

SAR 图像的 NSCT 域自适应收缩 相干斑抑制

张 伟¹⁾ 刘文波¹⁾ 张 弓²⁾ 时文华²⁾

¹⁾(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016) ²⁾(南京航空航天大学信息科学与技术学院, 南京 210016)

摘 要 提出了一种基于 Nonsubsampled Contourlet(NSCT)变换域自适应收缩的 SAR 图像相干斑抑制算法。首先将 SAR 图像分解至 NSCT 域,其次对 NSCT 系数进行 Pizurica 自适应收缩。利用 NSCT 变换良好的方向选择性及平移不变性,同时结合 Pizurica 自适应收缩的方向空间相关性及其局部噪声度量,自适应地得到各方向的高频子带系数对应的收缩因子,修正 NSCT 系数,最终将修正后的子带系数通过 NSCT 逆变换获得经过斑点噪声抑制的图像。实验结果表明,与小波域软阈值和 Contourlet 域软阈值算法相比,该算法在有效抑制 SAR 图像斑点噪声的同时能更好、更清晰地保持图像的边缘细节特征。

关键词 SAR 图像处理 相干斑抑制 Nonsubsampled Contourlet 变换 自适应收缩

中图法分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)01-0008-06

SAR Image Denoising Algorithm Based on Adaptive Shrinkage in Nonsubsampled Contourlet Domain

ZHANG Wei¹⁾, LIU Wen-bo¹⁾, ZHANG Gong²⁾, SHI Wen-hua²⁾

¹⁾(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

²⁾(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract A new algorithm for SAR image denoising based on adaptive shrinkage in Nonsubsampled Contourlet Domain, is presented. The nonsubsampled contourlet coefficients of SAR images are reduced by the corresponding Pizurica adaptive shrinkage factor. The Pizurica shrinkage factor takes into account not only the local noise measure, but also prior directional spatial consistency, and combines the shift-invariance and direction selectivity of the nonsubsampled contourlet transform. The shrinkage factor is assembled at each high frequency subband to modify the nonsubsampled contourlet coefficients. Inverse nonsubsampled contourlet transform is performed on the updated coefficients to get the denoised image. Compared with the denoising methods based on wavelet soft-threshold and contourlet soft-threshold, the proposed algorithm can reduce speckle noise more effectively while preserving the edges of the SAR images.

Keywords SAR image processing, speckle noise suppression, Nonsubsampled Contourlet transform, adaptive shrinkage

1 引 言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率的成像雷达,具有全天时、全天候数据获取能力及对一些地物

的穿透性能。由于相干波成像机制的固有特性, SAR 图像不可避免地受到相干斑噪声的污染。相干斑噪声的存在降低了 SAR 图像的辐射分辨率,严重地影响了对 SAR 图像的进一步解读和应用,相干斑噪声的抑制一直是 SAR 图像预处理的关键。

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2001047);航空科学基金项目(04D52032)

收稿日期:2007-09-11; 改回日期:2008-01-08

第一作者简介:张伟(1983 ~),男,南京航空航天大学测试计量技术及仪器专业硕士研究生。主要研究方向为数字信号处理、合成孔径雷达图像处理。E-mail: zhangwei0088@126.com

传统的 SAR 图像斑点噪声的抑制算法有两大类:第 1 类是基于空域滤波的 Lee 滤波、Forest 滤波、Gamma MAP 滤波。这些标准的滤波器虽然算法简单且对斑点噪声有很强的抑制能力,但无法有效保持图像的边缘信息,易造成边缘的模糊化。第 2 类是基于小波域阈值的去噪算法,利用了小波变换的多分辨率特性。但是,小波变换的方向选择性非常有限,不具有平移不变性。而平移不变性对于由滤波器实现的图像多尺度分解而言至关重要,平移不变性的缺少导致了伪吉布斯现象的产生^[1],并且阈值去噪方法存在着对小波系数“过扼杀”的倾向,在保持边缘细节方面,效果并不理想^[2],因此小波阈值去噪后的重建图像边缘容易产生伪吉布斯效应,造成图像边缘的损失。

