

SAR 图像斑点噪声整体变分偏微分方程 滤波算法研究

李贺 秦志远 周丽雅

(信息工程大学测绘学院, 郑州 450052)

摘要 SAR 图像固有的斑点噪声严重影响了图像的判读和后续处理,因此抑制 SAR 图像斑点噪声显得尤其重要。一个好的斑点噪声抑制算法应该在降低斑点噪声的同时,能很好地保持图像的细节特征,但现有的去噪算法没有一种能够完美地解决这个问题的。本文基于 SAR 图像斑点噪声滤波的重要性以及存在的问题,将整体变分偏微分方程用于去除斑点噪声。根据整体偏微分方程建立了去噪模型,并分析了模型的性能和参数选择的重要性。通过实验验证了该算法的有效性,并以峰值信噪比(PSNR)为评价准则,利用多项式拟合方法选择了最优参数。引入边缘保持指数(EPI),与其他滤波算法比较,本算法在去除噪声的同时较好地保持了边缘。

关键词 斑点噪声 整体变分 偏微分方程 峰值信噪比 边缘保持指数

中图分类号: P237 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2010)06-910-05

Study on SAR Image Speckle Noise Smoothing Algorithm with TV-PDE

LI He, QIN Zhiyuan, ZHOU Liya

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

Abstract The inherent speckle noise of SAR image affects the interpretation and the further processing, so it is important to suppress speckle noise of SAR images. A nice speckle filter would be preserving details while suppressing the noise. But now none of the existent filters can solve this problem ideally. TV-PDE (Total Variation Partial Differential Equation) was introduced to denoise speckle noise because is important to reduce the speckles for SAR image. The mathematical model for denoise was built and then the capability of this model was analyzed and also the importance of selecting preference. Experiments proved the validity of the model. Taking Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) as criterion the best preference was found by using polynomial fitting. The model preserved the edge when denoise the speckle better comparing with other algorithms according to EPI (Edge Preserved Index).

Keywords speckle noise, total variation (TV), partial differential equation (PDE), peak signal-to-noise ratio (PSNR), edge preserved index (EPI)

0 引言

合成孔径雷达(SAR)以其全天时、全天候、多视角及对地物一定的穿透性能等优点,被广泛应用于生态、水文、海洋监测和地形测绘等诸多方面。然而,由于 SAR 系统的有限分辨率和相干性,使其在

成像过程中不可避免地会产生斑点噪声。斑点噪声的存在影响了 SAR 图像的质量,使图像的判读和后续处理出现困难,严重时不能正确地反映地物目标特征。因此,抑制 SAR 图像斑点噪声尤其重要。

一个好的斑点噪声抑制算法应该在降低斑点噪声的同时,能很好地保持图像的细节特征。在过去几十年中,国内外学者提出了许多种斑点噪声滤

收稿日期:2008-09-11; 改回日期:2009-02-23

第一作者简介:李贺(1983—),男,现为信息工程大学测绘学院摄影测量与遥感专业博士研究生。主要研究方向为数字图像处理、SAR 图像模拟及成像算法、InSAR 等。E-mail: lihe_5115@sohu.com

波方法^[1-6],主要可分为两类:一类是在成像前处理,称为多视处理,但是多视处理中图像分辨率的提高是以牺牲 SAR 图像空间分辨率为代价的;另一类是在成像后处理。成像后处理方法又可分为两类:一类是基于合成孔径雷达斑点噪声统计特性的空域滤波算法;另一类是基于多分辨分析的滤波算法^[7]。但是这些算法都是在去除斑点噪声和保持纹理、边缘等信息之间的折中,无法获得完全满意的效果。

变分研究的是泛函的极大值和极小值问题,图像去噪可以看成求解图像能量泛函的问题。近年来,基于变分的图像去噪技术得到了深入研究。Rudin 和 Osher(1992)为解决图像去噪问题提出的整体变分图像模型,此模型被认为是目前比较合理的能够在去除噪声的同时保持图像边缘特征的图像模型。在图像整体变分模型下,把去噪问题转化为变分问题,然后利用求解变分问题的一般方法,将变分问题与相应的偏微分方程(PDE)联系起来。整体变分偏微分方程去噪算法引入了偏微分方程的各向异性扩散方程,在平滑噪声的同时很好地保持了边缘,较好地解决了保持图像细节和抑制噪声这一矛盾。

