

自交叉双边滤波的极化 SAR 数据相干斑抑制

肖世忱^{1,2}, 廖静娟¹, 沈国状¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 数字地球科学重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 相干斑抑制是极化 SAR 数据预处理的关键步骤。双边滤波是一种空域和值域滤波相结合的优秀边缘保持滤波算法。针对双边滤波在抑制极化 SAR 数据相干斑的不足, 该文将改进的交叉双边滤波引入到极化 SAR 数据降噪领域, 加入散射机制测度来扩展原权重核, 根据 SPAN 图像的局域变差系数自动调整空间方差系数, 利用参考图像来度量灰度值和散射机制相似性。实验结果表明: 本文方法较经典滤波算法有更强的噪声平滑能力和更好的细节信息保持能力, 在保持原数据极化散射信息方面也表现出良好的性能, 这为基于极化 SAR 数据的后续应用提供了支持。

关键词: 极化 SAR; 交叉双边滤波; 相干斑噪声; 滤波

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A

引用格式: 肖世忱, 廖静娟, 沈国状. 2015. 自交叉双边滤波的极化 SAR 数据相干斑抑制. 遥感学报, 19(3): 400-408

Xiao S C, Liao J J and Shen G Z. 2015. Speckle filtering for polarimetric SAR data based on self-cross bilateral filter. Journal of Remote Sensing, 19(3): 400-408 [DOI: 10.11834/jrs.20154117]

1 引言

极化合成孔径雷达(SAR)数据记录了地物在多种极化方式组合下的回波信息, 极大地提高了其对地观测的能力, 使其在军事和民用遥感领域得到更广泛应用。然而, 由于相干成像的原理性缺陷, 极化 SAR 数据中固有的相干斑噪声严重影响了后续信息的提取。因此, 抑制相干斑噪声是极化 SAR 数据预处理环节的重要工作。

早期常用的极化 SAR 数据滤波器有极化白化滤波器(Novak 和 Burl, 1990)、最优加权滤波(Lee 等, 1991)和极化矢量滤波(Goze 和 Lopes, 1993)等, 均是利用各通道间的极化相关信息进行数据融合来达到相干斑抑制的目的, 后来的很多算法都是在上述算法基础上的修正和改进(Liu 等, 1998; 皮亦鸣等, 2002), 这类算法的优点是在抑制相干斑的同时可以保持图像的分辨率, 缺陷是因引入不同极化通道之间的串扰而破坏了原始数据的极化散射特

性, 影响后续极化数据的应用(赵忠民, 2013; 张静怡等, 2013)。另一类滤波法主要借鉴了数字图像降噪和抑制 SAR 数据相干斑思想, 包含基于均值滤波的 Boxcar 滤波、基于 Lee 滤波的 Refined Lee 滤波(Lee 等, 1999)以及基于 Sigma 滤波的 IDAN 滤波(Vasile 等, 2006)和改进 Sigma 滤波(Lee 等, 2009), 但这类方法不能在有效抑制相干斑噪声的同时, 保持地物主散射特性和边缘纹理特征。针对如何在去除图像噪声的同时最大程度保留边缘等细节特征这一难题, 研究者们提出了多种边缘保持滤波算法, 主要有各向异性扩散法(Perona 和 Malik, 1990)、非局部均值法(Buades 等, 2008)和双边滤波法(Tomasi 和 Manduchi, 1998)等。其中各向异性扩散法需要求解偏微分方程且在某些给定初始值问题上的病态性会导致处理过程的不稳定, 对具有高梯度值脉冲噪声的图像降噪效果不理想。非局部均值法特别适用于处理纹理或结构信息具有很强规律性的图像, 但逐像元计算块相似度造成该方法

收稿日期: 2014-05-12; 修订日期: 2014-08-28; 优先数字出版日期: 2014-09-05

基金项目: 遥感科学国家重点实验室开放基金项目(编号: OFSLRSS201205); 中国科学院对地观测与数字地球科学中心主任创新基金(编号: Y2ZZ17101B)

第一作者简介: 肖世忱(1988—), 男, 硕士研究生, 现从事 SAR 数据图像处理与应用研究。E-mail: xshch88@163.com

通信作者简介: 廖静娟(1966—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波遥感。E-mail: liaojj@radi.ac.cn

(Copyright © 2015 Academic Journal of Remote Sensing. All rights reserved. http://www.cnki.net)

计算量大,很难满足实时运用的要求。相比以上两种边缘保持滤波算法,双边滤波是一种结合了空域滤波和值域滤波的非线性滤波算法,具有非迭代、局部和简单等特性,广泛应用于图像处理与分析中 (Zhang 和 Gunturk, 2008; Han 等, 2010), 缺点是难以确定合适的滤波参数。

双边滤波应用到极化 SAR 数据降噪领域的相关研究还很少,最早由 D'Hondt 等人 (2013) 将双边滤波应用于极化 SAR 数据降噪领域,该算法是基于极化 SAR 数据统计规律满足高斯分布的假设,采用对数变换将乘性噪声转换为加性噪声,以黎曼距离作为相似度量来进行相干斑抑制。然而,在 SAR 数据处理中对数变换会导致辐射偏差和模糊强点目标。王爽等人 (2014) 将依据极化 SAR 数据的噪声模型及复矩阵推导出的相似性距离度量引入到双边滤波中来抑制极化 SAR 数据的相干斑。该方法可直接对极化相干矩阵或协方差矩阵进行处理,能够很好地保持极化信息。