Do 和 Vetterli 提出了一种较小波变换有更好的方向选择性、对 2 维信号更为稀疏的表示方法——Contourlet 变换^[3-4]。Contourlet 变换有效地保留了图像的几何信息,因而在图像分析应用(如去噪、纹理特征提取)较小波变换有了明显的改善。但 Contourlet 变换中的下抽样及上采样操作会产生频谱混淆,使 Contourlet 变换不具有平移不变性。针对 Contourlet 变换的这些缺陷,Cunha、Zhou 和 Do 提出了具有平移不变性的 Contourlet 变换——Nonsubsampled Contourlet 变换^[1]。Nonsubsampled Contourlet(NSCT)变换由非抽样塔式分解和非抽样方向滤波器组实现,是一种具有平移不变性的多尺度、多方向图像分析方法,能有效地捕捉图像的几何信息。

针对以往相干斑噪声抑制算法的缺点,文中首先对图像进行 NSCT 变换,在 NSCT 系数域针对各尺度、各方向的子带系数利用 Pizurica 自适应收缩算法得到各系数的对应收缩因子并对系数进行修正,最后将修正后的系数经 NSCT 逆变换得到噪声抑制后的 SAR 图像。该算法充分利用了 NSCT 变换良好的多分辨率及方向选择性,且 NSCT 变换的平移不变性避免了小波阈值及 Contourlet 阈值算法中伪吉布斯现象的产生,Pizurica 自适应收缩算法在考虑系数的局部噪声度量的同时结合各个子带系数之间的空间相关性,避免了对系数的过扼杀,实验结果表明,该算法在抑制 SAR 图像斑点噪声及保留图像的边缘细节方面达到了很好的效果。

2 NSCT 变换

为了实现平移不变性,NSCT 由非抽样塔式结构和非抽样方向滤波器组构成。

非抽样塔式结构的基本结构单元为一个双通道的非抽样滤波器组^[5]。为了用非抽样塔式结构实现对 2 维信号的多尺度分解,通过迭代使用非抽样的二通道滤波器组实现信号的塔式分解。对于第 2 级分解,通过对二通道滤波器组中所有的滤波器系数沿行、列方向进行二插值得到。图 1 所示为非抽样的塔式分解结构,一个 k 级的非抽样塔式分解结构其等效的滤波器为

$$H_n^{eq}(z) = \begin{cases} H_1(z^{2^{n-1}}) \prod_{j=0}^{n-2} H_0(z^{2^j}) & 1 \leq n \leq 2^k \\ \prod_{j=0}^{n-1} H_0(z^{2^j}) & n = 2^k \end{cases} \quad (1)$$

式(1)为该滤波器的传递函数,其中 k 为滤波器的级数, z^j 表示 $[z_1^j, z_2^j]$, $H_0(z)$ 及 $H_1(z)$ 为对应的低通、高通 2 维滤波器传递函数,这些滤波器实现了如图 1 所示的图像多分辨率分解。通过迭代使用双通道非抽样滤波器组实现非抽样塔式分解,对于上抽样后的滤波器组虚线框内为其有效频谱特性。

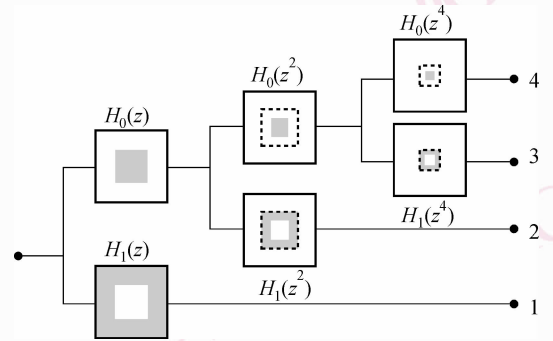


图 1 非抽样塔式分解

Fig. 1 A nonsubsampled pyramid

非抽样的方向滤波器组也是一个双通道的非抽样滤波器组,方向滤波器组^[6]用于实现信号的多方向分解,高层的方向分解较为复杂,可参见文献^[7]。

图 2(a)为 NSCT 变换的流程图,首先由非抽样塔式结构将输入 2 维信号分解为一个高频子带,一个低频子带,用非抽样方向滤波器组结构将高频子带分解为几个方向子带。类似的分解步骤可以在非抽样塔式结构输出的低频子带上反复进行实现非抽

