

基于广义交叉验证和Cycle Spinning的SAR图像相干斑抑制

杨晓慧 金海燕 焦李成

(西安电子科技大学智能信息处理研究所 西安 710071)

摘要: 该文基于 SAR 图像的统计特性, 提出了一种相干斑抑制算法。该算法在不需要估计噪声能量的情况下, 采用广义交叉验证准则构造目标函数, 自适应获取近似最优阈值; 然后基于小波阈值收缩完成 SAR 图像滤波; 并引入 Cycle Spinning 策略有效去除边缘存在的振铃效应。实验结果表明: 基于该文算法的相干斑抑制在视觉效果和客观衡量指标上都取得了较好的、鲁棒的效果, 有效地抑制了相干斑噪声, 均匀区域平滑, 且能同时保持边缘和细节清晰。

关键词: 合成孔径雷达; 广义交叉验证; Cycle Spinning; 相干斑

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1779-05

SAR Speckle Reduction Based on Generalized Cross Validation and Cycle Spinning

Yang Xiao-hui Jin Hai-yan Jiao Li-cheng

(Institute of Intelligent Information Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Considering the statistical characteristics of SAR images, a novel speckle reduction algorithm is presented in this paper. This technique is by virtue of generalized cross validation and constructs an object function to acquire the asymptotic optimal threshold without of estimating noise variance. After applying the wavelet shrinkage on SAR image, cycle spinning strategy is introduced to wipe off the visible ringing effects along the edges. Numerical tests show that the proposed SAR speckle reduction algorithm provides improvements both in visual effects and quantitative analysis, which can smooth image effectively and remain the edges and texture clearly.

Key words: SAR; Generalized Cross Validation (GCV); Cycle Spinning; Speckle

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)可以全天时、全天候成像, 且具有高分辨率和强穿透性等优势, 在军事、遥感等领域发挥出越来越大的作用。相干斑噪声是 SAR 图像固有的一种确定性干涉现象, 它主要是由于成像散射体散射回波的相干作用造成的。SAR 图像的相干斑成像方式使其图像不能有效反映地物目标的散射特性, 严重影响了图像的解释和判读的正确性, 以及对其中目标识别的精确性, 因此, 抑制相干斑是 SAR 图像应用的关键预处理问题^[1, 2]。尽管相干斑是确定的, 但由于其成因的复杂性, 通常在处理时把相干斑描述为乘性噪声, 这就使得 SAR 图像去噪问题比含加性噪声的一般图像处理更为复杂。

相干斑噪声的抑制技术可分为两大类, 即成像之前的多视处理和成像后的滤波技术, 后者又分为空域滤波和变换域滤波。经典的 SAR 图像空域滤波器有 Lee^[3], MAP^[4]等, 这些方法都是通过一个固定窗口对图像进行操作, 难以同时兼顾

均匀区域的平滑和细节信息的保持。小波变换由于具有多分辨率的优点, 可同时满足良好的时频特性, 因此广泛应用于图像去噪领域。Donoho 等提出小波阈值收缩法^[5]在 SAR 图像去噪中取得了较好的效果^[6, 7], 其中阈值的选取至关重要。广义交叉验证(Generalized Cross Validation, GCV)准则^[8, 9]是一种只依赖于输入和输出信号, 在不需要对噪声方差进行估计的情况下, 通过最小化误差函数从而获得阈值的渐进最优值。在 SAR 图像处理中, 理想图像是未知的, 因此适合于采用 GCV 准则来选取阈值。小波阈值去噪一个固有的现象就是边缘的振铃现象, 较多文章采用最后对去噪图像施加 Wiener 滤波来减弱这种现象, 但这是以模糊边缘信息为代价的, 对于 SAR 图像来说, 细节信息同样重要。Cycle Spinning 策略^[10]借助小波自身所具有的时间周期平移不变性, 可以较好地消除这种可见的振铃效应, 并保持较清晰的细节信息。

