

一种用于合成孔径雷达图像相干斑抑制的双边滤波参数配置新方法*

李金才¹⁾²⁾ 黄思训^{2)†} 彭宇行¹⁾ 张卫民¹⁾

1) (国防科学技术大学计算机学院, 长沙 410073)

2) (中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2011年9月7日收到; 2011年10月27日收到修改稿)

基于最优折衷假设以及等效视数曲线和边缘保持指数曲线的单调特性, 提出了一种用于合成孔径雷达 (SAR) 图像相干斑抑制的双边滤波参数配置新方法. 该方法与传统方法相比, 在计算时间相当的情况下, 灰度值近似方差精度提高一个数量级; 当灰度值近似方差精度相同时, 计算时间减少一个数量级.

关键词: 双边滤波, 合成孔径雷达, 相干斑抑制, 参数配置

PACS: 95.75.Mn, 42.30.Va, 42.30.Sy

1 引言

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种主动式微波遥感雷达, 具有高分辨率、全天候、全天候、穿透性强、覆盖面积大等特点. SAR 图像已经广泛应用于军事侦察、打击目标评估、地质和矿产资源勘探、灾情评估、海洋监测、地形测绘、森林环境监测和农业庄稼生长状况监控等^[1-8].

SAR 通过发射相干电磁波, 接收来自地物目标反射的回波进行成像, 所以 SAR 图像中存在着相干斑噪声. 相干斑噪声严重影响了 SAR 图像的进一步开发应用. 双边滤波^[9] 是一种空域滤波和值域滤波相结合的非线性滤波算法, 能够在光滑 SAR 图像的同时保持边缘信息, 因此受到了广泛的关注和研究^[10-16]. 双边滤波的结果由几何距离方差 (σ_d) 和灰度值近似方差 (σ_r)^[9] 两个参数支配, 但是给出这两个参数的最优配置非常困难. 张文革等^[10] 将双边滤波应用于 SAR 图像相干斑抑制, 并且提出了一种参数配置方法, 取得了较好的相干斑抑制效果. 但是, 该方法得到的 σ_r 误差较大, 为了

提高 σ_r 的精度, 计算时间呈线性增长, 这为大规模实时 SAR 图像相干斑抑制带来困难.

本文基于文献^[10], 提出了一种新的参数配置方法, 该方法与传统方法相比, 在计算时间相当的情况下, σ_r 的精度提高一个数量级; 在 σ_r 精度相同的情况下, 计算时间减少一个数量级.

2 双边滤波

双边滤波是 Tomasi 和 Manduchi^[9] 提出的一种非线性滤波算法. 该滤波是一个空域滤波器和一个值域滤波器的结合, 能够同时考虑图像空域信息和值域信息, 所以在光滑图像的同时保持图像的边缘信息. 双边滤波可以表示如下^[9]:

$$h(x) = k^{-1}(x) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) c(\xi, x) \times s(f(\xi), f(x)) d\xi, \quad (1)$$

其中

$$k(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi, \quad (2)$$

$f(\cdot)$ 表示输入图像, $h(\cdot)$ 表示输出图像, x 是当前像素点, ξ 是 x 的相邻像素点. $c(\xi, x)$ 测量 x 和 ξ

* 国家自然科学基金 (批准号: 41175025, 60970033, 41105012) 资助的课题.

† E-mail: huangxsp@yahoo.com.cn

之间的几何距离程度, $s(f(\xi), f(x))$ 测量 x 和 ξ 灰度值近似程度. 对于具有平移不变性的高斯滤波, $c(\xi, x)$ 和 $s(f(\xi), f(x))$ 可以表示为^[10]

$$c(\xi, x) = \exp(-0.5(\|\xi - x\|/\sigma_d)^2), \quad (3)$$

$$s(\xi, x) = \exp(-0.5(\|f(\xi) - f(x)\|/\sigma_r)^2), \quad (4)$$

其中 σ_d 是几何距离方差, σ_r 是灰度值近似方差. σ_d 用于调控空域中对当前像素点最终滤波结果有影响的像素点, σ_d 越大, 将会有更远距离的像素点对当前像素点最终值有影响, 对于 $N \times N$ 的滤波窗口, σ_d 的取值一般为不超过 N 的自然数; σ_r 用于调控值域中对当前像素点最终滤波结果有影响的像素点, σ_r 越大, 将会有与当前像素点灰度值之差更大的像素点对当前像素点最终值有影响, 对于归一

化的图像, σ_r 的取值为 (0, 1).

