

# 基于改进轮廓波变换的SAR图像增强

王蕊<sup>1</sup>, 龙奕<sup>2</sup>

WANG Rui<sup>1</sup>, LONG Yi<sup>2</sup>

1.西南交通大学峨眉校区 计算机与通信工程系, 四川 峨眉 614202

2.贵州大学 电气工程学院, 贵阳 510003

1.Department of Computer and Communication Engineering, South West Jiaotong University, E'mei, Sichuan 614202, China

2.School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 510003, China

**WANG Rui, LONG Yi. SAR image enhancement based on improved contourlet transform. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(13): 178-180.**

**Abstract:** In the contourlet transform, the image obtained by Laplacian Pyramid decomposition may produce artifacts on singularity of signal, which is harmful to image denoising. Due to the lack, the improved contourlet transform which is composed of the improved Laplacian Pyramid (LP) decomposition is proposed, and the improved Laplacian Pyramid can effectively suppress the artifacts around the edge of the subband image obtained by contourlet transform. At the same time, SAR image enhancement algorithm based on improved contourlet transform is presented. Experiment results show that the algorithm is superior not only in speckle reduction but also in edge preservation.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR) image; contourlet transform; Laplacian Pyramid (LP); image enhancement

**摘 要:** 针对轮廓波变换(contourlet transform)中进行拉普拉斯金字塔分解时, 所得的带通图像在奇异性点附近产生振荡, 影响图像去噪的效果, 提出一种改进的轮廓波变换。通过改进拉普拉斯金字塔分解, 可消除轮廓波变换带通图像边缘附近的震荡。提出了基于改进轮廓波变换的SAR图像增强算法。实验结果表明, 该算法在有效抑制SAR图像噪声的同时, 较好地保持了图像边缘细节。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR)图像; 轮廓波变换; 拉普拉斯金字塔; 图像增强

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2011.13.050 文章编号: 1002-8331(2011)13-0178-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391

## 1 引言

由于成像系统的相干性, SAR图像中不可避免地存在着斑点噪声, 斑点噪声将干扰对SAR图像的后续处理。因此, 斑点噪声的抑制和增强技术已成为SAR图像预处理的关键。在过去的20多年中, 提出了许多抑制SAR图像散斑噪声的算法。这些算法可以分为3大类: 多视处理、空域滤波和各种基于子波变换的散斑噪声抑制算法<sup>[1-4]</sup>。多视处理是早期采用的方法, 它是在成像过程中以牺牲空间分辨率为代价来抑制散斑噪声。空域滤波法包括Lee滤波、Kuan滤波、Frost滤波、Gamma MAP滤波和数学形态学滤波及它们的增强形式。空域滤波虽然算法简单, 其主要问题是滤波窗口大小和方向的选择, 很难在抑制散斑噪声和边缘保持两者之间兼顾。为克服空域滤波的局限性, SAR图像去噪效果依赖于用少数几个基向量有效地近似信号的能力, 也就是取决于图像表达的稀疏性能力以及噪声阈值的准确选取。而对于二维图像信号, 其奇异性主要是由边缘和轮廓产生。二维张量小波变换由于方向有限(H、V和D)而在表示图像时存在不足, 因此需要能够有效捕获图像关键特征的图像稀疏表示方法。

为了更好地处理高维信号的奇异性, 一类带有方向性的稀疏表示方法——多尺度几何分析应运而生。如Candes和Donoho等人相继提出的脊波变换(ridgelet transform)、曲线波变换(curvelet transform)。脊波是在二维连续空间 $R^2$ 中定义的多方向小波, 在离散二维空间中要借助Randon变换及一维小波变换实现, 它是表示具有直线边缘图像的最优基。曲线波是脊波的推广, 它结合了分块脊波变换和子带分解算法, 具有良好的空域和频域局部性及非线性逼近性能, 它是表示具有二阶可微的平滑曲线边缘图像的最优基。虽然curvelet变换能够很有效地捕捉曲线奇异性, 但由于离散化的困难, 促使M.N.Do和Martin Vetterli提出一种类似于curvelet变换的方向性多分辨变换, 但它却是直接产生于离散域的变换——contourlet transform<sup>[5-7]</sup>。contourlet变换是一种真正的二维图像表示方法。这种方法可以很好地抓住图像的几何结构, 并且因利用轮廓线段的构造方式产生了一种灵活可变的分辨分析、局部和方向性的表示方法而得名。