样的 Contourlet 变换。塔式结构的高频子带上的方向分解数必须是 2 的整数次幂,不同尺度的方向分解可以有不同的方向数。

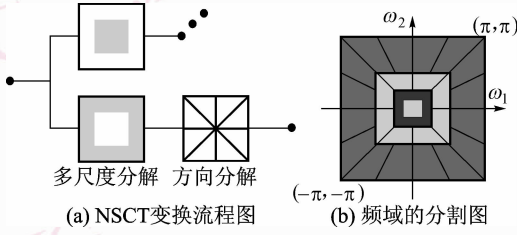


图 2 NSCT 变换

Fig. 2 The nonsubsamped contourlet transform

NSCT 变换由于没有下抽样与上采样过程,因而具有平移不变性。同时由于分解过程中没有进行下抽样操作故 NSCT 变换是一个冗余变换,然而,冗余变换设计更为灵活、简便,并在很多应用如图像的去噪、增强中,冗余变换优于非冗余变换^[1]。

3 NSCT 域自适应收缩相干斑抑制

Pizurica 收缩算法^[8]不仅考虑小波变换的各子带系数的局部噪声度量,而且认为有意义的子带系数会受到一定的空间约束而形成特定方向的边缘等细节信息。故系数收缩因子必须同时体现噪声的局部度量(由系数的幅值评估)及系数的空间相关性。该算法将小波域内 Pizurica 收缩算法思想推广到 NSCT 变换域内,用 w_l 表示某方向子带中空间位置为 l 对应的系数值, N_l 表示系数 w_l 对应的邻域,针对 NSCT 变换的八方向子带分解所设计的 8 个不同方向子带系数的邻域^[9]如图 3 所示,每个图中的灰色像素构成了特定方向子带上的黑色中心像素点的邻域。

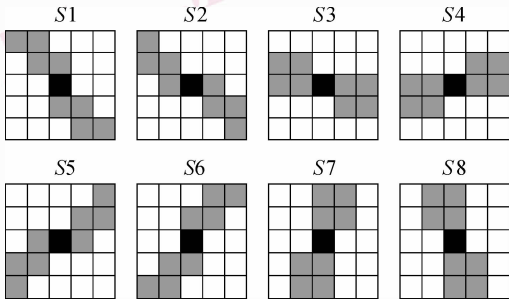


图 3 Pizurica 算法的 8 个邻域图

Fig. 3 Definition of local eight-band neighborhoods for the Pizurica algorithm

用 ξ_l 反映噪声度量对收缩因子的影响,子带系数的近似噪声度量 m_l 由其幅值来进行评估($m_l = |w_l|$),变量 ξ_l 是关于 m_l 的单调增函数, m_l 越大,系数更可能属于信号,而相应的收缩因子也越大。

$$\xi_l = \frac{m_l - (1 - \alpha)T}{(1 + \alpha)T - m_l}$$

$$(1 - \alpha)T < m_l < (1 + \alpha)T \quad (2)$$

其中, T 为噪声度量的最优阈值, α 用来控制阈值范围。在该算法中不同方向子带对应不同 T , $T = 3\sqrt{MAD(|w_l|)}/0.6745$, 其中 $MAD(|w_l|)$ 为各方向子带系数的模值的中值。