空间上离邻域中心 x 距离越远的点对 x 的最终值影响应该越小, 空域滤波对空间上邻近的点进行加权平均, 加权系数随着距离的增加而减小; 值域滤波则对灰度值相近的点进行加权平均, 加权系数随着灰度值之差的增大而减少. 值域滤波仅仅改变图像的灰度值映射, 仅使用值域滤波没有意义, 所以双边滤波结合空域滤波和值域滤波对图像进行处理.

SAR 图像滤波结果的评价指标主要包括等效视数 (equivalent number of looks, ENL)^[17] 和边缘保持指数 (edge preserving index, EPI)^[18]. ENL^[17] 和 EPI^[18] 分别表示为

$$\text{ENL} = \bar{\mu}^2/\sigma^2, \quad (5)$$

$$\text{EPI} = \frac{\sum \sqrt{[p_s(i, j) - p_s(i + 1, j)]^2 + [p_s(i, j) - p_s(i, j + 1)]^2}}{\sum \sqrt{[p_o(i, j) - p_o(i + 1, j)]^2 + [p_o(i, j) - p_o(i, j + 1)]^2}}, \quad (6)$$

其中 $\bar{\mu}$ 表示图像的均值, σ^2 表示图像的方差; $p_s(i, j)$ 为输出图像在点 (i, j) 的灰度值, $p_o(i, j)$ 为输入图像在点 (i, j) 的灰度值. ENL 越大说明算法图像光滑效果越好, EPI 越大说明算法边缘保持能力越强. 对于 $N \times M$ 的图像, $\bar{\mu}$ 和 σ^2 的计算公式如下^[19]:

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x(i, j), \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x(i, j) - \bar{\mu})^2, \quad (8)$$

其中 $x(i, j)$ 表示点 (i, j) 的灰度值.

3 传统参数配置方法

文献 [10] 将双边滤波应用于 SAR 图像相干斑抑制, 并提出了一种传统的双边滤波参数配置方法. 图 1 是 Ku 波段美国亚利桑那州菲尼克斯附近的农田机载 SAR 图像^[20], 分辨率为 1 m. 对整幅图像进行双边滤波操作, 图 2 是给定 σ_d 时, 归一化 ENL 和归一化 EPI 随 σ_r 的变化. 从图 2 可以看出, ENL 和 EPI 是一对相反的参数, 所以对 σ_d 和 σ_r 配置时, 需要进行折衷. 传统方法假设归一化 ENL 曲线和归一化 EPI 曲线的交点是一个最佳折衷配置, 并且指出 σ_r 比 σ_d 对 ENL 更加敏感. 所以传统方法首先给定一个 σ_d 和一个灰度值区间; 将给定

的灰度值区间进行 N 等分, 得到 $N + 1$ 个不同 σ_{ri} ($i = 0, 1, \dots, N$), 以 σ_d 和 σ_{ri} ($i = 0, 1, \dots, N$) 为参数, 对图像进行双边滤波, 得到 $N + 1$ 对归一化 ENL 和归一化 EPI 值. 满足条件

$$\begin{aligned} \text{ENL}(i - 1) &< \text{EPI}(i - 1), \\ \text{ENL}(i + 1) &> \text{EPI}(i + 1) \end{aligned} \quad (9)$$

的 σ_{ri} 就是所求的最佳折衷配置的 σ_r .