本文根据 SAR 图像自身的特点, 基于小波分析理论, 在阈值收缩的基础上, 采用 GCV 准则自适应选取渐进最优阈值, 为了消除小波阈值去噪带来的振铃效应, 引入 Cycle Spinning 策略, 在有效抑制相干斑的同时, 较好地保持图像的边缘和细节信息。

2006-07-18收到, 2006-12-25改回

国家自然科学基金(60472084)和国家973计划(2001CB309403)资助课题

2 基于GCV准则和Cycle-Spinning策略的SAR图像相干斑抑制

2.1 相干斑统计特性

相干斑是SAR图像固有的一种确定性干涉现象,主要是由成像体散射回波信号中均值为零的随机相位的相干作用造成的,常描述为乘性噪声模型:

$$I = \omega n \quad (1)$$

其中 I 是SAR图像强度测量值, ω 是未受干扰的理论值, n 是均值为1, 方差为 σ^2 的斑点噪声。

单视SAR图像相干斑的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)服从Rayleigh分布, 当视数 ≥ 4 时, SAR图像基本服从Gauss分布, 此时可通过对所获得的强度图像首先作对数同态变换, 将乘性噪声转换为加性高斯白噪声来处理:

$$\ln I = \ln \omega + \ln n \quad (2)$$

简记为 $Y = X + N$, 这里 $Y = \ln I$, $X = \ln \omega$, $N = \ln n$ 。

从SAR图像所含相干斑的统计特性出发, 采取有效的去噪算法对后继的识别和分类至关重要。

2.2 GCV准则

小波具有良好的时频局部化、多分辨特性, 并有Mallat分解重构算法作实现支撑, 因此在信号处理领域获得了广泛应用, 能同时较好地处理轮廓和细节信息。原始图像经小波变换作用后, 能量在各个频率子空间进行重新分配, 小波系数幅值的绝对值大小反映了图像信号在相应频率空间所具有的频谱能量的大小。正因为这些优良特性, 小波阈值收缩适合于SAR图像的相干斑抑制, 这里关键在于选择合适的阈值, 从而在有效去除噪声的同时较好地保持图像的细节和纹理信息不被模糊。

均方误差(MSE)是常用的阈值选取准则, 它表明重建信号与理想不含噪信号在均方意义上的偏离程度, 但在实际中, 大多理想信号是无法预知的。广义交叉验证准则可在仅知道观测信号而不知噪声确切特性的情况下, 作为MSE的一个估计, 自适应求取阈值的渐进最优值。若原始信号为 X , 含噪信号为 Y , 加性噪声为 N , 则加性噪声模型 $Y = X + N$ 作小波变换得: $WY = WX + WN$ 。按照GCV准则定义如下的目标函数 J , 通过目标函数最小化来选取渐进最优阈值 U , 即

$$GCV(T) = \frac{\frac{1}{N} \sum (WY - \widehat{WY})^2}{\left| \frac{N_0}{N} \right|^2} \quad (3)$$

$$U = \arg \min(GCV) \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (4)$$

其中 N 为某一层中小波系数的总个数, N_0 为信号在阈值收缩中被置为0的系数个数, WY 和 \widehat{WY} 分别代表带噪小波系数和阈值 T 收缩后的系数。令均方误差函数为

$$R(T) = \frac{1}{N} \|\widehat{WY} - WX\|^2 \quad (5)$$

更精确地, 如果 E 表示期望算子, 则有如下定理:

定理1^[9]: 如果 $T^* = \arg \min R(T)$, $\tilde{T} = \arg \min GCV(T)$, 那么当 $N \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\frac{ER(\tilde{T})}{ER(T^*)} \downarrow 1 \quad (6)$$

此定理保证了由GCV准则获取的阈值恰好对应于给定的均方误差最小化的那个阈值, 是渐进最优的有效估计。阈值选定后, 再采用如下的软阈值处理:

$$X = T(Y) = \text{sgn}(Y) \cdot (|Y| - U)_+ \quad (7)$$

其中

$$(|Y| - U)_+ = \begin{cases} |Y| - U, & |Y| \geq U \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