变量 η_l 反映邻域系数对其影响,体现系数之间的空间相关性。属于边缘的像素对应系数在空间上是联接的,当一个系数其周围较多的系数均属于信号时它更可能属于信号,而一个孤立的幅值较大的噪声则更可能是一个噪声点。系数的空间相关性通过变量 t_l 来度量:

$$t_l = \sum_{k \in N_l} (2x_k - 1) \quad (3)$$

其中, $k \in N_l$, x_k 为空间位置为 k 的子带系数对应的二元标识,当系数属于噪声时($m_k < T$) $x_k = 0$,当系数属于信号时($m_k > T$) $x_k = 1$ 。由式(3)知,当 $t_l > 0$ 时该系数邻域内大部分系数均被认为是边缘, η_l 用于定量化描述系数的空间相关性,

$$\eta_l = \exp(t_l) \quad (4)$$

Pizurica 自适应收缩算法对各子带系数 w_l 的收缩公式如下:

$$w_l^{\text{new}} = w_l q_l \quad (5)$$

收缩因子 q_l 为

$$q_l = \begin{cases} 0 & m_l \leq (1 - \alpha)T \\ \frac{\xi_l^\beta \eta_l^\gamma}{1 + \xi_l^\beta \eta_l^\gamma} & (1 - \alpha)T < m_l < (1 + \alpha)T \\ 1 & m_l \geq (1 + \alpha)T \end{cases} \quad (6)$$

当噪声度量 $m_l \leq (1 - \alpha)T$ 或 $m_l \geq (1 + \alpha)T$ 时,收缩因子不受系数的空间相关性的限制,对应 $q_l = 0$ 或 $q_l = 1$ 。当噪声度量位于阈值区间($(1 - \alpha)T, (1 + \alpha)T$)内($0 \leq \alpha \leq 1$),噪声度量 m_l 并不能充分地判定系数属于噪声或是信号。因此当 $(1 - \alpha)T < m_l < (1 + \alpha)T$ 时,收缩因子 $0 < q_l < 1$,收缩因子的大小取决于变量 ξ_l 及 η_l 可由式(2)~(4)所决定,其中引入参数 β 和 γ 用于控制噪声度量 m_l 及系数空

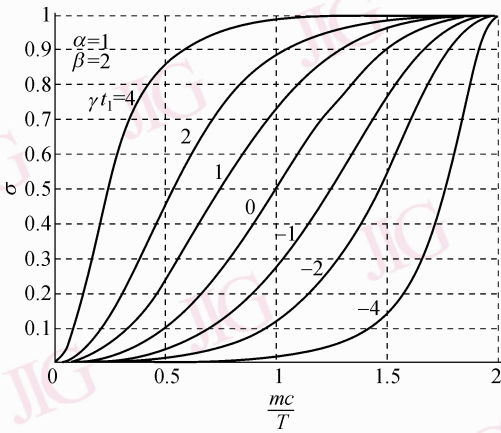


图 4 收缩因子曲线图

Fig. 4 A family of shrinking curves

间约束 t_i 对收缩因子影响。图 4 所示为 $\alpha = 1$, $\beta = 2$, $-4 \leq \gamma t_i \leq 4$ 时对应的收缩因子曲线图。当系数的幅值等于该子带阈值 ($\frac{m_i}{T} = 1$), 且其邻域内有相同个数的边缘点和非边缘点 ($t_i = 0$) 时, 该系数对应的收缩因子为 0.5。当系数的幅值 m_i 较大但其方向邻域参数 t_i 较小时, 该系数也会被较大程度地收缩; 当系数的幅值 m_i 较小但其方向邻域参数 t_i 较大时, 该系数会被较大程度地保留。

Pizurica 自适应收缩算法流程为

- (1) 由式 $T = 3 \sqrt{MAD(|w_i|)}/0.6745$ 得到各方向子带系数的噪声度量最优阈值 T ;
- (2) 计算各子带系数对应的二元标识 x_i ;
- (3) 由式 (2) ~ (4) 得到噪声度量 ξ_i 及空间相关性度量 η_i ;
- (4) 由式 (6) 得到各子带系数对应的收缩因子 q_i ;
- (5) 用收缩公式 (5) 对各子带系数 w_i 进行修正得到修正后得子带系数 w_i^{new} 。