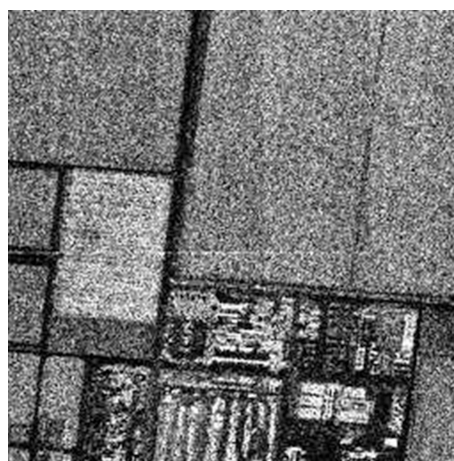


图 1 Ku 波段机载 SAR 图像

类似最佳折衷 σ_r 的估计方法, 可以求得最佳折衷配置的 σ_d . 详细算法可参考文献 [10]. 该方法中 σ_r 精度依赖于灰度值区间的剖分, N 值越大, 精

度越高,但是计算时间也随 N 呈线性增长,这为大规模实时 SAR 图像处理带来了困难.

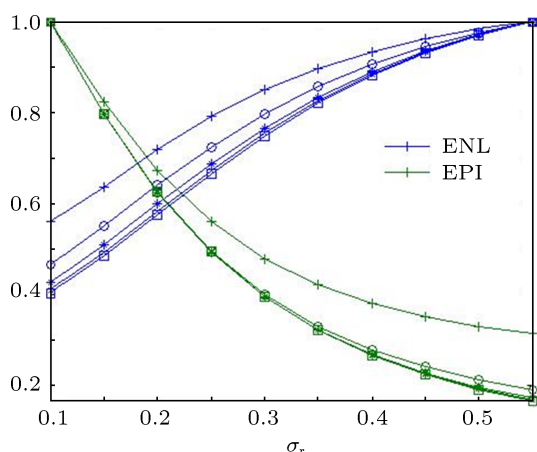


图2 归一化 ENL 和归一化 EPI 随 σ_r 的变化 ‘+’, ‘o’, ‘*’, ‘x’ 和 ‘□’ 分别表示 $\sigma_d = 1, 2, 3, 4, 5$

4 参数配置的新方法

从图 2 可以看出, ENL 曲线是上凸单调递增, EPI 曲线是下凸单调递减, 并且随着参数 σ_d 变动, 曲线保持上述单调特性. 随着 σ_r 的增加, 滤波窗口包含的像素点增多, 图像的光滑效果更好, 从而 ENL 呈递增状态, 其增加的速度会随着 σ_r 的增加而变缓, 因此 ENL 曲线是上凸单调递增的. 另一方面, 随着滤波窗口像素点的增多, 边缘被模糊的程度增强, EPI 相应呈递减状态, 其模糊程度的变化随着 σ_r 的增加而变缓, 因此 EPI 曲线是下凸单调递减的. 本文根据 ENL 曲线和 EPI 曲线的单调特性, 基于归一化 ENL 曲线和归一化 EPI 曲线交点为最佳折衷配置的假设, 提出了一种新的 σ_r 估计方法. 该方法求解 σ_r 的过程如图 3 所示.

