsilon$ ，则该像素点为边缘点，否则其不为边缘点。其中 ε 为不确定性上限，本文采用 $\varepsilon = 0.1$ 。

为了完成基于局部混合滤波的SAR图像边缘检测，本文还需要改动一下局部滤波的步骤，将Lee滤波和sigma滤波放在NSDFB-DTCWT变换以前，这样并不改变混合滤波的噪声平滑能力，却可以方便后面边缘检测操作，由此可以得到基于局部混合滤波的SAR图像边缘检测算法的流程如图2所示。在后面的实验中我们将验证该算法的有效性。

4 实验结果与分析

为了全面而准确地验证本文算法的边缘检测性

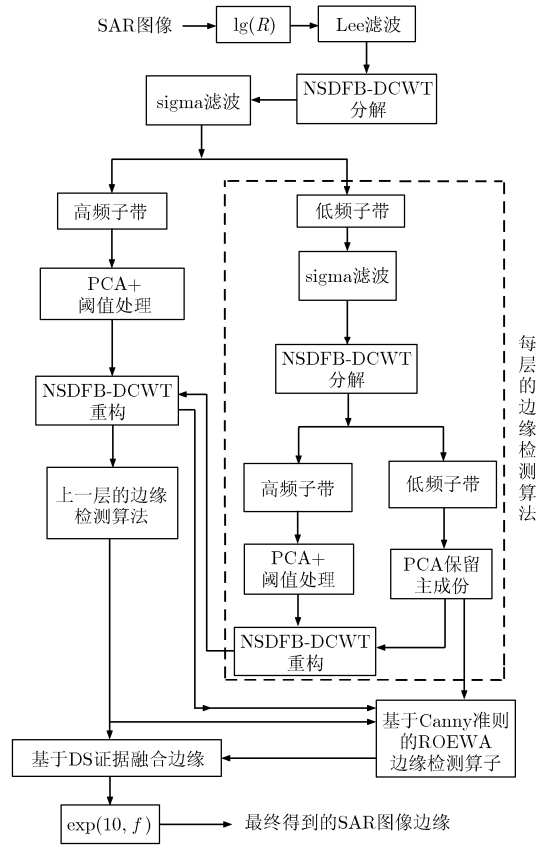


图 2 基于局部混合滤波的 SAR 图像边缘检测示意图

能，先对一幅原始图像加上不同的乘性噪声进行边缘提取，边缘提取的算法分别为文献[4]提出的基于小波变换的 ROA 边缘检测算法，文献[7]提出的融合小波变换和数学形态学的边缘检测算法，文献[15]提出的基于 ROEWA 和 Gabor 滤波的 SAR 图像边缘提取算法，文献[17]提出的基于 NSDFB 域改进 Canny 算子的边缘提取算法和文献[18]提出的基于多信息测度融合的边缘检测方法。本文采用的多尺度分解都为 3 层，其中第 1, 2 和 3 层选取的领域半径为 3, 5 和 7。分别对原图像添加视数 L 为 2, 4, 16 的乘性噪声，然后依次使用上述边缘检测算法提取边缘，图 3(a)给出原始不含噪声图像，图 3(b)是添加了视数为 2 的乘性噪声的含噪图像，图 3(c)是添加了视数为 4 的乘性噪声的含噪图像，图 3(d)是添加了视数为 16 的乘性噪声的含噪图像。从图 3 可知，视数 L 越小相干斑噪声的强度越大。

图 4 给出了图 3(b)经过上述的边缘检测算法提取得到的边缘图像。

由图 4 可知，对于乘性噪声严重的 SAR 图像，图 4(a)所示的文献[4]提出的边缘检测算法最差，由于该算法没有使用多尺度分解，所以检测的边缘不仅上面的竖条上有很多的虚假边缘，并且下面的圆