基于 NSCT 域系数 Pizurica 自适应收缩去噪算法流程为 (1) 将图像分解至 NSCT 域; (2) 除最低频子带系数外, 通过 Pizurica 收缩算法自适应地得到其他各尺度、各方向子带系数对应的收缩因子, 并利用收缩因子修正各个子带系数; (3) 将修正后的 NSCT 系数进行 NSCT 重构得到相干斑抑制后的图像。

对于算法中尺度分解层数的选择, 当分解层数太小时, 噪声对应的模板大值不能足够衰减, 使得难以区分噪声与信号; 但如果分解尺度过大, 则又会失

去信号的某些重要的局部特征^[10], 因而在实际的使用中需根据相干斑噪声在相应的多尺度分解空间上的分布特性和算法的复杂度来适当地选取尺度分解层数。文献[11]、[12]中指出 3 层小波分解后的高频子带系数已经包含了大部分的斑点噪声信息, 因而在小波和 Contourlet 变换中尺度分解选择 3 层为宜。由于 NSCT 是冗余变换, 计算量比小波和 Contourlet 大, 使用 NSCT 进行 SAR 图像相干斑抑制的实验结果表明, 两层的尺度分解已取得较好的去噪效果, 3 层的尺度分解在计算量增加的情况下, 去噪性能并无明显的改善, 因此, 对于 NSCT 这里选择两层尺度分解。为了充分利用各像素点的空间相关性, 对应于 Pizurica 算法的 8 个方向邻域本文对各尺度高频子带进行八方向的分解。

Pizurica 参数 α 用来控制系数收缩的阈值范围, β 和 γ 分别是噪声度量 m_i 及系数空间约束 t_i 对收缩因子影响的权重, 文献[8]指出对于 Pizurica 参数的选择需根据其应用的图像场合进行设置, 通过大量实验得到一组用于本文算法的最优的参数为 $\alpha = 1, \beta = 2, \gamma = 2$ 。

NSCT 尺度分解滤波器选择不可分离的最大平坦滤波器 (maxflat), 该滤波器因其不可分离性故其设计更加灵活, 频率选择性能更好, 较“9-7”、“pyr”等更接近理想尺度分解滤波器的频谱特性, 能取得较好的去噪效果, 方向分解滤波器选择 pkva 钻石形滤波器^[13], pkva 钻石形滤波器是种两通道的不可分离双正交滤波器, 具有完全重构性、正则性, 能保持其对应的 1 维滤波器良好的频率特性, 阻滞衰减大、通带纹波小, 频率选择性好。

4 实验结果分析与对比

实验时本文算法中选择 maxflat 滤波器, 方向分解选择 pkva 滤波器, 分解级数为两级, 每级对应 8 个方向, Pizurica 收缩参数 $\alpha = 1, \beta = 2, \gamma = 2$ 。为了与本文算法去噪性能进行比较, 选择小波软阈值算法和 Contourlet 软阈值算法, 文献[14]、[15]均指出 Contourlet 去噪时使用 9-7 尺度滤波器和 pkva 方向分解滤波器较其他的滤波器组合有更好的去噪效果, 因而为了便于与本文算法进行比较, Contourlet 域软阈值算法中尺度分解选择 9-7 滤波器, 方向分解选择 pkva 滤波器, 分解级数为 3 级, 每级对应 8 个方向; 小波域软阈值算法中选择用于 SAR 图像去

噪效果较好的具有较高消失矩、支撑较长的小波基 sym8 小波^[16], 分解级数选择 3 级。3 种算法中各子带的阈值 $T = 3 \sqrt{MAD(|w_l|)/0.6745}$ 。

图 5 所示为两组实测 SAR 图像(图像大小为 256×256)分别用小波域软阈值、Contourlet 软阈值及本文算法进行实验的相干斑抑制结果。从目视效果来看, 本文算法相对于小波域及 Contourlet 域软阈值算法来说, 在去噪效果和边缘细节的保持上都为最优。表 1 定量地对 3 种 SAR 图像去噪算法进行了比较。包括均值 μ , 标准差 σ , 等效视数 $ENL = \mu^2/\sigma^2$, 相干斑抑制因素 $F = (S/S_f)^{2[17]}$, 其中, S 是原 SAR 图像的标准差, S_f 是经相干斑抑制后 SAR 图像的标准差。等效视数及相干斑抑制因素是定量