但轮廓波变换也存在一些不足: 由于使用了拉普拉斯金字塔, 使得轮廓波分解的细节图像在奇异点附近产生振荡, 影

**基金项目:** 西南交通大学青年教师科研起步项目资助(No.2008Q028)。

**作者简介:** 王蕊(1979—), 讲师, 研究方向: 图像处理、信号处理。E-mail: 15441065@qq.com

**收稿日期:** 2009-08-24; **修回日期:** 2009-10-24

响了去噪效果, 本文针对轮廓波变换的这种缺陷, 对拉普拉斯分解做了改进, 构造了一种新的轮廓波变换, 并将其应用于图像增强, 取得了良好效果。

## 2 改进的轮廓波变换

轮廓波变换由拉普拉斯金字塔<sup>[8]</sup>LP(Laplacian Pyramid)和方向滤波器组DFB(Directional Filter Bank)两部分组成。为了消除轮廓波变换带通图像边缘附近的震荡, 将原拉普拉斯金字塔中的综合滤波器去掉, 构造相应的拉普拉斯金字塔, 得到改进的轮廓波变换。

### 2.1 拉普拉斯金字塔塔式分解

拉普拉斯塔式分解把原始图像分解为低通子带和带通子带。其中低通子带是由原始图像经过二维低通滤波和隔行隔列下抽样产生; 低通子带经过上抽样和低通滤波后形成与原始图像尺寸相同的低通分量, 原始图像减去这个低通分量形成高通子带。拉普拉斯金字塔分解结构如图1所示。

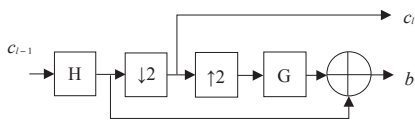


图1 拉普拉斯金字塔分解图

分析滤波器H和综合滤波器G为归一化滤波器, 具有对称性。设原图像表示为 $c_0$ , 金字塔第一层得到的低通采样图像为 $c_1$ , 第二层用同样的低通滤波器滤波再下采样得到 $c_2$ ,  $l$ 为当前分解层,  $l \geq 1$ , 迭代过程可用公式(1)、公式(2)表示:

$$c_l(i, j) = \sum h(m, n) c_{l-1}(2i + m, 2j + n) \quad (1)$$

$$b_l(i, j) = c_{l-1}(i, j) - \sum g(m, n) c_l\left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2}\right) \quad (2)$$

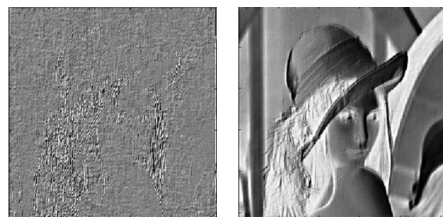
若进行 $J$ 层LP分解, 则图像空间 $V$ 分解成为 $W_1, W_2, \dots, W_J, V_J$ 共 $J+1$ 个子空间。其中 $V_J$ 为低频子空间,  $W_l$ 为各层的高频子空间。

$$V = V_J \oplus \left( \bigoplus_{l=1}^J W_l \right) \quad (3)$$

### 2.2 改进的拉普拉斯金字塔塔式分解

在基于轮廓波变换的去噪方法中, 人为振荡现象主要表现在信号奇异点的附近。在奇异点的邻域内, 轮廓波变换去噪会表现出Pseudo-Gibbs现象, 其重构回来的去噪信号在奇异点附近交替出现较大的上、下峰值, 这些峰值并不是原始信号本身包含的, 而是在去噪过程中产生的人为的干扰。这种现象类似于基于Fourier变换去噪所产生的Gibbs现象。因此为了消除去噪后信号所表现的振荡现象, 需要采取适当的方法, 消除轮廓波去噪在奇异点位置的特殊性。