本文基于 SAR 图像斑点噪声滤波的重要性以及存在的问题,将整体变分偏微分方程用于去除斑点噪声。根据整体偏微分方程建立了去噪模型,并分析了模型的性能和参数选择的重要性。通过实验验证了该算法的有效性,并以峰值信噪比(PSNR)为评价准则,利用多项式拟合方法选择了最优参数。以边缘保持指数(EPI)作为评价准则与其他滤波算法比较,该算法在去除噪声的同时较好地保持了边缘。

1 斑点噪声产生机理及数学模型

合成孔径雷达是一种工作在微波波段的相干成像雷达,并且分辨单元总是比发射信号的波长大得多。由于采用相干微波源进行照射,对分布目标而言,每个分辨单元都可以看做由许多尺寸与波长相近的散射体组成,这一单元的总回波是各散射体回波的矢量叠加,造成合成矢量的振幅和相位都有一定的起伏,而且其幅度和相位与回波的方向有很大关系。

因此,当相干电磁波照射实际目标时,其散射回来的总回波并不完全由地物目标的散射系数决定,而是围绕这些系数值有很大的随机起伏,使得到的图像出现相干斑,即斑点噪声。

斑点噪声是一种乘性噪声, SAR 图像可以用以下数学模型来描述,即

$$s(x, y) = s_0(x, y) \cdot n_0(x, y) \quad (1)$$

式中, $s(x, y)$ 为观测到的图像; $s_0(x, y)$ 为不含噪声的图像; $n_0(x, y)$ 表示斑点噪声, 其均值为 1, 方差为 σ^2 。

对式(1)进行对数运算便可把乘性噪声转化为加性噪声:

$$u(x, y) = u_0(x, y) + n(x, y) \quad (2)$$

式中, $u(x, y) = \ln s(x, y)$, $n(x, y) = \ln n_0(x, y)$, 并且 $n(x, y)$ 的均值为 0, 方差为 σ_n^2 。

为了方便起见,在后面令 $u = u(x, y)$, $u_0 = u_0(x, y)$ 。

2 整体变分去噪模型及分析

Rudin 等人的研究成果^[8]表明,有噪声图像的整体变分明显大于无噪声图像的整体变分,通过最小化整体变分可以消除图像噪声。整体变分偏微分方程去噪算法是在图像的整体变分模型下,把图像去噪问题转化为变分问题,然后利用求解变分问题的一般方法,将变分问题与具有各向异性扩散性质的偏微分方法联系起来,从而达到去除噪声的同时保持图像的细节。

2.1 模型建立

一幅 2 维图像的整体变分可以定义为梯度幅值的积分,即

$$TV(u) = \iint_{\Omega} |\nabla u| dx dy \quad (3)$$

式中, ∇u 表示图像在 (x, y) 处的梯度。

式(2)中 $n(x, y)$ 的均值为 0, 方差为 σ_n^2 , 从而可以得到 TV 最小化的两个约束条件:

$$\iint_{\Omega} u dx dy = \iint_{\Omega} u_0 dx dy \quad (4)$$

$$\frac{1}{|\Omega|} \iint_{\Omega} (u - u_0)^2 dx dy = \sigma_n^2 \quad (5)$$

式中, $\frac{1}{|\Omega|}$ 为图像区域 Ω 的面积。

文献[9]证明了在 TV 模型下式(4)这个约束条件实际是满足的,所以只需要考虑第 2 个条件,即式(5)。可以通过引入拉格朗日乘子 λ 的方法来定义能量泛函:

$$J(u) = \iint_{\Omega} |\nabla u| dx dy + \frac{\lambda}{2} \iint_{\Omega} (u - u_0)^2 dx dy \quad (6)$$

其中参数 λ 对平滑去噪起到至关重要作用。通过式(6)建立了图像去噪的 TV 模型。这是一个泛函求极值的变分问题。

2.2 模型转化

在上面的过程中,通过引入能量函数,将图像去噪问题转化为泛函求极值的变分问题。变分问题求解分为如下两步:

1) 利用变分法基本定理确定相应的欧拉-拉格朗日方程;

2) 在边界约束条件下求解偏微分方程。

令:

$$F = |\nabla u| + \frac{\lambda}{2}(u - u_0)^2 \quad (7)$$

该类型的泛函求极值的必要条件即为欧拉-拉格朗日方程:

$$\lambda(u - u_0) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\frac{\partial u}{\partial x}}{|\nabla u|} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\frac{\partial u}{\partial y}}{|\nabla u|} \right) = 0 \quad (8)$$

将式(8)整理变形可得到如下形式:

$$\lambda(u - u_0) - \Delta u = 0 \quad (9)$$

其中 $\Delta u = -\nabla \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right)$, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ 表示梯度算子。

式(9)即为图像去噪模型的偏微分方程。

在式(9)中, $\Delta u = -\nabla \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right)$ 是用来控制模型的扩散性能的。文献[10]根据数学原理对此进行了详细分析。分析表明 $\Delta u = -\nabla \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right)$ 实质上是一个非线性各向异性扩散方程,扩散系数 $\frac{1}{|\nabla u|}$ 控制着该扩散方程的扩散行为,并且整体变分仅在边缘的切线方向扩散,因此保留了图像细节。

2.3 参数分析

下面对参数 λ 进行分析。将式(9)两边同时乘以 $u - u_0$, 然后对整个图像范围进行积分,可以得到

$$\lambda = \frac{\iint_{\Omega} \nabla \cdot \left(\frac{|\nabla u|}{\nabla u} \right) \cdot (u - u_0) dx dy}{\iint_{\Omega} (u - u_0)^2 dx dy} \quad (10)$$

联立式(10)与式(5)得到:

$$\lambda = \frac{1}{\sigma_n^2} \cdot \iint_{\Omega} \nabla \cdot \left(\frac{|\nabla u|}{\nabla u} \right) \cdot (u - u_0) dx dy \quad (11)$$

由式(11)可以看出, $\lambda \geq 0$, 且与 σ_n^2 存在比例关系。在处理时,如果 σ_n^2 比较大,即噪声较大, λ 就应该小

一点,如果 σ_n^2 比较小, λ 就应该大一点。通过式(9)可以发现,当 λ 接近 0 时, Δu 也接近 0, 图像会因过度平滑以致边缘严重模糊,当 λ 取值过大时, u 与 u_0 近似相等,即图像平滑程度非常小。所以, λ 的取值非常重要。

2.4 模型评价

一个好的斑点噪声抑制算法应该在降低斑点噪声的同时,能很好地保持图像的细节特征。峰值信噪比 (PSNR) 是一种评价图像质量的客观标准, PSNR 越大,去噪图像的质量越高。EPI 用于评价滤波的边缘保持情况。所以本文采用 PSNR 和 EPI 分别作为噪声去除效果和边缘保持效果的客观评价标准。

2.4.1 PSNR^[11]

PSNR 用下式表示:

$$\text{PSNR} = 10 \log \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - g(x, y)]^2} \quad (12)$$

式中, $f(x, y)$ 为原始无噪声图像, $g(x, y)$ 表示去噪后的图像, 图像大小为 $M \times N$ 。

2.4.2 EPI^[12]

$$\text{EPI} = \frac{\sum |P_s - P_{sn}|}{\sum |P_0 - P_{0n}|} \quad (13)$$

式中, P_s 为平滑后的像元值, P_{sn} 为 P_s 相邻像元, P_0 为原始图像的像元值, P_{0n} 为 P_0 相邻像元。EPI 表示的是滤波后的 SAR 图像与未滤波的 SAR 图像边缘对比度之比, 未去斑图像的对比度是 1。EPI 越接近 1, 说明边缘保持效果越好。

3 实验分析及参数选择

参照文献[13]对本模型进行解算, 利用 Matlab7.0 进行编程, 验证模型的有效性, 提出最优参数选择方法, 并与其他滤波方法进行对比。

3.1 模型验证

分别取 $\lambda = 0, 3, 8, 15$, 对 256×256 的灰度图像加入斑点噪声, 利用本模型进行滤波实验。如图 1(a) 为原始图像, 图 1(b) 为加入斑点噪声后的图像, 图 1(c) — (f) 分别为 $\lambda = 0, 3, 8, 15$ 时的效果图。