由于用GCV准则得到的最优阈值趋近于理想最优阈值, 并且不需要对噪声方差进行估计, 而SAR图像获取的都是含相干斑噪声的图像, 理想图像是未知的, 因此所需的小波阈值本身也是一个估计过程, 适于借助GCV准则获取渐进最优的阈值。

2.3 Cycle Spinning

采用小波阈值去噪时, 如果变换缺乏平移不变性, 会在不连续点邻域产生明显的人工效应, 导致信号失真。这种信号失真与不连续点的位置密切相关, 即, 对某些不连续点处理得好, 在其邻域内就不会产生Gibbs现象, 但在其它相邻的不连续点的邻域内却会产生明显的Gibbs现象。为消除这种效应, Coifman和Donoho引入cycle spinning^[10], 借助小波的时间周期平移不变性, 对原信号进行循环平移, 改变信号不连续点的位置, 对平移后的信号作去噪处理, 再反平移回去, 最后对所有得到的去噪后的信号作平均。由于每次平移后的信号作阈值去噪处理后使得Gibbs现象出现在不同地方, 因此通过对行和列方向上的每组平移量得到的去噪结果作线性平均, 可以在一定程度上消除这种振铃效应。假定平移不变周期为 P , 则完全平移量可以取为 $M = \{m/m = 0, 1, \dots, P-1\}$ 。上面的过程可描述为

$$T(X; (S_m)_{m \in M}) = A_{m \in M} S_{-m} (D(S_m(X))) \quad (9)$$

其中 X 表示原始信号, S_m 表示对原信号作平移量为 m 的平移操作, D 表示对平移后的信号作去噪, S_{-m} 表示对去噪后的信号作同等平移量的反平移操作, 以返回和原信号一致的正常顺序的信号, A 表示对经过如此操作后得到的所有信号作加权平均。

2.4 基于GCV准则和Cycle Spinning策略的SAR图像相干斑抑制算法

根据SAR图像的特征, 结合GCV准则、小波阈值收缩和Cycle Spinning, 给出如下斑点抑制算法:

(1) 初始化。设输出图像 $imout = 0$ ，取最大平移量为8，行和列设定循环平移；

(2) 对输入图像作对数同态变化；

(3) 按照循环设定作平移；

(4) 对平移后的图像分别作小波变换；

(5) 根据GCV准则对小波变换后的多尺度系数图选取阈值，并作滤波处理；

(6) 对阈值后的图像进行小波逆变换，并对逆变换的结果进行逆向平移，得到去噪后的图像 rim ，并对所有输出图像求和： $imout = imout + im$ ；

(7) 满足循环中止条件，则跳出，对输出图像 $imout$ 作线性平均；否则，返回(3)。

(8) 对(7)中得到的线性平均后的图像作指数变换，得到最终去噪输出图像。

3 对比实验

根据所给算法，本节分别对两幅SAR图像进行相干斑抑制实验。图1(a)是一幅 x 波段的航拍SAR图像，3m分辨率，图的右下角是城镇，大量均匀平坦的区域是田地，图1(b)是一幅灯塔SAR图像，两幅图像大小均为 256×256 。

