

基于尺度空间相关的 SAR 图像 NeighShrink 滤波算法

李恒超^{①②} 洪文^① 吴一戎^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 为有效滤除相干斑噪声和保持图像的结构信息, 该文提出了基于尺度空间相关的 SAR 图像 NeighShrink 滤波算法。首先, 利用所提出的单选择可调参数的尺度空间相关法, 检测对数 SAR 图像经平稳小波变换所得细节子带中分别与噪声相关及与结构信息相关的小波系数。然后, 对与噪声相关的小波系数, 直接采用 NeighShrink 算法以获得较好的平滑效果; 而对于与结构信息相关的小波系数, 则提出加权的 NeighShrink 算法来达到结构信息保持的目的。仿真实验验证了该文算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达图像; 相干斑噪声; 平稳小波变换; 尺度空间相关

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1940-04

NeighShrink Despeckling for SAR Images Based on Scale Space Correlation

Li Heng-chao^{①②} Hong Wen^① Wu Yi-rong^①

^①(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To effectively suppress speckle noise and preserve structure information of SAR images, a NeighShrink despeckling based on scale space correlation is proposed in this paper. Firstly, for detail subbands of logarithmically transformed SAR images decomposed by stationary wavelet transform, the single selective scale space correlation with tunable parameter is introduced to separate the wavelet coefficients related to noise and the ones related to structure information. Subsequently, as regards the former, the NeighShrink is directly taken advantage of to obtain good smoothing effect. For the latter, the weighted NeighShrink is proposed to achieve the preservation of structure information. The experimental results verify the validity of the proposed method.

Key words: SAR images; Speckle noise; Stationary wavelet transform; Scale space correlation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种可全天候、全天时工作的主动式微波成像系统, 已被广泛应用于国土资源调查、洪水监测、城市规划、矿产勘探、农业估产等领域。但相干成像的特性使 SAR 图像不可避免地受到相干斑噪声的影响, 导致图像的空间分辨率降低、可解译性差及计算机辅助场景分析困难。因此, 相干斑滤波对 SAR 图像处理和应用有着重要的意义。

SAR 图像的相干斑滤波技术大致可分为多视处理、空域自适应滤波和多分辨率滤波三类。其中, 多视处理在滤除相干斑噪声的同时, 降低了图像的空间分辨率^[1]。空域自适应滤波如 Lee 滤波^[2], Kuan 滤波^[3], Frost 滤波^[4]以及 Gamma MAP 滤波^[5]等则在滤波窗口选择上存在平滑和边缘信息、纹理细节保持间的矛盾。而多分辨率滤波借助小波变换良好的

时频局部性、多分辨率特性及稀疏性等特点成为近来研究的热点。其中, 阈值收缩算法因其简单、有效得到人们的普遍关注。

Donoho 等^[6, 7]最先引入阈值收缩滤波的概念, 并提出 VisuShrink 与 SureShrink 算法。Thitimajshima^[8]将其软阈值形式应用于 SAR 图像的相干斑滤波。但 VisuShrink 与 SureShrink 均没有考虑邻域系数对当前进行阈值收缩小波系数的影响。Cai 等^[9]利用邻域系数间的相关性, 提出针对一维信号的 NeighCoeff 算法。Chen^[10]等将 NeighCoeff 算法推广到二维图像滤波, 提出了 NeighShrink 算法, 能够获得比维纳滤波, VisuShrink 及 SureShrink 更好的滤波效果。截至目前, NeighShrink 算法还没有被应用到 SAR 图像的滤波中。然而正交小波变换的降采样操作致使 NeighShrink 收缩滤波后的图像在不连续处出现伪 Gibbs 振荡现象, 同时没有考虑尺度间系数的相关性及不同方向细节子带具有不同的能量聚类特性。针对 SAR 图像滤波既要有效滤除相干斑噪

声,又要保持图像结构信息的要求,借助 NeighShrink 的优点,且考虑其不足,本文提出了基于尺度空间相关的 SAR 图像 NeighShrink 滤波算法。

2 平稳小波变换

平稳小波变换(SWT)是由 Nason 和 Silverman^[11]提出的一种非正交的小波变换,可通过修正正交小波变换得到。该变换在每次分解后不进行降采样,而是分别在低通、高通滤波器的每两个系数间插入 2^{j-1} 个零来实现滤波器的扩展

$$h_k^{[j]} = \begin{cases} h_{k/2^j}, & k = 2^j m \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad g_k^{[j]} = \begin{cases} g_{k/2^j}, & k = 2^j m \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $m \in \mathbb{Z}$ 。经平稳小波变换后的近似信号、细节信号与原信号具有相同的长度。同时,平稳小波变换的重构采用对所有 ε -采样离散小波变换的重构结果进行平均,保证了时移不变性,能很好地抑制伪 Gibbs 振荡现象。将一维平稳小波变换推广到二维,可实现图像的平稳小波变换分解。

