

文章编号: 1007-2780(2013)02-0290-05

基于边缘保持的 SAR 图像滤波算法研究

高 珊¹, 马艳会²

(1. 枣庄学院 光电工程学院, 山东 枣庄 277160, E-mail: smilegs@126.com;

2. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071)

摘 要: 为了有效去除 SAR 图像中的相干斑噪声, 同时很好地保留图像中的边缘细节, 将双边滤波算法应用到 SAR 图像滤波, 并使用 ENL 和 EPI 对其参数进行估计; 经过参数估计的双边滤波算法作用于 SAR 图像后, 很好地去除了斑点噪声且保留了边缘信息; 实验结果表明, 该算法的主观和客观数据都优于经典 Lee 滤波算法。

关 键 词: 相干斑去噪; 双边滤波; 边缘保持; ENL; EPI

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20132802.0290

Algorithm Research of Filtering for SAR Images Based on Edges-Preserving

GAO Shan¹, MA Yan-hui²

(1. Opto-Electronic Engineering College, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China, E-mail: smilegs@126.com;

2. Xidian University School of Computer Science and Technology, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to effectively clear away the speckle in SAR images, while preserving the SAR images edge detail, the application of BF (bilateral filtering) is extended to SAR images despeckling. The despeckling evaluation indexes, including the equivalent number of looks and the edge preserve index, are used to estimate the parameters. After BF with estimated parameters imposed on a normalized SAR image, the filtering result can achieve both despeckling and edge preservation simultaneously. Experimental results show that the visual quality and evaluation indexes of the proposed algorithm outperforms that of the classical Lee filtering algorithm.

Key words: despeckling; bilateral filtering; edge preserve; ENL; EPI

1 引 言

作为一种有源遥感技术手段, 合成孔径雷达 (Synthetic aperture radar, SAR) 成像具有红外以及可见光不具备的优势。SAR 具有全天候、全天时的工作能力而且不受云雨覆盖或光照条件的影响, 在国防建设和经济建设上发挥着巨大的作用。由于它是相干成像系统, 其产生的图像必然要受

到相干斑的污染。SAR 图像存在的相干斑噪声, 给 SAR 图像的后处理和应用带来了较大困难。因此, 如何降低 SAR 图像斑点噪声一直是 SAR 图像处理领域的重点研究内容^[1-2]。经典的去斑算法 Lee 滤波^[3]、Frost 滤波^[4]、Gamma MAP 滤波^[5]和其他去斑算法在去斑方面都有很好的效果, 但是研究发现这些算法很难在去斑的同时保持 SAR 图像的边缘细节, 它们都在有效去斑的同

时也使图像的边缘模糊。

双边滤波(bilateral filtering, BF)^[6-7]算法能在平滑噪声的同时很好地保持图像边缘信息,近年来在光学图像信号处理方面有广泛的应用。由于 BF 算法中两个方差参数的设置很难达到最优,所以其在 SAR 图像上的应用一直受到限制。本文通过 SAR 图像特有的去噪评价标准找到了 BF 算法的最优方差配置参数,将得到的 BF 算法应用到 SAR 图像,最后得到了斑点噪声大量减少且边缘保存良好的 SAR 图像。

2 相干斑噪声的乘性数学模型

为了更好地描述 SAR 图像的相干斑模型,Goodman 于 1976 年提出了完全发育的相干斑噪声概念^[8],相干斑完全发育的区域,表现在图像上为均匀区域或弱纹理区域。在满足完全发育的条件下,对强度 SAR 图像 I 可以建立相干斑噪声的乘性模型^[9]:

$$I(t) = R(t) \cdot N(t) \quad (1)$$

其中, $t=(i, j)$ 是图像的空间位置坐标, $I(t)$ 是图像信号观测值, $R(t)$ 是无噪信号, $N(t)$ 是相干斑噪声。

3 双边滤波

最初双边滤波算法(Bilateral filtering)的概念是由 Tomasi 和 Manduchi 基于 Gauss 滤波方法提出的,主要针对 Gauss 滤波中将 Gauss 权系数直接与图像灰度值做卷积运算进行图像滤波的原理,将滤波权系数优化成 Gauss 函数和图像亮度信息的乘积,优化后的权系数再与图像灰度值做卷积运算,这样就能在滤波的同时考虑到图像信息中的图像边缘信息,使图像在正常 Gauss 滤波后很模糊的边缘信息得以保持清晰,并且图像边缘更加平滑^[10-11]。