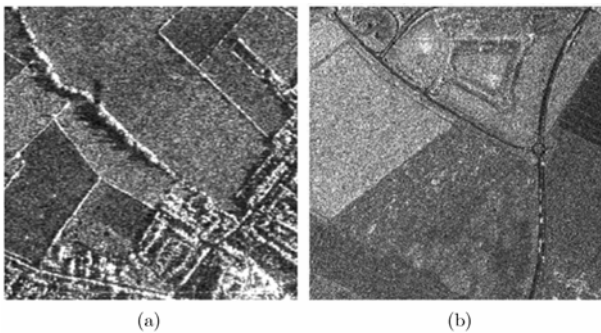


图1 两幅SAR测试图像原图

实验采用6种方法作比较，分别为Lee滤波，MAP滤波，基于 $T = 3\hat{\sigma}$ 和 $T = \hat{\sigma}\sqrt{2\log N}$ (其中 N 是数据数目； $\hat{\sigma}$ 是噪声标准差的估计，采用经典的中值估计子获得： $\hat{\sigma} = \text{Madian}(|Y_{i,j}|)/0.6745$ ($Y_{i,j}$ 表示含噪信号多尺度分解的高频子带系数)两种不同阈值的小波去噪(简记为小波1滤波和小波2滤波)，基于GCV的小波去噪(简记为小波3滤波)以及基于本文的GCV结合Cycle Spinning的小波去噪(简记为小波4滤波)等。小波则统一选取具有紧支撑性质的正交Symmetlet-8(Sym8)小波滤波器作4级分解。在Cycle Spinning循环平移中，最大平移量取为8。图2和图3分别给出图1(a)和图1(b)在各种滤波方法的作用下相干斑抑制的结果。

实验结果表明：对于含有大片的平滑区域，而细节部分又比较集中的图1(a)，滤波效果比较明显。Lee滤波平滑区域处理较好，但边缘和边界部分存在噪声去除不彻底的现象，有大量明显的噪声亮点；MAP滤波边缘噪声去除稍微好些，但均匀区域没有Lee滤波好；小波1滤波方法存在过平滑现象，这使得图像相对模糊；小波2滤波中除了边缘的振铃效应外，平滑区域滤波不干净；小波3滤波由于充分考虑了

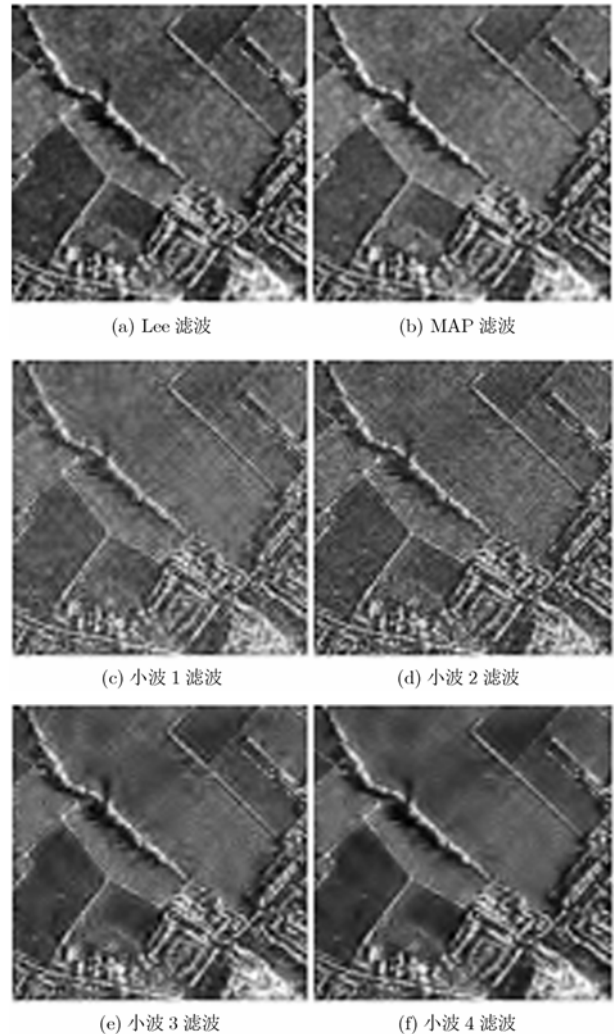


图2 SAR图像(图1(a))斑点抑制结果对比

SAR图像自身的特征，采取的是针对总体效果的滤波方法，所以平滑区域处理得较好，且边缘保持也比较好，但还存在小波阈值难以克服的问题，即边缘比较明显的振铃效应；小波4滤波方法由于引入了Cycle Spinning策略，所以平滑区域更干净，而且边缘和细节也更清晰，振铃效应明显减轻。对于SAR测试图1(b)，由于原图像中除了严重的相干斑外，还存在严重的污染现象，从滤波效果来看，均没有图像1(a)各方法效果明显，但从各种方法滤波结果图比较，仍可看出各方法存在的优缺点，其中基于本文提出的小波4滤波方法的相干斑抑制结果不论从平滑区域还是边缘、细节都是最好的，具有较强的鲁棒性。