3 基于尺度空间相关的 SAR 图像 NeighShrink 滤波算法

SAR 图像中的相干斑噪声是雷达图像分辨单元内大量散射子回波均匀相干叠加的结果,可描述为

$$I(m,n) = S(m,n)U(m,n), \quad (m,n) \in \mathbb{Z}^2 \quad (2)$$

其中 I 为观察的 SAR 图像, S 为雷达散射截面(RCS), U 为相干斑噪声。为进行小波阈值收缩滤波,对式(2)两边取对数将乘性相干斑噪声转化为加性噪声, Xie 等^[12]研究表明对数变换的相干斑噪声可近似认为是非零均值的高斯白噪声。再进行平稳小波变换可得

$$y(m,n) = x(m,n) + \varepsilon(m,n) \quad (3)$$

其中 $y(\cdot)$ 、 $x(\cdot)$ 、 $\varepsilon(\cdot)$ 分别为 $\log I(\cdot)$ 、 $\log S(\cdot)$ 及 $\log U(\cdot)$ 的平稳小波变换系数。

3.1 基于尺度空间相关的小波系数分类

小波变换除具有时频局部性、多分辨率特性及稀疏性外,还具有聚类性和持续性的特点。聚类性表现在如果同一尺度内某一系数较大(或较小),则其邻域内的系数也非常可能较大(或较小)。NeighShrink 算法考虑了聚类特性,但忽略了小波变换的持续性,即与结构信息相关的较大(或较小)的小波系数沿着尺度方向具有一定的传递性。相反,与噪声相关小波系数的幅值则随着尺度的增加迅速衰减。Xu 等^[13]用结构信息和噪声分别对应的小波系数在相邻尺度上表现出来的特性,提出基于尺度空间相关的小波系数分类方法,但该方法迭代结束条件中的噪声功率对多数图像而言难以获得。故此,本文提出单选择可调参数的尺度空间相关分类方法,并应用于对数 SAR 图像经平稳小波变换所得小波系数的分类。

令 $y_{j,k}^{D_i}$ 为细节子带 D_i ($D_i \in \{\text{LH}_i, \text{HL}_i, \text{HH}_i\}$, $i = 2, \dots, J-1$) 上空间位置 (j,k) 处噪声图像对应的小波系数,定义尺

度空间相关函数

$$C_{j,k}^i = y_{j,k}^{D_i} \cdot y_{j,k}^{D_{i+1}} \quad (4)$$

则单选择可调参数的尺度空间相关分类方法描述如下:

(1)在当前尺度上对每个细节子带根据式(4)计算尺度空间相关函数的值 $C_{j,k}^i$;

(2)对 $C_{j,k}^i$ 作归一化处理:

$$C_{j,k}^i = C_{j,k}^i \sqrt{\frac{\sum_j \sum_k (y_{j,k}^{D_i})^2}{\sum_j \sum_k (C_{j,k}^i)^2}} \quad (5)$$

(3)用下式对小波系数进行分类

$$M_{j,k}^{D_i} = \begin{cases} 1, & |C_{j,k}^i| > K^i |y_{j,k}^{D_i}| \\ 0, & |C_{j,k}^i| \leq K^i |y_{j,k}^{D_i}| \end{cases} \quad (6)$$

其中 $M_{j,k}^{D_i}$ 为子带 D_i 上空间位置 (j,k) 处的掩码, 1 表示此处对应结构信息相关的小波系数, 0 则为噪声相关的小波系数。 $K^i = K/2^i$ 为可调参数,选择不同的 K 则每一分解级对应不同的可调参数值。

3.2 分类后小波系数的滤波

分类后的小波系数分别采取不同的滤波策略。对与噪声相关的小波系数,直接用 NeighShrink 算法以获得较好的平滑效果。而对于与结构信息相关的小波系数,结合不同方向的细节子带具有不同的能量聚类特性,本文提出了加权 NeighShrink 算法来达到结构信息保持的目的。