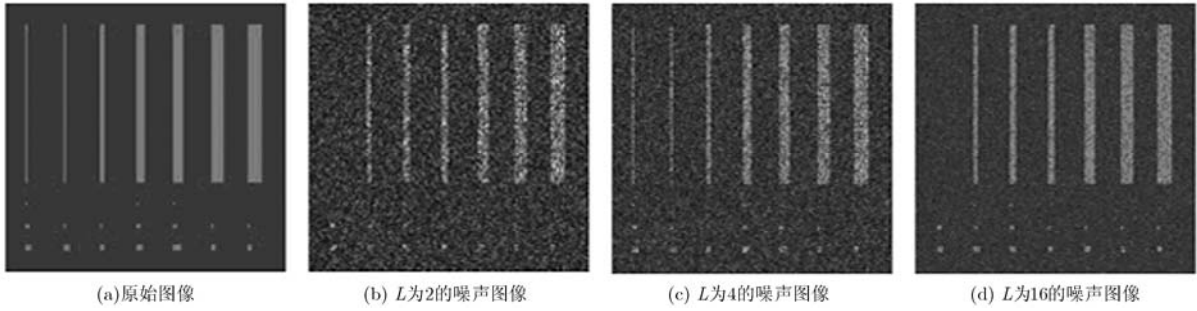


图3 原始图像和噪声图像

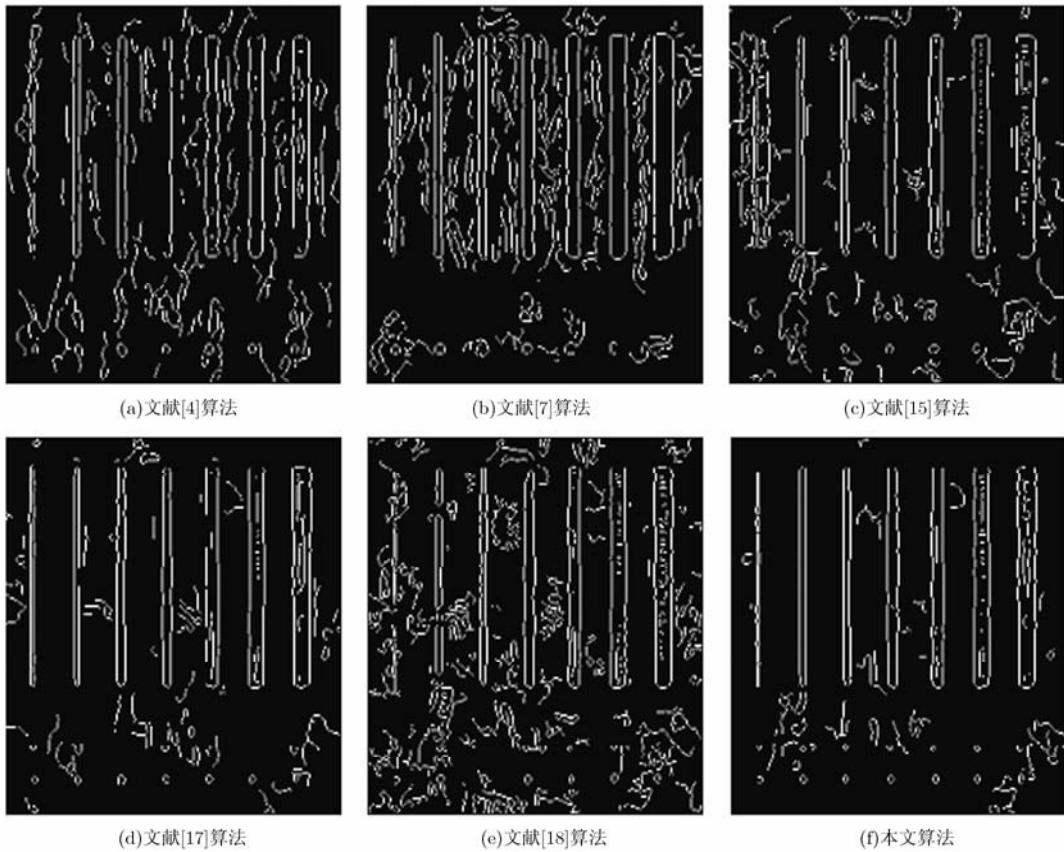


图4 视数 $L=2$ 时，几种算法对噪声图像边缘检测效果图

点虚假边缘太多，几乎都看不出其轮廓，这说明其去噪能力非常差。图 4(b)所示的文献[7]提出的边缘检测算法的效果也很差，上面的竖条也有很多的虚假边缘，不过在下面的圆点的边缘虚假边缘较少，可以很清晰地看到该算法检测出了 4、5 个圆点的轮廓，该算法比较差的原因在于边缘提取的双阈值操作很简单，且使用的融合算法也比较简单。图 4(c)所示的文献[15]提出的边缘检测的效果较好，竖条部分的虚假边缘明显减少了，这应该归功于使用 Gabor 变换改善了其方向性。图 4(d)所示的文献[17]提出的算法的边缘检测效果较好，竖条部分的虚假边缘进一步地减少，且下面的圆点的轮廓提取得较

好。图 4(e)所示的文献[18]提出的算法的边缘检测效果较好，竖条部分的虚假边缘较少，但是相比文献[17]提出的算法，该算法的效果较差，这是由于该算法虽然使用了多尺度 DS 证据融合方法，但是并没有进行噪声的平滑，且其双阈值选取不如文献[17]所提出的算法好。最后，图 4(f)所示的本文提出的算法效果最好，相比文献[17]本文采用 DS 证据融合策略且使用了具有恒虚警的改进 Canny 算子，相比文献[18]，本文算法使用了具有较好平滑效果的局部滤波进行噪声平滑，因此本文提出的算法提取的边缘，不仅竖条部分虚假边缘很少，且对圆点部分的边缘提取效果也很好。

表1为各种方法采用Canny准则的客观评判标准,即有效检测边缘点数(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)、准确检测边缘点数、漏检边缘点数、误判边缘点数边缘检测方法的性能比较。

