

基于平稳Contourlet变换的极化SAR图像融合

张德祥^{1,2}, 吴小培¹, 高清维^{1,2}, 郭晓静²

(1. 安徽大学计算智能与信号处理重点实验室 合肥 230039; 2. 安徽大学电子科学与技术学院 合肥 230039)

【摘要】提出一种新颖而有效的基于平稳Contourlet变换的极化SAR图像融合算法。平稳Contourlet变换是一种具有几何信息的灵活多尺度、多方向和平移不变性的图像分解变换,与小波变换相比,对图像分析很重要的沿曲面任意方向反映的细节更容易调整。采用平稳Contourlet变换对多个单极化强度图像进行分解,对于低频系数和方向高频系数采用最优加权算法实现极化图像的融合处理。实验结果表明,该算法与PWF算法相比在保留原始图像边缘和纹理信息同时,可以有效地抑制相干斑噪声的影响,取得较好的融合视觉效果。

关键词 融合; 极化SAR图像; 相干斑噪声; 平稳Contourlet变换

中图分类号 TN957.54; TP751.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.02.010

Fusion of Polarimetric SAR Image Based on Stationary Contourlet Transform

ZHANG De-xiang^{1,2}, WU Xiao-pei¹, GAO Qing-wei^{1,2}, and GUO Xiao-jing²

(1. Key Lab of Intelligent Computing and Signal Processing, Anhui University Hefei 230039;

2. The School of Electronic Science and Technology, Anhui University Hefei 230039)

Abstract A novel and efficient fusion method for polarimetric SAR image based on stationary contourlet transform is proposed. Several single-polarimetric-channel SAR intensity images are decomposed using stationary contourlet transform. Low-pass coefficients and the directional high-frequency coefficients are selected by optimal weighted sum of intensities algorithm for fusion. Experimental results show that compared with PWF de-speckling algorithm, the proposed algorithm can get better visual effect and preserves image details, and the significant information of original image like textures and contour details is well maintained.

Key words fusion; polarimetric SAR image; speckle noise; stationary contourlet transform

近年来,极化合成孔径雷达(polarimetric synthetic aperture radar)成像技术得到广泛应用,极化合成孔径雷达(POL-SAR)可以在不同收发极化组合下测量地物目标的极化散射特性,通过极化散射矩阵完全描述回波的后向散射特性,提高SAR对目标信息的获取能力^[1]。但极化合成孔径雷达图像容易受到相干电磁波的影响,因此,在同一分辨单元内随机分布的许多散射点的反射回波也是相干的,这些相干回波在SAR图像中表现为随机分布的斑点而产生相干斑噪声。而相干斑的存在严重地影响了目标的检测和识别,如何在消除相干斑噪声的同时保持原始图像的纹理和细节特征是研究的热点之一^[2]。

对于极化SAR图像,可以利用其同极化和交叉极化图像的相关性来进行降斑处理。文献[3]提出了应用极化散射矩阵中的3个复元素HH、HV和VV的最优加权的方法来降低极化SAR图像相干斑,称其

为极化白化滤波(PWF)法。该方法利用全极化SAR数据产生一幅相干斑强度最小的图像,不但可以有效地增强极化SAR图像,更能够保持SAR图像的分辨率不变,开创了极化SAR图像相干斑抑制的全新途径。极化白化滤波能够在保持分辨率不变的情况下有效地抑制相干斑,但它是非自适应的,并且噪声消除不彻底。虽然通常的加窗处理能够将其转化为自适应的,可是在非均匀区域或者含有亮点的地方模糊现象严重。

为了有效消除相干斑噪声的影响,本文采用像素级图像融合技术^[4]。利用平稳Contourlet变换,对多个极化强度图像分别进行多尺度、多方向和平移不变分解,得到低频系数和一系列具有不同分辨率和不同方向的高频分解系数。对于低频系数采用窗口平均融合算法,对于含噪声较少的高频系数采用窗口能量最大融合算法,对于含噪集中的高频系数