BF 在处理相邻各像素的灰度值时,不仅考虑到了几何上的邻近关系,也考虑到了亮度上的相似性,通过对二者的非线性组合,自适应滤波后得到平滑图像。这样处理过的图像在滤除噪声的同时还能很好地保持图像的边缘信息。BF 算法如式(2)所示:

$$\text{BF}[I(t)]_q = \frac{1}{K} \sum_{q \in S} W_d(t, k) W_r(t, k) I(t) \quad (2)$$

其中:

$$K = \sum_{q \in S} W_d(t, k) W_r(t, k) \quad (3)$$

$$W_d(t, k) = \exp[-|d((t), (t-k))|^2 / 2\sigma_d^2] \quad (4)$$

$$W_r(t, k) = \exp[-|(I(t) - I(t-k))|^2 / 2\sigma_r^2] \quad (5)$$

式中 $t=(i, j)$ 和 $k=(m, n)$ 分别为滤波窗口中心像素和滤波像素的坐标; $I(t)$ 为原图像灰度值; $\text{BF}[I]_q$ 为平滑滤波后的图像灰度值; σ_d 表示在空域滤波时的高斯函数的标准差; σ_r 表示在窗口中图像的灰度值通过高斯函数进行滤波时的灰度值标准差;这里 $W_d(t, k)$ 是点 k 与几何中心 t 的空间邻近度, $W_r(t, k)$ 为点 k 与几何中心 t 的像素灰度相似度。

BF 的特点是对图像的每个点用其空间相邻且灰度相近的像素值的平均值代替原来的值,从而达到滤波的效果。在图像变化平缓的区域,在一个小的邻域内图像的灰度变化不大,近似为常数,这时双边滤波器转化为标准的低通空域滤波器。而在图像变化剧烈的区域,比如在一个二值图的边缘上,灰度相似函数在灰度值相同的一边为 1,而在灰度值不同的一边近似为 0,结果滤波器用边缘点邻域内灰度近似的像素点的灰度平均值替代原灰度值。这样, BF 既可以达到滤波的效果又可以保持图像的高频细节,因此是一种很有应用价值的滤波方法^[12]。

4 最优参数的确定

通过上节可知在 BF 算法中, σ_d 和 σ_r 是两个重要的配置参数,想要得到一个理想的适用于 SAR 图像的滤波器,必须对它们进行最优化配置。本文采用去斑评价指数—等效视数(ENL)和边缘保持指数(EPI)——来估计 σ_d 和 σ_r 的最优值。

ENL 是衡量一幅图像相干斑噪声相对强度的一种指标,等效视数越大,表明图像上的相干斑越弱,可解译性越好。其定义为^[13-14]:

$$\text{ENL} = A \cdot \frac{u_l^2}{\sigma_l^2}, \quad \left\{ A = \begin{cases} 1, \text{均匀区域} \\ \frac{4}{\pi} - 1, \text{震荡区域} \end{cases} \right. \quad (6)$$

式中, u_l 和 σ_l 分别为图像中 $I(t)$ 中的均值和标准差。

EPI 反映了滤波算法在水平或垂直方向上的

边缘保持能力,EPI 值越高,边缘保持能力越强。其定义为^[15]:

$$EPI_H = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} |M'_{i,j+1} - M'_{i,j}|}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} |M_{i,j+1} - M_{i,j}|},$$

$$EPI_V = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m-1} |M'_{i+1,j} - M'_{i,j}|}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m-1} |M_{i+1,j} - M_{i,j}|} \quad (7)$$