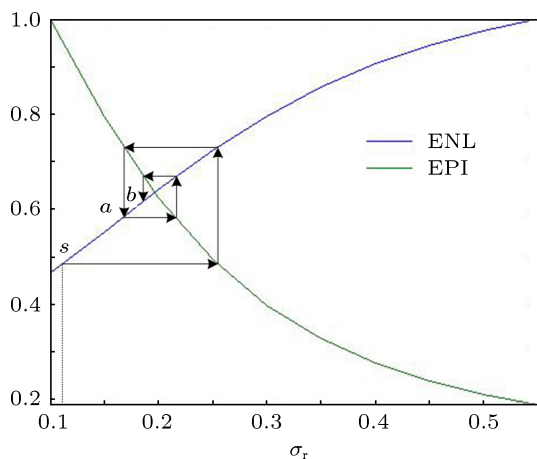


图3 新方法求解 σ_r 示意图

给定初始点 s 和一个小量 ε , 如图 3 所示, 按照逆时针方向, 过点 s , 依次做与 x 轴平行、垂直、平行、垂直的直线, 与 ENL 相交于点 a , 判断点 s 与 a 横坐标之差是否满足条件 (10) 式. 如果满足, 则迭代中止; 否则以点 a 为初始点, 重复上面的操作, 与 ENL 相交于点 b , 判断点 a 与 b 横坐标之差是否满足条件 (10) 式, 如果满足, 则迭代中止, 否则以点 b 为初始点, 重复上面的操作, 直到条件 (10) 式满足为止.

$$|s_x - a_x| \leq \varepsilon, \quad (10)$$

其中下标表示点的横坐标. σ_r 估计的详细算法如下:

- 1) 给定一个 σ_d 和灰度值区间, 设定一个小量 ε ;
- 2) 将灰度值区间分割为 N 等份, 得到 $N + 1$ 个 σ_{ri} ($i = 0, 1, \dots, N$), N 的取值一般较小, 比如 10;
- 3) 以 σ_d 和 σ_{ri} ($i = 0, 1, \dots, N$) 为参数, 对图像进行双边滤波, 并计算归一化 ENL 和归一化 EPI;
- 4) 对归一化 ENL 和归一化 EPI 进行多项式曲线拟合;
- 5) 给定一个初始点 s , 判断点 s 位于拟合曲线交点的左侧还是右侧, 如果点 s 位于交点的左侧, 则执行 6); 如果点 s 位于交点的右侧, 则执行 7); 如果点 s 正好是交点, 则迭代中止;
- 6) 过初始点, 按逆时针方向, 依次做与 x 轴平行、垂直、平行、垂直的直线, 与拟合 ENL 曲线相交于点 a , 判断点 s 与点 a 是否满足条件 (10) 式, 若满足, 则迭代中止, 否则以点 a 为初始点, 重复执行 6) 直到条件 (10) 式满足;
- 7) 过初始点, 按逆时针方向, 依次做与 x 轴垂直、平行、垂直、平行的直线, 与拟合 EPI 曲线相交于点 a , 判断点 s 与点 a 是否满足条件 (10) 式, 若满足, 则迭代中止, 否则以点 a 为初始点, 重复执行 7) 直到条件 (10) 式满足.

按照上述算法可以求得最佳折衷配置时的 σ_r . 由于 σ_d 的数量较少, 所以给定最佳折衷的 σ_r 后, σ_d 可由传统方法估计.

5 数值试验

分别使用新方法与传统方法对图 1 中的 SAR 图像进行滤波试验. 给定 $\sigma_d = 2$, 灰度值区间为 $[0.1, 0.55]$, $N = 10$, 当 ε 分别为 0.005, 0.002

和 0.001 时, 采用四次多项式对归一化 ENL 和归一化 EPI 进行曲线拟合, 最佳折衷配置时 σ_r 的结果和计算时间如表 1 所示. 其中运行时间是基于 Matlab 自带的 tic, toc 命令测量得到. 试验环境为酷睿 -2 双核 2.53 GHz CPU, 4 GB 内存.

从表 1 可以看出, 随着 ε 的减小, 新方法的计算时间几乎没有增加, 而传统方法的计算时间呈线性增加. 在 $\varepsilon = 0.005$ 时, 新方法与传统方法的计算结果一致, 而所需时间比传统方法少一个数量级. 在计算时间相当的情况下, 新方法的计算精度提高一个数量级. 随着 ε 的减小, 新方法与传统方法的计算结果偏差有所增加, 这主要是由于新方法中归一化 ENL 拟合曲线和归一化 EPI 拟合曲线是基于步长为 0.05 的离散点拟合的, 随着 ε 的减小, ENL 和 EPI 拟合曲线的误差会有所增加.