收稿日期: 2008-09-01; 修回日期: 2008-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(60872163); 安徽省教育厅基金(KJ2008A034、KJ2007B305ZC)

作者简介: 张德祥(1968-),男,在职博士生,副教授,主要从事图像处理、信号检测与处理等方面的研究。

以相关系数的最优加权算子作为融合规则, 最后根据融合算法得到融合后的图像分解系数重构一幅新的图像。该技术不仅可以保留原始极化图像的纹理和细节, 而且由于采用相关系数的最优加权算子实现同极化和交叉极化的相关性降噪方式, 所以融合后的图像降噪效果更好。

1 Contourlet变换

小波变换在分析点状瞬态特征的奇异性时是最优的, 但在表示图像结构的直线和曲线奇异性时却不是最优的^[5-6]。为了克服小波在图像处理中的局限性, 文献[7]提出一种“真正”的二维图像几何表示方法的Contourlet变换。Contourlet变换不仅继承了小波变换的多分辨率时频分析特征, 而且弥补了小波变换的方向性缺乏, 具有良好的各向异性特征, 不仅能较好地捕获二维图像中的线和面奇异性, 实现二维图像的稀疏表达, 还能用比小波变换更少的系数来表达光滑的曲线, 如图1所示。

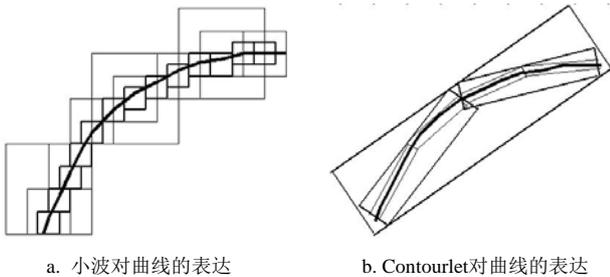


图1 小波和Contourlet变换对曲线的不同表达方式

Contourlet变换采用塔型方向滤波器组对图像进行多尺度、多方向的分解, 首先采用拉普拉斯金字塔变换对图像进行高斯金字塔分解, 生成一个低通采样图像和一个带通图像; 对低频子带图像继续使用拉普拉斯变换进行迭代分解, 便可以将原始图像分解为一系列不同尺度上的低频和高频子带图像; 然后再利用方向滤波器组对带通图像进行多方向分解, 将分布在同方向的奇异点合成一个系数。计算时, 每层先通过扇形滤波器组进行扇形方向上的频率切分, 随后与旋转重采样操作进行高频信息方向性分析, 捕获图像中的线和面的奇异性, 最终将图像的频域划分为 2^l 个楔形区域^[8]。Contourlet变换的原理结构框图如图2所示。由于Contourlet变换基的支撑区间具有随尺度而长宽比变化的“长条形结构”, 所以Contourlet变换有很好的多尺度分辨性、多方向性和各向异性, 能够准确地将图像中的边缘捕获到不同尺度、不同频率的子带中。在Contourlet系数中, 表示图像边缘的系数能量更加集中^[9]。

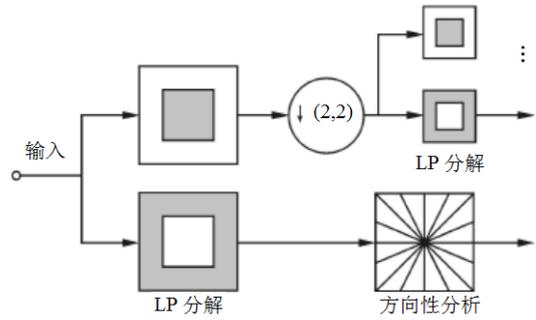


图2 Contourlet变换的原理结构框图

2 平稳Contourlet变换

Contourlet变换缺乏平移不变性, 对于图像的融合或图像特征的提取常采用非下采样的Contourlet变换, 即平稳Contourlet变换^[10]。平稳Contourlet变换采用非下采样的金字塔变换将图像分解成一个低通子带和一个高通子带, 非下采样方向滤波器组将高通子带分解成多方向子带。这种分解可以在低频子带上进行多分辨率、多方向上的迭代分解, 而且每个方向子带图像的大小和原始图像的大小相等, 是一种冗余分解, 可以使图像的边缘和纹理细节最大程度地保留下来。滤波器组结构分解如图3所示。