基于图像的拉普拉斯金字塔变换的方法是一种很好的多尺度、多分辨率的图像处理方法, 可以将图像的重要特征(如边缘等)按照不同的尺度分解到不同的塔型分解层上。但是, 用文献[8]中的拉普拉斯金字塔分解来获得图像在各个尺度下的奇异点, 对Lena图分解后得到的带通图像如图2(a)所示。可以看出, 由于滤波器的多过零点, 使得分解得到的细节图像在边缘附近产生了振荡。这对于去噪很不利, 为了克服这个现象, 对Lena图像进行由改进的LP金字塔分解, 可以消除边缘附近的振荡现象。



(a)原LP分解得到的子带图像 (b)改进的LP分解得到的子带图像

图2 原LP分解与改进的LP分解得到的子带图像对比图

通采样图像上进行。对第 $l$ 级获得的低通采样图像直接进行上采样, 并与第 $l-1$ 级低通采样图像相加得到第 $l$ 级的细节图像。分解结构如图3所示。

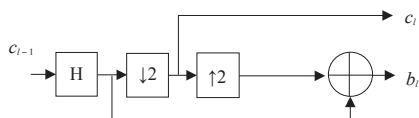


图3 改进的拉普拉斯金字塔分解结构图

图3中 $c_{l-1}$ 为 $l-1$ 级得到的低通采样图像,  $b_l$ 为第 $l$ 层输出的带通图像,  $c_l$ 为第 $l$ 级获得的低通采样图像, 多尺度分解继续在 $c_l$ 上进行。由图3的结构框图得到的输出信号表达式如下:

$$c_l(i, j) = \sum h(m, n) c_{l-1}(2i + m, 2j + n) \quad (4)$$

$$b_l(i, j) = c_{l-1}(i, j) - \sum c_l\left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2}\right) \quad (5)$$

这两种分解算法的主要差异在于, 改进的拉普拉斯分解算法中去掉了综合滤波器, 利用改进的拉普拉斯金字塔对图像进行分解, 得到的子带图像如图2(b), 可以看到利用改进的拉普拉斯金字塔分解的子带图像消除了边缘附近的振荡现象。

## 3 基于改进轮廓波变换的 SAR 图像增强

由改进的拉普拉斯金字塔替代原拉普拉斯金字塔和方向滤波器组构成改进的轮廓波变换, 由上述分析得基于改进的轮廓波变换不仅具有轮廓波变换的多分辨率特性、局部性和方向性, 还可以消除轮廓波去噪在奇异点位置的震荡。在图像处理中有广泛的应用前景。SAR图像噪声通常表示为非相关的乘性噪声模型, 即 $g = x\eta$ , 其中,  $g$ 表示噪声图像灰度,  $x$ 表示不含噪声的图像,  $\eta$ 表示噪声。本算法的基本思想是将原始图像进行由改进的拉普拉斯塔式分解和二维方向滤波器组构造的轮廓波分解, 采用自适应阈值去噪法将变换域系数中的噪声点和信号点完全区分开来, 并对处理后的系数进行放大, 随后通过反变换重构图像, 从而有效抑制SAR图像噪声, 达到图像增强的效果。

增强算法简述如下<sup>[9]</sup>:

(1) 对含噪图像 $g$ 进行对数变换得到 $g_1 = x_1 + \eta_1$ , 其中 $g_1 = \ln(g)$ ,  $x_1 = \ln(x)$ ,  $\eta_1 = \ln(\eta)$ 。

(2) 对 $g_1$ 进行 $J$ 层,  $2'$ 方向的改进的轮廓波变换得到,  $y_{i,j} = x_{i,j} + \eta_{i,j}$ 。  $y_{i,j}$ ,  $x_{i,j}$ ,  $\eta_{i,j}$ 是 $g_1$ ,  $x_1$ ,  $\eta_1$ 的变换域系数。  $i, j$ 代表系数的位置。