3.2.1 NeighShrink 算法^[10] 对每一个 $y_{j,k}^{D_i}$, 在其邻域窗口 $B_{j,k}$ 内计算 $(S_{j,k}^{D_i})^2$

$$(S_{j,k}^{D_i})^2 = \sum_{(m,n) \in B_{j,k}} (y_{m,n}^{D_i})^2 \quad (7)$$

如果 $(S_{j,k}^{D_i})^2$ 小于 T^2 , 则设置 $y_{j,k}^{D_i}$ 等于零。否则,用下式收缩该小波系数:

$$\hat{x}_{j,k}^{D_i} = y_{j,k}^{D_i} \left(1 - T^2 / (S_{j,k}^{D_i})^2\right)_+ \quad (8)$$

其中 $T = \sigma_n \sqrt{2 \log N^2}$ 为 Donoho 通用阈值, N 为图像大小, σ_n 为高斯噪声标准差。NeighShrink 具有比维纳滤波, VisuShrink, SureShrink 更好的滤波效果,且 3×3 为滤波最佳邻域窗口。

3.2.2 加权 NeighShrink 算法 图 1 给出美国 Sandia 国家实验室 1m 分辨率, Ku 波段 SAR 图像对应的对数图像经二维平稳小波变换在第二分解级上的水平、垂直及对角子带。由图 1 可见,在水平、垂直及对角子带上能量聚类分别沿着水平、垂直及对角方向。考虑该能量聚类特性,在 NeighShrink 算法的基础上提出了加权 NeighShrink 算法。

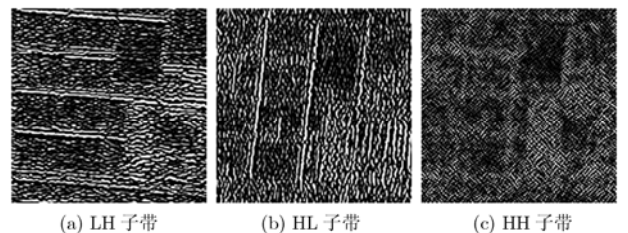


图 1 对数 SAR 图像经平稳小波变换的第二级分解

仍然定义 $y_{j,k}^{D_i}$ 与 $x_{j,k}^{D_i}$ 分别为平稳小波变换子带 D_i ($D_i \in \{LH_i, HL_i, HH_i\}$) 上空间位置 (j, k) 处噪声图像及其无噪图像的小波系数。并令 κ^{LH} , κ^{HL} , κ^{HH} 分别为水平、垂直及对角细节子带来计算 $(S_{j,k}^{D_i})^2$ 的加权系数, 其值如图 2 所示。则对每一个 $y_{j,k}^{D_i}$, 在其邻域窗口 $B_{j,k}$ 内用下式计算 $(S_{j,k}^{D_i})^2$

$$(S_{j,k}^{D_i})^2 = \begin{cases} \sum_{(m,n) \in B_{j,k}} \kappa^{LH} (y_{m,n}^{D_i})^2, & D_i \in LH_i \\ \sum_{(m,n) \in B_{j,k}} \kappa^{HL} (y_{m,n}^{D_i})^2, & D_i \in HL_i \\ \sum_{(m,n) \in B_{j,k}} \kappa^{HH} (y_{m,n}^{D_i})^2, & D_i \in HH_i \end{cases} \quad (9)$$

如果 $(S_{j,k}^{D_i})^2$ 小于 T^2 , 则设置 $y_{j,k}^{D_i}$ 等于零。否则, 用式(8)收缩该小波系数。

1/2	1/2	1/2	1/2	3/2	1/2	9/8	3/2	9/8
3/2	3	3/2	1/2	3	1/2	3/2	3	3/2
1/2	1/2	1/2	1/2	3/2	1/2	9/8	3/2	9/8
(a) κ^{LH}			(b) κ^{HL}			(c) κ^{HH}		

图 2 加权系数的值

3.3 SAR 图像滤波算法描述

综上所述, 基于尺度空间相关的 SAR 图像 NeighShrink 滤波算法执行步骤如下:

- (1)对 SAR 图像 I 取对数, 并进行最大 J 级平稳小波分解。
- (2)根据文献[14]分析, 利用下式估计噪声方差 $\hat{\sigma}_n^2 = \text{median}(|y_{j,k}^{HH_1+HH_2}|) / 0.6745$ (10)
- (3)计算 Donoho 通用阈值 $T = \hat{\sigma}_n \sqrt{2 \log N^2}$ 。
- (4)对 LH_i 、 HL_i 及 HH_i ($i = 1, \dots, J - 1$) 各子带, 用单次选择可调参数的尺度空间相关法对小波系数进行分类。对与噪声相关的小波系数, 直接利用 NeighShrink 滤波; 而对与结构信息相关的小波系数, 则用加权 NeighShrink 滤波。
- (5)对于 LH_J , HL_J 及 HH_J 子带, 同样用加权 NeighShrink 滤波。
- (6)调整均值且对收缩滤波后的小波系数作平稳小波逆变换。
- (7)进行指数变换得滤波后的图像 \hat{S} 。