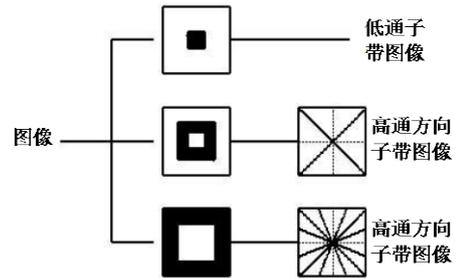


图3 平稳Contourlet变换的非下采样滤波器组结构

3 基于平稳Contourlet变换的图像融合策略

全极化SAR测量得到的散射矩阵为复矩阵:

$$f = \begin{bmatrix} HH & HV \\ VH & VV \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} HH_I + jHH_Q & HV_I + jHV_Q \\ VH_I + jVH_Q & VV_I + jVV_Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于互易介质, 一般 $HV = VH$ 。式(1)中, 下标“ I ”和“ Q ”分别表示复元素的实部和虚部。

将极化图像的 $|HH|^2$ 、 $|HV|^2$ 、 $|VV|^2$ 等3个强度图像进行平稳Contourlet变换, 然后对低频子带Contourlet系数和高频各方向子带Contourlet系数分别按照融合规则进行融合处理, 得到融合后各方向子带的Contourlet系数, 最后进行平稳Contourlet逆变换, 得到融合后强度图像。

由于平稳Contourlet变换是一种平移不变Contourlet分解, 所以各方向纹理和边缘系数较大且

比较集中,因此,对于低频系数采用平均融合规则。

对于含有噪声很少的次高频系数,采用窗口区域能量最大融合规则进行融合处理。在某一尺度高频子带图像中选取一定大小的区域,分别计算待融合图像相应区域的能量 E_{HH} 、 E_{HV} 、 E_{VV} ,并根据区域能量是否最大确定融合后图像高频各方向子带Contourlet系数实现图像融合,即:

$$E = \sum_{m',n'} W_{i,k}^2(m+m',n+n') \quad (2)$$

$$\text{式中 } W_{i,k}(m,n) = \begin{cases} W_{i,k}^{HH}(m,n) & E_{HH} \text{最大} \\ W_{i,k}^{HV}(m,n) & E_{HV} \text{最大, } W_{i,k} \text{表} \\ W_{i,k}^{VV}(m,n) & E_{VV} \text{最大} \end{cases}$$

示第 i 层分解中第 k 个方向的高频子图Contourlet系数; (m,n) 表示待融合子图中对应像素的位置; m' 和 n' 表示融合区域窗口像素的位置; E 表示区域窗口的能量。

对于含噪声较为集中的高频各方向子带则采用区域相关最优加权算子对多个极化图像进行融合处理,可以最大限度地降低噪声的影响以取得最佳的降噪处理而更多地保留原始极化图像的边缘和细节特征。

$$\begin{aligned} W_{i,k}(m,n) = & (W_{i,k}^{HH}(m,n) + r_c(hh,hv) * W_{i,k}^{HH}(m,n) + \\ & (1 - r_c(hh,hv)) * W_{i,k}^{HV}(m,n) + r_c(hh,vv) * W_{i,k}^{HH}(m,n) + \\ & (1 - r_c(hh,vv)) * W_{i,k}^{VV}(m,n)) / 3 \end{aligned} \quad (3)$$

其中相关系数为:

$$r_c(hh,hv) = \frac{E[HH \cdot HV]}{\sqrt{E[|HH|^2] E[|HV|^2]}} \quad (4)$$

$$r_c(hh,vv) = \frac{E[HH \cdot VV]}{\sqrt{E[|HH|^2] E[|VV|^2]}} \quad (5)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示期望因子。