(3) 方差估计: SAR图像噪声仍然近似服从高斯分布, 对轮廓波分解的 $J$ 层系数的方差逐层进行估计,  $C$ 一般取0.674 5, 为加噪图像进行可控金字塔的轮廓波变换第 $l$ 层系数。

$$\delta_{e_{i,j}}^{\wedge}(l)=\frac{Median(|W_{g_{i,j}}(l)|)}{C} \tag{6}$$

(4) 國值设定:使用

$$T(l)=\delta_{e_{i,j}}^{\wedge}(l)\sqrt{2\lg M(l)} \tag{7}$$

确定各高频子带的國值,其中 $M(l)$ 为第 $l$ 层分解系数的数目。

(5) 对不同子带、不同方向的分解系数进行硬國值处理。

(6) 对國值处理后的系数进行放大(即 $\hat{g}$ 乘以大于1的常数)能增强图像的主要特征。

(7) 对处理后的系数进行改进的轮廓波反变换。

(8) 将反变换后的系数再进行指数变换后即可得到图像增强后的SAR图像。

4 实验结果

实验中采用加零均值白噪声的国际标准图像和机载单视SAR图像,对本文增强算法进行验证,并进行了对比,所用到的平稳小波变换及轮廓波变换进行的总分解层数均为 $J=3$ ,各层的方向分解数目选定为 $2^l$ ,其中 $l$ 为分解层数。

表1列出了本文算法、平稳小波变换和轮廓波变换对SAR图像增强处理后的均值 $m$ ,标准差 $s$ ,散斑指数 $\beta$ 和等效视数 $ENL$ (其中 $\beta=s/m, ENL=1/\beta^2$ )。散斑指数和等效视数是定量评价均匀区域散斑噪声抑制效果的主要参数。散斑指数越小,即等效视数越大,表示SAR图像去噪声效果越好。由表1可以看出本文算法得到的散斑指数比轮廓波变换降噪的散斑指数低0.031 3,等效视数比轮廓波变换降噪等效视数高0.695 4。

表1 实验结果表

	原始图像	平稳小波	轮廓波	本文方法
$m$	85.798 8	84.031 8	83.391 7	82.654 4
$s$	44.948 1	41.848 3	38.715 3	35.787 6
$\beta$	0.523 9	0.497 9	0.464 2	0.432 9
$ENL$	3.643 3	4.033 8	4.640 7	5.336 1

图4给出了SAR图像在使用不同方法的增强效果。从实验结果中可以看到,本文增强算法在视觉效果上优于平稳小波自适应增强和轮廓波变换自适应增强效果,能够更有效地保留图像细节和纹理特征。

5 结论

提出了一种基于改进的拉普拉斯金字塔的轮廓波变换,在此基础上给出了一种针对SAR图像的图像增强算法。该算法能够在抑制斑点噪声的同时,更有效地增强图像的细节和纹理特征,视觉效果和客观效果均优于基于平稳小波变换和轮廓波变换的算法。由于改进后的轮廓波变换具有更好地表

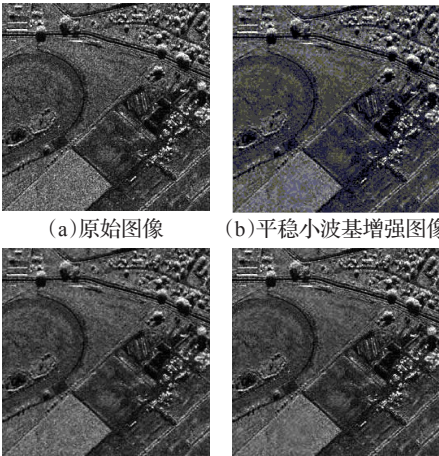


图4 不同算法对SAR图像的增强结果图

现图像的优良特性,因此将其应用于图像的纹理识别、图像融合及边缘检测是进一步研究的重点。

参考文献:

[1] 练秋生,孔令富.冗余轮廓波变换的构造及其在SAR图像降斑中的应用[J].电子与信息学报,2006(7):1215-1218.  
[2] Argenti F, Alpatone L. Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2363-2374.  
[3] Dai Min, Peng Cheng, Chan A K, et al. Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1642-1648.  
[4] 孙强,焦李成,侯彪.统计先验指导的非下采样Contourlet变换域SAR图像降斑[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2008,35(1): 14-21.  
[5] Po D D Y, Do M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15: 1610-1620.  
[6] Do M N, Vetterli M. Contourlet transform and sparse image expansions[C]//Proceedings of the International Society for Optical Engineering, San Diego, USA, 2003: 560-570.  
[7] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2100.  
[8] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian Pyramid as a compact image code[J]. IEEE Trans on Communications, 1983, 31(4): 532-540.  
[9] Chen G Y, Bui T D. Multiwavelet denoising using neighboring coefficients[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(7).