式中 M 为原始图像像素值, M' 为去斑后的图像像

素值, m 为图像像素行数, n 为列数。

为了检测去斑结果对 σ_d 和 σ_r 的敏感程度,本文选用了一幅机场 SAR 图像(分辨率为 3 m, ENL=2.672 3)。为了保证计算结果的稳定性,本文使用了整幅图像而不是图像的同质区域来计算去斑后图像的 ENL 和 EPI。表 1 和表 2 分别为 ENL 和 EPI 随着 σ_d 和 σ_r 的改变而相应改变。

表 1 不同 σ_r 对应的 ENL、EPI($\sigma_d=3$)

Table 1 Comparison of ENL and EPI variation with σ_r ($\sigma_d=3$)

	$\sigma_r=0$	$\sigma_r=0.1$	$\sigma_r=0.2$	$\sigma_r=0.3$	$\sigma_r=0.4$	$\sigma_r=0.5$
ENL	3.347 6	3.347 6	4.828 2	7.049 7	9.235 2	10.772 0
EPI	0.672 0	0.672 0	0.413 9	0.266 3	0.183 1	0.136 9

表 2 不同 σ_d 对应的 ENL、EPI($\sigma_r=0.2$)

Table 2 Comparison of ENL and EPI variation with σ_d ($\sigma_r=0.2$)

	$\sigma_d=0$	$\sigma_d=0.1$	$\sigma_d=0.2$	$\sigma_d=0.3$	$\sigma_d=0.4$	$\sigma_d=0.5$
ENL	3.347 6	3.787 2	4.487 0	4.828 2	4.987 3	5.068 0
EPI	0.672 0	0.467 1	0.414 3	0.413 9	0.415 0	0.415 8

通过表 1 和表 2 可以看出, σ_r 比 σ_d 对 ENL 的影响更大,ENL 对 σ_r 更敏感,所以本文首先固定 σ_d 的值来估计 σ_r 的值。随着 σ_r (σ_d) 值的增加,ENL 的值变大,然而 EPI 的值却减小,因此对参数进行估计的步骤如下:

(1)参数初始化。为了尽可能滤除连续像素的相干斑噪声且尽可能的保持图像中的边缘细节,初始先设滤波窗口为 9×9 ,最后可根据滤波效果进行优化,从表 2 可以看出,当 $\sigma_d \geq 3$ 时 SAR 图像的 ENL 和 EPI 的数值变化幅度较小,所以在这可以先设 $\sigma_d=3$ 。通过设初值和步长为 0.05 计算 10 次 σ_{ri} ($i=1,2 \dots 10$)。

(2)对于每一个 σ_{ri} ($i=1,2 \dots 10$) 和 $\sigma_d=3$:

①应用 BF 算法对归一化后的 SAR 图像进行滤波,并记滤波后的 SAR 图像为 M ;

②计算滤波后 SAR 图像 M 的 ENL_i 和 EPI_i , 并通过式(8)计算它们归一化后的值:

$$N_ENL_i = \frac{ENL_i}{(ENL_i)_{\max}}$$

$$N_EPI_i = \frac{EPI_i}{(EPI_i)_{\max}} \quad (8)$$

(3)以 σ_{ri} ($i=1,2 \dots 10$) 为横轴, N_ENL_i 和 N_EPI_i 的值为纵轴,做两条曲线。

(4)如果两曲线满足 $N_ENL_{i-1} < N_EPI_{i-1}$ 并且 $N_ENL_{i+1} > N_EPI_{i+1}$,那么两曲线交点的横轴坐标值即为 σ_r 的近似值 σ_{ra} 。