4 极化图像融合实验及结果分析

本文利用平稳Contourlet变换对多个极化图像进行分解,采用不同的融合规则对极化图像融合处理,实验结果如图4f所示。为了说明相干斑噪声的分布和突出图像纹理细节,图4对原始图像进行 512×512 剪切处理,并且将本文融合算法的结果与PWF融合结果和加窗PWF融合结果进行比较。其中图4a、图4b和图4c分别是原始的HH、HV和VV极化图像,图4d是采用PWF算法得到的融合图像,图4e

是采用加窗PWF算法得到的融合图像。从实验结果可以看出,本文提出的算法可以在保留原始图像细节的同时有效地降低相干斑噪声的影响。

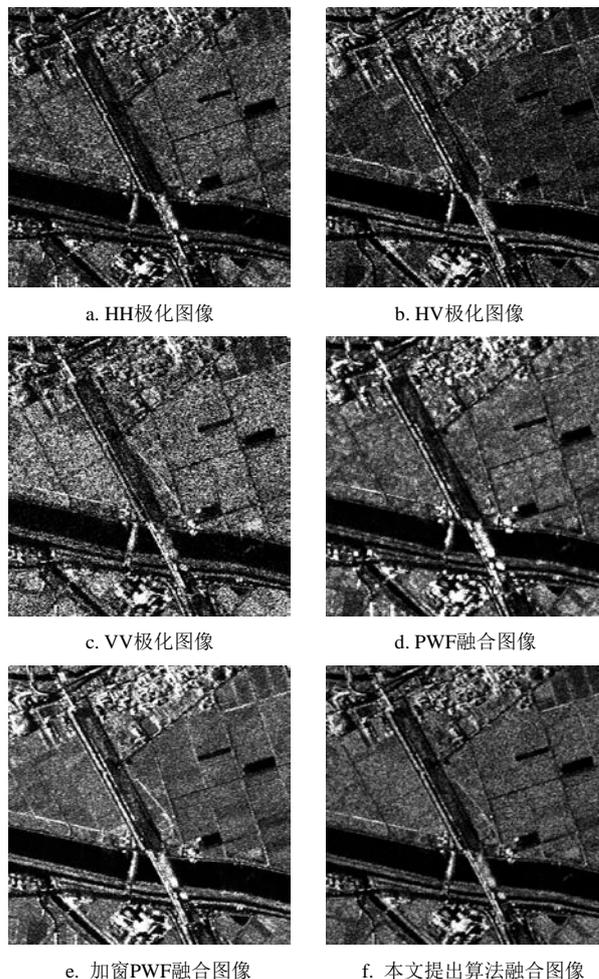


图4 原始极化图像和不同融合方法得到的融合图像

通常,采用图像像素强度的标准差与平均值之比作为相干斑的度量因子^[11],定义为:

$$\frac{s}{m} = \frac{\sqrt{\text{var}(y)}}{\text{mean}(y)} \quad (6)$$

式中 y 表示区域图像各像素的强度; s 表示区域图像像素强度的标准差; m 表示区域图像像素强度的平均值。

为了说明滤波效果,选择图像中 3×3 区域大小点样本进行计算,其相干斑度量因子的大小可采用如图5所示的方式表达,其中横坐标和纵坐标表示图像的大小位置,图像中像素点对应的是相干斑的度量因子。