可以看出, $\lambda = 0$ 时即图 1(c) 因过度平滑而严重模糊, 图 1(d) 和图 1(e) 效果相近, 优于图 1(f)。利用峰值信噪比 (PSNR) 对实验结果进行比较可以

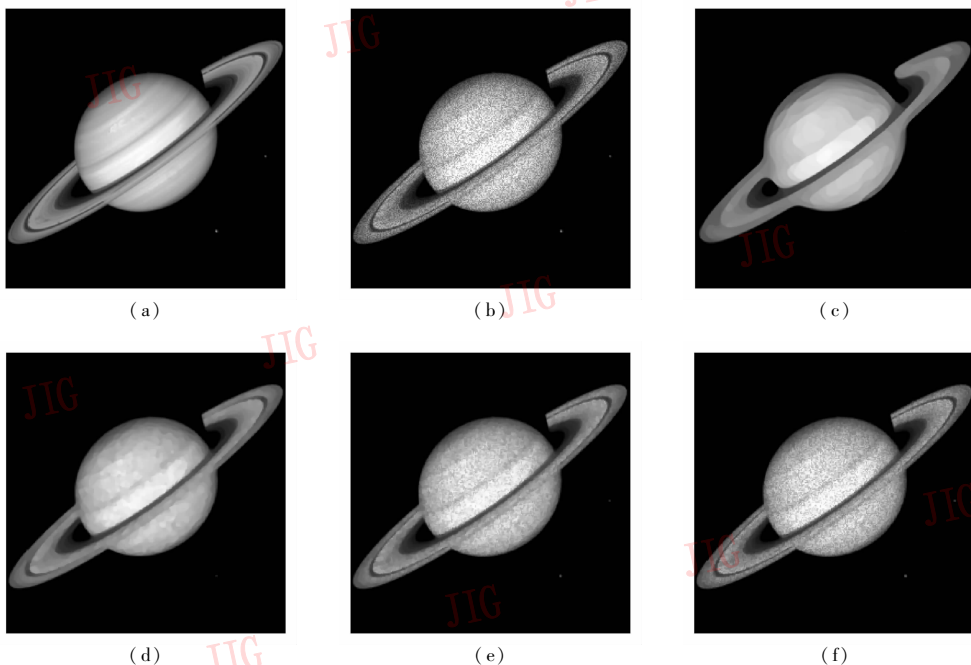


图 1 斑点噪声滤波结果
Fig.1 Results of speckle filtering

发现,随着参数 λ 的增大,PSNR 先增后降。所以必须选择合适的参数 λ 才能得到最好的结果。

3.2 参数选择

为了选择合适的参数以得到最优处理效果,利用多项式拟合方法得到 PSNR 随参数 λ 变化的函数,如图 2 为该函数的曲线。

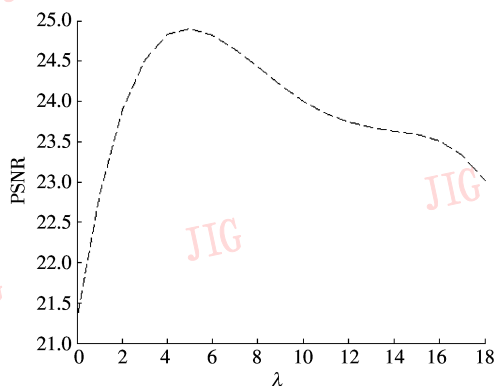


图 2 PSNR 变化曲线
Fig.2 PSNR changing curve

根据拟合函数求得,当 $\lambda = 5.05$ 时 PSNR 取得最大值。

利用本文算法以及所选择的最优参数 $\lambda = 5.05$,与均值滤波、中值滤波和维纳滤波进行了比较,结果显示了本文算法的去噪优势。几种算法的去噪结果如图 3 所示。