4 仿真实验

实验 1 用合成 SAR 图像分析本文算法对 NeighShrink 算法的改进效果 选择一幅 256×256 大小的航空图像为原始图像(如图 3(a)所示), 通过乘以空间不相关、幅度格式的 3 视仿真相干斑噪声而得到相应的合成 SAR 图像。实验中, 两种滤波算法均采用 4 消失矩的 Daubechies 母小波对图像进行最大 5 级分解。另外, 鉴于仿真相干斑噪声是空间不相关的, 本文算法仅用 HH_1 子带的的数据来估计噪声方差, 而 NeighShrink 算法则考虑正交小波变换与平稳小波变换两种

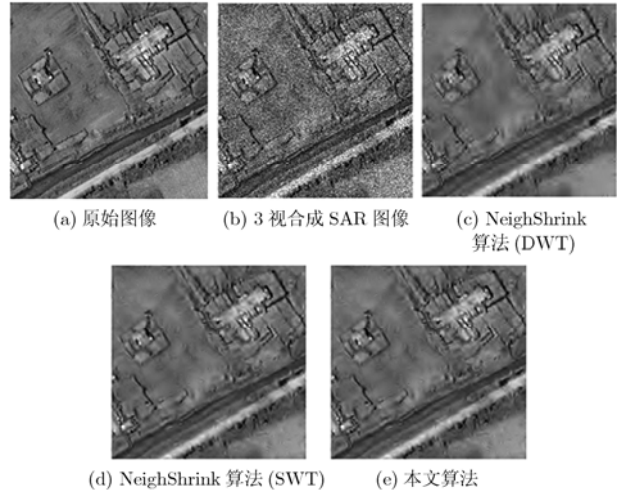


图 3 各种滤波算法对合成 SAR 图像滤波的效果比较

情况。为量化分析本文算法对 NeighShrink 算法的改进, 选择比值图像(相干斑图像与滤波图像)的等效视数(ENL)^[15]作为评价准则。

表 1 给出本文算法与 NeighShrink 算法的量化性能比较。由表 1 可知, 本文算法的 ENL 更接近于理论值, 说明在结构信息保持上要优于 NeighShrink 算法。由此可见, 借助平稳小波变换及采用加权 NeighShrink 算法来处理与结构信息相关的小波系数对提高结构信息保持是有效的。图 3(b)-图 3(e)分别给出了 3 视合成 SAR 图像及各滤波算法的滤波结果。不难看出, 基于平稳小波变换的滤波算法能有效地压缩在正交小波变换中由降采样操作导致的伪 Gibbs 振荡现象(如图 3(c)中边缘像素的邻域所示), 具有更好的视觉效果。

表 1 结构信息保持的量化性能比较

方法	ENL	
	正交小波变换	平稳小波变换
NeighShrink	2.5841	2.9268
本文算法	-	2.9780

实验 2 用实际 SAR 图像比较本文算法与其它滤波算法的滤波性能 在实验 2 中, 仍然选取美国 Sandia 国家实验室 Ku 波段的 SAR 图像(如图 4(a)所示)作为实验数据, 并同 Gamma MAP 滤波^[5]、小波软门限^[16]进行滤波性能比较。其中, Gamma MAP 滤波使用 7×7 的滤波窗口, 小波软门限采用 1.5 倍的噪声标准差作为门限值, 并选择标准偏差与均值比(S/M)^[17]作为量化评估去斑能力的评价准则。其中, S/M 值越小则表明去斑效果越好。

表 2 给出上述各种方法滤波图像中两个不同区域的 S/M 值。由表 2 可见, 本文算法具有最好的滤波性能, 其次是 Gamma MAP 滤波, 而小波软门限的方法则相对较差。为视觉比较, 图 4(b)-图 4(d)依次给出经 Gamma MAP、小波软门限和本文算法的滤波结果。仔细判读可以发现, 本文算法