可以看出,本文的算法在均匀地物处和地物目标亮度大的区域相干斑噪声消除,均可得到满意的结果。从图的视觉效果来看,也可以得到同样的结果。

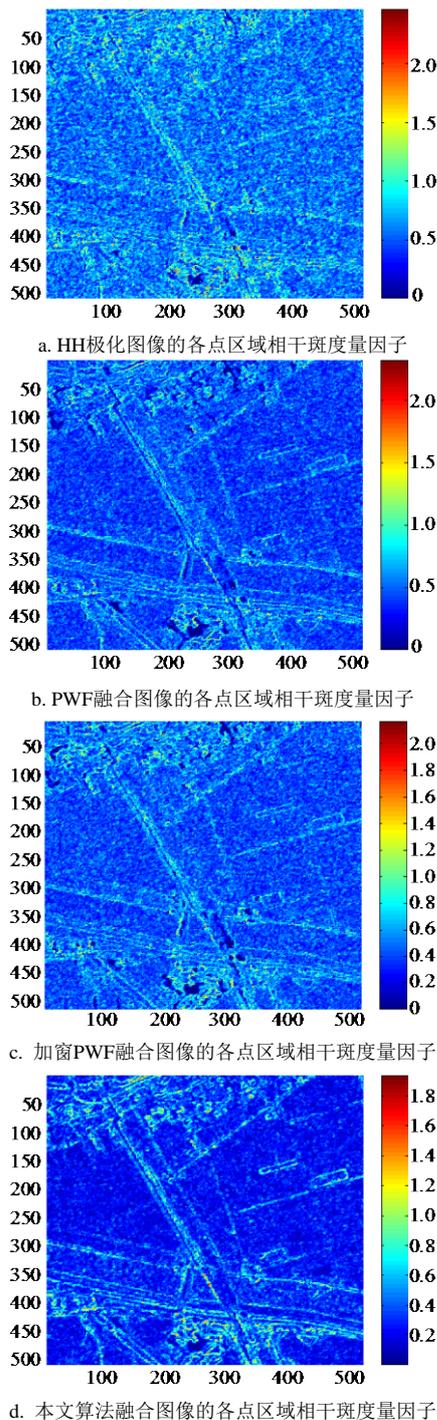


图5 原始图像和不同融合图像的各点区域相干斑度量因子

5 结 论

从实验结果可知, PWF极化图像融合方法可以有效地消除相干斑噪声的影响, 但相干斑消除不彻底, 虽然加窗方法可以自适应消除噪声, 但在图像亮度较大的地方, 模糊比较严重, 在两类目标交界的地方, 模糊现象更严重。而采用平稳Contourlet变换分别对多个极化强度图像进行分解, 再对不同的

高频各方向子带系数采用不同的最优加权算子进行融合处理, 不仅可使地物目标均匀的地方噪声影响降到最小, 而且在地物目标亮度较大的地方, 由于相干斑噪声已得到较大程度的消除, 可以使融合后的图像模糊现象消除, 取得最佳的融合效果。融合后的图像不仅在保留原始图像边缘和纹理细节方面取得了与PWF方法同样的效果, 而且在消除相干斑噪声方法方面取得了比PWF方法更满意的效果。

参 考 文 献

- [1] ULABY F T, ELACHI C. Radar polarimetry for geosciences applications[M]. Boston: Artech House Inc, 1990.
- [2] HAWWAR Y, REZA A. Spatially adaptive multiplicative noise image denoising technique[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2002, 11(2): 1397-1404.
- [3] NOVAK L M, BURL M C. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery[J]. IEEE Trans, 1990, 26(2): 293-305.
- [4] WALD L, RANCHIN T, MANGOLINI M. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1997, 63(6): 691-699.
- [5] ARGENTI F, ALPARONE L. Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2002, 40(11): 2363-2374.
- [6] 汤志伟, 王建国, 黄顺吉. 使用小波分析的图像融合算法[J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(2): 122-125.
TANG Zhi-wei, WANG Jian-guo, HUANG Shun-ji. An image fusion algorithm based on wavelet transformation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2000, 29(2): 122-125.
- [7] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [8] ZHANG De-Xiang, GAO Qing-wei, WU Xiao-pei. Bayesian-based speckle suppression for SAR image using contourlet transform[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2008, 6(1): 79-82.
- [9] PO D D Y, DO M N. Directional multiscale modeling of images using the contourlet transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1610-1620.
- [10] DA CUNHA A L, ZHOU J, DO M N. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and application[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [11] STARCK J L, CANDÈS E, DONOHO D. The curvelet transform for image denoising[J]. IEEE Trans Image Processing, 2002, 11(6): 670-684.

编辑 税红