主观视觉感知易受到视觉心理因素的影响，下面给出基于本文所给的客观评价指标的实验结果，从平滑程度和边缘保持两方面来定量衡量各种滤波方法的优劣。

对SAR等遥感图像恢复性能的评价一般采用主观感知和客观评价指标相结合的方法。相干斑噪声的抑制过程实际是一个盲图像恢复过程，因而不能用像评价传统图像那样使用PSNR和MSE等指标，基于相干斑抑制的目的，本文采用如下客观衡量指标：

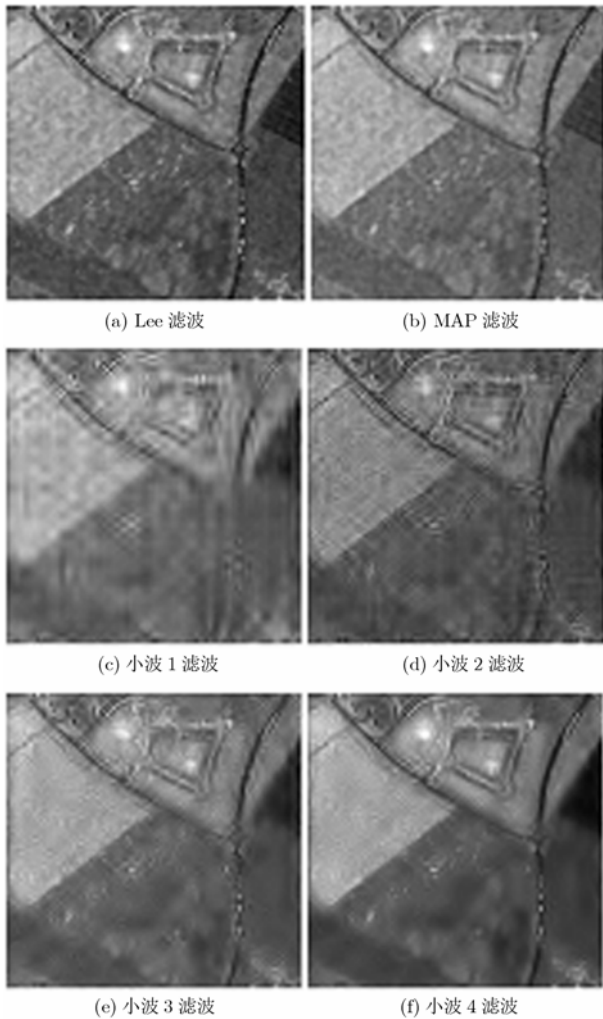


图3 SAR图像(图1(b))斑点抑制结果对比

(1) 等效视数(Equivalent Number of Looks, ENL):

ENL是衡量滤波平滑能力的指标,定义如下:

$$ENL = \mu^2 / \sigma^2 \quad (10)$$

这里 μ 和 σ 分别表示均值和标准差。抑制性滤波后,斑点噪声的强度和图像的方差减小,ENL值增大;噪声抑制效果越好,平滑效果越好ENL值越大。

(2) 边缘保持指数(Edge Similar Index, ESI): ESI表示图像滤波后各滤波方法对各类图像水平方向和垂直方向的边缘保持能力,其表达式为

$$ESI = \frac{\sum_{i=1}^m |(\widehat{DN}_{R1} - \widehat{DN}_{R2})|}{\sum_{i=1}^m |DN_{R1} - DN_{R2}|} \quad (11)$$

其中 m 表示待检验像素的个数, \widehat{DN}_{R1} 和 \widehat{DN}_{R2} 分别表示处理后图像沿着边缘交界除左右或上下互邻像素的灰度值, DN_{R1} 和 DN_{R2} 则分别表示对应的原始图像中的值。该值越大,边缘保持能力越强。