从表1可以看到,随着噪声的逐渐减弱,各种边缘检测算法的效果逐渐接近。而本文的方法无论是强噪声环境下,还是在弱噪声环境下都具有最好的效果,与文献[4]、文献[7]、文献[15]的算法相比,本文的算法漏检边缘少很多。比起文献[17]和文献[18]中的方法,本文的算法误判边缘少很多。结合图4说明本文的算法对于SAR图像边缘检测较完整且很少误判和漏判的情况。当然,还需要在实际的SAR图像去噪中检验本文所提出的算法,本文使用的测试图像是网上免费 TerraSar-X 的 SAR 图像库。本文展示其中的一副图像如图5所示。



图5 真实的 SAR 图像

对该图像使用上述的几种边缘检测算法提取 SAR 图像的边缘信息。图6是对图5使用各种边缘提取算法提取到的边缘图。

表1 各去噪算法客观性能

算法	$L=2$				$L=4$				$L=16$			
	有效边缘检测点	准确边缘检测点	漏检边缘点	误判边缘点	有效边缘检测点	准确边缘检测点	漏检边缘点	误判边缘点	有效边缘检测点	准确边缘检测点	漏检边缘点	误判边缘点
文献[4]	6653	6018	435	603	6987	6786	355	486	7123	6975	171	243
文献[7]	6895	5898	465	588	6998	6975	105	475	7305	7005	134	204
文献[15]	6989	6505	289	479	7093	6897	396	335	7270	6998	165	154
文献[17]	7018	6952	37	142	7103	7005	17	87	7387	7105	12	57
文献[18]	7002	6813	78	236	7110	6989	25	142	7475	7003	16	74
本文算法	7030	6988	26	36	7135	7098	15	25	7489	7298	9	19