评价均匀区域斑点噪声抑制效果的重要参数。

一般等效视数越大, 则相干斑抑制因素越大, 图像受相干斑影响越弱, 图像去噪效果越好, 可解译性越好。从表 1 可以看出, 本文算法较小波域软阈值及 Contourlet 域软阈值而言其均值与原图像最为接近, 且其对应的等效视数与相干斑抑制因素最大。从图 5 中可以看出本文算法在保证很好的平滑效果时, 较小波软阈值及 Contourlet 软阈值能更好地保留了原图像的边缘等细节信息, 边缘的清晰度更高。

实验结果表明, NSCT 域 Pizurica 自适应收缩 SAR 图像相干斑抑制算法, 其去噪结果无论在目视效果还是在各项去噪性能指标上较小波域软阈值去噪算法、Contourlet 域软阈值去噪算法都有了很大的改善。

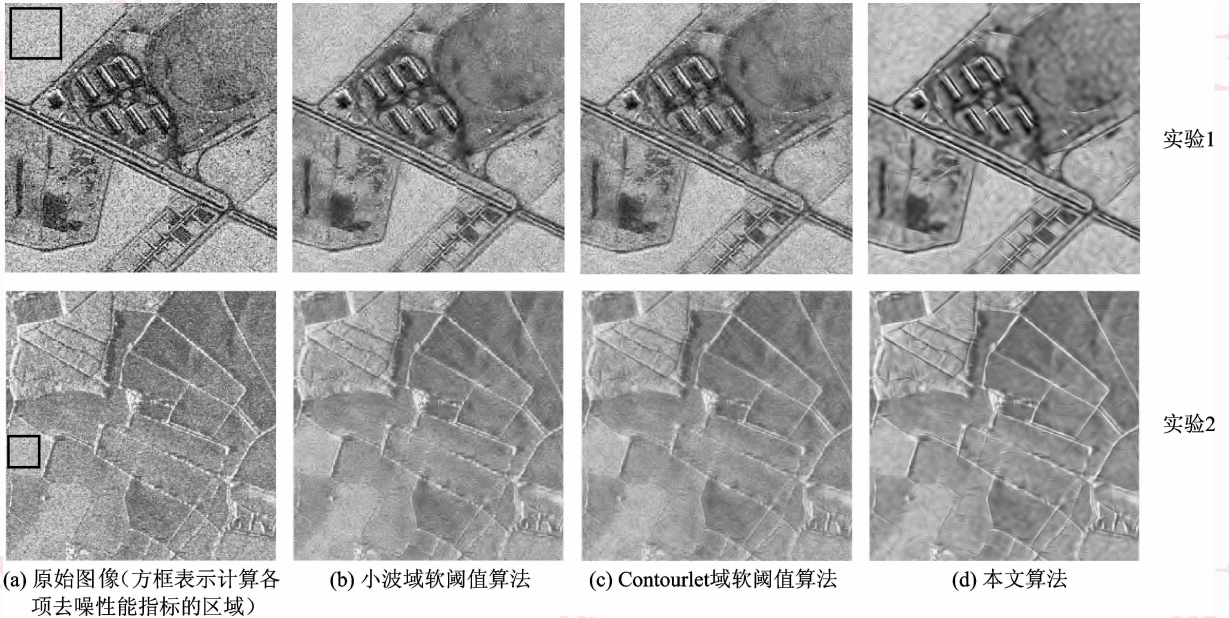


图 5 实测 SAR 图像不同算法去噪结果

Fig. 5 Despeckling results of the real SAR image using different algorithm

表 1 3 种去噪算法性能的定量评价

Tab. 1 Quantitative evaluation of three despeckling algorithms

	图 5 实验 1				图 5 实验 2			
	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(c)	(d)
μ	109.70	109.65	109.80	109.69	173.90	174.29	174.40	174.04
σ	28.21	16.91	16.06	10.48	28.21	16.91	16.06	10.48
ENL	15.12	42.07	46.71	109.51	63.20	239.31	272.59	396.65
F		2.78	3.08	7.24		3.77	4.29	6.27