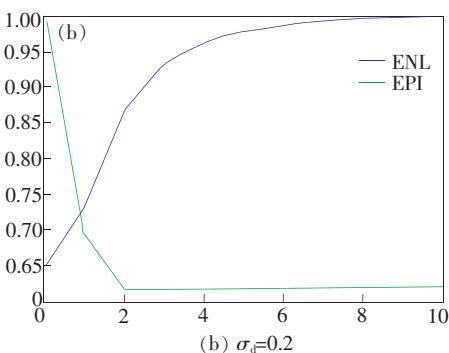
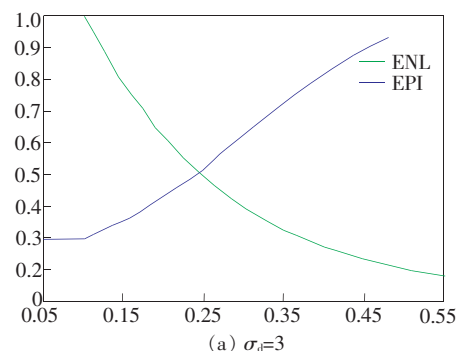


图 1 σ_{ra} 和 σ_{da} 的近似值估计

Fig. 1 Estimation of approximate σ_{ra} and σ_{da}

用相同的步骤可以估计得到 σ_d 的近似值 σ_{da} 。图 1 为使用以上方法对机场 SAR 图像的 BF 算法参数 σ_r 和 σ_d 进行近似值估计得到的曲线图。其中, $\sigma_{ra}=0.24$ 、 $\sigma_{da}=0.8$ 。

通过上述方式得到 σ_{ra} 和 σ_{da} 后,以它们作为参数对 SAR 图像进行 BF 处理,可以得到滤波后的 SAR 图像 M1。本文通过大量实验得出,由于 σ_{ra} 和 σ_{da} 只是近似值不是精确值,所以滤波后的 SAR 图像 M1 仍旧存在一些相干斑。为了得到更好的滤波结果,本文对 M1 图像做进一步处理。因为 σ_d 对去斑结果的影响相对小一些,所以本文用 $\sigma_{ra}/2$ 和 σ_{da} 作参数对 M1 图像再次进行 BF 处理,

根据需要可重复处理多次,最终可得到理想的滤波图像。虽然结论是通过机场 SAR 图像获得的,但这个结论同样适用于绝大多数 SAR 图像。

5 仿真及分析

在进行仿真分析时,本文的算法包括上节中提到的应用 BF 进行后续处理。在实验中,本文依旧使用机场 SAR 图像,并对多次应用 BF 进行后续处理,最终得到的理想滤波结果与经典的 Lee 滤波进行对比。其中, Lee 滤波和 BF 都使用 5×5 的滤波窗口。去斑结果和相应评价指数如图 2 和表 3 所示。

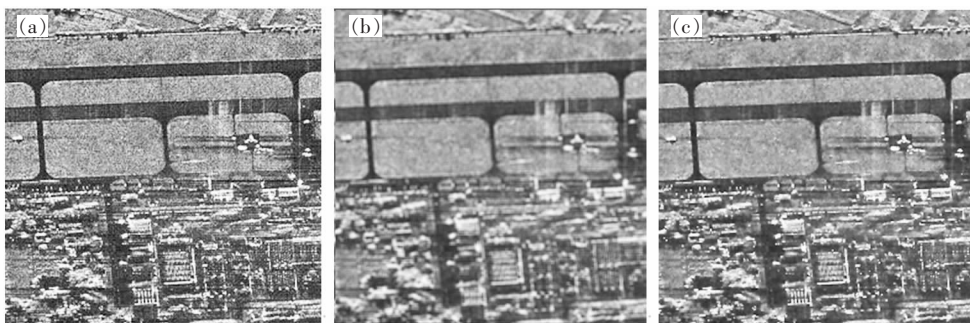


图 2 不同方法对机场 SAR 图像滤波结果。(a)原始 SAR 图像;(b)Lee 滤波;(c)本文算法滤波。

Fig. 2 Despeckling results of airport SAR image using different methods. (a)Original SAR image;(b)Lee filtering;(c)BF method.