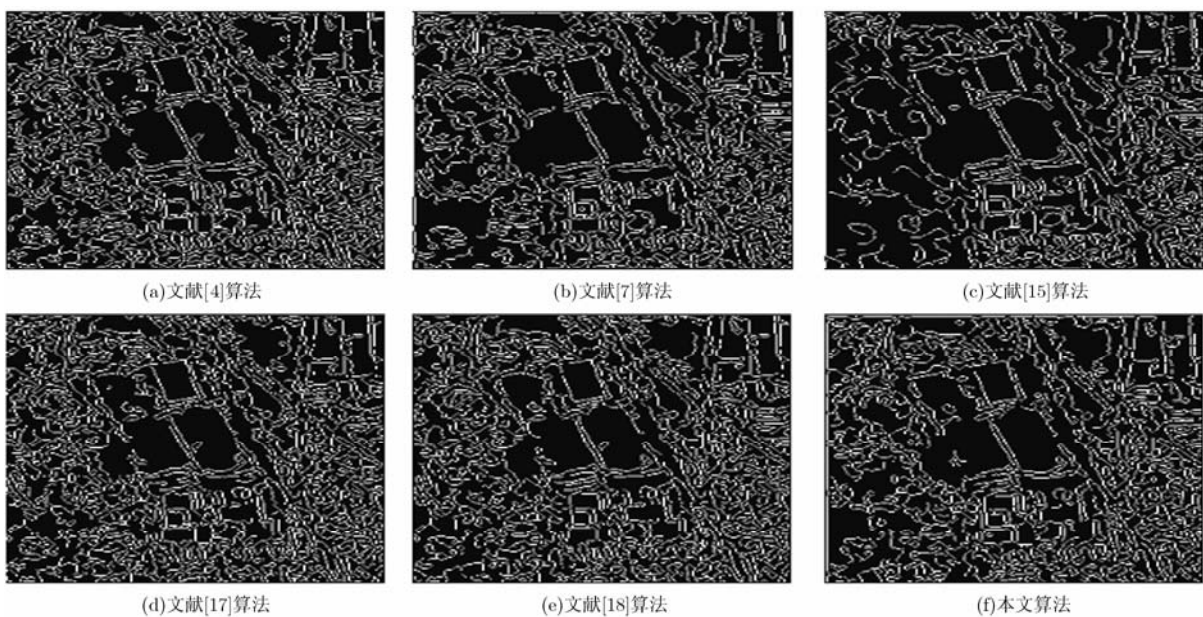


图6 几种边缘检测算法提取的 SAR 图像的边缘图像

从图6中可以看到,使用文献[4]的方法提取边缘的效果最差,有很多虚假边缘。而使用文献[7]和文献[15]的方法提取边缘时会漏判很多边缘,文献[17]的方法和本文提出的算法比文献[18]提出的算法效果好,较少误判边缘。本文的算法比文献[17]提出的方法要好一些,主要体现在图像下半部分的伪边缘较少。

5 结束语

本文提出一种基于局部混合滤波结合 ROEWA 算子与 Canny 准则的 SAR 图像边缘检测算法,该算法首先使用改进的局部滤波进行噪声平滑,然后在各个尺度上进行基于 Canny 准则的 ROEWA 边缘提取算法,最后使用 DS 证据理论将各尺度上的边缘融合为最终完整的边缘。实验结果表明,本文所提出的算法可有效地提取 SAR 图像的边缘,大大地减少了伪边缘和误判边缘的情况,所以本文的算法比较适合于 SAR 图像边缘提取。但是,本文所提出的算法也还有不完善的地方:例如本文所提出的算法并没有利用变换的多方向性,因此,在未来我们将在该方面作进一步的研究。