当计算时间相当时, 使用两种方法对真实 SAR 图像进行滤波后的可视性进行比较. 新方法 $\varepsilon = 0.005$, $N = 10$, 传统方法的步长为 0.05 时, 两种方法的计算时间相当. 此时, 传统方法得到的参数配置为 $\sigma_r = 0.1500$, $\sigma_d = 2$, 而新方法得到的参数配置为 $\sigma_r = 0.1950$, $\sigma_d = 2$. 分别使用这些参数对图 1 进行双边滤波, 得到的图像如图 4 所示. 可以

看出, 新方法滤波结果的可视性优于传统方法滤波结果的可视性.

表 2 给出了两种方法滤波后, 评价指标的定量比较. 从表 2 可以看出, 新方法与传统方法相比, 图像的光滑效果更好, 边缘保持能力稍差, 该结果与最佳折衷假设相一致. 总体而言, 新方法的结果要好于传统方法.

表 1 两种方法 σ_r 的结果和计算时间

ε	σ_r		时间/s	
	新方法	传统方法	新方法	传统方法
0.05	—	0.1500	—	46.503309
0.005	0.1950	0.1950	46.722498	427.571565
0.002	0.1963	0.1960	46.780648	1061.191718
0.001	0.1967	0.1960	46.801074	2121.066465

表 2 评价指标定量比较

方法	ENL		EPI
	区域 I	区域 II	
	(1 : 80, 1 : 80)	(1 : 128, 129 : 256)	
原始图像	8.3599	9.3954	1
传统方法	21.3948	22.0810	0.6320
新方法	33.2956	32.8563	0.5078

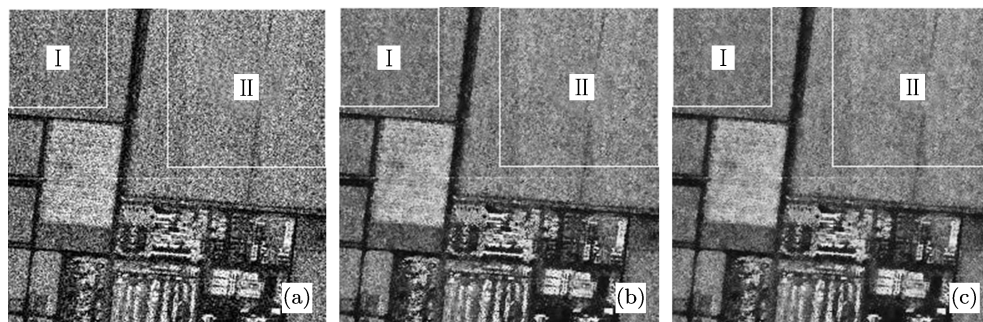


图 4 滤波结果可视性比较 (a) 原始图像; (b) 传统方法; (c) 新方法

6 结论

基于 ENL 曲线和 EPI 曲线随 σ_r 变化的单调特性以及最优折衷配置假设, 提出了一种用于 SAR 图像相干斑抑制的双边滤波参数配置新方法. 该方法与传统方法相比, 在计算时间相当的情况下, σ_r 的精度提高了一个数量级; 在 σ_r 精度相同的情况下, 计算时间减少一个数量级. 该方法能够大

量节约 SAR 图像相干斑抑制时间, 适合大规模实时 SAR 图像处理, 对 SAR 图像的理解和进一步应用具有重要意义.

感谢美国 Sandia 国家实验室提供的样本图像; 感谢长安大学的张文革教授在数值试验过程中给予的帮助; 感谢国防科学技术大学赵军博士和解放军理工大学气象学院李毅在论文完成过程中给予的大力帮助.