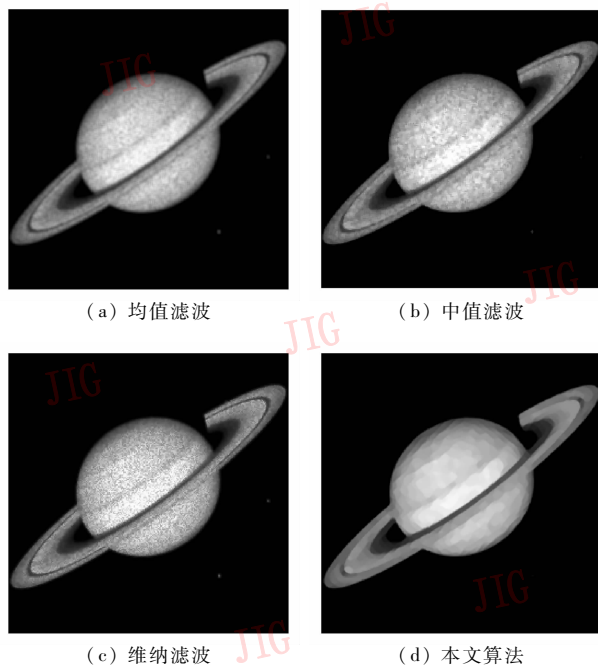


图 3 滤波算法结果比较
Fig.3 Comparison of results of filtering

引入边缘保持指数(EPI)比较这些滤波算法的边缘保持情况,如表 1 所示。由表中数据可以看出,本文算法在选择最优参数时,PSNR 和 EPI 都高于其他几种算法,从而说明本文算法在去处噪声的同时较好地保持了图像的边缘。

表 1 结果比较

Tab.1 Comparison of filtering results

	3 × 3 均值滤波	3 × 3 中值滤波	3 × 3 维纳滤波	本文算法
PSNR/dB	19.693 7	19.656 9	23.308 2	24.804 3
EPI	0.373 6	0.403 2	0.400 7	0.412 5

4 结 论

将整体变分偏微分方程用于 SAR 图像斑点噪声滤波,建立了去噪模型,并分析了模型的性能和参数选择的重要性。采用 PSNR 和 EPI 作为滤波算法评价准则,利用多项式拟合方法选择最优参数。实验结果显示,利用本文算法及选择的最优参数能在去除斑点噪声的同时很好地保持图像的边缘信息,较好地解决了保持图像细节和抑制噪声这一矛盾。

参考文献 (References)

- [1] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, 2(2): 165-168.
- [2] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, et al. Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(2): 165-177.
- [3] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(2): 157-165.
- [4] Meer P, Park R H, Cho K. Multi-resolution adaptive image smoothing [J]. Computer Vision and Graphic Image Processing, 1994, 56(2): 140-148.
- [5] Ranganath S. Image filtering using multi-resolution representations [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(5): 426-440.
- [6] Donoho D L, Johnstone I M. Adapting to unknown smoothing via wavelet shrink [J]. Journal of the American Statistical Association, 1995, 90(432): 1200-1224.
- [7] Jia Chengli, Kuang Gangyao. A review of SAR speckle filtering [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(2): 135-140. [贾承丽, 匡纲要. SAR 图像去斑方法 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(2): 135-140.]
- [8] Rudin L I, Osher S T, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. Physical D, 1992, 60: 259-268.
- [9] Chan T F, Osher S, Shen J. The Digital TV filter and nonlinear denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 231-241.
- [10] Wu Bin, Wu Yadong, Zhang Hongying. Image Restoration Technology Based on Total Variation Partial Differential Equation [M]. Beijing: Peking University Press, 2008: 31-69. [吴斌, 吴亚东, 张红英. 基于变分偏微分方程的图像复原技术 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008: 31-69.]
- [11] Wang Hongmei, Li Yanjun, Zhang Ke. An improved image filtering method for salt and pepper noise [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(1): 113-116. [王红梅, 李言俊, 张科. 一种改进型椒盐噪声滤波算法 [J]. 光电学 · 激光, 2007, 18(1): 113-16.]
- [12] Han Chunming, Guo Huadong, Wang Changlin. The Essence of SAR image speckle suppression [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(6): 470-475. [韩春明, 郭华东, 王长林. SAR 图像斑点噪声抑制的本质 [J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 470-475.]
- [13] Chan T, Shen J H. Mathematical models for local non-texture inpainting [J]. SIAM J. Appl. 2001, 62(3): 1019-1043.