参考文献

- [1] 王敏杰, 杨唐文, 韩建达, 等. 图像边缘检测技术综述[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(增刊1): 811-816.
Wang Min-jie, Yang Tang-wen, Han Jian-da, *et al.* Review on image edge detection technologies[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2011, 42(Suppl.1): 811-816.
- [2] 赵凌君, 贾承丽, 匡纲要. SAR 图像边缘检测方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(12): 2043-2049.
Zhao Ling-jun, Jia Cheng-li, and Kuang Gang-yao. Overview of edge detection in SAR images[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(12): 2043-2049.
- [3] Benoit T and Bertrand A. A fast multi-scale edge detection algorithm[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004, 25(6): 603-618.
- [4] Min Dai, Cheng Peng, Chan A K, *et al.* Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1642-1648.
- [5] 周何, 黄山, 盛贤. 基于 B 样条小波的图像边缘检测[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 214-217.
Zhou He, Huang Shan, and Sheng Xian. Image edge detection based on B-spline wavelet[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(11): 214-217.
- [6] 薛笑荣, 张艳宁, 赵荣椿, 等. 基于小波变换的 SAR 图像边缘提取新方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(3): 332-335.
Xue Xiao-rong, Zhang Yan-ning, Zhao Rong-chun, *et al.* On good-quality edge detection of SAR image[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2003, 21(3): 332-335.
- [7] 胡晓辉, 张晓颖, 陈俊莲. 一种融合小波变换和数学形态学的边缘检测算法[J]. 铁道学报, 2011, 33(3): 45-48.
Hu Xiao-hui, Zhang Xiao-ying, and Chen Jun-lian. An image edge detection algorithm fused with wavelet transform and mathematical morphology[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2011, 33(3): 45-48.
- [8] 白婷婷, 邓彩霞, 耿英. 基于小波变换与 Canny 算子的图像边缘检测[J]. 哈尔滨理工大学, 2010, 15(1): 44-51.
Bai Ting-ting, Deng Cai-xia, and Geng Ying. Image edge detection based on wavelet transform and Canny operator [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2010, 15(1): 44-51.
- [9] Do M N and Vetterli M. Contourlets: a directional multiresolution image representation[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, Rochester, NY: 2002: 357-360.
- [10] Zheng Geng-feng, Jin Long-xu, Han Shuang-li, *et al.* Directional multiscale edge detection using the contourlet transform[C]. 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC), Changchun, China, 2010: 58-62.
- [11] 张悦庭, 孟晓锋, 尹忠科, 等. 基于 Contourlet 模极大值的图像边缘检测[J]. 铁道学报, 2008, 30(5): 41-45.
Zhang Yue-ting, Meng Xiao-feng, Yin Zhong-ke, *et al.* Image edge detection based on Contourlet modulus maxima[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2008, 30(5): 41-45.
- [12] Cunha A L, Zhou J P, and Do M N. The nonsubsampling Contourlet transform: theory, design and application[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [13] Li Q W, Huo G Y, Li H, *et al.* Bionic vision-based synthetic aperture radar image edge detection method in non-sampled Contourlet transform domain[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(6): 526-535.
- [14] 刘帅奇, 胡绍海, 肖扬. 基于局部混合滤波的 SAR 图像去噪[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(2): 17-23.
Liu Shuai-qi, Hu Shao-hai, and Xiao Yang. SAR image de-noise base on local hybrid filter[J]. *Journal Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(2): 17-23.
- [15] 孔莹莹, 周建江, 张焱. 基于 ROEWA 和 Gabor 滤波的 SAR 图像边缘提取[J]. 光电子·激光, 2010, 21(8): 1257-1263.
Kong Ying-ying, Zhou Jian-jiang, and Zhang Yan. A new edge detection method for SAR image based on ROEWA and gabor filter[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(8): 1257-1263.
- [16] Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence [M]. Princeton: Princeton University Press, 1976, Chapter 1-4.
- [17] 霍冠英, 王敏, 程晓轩, 等. 用于侧扫声呐图像边缘检测的改进 Canny 算子[J]. 应用科学学报, 2011, 29(6): 613-618.
Huo Guan-ying, Wang Min, Cheng Xiao-xuan, *et al.* Edge detection for side-scan sonar images based on improved Canny operator[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2011, 29(6): 613-618.
- [18] 才辉, 张光新, 张浩, 等. 一种新的基于多信息测度融合的边缘检测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(10): 1671-1675.
Cai Hui, Zhang Guang-xin, Zhang Hao, *et al.* Novel edge detection method based on multiple information measures fusion[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(10): 1671-1675.

刘帅奇: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为多维信号处理、SAR 图像处理。

胡绍海: 男, 1964 年生, 教授, 研究方向为人工神经网络、图像处理等。

肖扬: 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 MIMO、多维信号处理等。