5 结论

针对 Contourlet 变换不具有平移不变性和阈值去噪算法对变换域系数的过扼杀现象,提出了将 NSCT 与 Pizurica 收缩算法相结合的 SAR 图像去噪算法。该算法充分利用了 NSCT 的冗余性和良好的方向选择性,及 Pizurica 收缩算法对图像边缘的有效保留特性。实验结果表明,与小波域、Contourlet 域软阈值去噪算法相比,该算法无论从目视效果,还是从去噪的定量评价指标上来看,都在有效地去除 SAR 图像斑点噪声的同时,保留了清晰的边缘等细节信息。

参考文献 (References)

- 1 Arthur L C, Zhou J P, Minh N D. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications[J]. IEEE Transactions on Images Processing, 2006, **15**(10): 3089-3101.
- 2 Zhang Xu, Luo Jian-shu. SAR image denoising based on adaptive shrinkage factor [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, **36**(3): 102-104. [张旭,罗建书. 基于自适应收缩因子的 SAR 图像去噪[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, **36**(3): 102-104.]
- 3 Minh N D, Vetterli M. Contourlets: A directional multiresolution image representation [A]. In: Proceedings of IEEE International Conferences of Image Processing [C], New York, USA, 2002: 357-360.
- 4 Minh N D, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Images Processing, 2005, **14**(12): 2091-2106.
- 5 Zhou J P, Arthur L C, Minh N D. Nonsubsampling contourlet transform: construction and application in enhancement [A]. In: Proceedings of IEEE International Conferences of Image Processing [C], Genoa, Italy, 2005: 469-472.
- 6 Bamberger R H, Smith M J. A filter bank for the directional decomposition of images: theory and design[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, **40**(4): 882-893.
- 7 Khan M A, Khan M K. Coronary angiogram image enhancement using decimation-free directional filter banks[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C], Montreal, QC, Canada, 2004: 441-444.
- 8 Pizurica A, Philips W, Lemahieu I, et al. Image de-noising in the wavelet domain using prior spatial constraints[A]. In: Proceedings of the IEE International Conference on Image Processing and its Application [C], Manchester, UK, 1999: 216-219.
- 9 Rosiles J G. Image and Texture Analysis using Biorthogonal Angular Filter Banks[D]. Atlanta, USA: School of Electrical and Computer Engineering, 2004.
- 10 Sun Yan-kui. Wavelet Analysis and its Application [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. [孙延奎著. 小波分析及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.]
- 11 Rosiles J G, Smith M J. Model-based coding of sar and ultrasound images[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems [C], Jounieh, Lebanon, 2000: 62-65.
- 12 Simard M, Degrandi G, Thomson K P. Analysis of speckle noise contribution on wavelet decomposition of SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, **36**(6): 1953-1962.
- 13 Phoong S M, Kim C W, Vaidyanathan P P. A new class of two-channel biorthogonal filter banks and wavelet bases [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, **43**(3): 649-665.
- 14 Huai Jing-qu, Yu Hua-peng, Wei Feng-sun. Texture image retrieval based on contourlet coefficient modeling with generalized Gaussian distribution [A]. In: Proceedings of International Symposium on Intelligence Computation and Applications [C], Wuhan, China, 2007: 493-502.
- 15 Li Yan-ling, Guo Jian-tao, Chen Xin-wu. Filter selection of contourlet based on denoising [J]. Journal of Xinyang Normal University, 2007, **20**(4): 518-520. [李艳灵, 郭建涛, 陈新武. 轮廓波消噪中滤波器的选择 [J]. 信阳师范学院学报, 2007, **20**(4): 518-520]
- 16 Pan Quan. Wavelet Filtering Method and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. [潘泉著. 小波滤波方法及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.]
- 17 Xie H, Ulaby F T, Pience L E. Performance metrics for SAR speckle-suppression filter [A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Hamburg, Germany, 1999: 1540-1542.