从表1和表2的实验结果可知:经过滤波处理后,图像的ENL值都比原始图像要高,这表明各种滤波方法都不同程度

地达到了平滑作用,其中基于本文算法的ENL值最高,表明这种算法消除斑点噪声最干净有效;再从边缘保持指数ESI来看,各种方法处理后的值都小于1,这说明作滤波处理后,边缘和细节信息在一定程度上会减弱,比较来看,基于本文算法的边缘保持指数比Lee滤波和MAP滤波都要高,仅比小波2略低,在有效滤除斑点噪声的同时,较好地保持了边缘和细节信息。

表1 图2中不同方法的相干斑抑制效果比较

图像	平滑指数 (ENL)	边缘保持指数(ESI)	
		水平方向	垂直方向
原始图像	3.9569	1.0	1.0
Lee滤波	8.6849	0.2988	0.2656
MAP滤波	7.5996	0.3135	0.2758
小波1滤波	6.9320	0.4146	0.3875
小波2滤波	5.4905	0.5690	0.5926
小波3滤波	10.3391	0.4251	0.4637
小波4滤波	11.5011	0.4411	0.4227

表2 图3中不同方法的相干斑抑制效果比较

图像	平滑指数 (ENL)	边缘保持指数(ESI)	
		水平方向	垂直方向
原始图像	6.0266	1.0	1.0
Lee滤波	13.1419	0.1831	0.1777
MAP滤波	12.7573	0.1521	0.1481
小波1滤波	15.4346	0.1174	0.1042
小波2滤波	12.7115	0.2681	0.2576
小波3滤波	15.7248	0.2162	0.2121
小波4滤波	16.8750	0.2441	0.2371

4 结束语

从视觉效果和客观衡量指标两方面综合来看,本文提出的基于小波阈值收缩,结合GCV自适应获得的渐进最优阈值,并引入Cycle Spinning策略的相干斑抑制算法能有效抑制SAR图像中的相干斑噪声,均匀区域平滑效果好,并使得边缘和细节特征更清晰,具有好的图像视觉效果,且具有较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] Kuan D T and Sawchuk A A. Adaptive noise smoothing filter for signal-dependent noise. *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intel*, 1985, 7(2): 165-177.
- [2] Frost V S and Stiles J A. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Trans. on Pattern Anal. and Machine Intel*, 1982, 4(2): 157-165.

- [3] Lee J S. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images. *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, 1983, 13(1): 85–89.
- [4] Lopes A, Nezry E, and Touzi R, *et al.* Maximum a posteriori filtering and first order texture models in SAR images. Proc. of IEEE Int, Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington, D C, 1990: 2409–2412.
- [5] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1995, 41(3): 613–627.
- [6] Min D, Cheng P, Andrew K C, and Dmitri L. Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling. *IEEE Trans. on Geosc. and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1642–1648.
- [7] Helmi Z, Shafri M, and Paul M M. Wavelet shrinkage in noise removal of hyperspectral remote sensing data. *American Journal of Applied Sciences*, 2005, 2(7): 1169–1173.
- [8] Jansen M, Malfait M, and Bultheel A. Generalization cross validation for wavelet thresholding. *Signal Process.*, 1997, 56(1): 33–44.
- [9] Weyrich N and Warhola G T. Wavelet shrinkage and generalized cross validation for image denoising. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1998, 7(1): 82–90.
- [10] Coifman R R and Donoho D L. Translation invariant denoising. *Wavelets and Statistics*. New York/Berlin: Springer-Verlag, 1995: 125–150.
- 杨晓慧：女，1978年生，博士生，研究方向为多尺度几何分析及其在SAR图像处理中的应用。
- 金海燕：女，1976年生，博士生，研究方向为SAR图像处理。
- 焦李成：男，1959年生，教授，博士生导师，研究方向为智能算法、机器学习和智能信息处理等。