- [1] Jiang Z H, Huang S X, He R, Zhou C T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068401 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 何然, 周晨腾 2011 物理学报 **60** 068401]
- [2] Jiang Z H, Huang S X, Shi H Q, Zhang W, Wang B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 108402 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 石汉青, 张伟, 王彪 2011 物理学报 **60** 108402]
- [3] Novak L M, Owirka G J, Weaver A L 1999 *IEEE Trans. Aero. Elec. Sys.* **35** 157
- [4] Nico G, Leva D, Antonello G, Tarchi D 2004 *IEEE Geosci. Remote* **42** 1344
- [5] Siegert F, Hoffmann A A 2000 *Remote Sens. Environ.* **72** 64
- [6] McNairn H, Brisco B 2004 *Can. J. Remote Sens.* **30** 525
- [7] Thompson A A, Luscombe A P, James K, Fox P 2001 *Proceedings of International Geoscience Remote Sensing Symposium* Sydney, Australia, July 9–13 2001 p485
- [8] Askne J I H, Dammert P B G, Ulander L M H, Smith G 1997 *IEEE Trans. Geosci. Remote* **35** 25
- [9] Tomasi C, Manduchi R 1998 *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Computer Vision* Bombay, India, January 4–7, 1998 p839
- [10] Zhang W G, Liu F, Jiao L C 2009 *Electron. Lett.* **45** 781
- [11] Zhang W G, Zhang Q, Yang C S 2011 *Electron. Lett.* **47** 286
- [12] Elad M 2002 *IEEE T. Image Process* **11** 1141
- [13] Barash D 2002 *IEEE T. Pattern Anal.* **24** 844
- [14] Barash D, Comaniciu D 2004 *Image Vision Comput.* **22** 73
- [15] Li J C, Huang S X, Peng Y X, Zhang W M 2011 *Proceedings of the 3rd International Conference on Information Science and Engineering* Yangzhou, China September 29 – October 1, 2011 p778
- [16] Zhang B Y, Allebach J P 2008 *IEEE T. Pattern Anal.* **17** 664
- [17] Oliver C, Quegan S 2004 *Understanding Synthetic Aperture Radar Images* (Raleigh: SciTech Publishing, Inc) p95
- [18] Zhang H, Wang C, Zhang B, Wu F, Yan D M 2009 *High-Resolution SAR Image Target Recognition* (Beijing: Science Press) (in Chinese) pp43–44 [张红, 王超, 张波, 吴樊, 闫冬梅 2009 高分辨率 SAR 图像目标识别 (北京: 科学出版社) 第 43—44 页]
- [19] Lee J S 1980 *IEEE T. Pattern Anal.* **2** 165
- [20] Sandia National Laboratories <http://www.sandia.gov/radar/imageryku.html> [August 5 2011]

A novel method to configure the parameters of the bilateral filtering for synthetic aperture radar images speckle reduction*

Li Jin-Cai¹⁾²⁾ Huang Si-Xun^{2)†} Peng Yu-Xing¹⁾ Zhang Wei-Min¹⁾

1) (School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (Institute of Meteorology, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(Received 7 September 2011; revised manuscript received 27 October 2011)

Abstract

Bilateral filtering can effectively smooth SAR images with the edges preserved, but it is difficult to optimally configure the parameters of bilateral filtering. Traditional method is based on an optimal trade-off hypothesis according to the despeckling estimation indexes, including the equivalent number of looks (ENL) and edge preserving index (EPI). However, the variance of gray value similarity obtained by traditional method has large error, and to improve accuracy, the computing time is increased linearly. In this paper, we present a novel method to configure the parameters of bilateral filtering based on the hypothesis and the monotone properties of the ENL and EPI curves. Experimental results show that the accuracy of variance of gray value similarity is increased by one order of magnitude in the case of almost the same computing time; the computing time is reduced by one order of magnitude for the same accuracy of variance of gray value similarity.

Keywords: bilateral filtering, synthetic aperture radar, speckle reduction, parameters configuration

PACS: 95.75.Mn, 42.30.Va, 42.30.Sy

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175025, 60970033, 41105012).

† E-mail: huangsxp@yahoo.com.cn