表 3 去斑性能评价指数比较

Table 3 Comparison of performance for despeckling results

	ENL	EPI_H	EPI_V
原始图像	2.6723	1	1
Lee 滤波	5.2904	0.2676	0.2586
本文算法滤波	5.7993	0.4652	0.4730

通过图 2 和表 3 可以看出,本文的滤波算法在去除相干斑的同时很好地保留了图像中的边缘信息,结果明显好于经典的 Lee 滤波。这是主要因为本文采用了去斑评价指数来确定 BF 的两个参数,这样得到的参数能更好的使 BF 去除噪声保留边缘,并且文中又使用 BF 对滤波后的图像再次进行后续处理,更好的去除了残留在图像中

的相干斑噪声。Lee 滤波算法也能很好地去除相干斑噪声,但这种算法在去除斑点噪声的同时也使图像边缘模糊化。从表 3 的客观数据也可看出本文算法滤波结果的 ENL 和 EPI 要好于 Lee 滤波。

6 结 论

基于 ENL 和 EPI 两个 SAR 图像去噪评价指标,提出了一个 BF 参数估计的方法,并使用该方法对 SAR 图像进行了滤波处理。使用经过参数估计的 BF 对 SAR 图像进行了滤波,经多次后续处理的 SAR 图像滤波结果在很好去除斑点的同时保持了图像的边缘细节。最后的仿真实验也证明了该方法在主观图像和客观数据上都优于 Lee 滤波算法。

参 考 文 献:

[1] 黄世奇,刘代志. 侦测目标的 SAR 图像处理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

- [2] Amirmazlaghani M, Amindavar H, Moghaddamjoo A. Speckle suppression in SAR images using the 2-D GARCH model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(2):250-259.
- [3] Lee J S. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar image [J]. *Optical Engineering*, 1986, 25(5): 636-643.
- [4] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, *et al.* A mode for radar image and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, 4(4):157-165.
- [5] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, *et al.* Adaptive restoration of images with speckle [J]. *IEEE Trans. ASSP*, 1987, 35(3):373-383.
- [6] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for grey and color images [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, New Delhi, India; IEEE 1998:839-846.
- [7] Barash D. Bilateral filtering and anisotropic diffusion: towards a unified viewpoint [EB/OL]. [2000-08-14]. <http://www.hpl.hp.com/techreports/2000/HPL-2000-18R1.pdf>.
- [8] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, 66(11):1145-115.
- [9] 王爱丽, 张晔, 谷延锋, 等. 基于多小波的 SAR 图像去噪与压缩 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(15):4128-4131.
- [10] 赵艳伟. 基于图像分辨率增强算法的场景生成技术 [J]. *液晶与显示*, 2011, 26(6):823-830.
- [11] Zhang W G, Liu F, Jiao C. SAR image despeckling via bilateral filtering [J]. *Electronics Lett.*, 2009, 45(15):781-783.
- [12] 张闯, 迟健男, 张朝晖, 等. 基于边缘检测与双边滤波的彩色图像去噪 [J]. *电子学报*, 2010, 38(8):1776-1783.
- [13] 尹传历, 孙丽娜, 韩松伟, 等. 基于暗原色先验的嵌入式图像增强系统 [J]. *液晶与显示*, 2011, 26(5):673-676.
- [14] Liudan D D, Tang C R. The denoising method of SAR image based on retinex [C]//*2nd International Conference on Future Computer and Communication*, Wuhan, China; IEEE, 2010:625-628.
- [15] Zhang W G, Zhang Q, Yang C S. Improved bilateral filtering for SAR image despeckling [J]. *Electronic Letters*, 2011, 47(17):286-288.