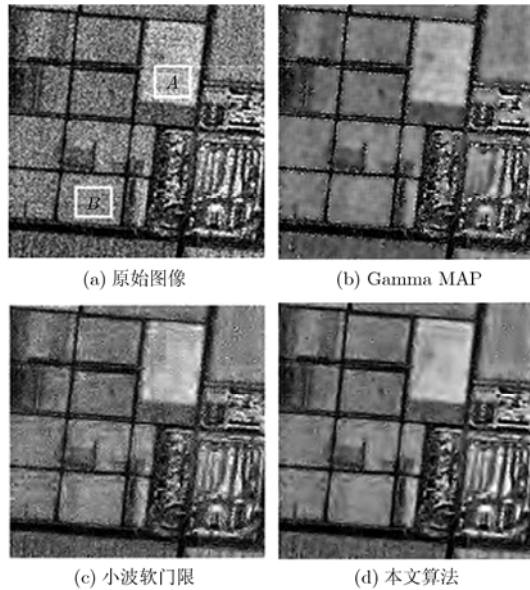


图 4 各种滤波算法对实际 SAR 图像滤波的效果比较

表 2 去斑效果的量化性能比较(S/M)

方法	噪声图像	Gamma MAP	小波软 门限	本文算法
区域 A	0.2661	0.0605	0.0672	0.0533
区域 B	0.3115	0.0595	0.0877	0.0538

除在均匀区域获得好的滤波效果外,还能有效保持图像的结构细节信息,具有最佳的视觉效果。相反, Gamma MAP 滤波过平滑图像的一些特征信息,而软门限则在滤波后的图像上产生了不可接受的伪像。

5 结束语

借助小波变换良好的时频局部性、多分辨率特性及稀疏性等特点,多分辨率滤波已成为当前 SAR 图像相干斑滤波研究的热点。本文从 SAR 图像滤波的要求出发,在 NeighShrink 算法的基础上,考虑尺度间系数的相关性及不同方向的细节子带具有不同的能量聚类特性,提出了基于尺度空间相关的 SAR 图像 NeighShrink 滤波算法。对合成及实际 SAR 图像的实验结果表明本文算法在去斑和结构信息保持上都有较好的表现,滤波后的图像便于后续的处理及应用。

参 考 文 献

- [1] Oliver C and Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Boston: Artech House, 1998, chapter 6: 157-193.
- [2] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, 2(3): 992-1000.
- [3] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, and Chavel P. Adaptive restoration of images with speckle. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1987, 35(2): 373-383.
- [4] Frost V S, Stiles J A, Sanmugan K S, and Holtzman J C. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, 4(2): 157-165.
- [5] Lopes A, Nezry E, Touzi R, and Laur H. Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images. Proc. IGARSS'90, Washington, D.C., USA, 1990: 2409-2412.
- [6] Donoho D L and Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. *Biometrika*, 1994, 81(5): 425-455.
- [7] Donoho D L and Johnstone I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage. *Journal of the American Statistical Association*, 1995, 90(432): 1200-1224.
- [8] Thitimajshima P. SAR images speckle noise reduction by wavelet thresholding. Proc. IGARSS'99, Hamburg, Germany, 1999, (2): 55-88.
- [9] Cai T and Silverman B W. Incorporating information on neighboring coefficients into wavelet estimation. *Sankhya: Indian Journal of Statistics, Series B*, 2001, 63(2): 127-148.
- [10] Chen G Y, Bui T D, and Krzyzak A. Image denoising using neighboring wavelet coefficients. Proc. ICASSP'04, Montreal, Canada, 2004, (2): 917-920.
- [11] Nanson G P and Silverman B W. Stationary wavelet transform and some statistical applications. Wavelet and Statistics, Lecture Notes in Statistics, Berlin: Springer-Verlag, 1995: 281-299.
- [12] Xie H, Pierce L E, and Ulaby F T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(3): 712-727.
- [13] Xu Y S, Weaver J B, Healy D M, and Lu J. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1994, 3(6): 747-758.
- [14] Simard M, DeGrandi G, Thomson K P B, and Benie G B. Analysis of speckle noise contribution on wavelet decomposition of SAR images. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(6): 1953-1962.
- [15] Touzi R. A review of speckle filtering in the context of estimation theory. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2392-2404.
- [16] Guo H, Odegard J E, Lang M, Gopinath R A, Selesnick I W, and Burrus C S. Wavelet based speckle reduction with application to SAR based ATD/R. Proc. ICIP'94, Austin, USA, 1994: 75-79.
- [17] Achim A, Tsakalides P, and Bezerianos A. SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed model. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(8): 1773-1784.

李恒超: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 图像统计特性分析及滤波算法等。
 洪文: 女, 1968 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为遥感影像处理、SAR 成像算法等。
 吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 研究方向为遥感影像处理、SAR 成像算法、遥感地面应用处理系统、并行处理等。