本文根据极化 SAR 数据的滤波准则,对双边滤波器的权重核进行了扩展,并将交叉双边滤波的思想应用于抑制极化 SAR 数据的相干斑,较经典的滤波算法更加有优势,不仅能有效地抑制相干斑噪声,还能够良好地保持点目标和边缘等细节信息,另外在保持极化信息和地物散射特性方面也表现

出良好的性能,这为基于极化 SAR 数据的后续应用提供了支持。

2 理论与方法

2.1 双边滤波理论

双边滤波最早由 Tomasi 和 Manduchi (1998) 提出,算法的核心思想是将描述空间邻近度和灰度相似度的两个权重核非线性组合在一起,这样不仅考虑到中心像元与周围像元在空间上的邻近关系,还考虑到像元间灰度值的差异性。其数学模型可用式 (1) 表示。

$$F_{ij} = \sum_{l=-r}^r \sum_{m=-r}^r d_{lm} \omega_{ijlm} G_{i+l, j+m} / \sum_{l=-r}^r \sum_{m=-r}^r d_{lm} \omega_{ijlm} \quad (1)$$

$$d_{lm} = e^{-\frac{l^2+m^2}{2\sigma_d^2}} \quad (2)$$

$$\omega_{ijlm} = e^{-\frac{(G_{ij}-G_{i+l, j+m})^2}{2\sigma_r^2}} \quad (3)$$

式中, G 代表原始图像像元灰度值, d_{lm} 和 ω_{ijlm} 分别代表空间距离和灰度值测度, σ_d 和 σ_r 分别代表 d_{lm} 和 ω_{ijlm} 的扩散标准差。 σ 为高斯滤波器的形状设计参数,值越大滤波后图像的细节信息越模糊,反之则越清晰。

边缘处的权重系数如图 1 (b) 所示,图 1 (a) 为阶跃带噪图像,图 1 (c) 为降噪结果,可以看到噪声在得到抑制的同时很好地保留了图像的边缘。

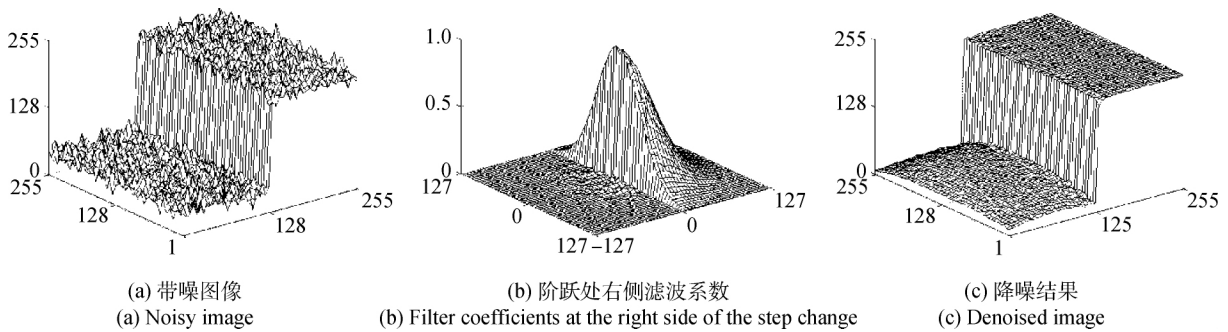


图 1 双边滤波器在图像边缘处的滤波效果

Fig. 1 Effect of bilateral filter at the edges of the image

双边滤波器要求对中心像元贡献大的邻域像元既要在空间距离上靠近还要在灰度值上接近中心像元。当中心像元位于同质区域时,邻域像元同中心像元的灰度值差异小,灰度值相似性高, d_{lm} 和 ω_{ijlm} 相乘得到的权重因子主要取决于 d_{lm} , 这时权重核发挥的作用是平滑图像。当中心像元位于边缘处时,因边缘两侧的像元在灰度值上往往差异较大,这会使边缘同侧的像元具有很大的权重,而另

侧则权重很小,这是 ω_{ijlm} 对 d_{lm} 修正的结果,此时权重核的主要作用是保留边缘信息。正是由于双边滤波考虑到了像元灰度值间的相似性,使滤波模板在边缘处出现陡峭变化而使图像的边缘信息得到很好的保留。

交叉双边滤波最早出现在摄影学中 (Petschnigg 等, 2004; Eisemann 和 Durand, 2004), 目的是基于双边滤波将开启闪光灯得到的图像和无闪光图像融

合在一起,从而使融合结果在去除噪声的同时,既保持了噪声图像的原本色彩,又锐化了纹理信息。可见交叉双边滤波器的降噪效果取决于参考图像的质量。然而,在绝大多数实际拍摄环境中,只能获得一幅带有噪声的图像,很难同时得到无噪的理想图像。针对这一实际情况,邱宇等人(2013)提出自交叉双边滤波器并取得了良好的滤波效果,其核心原理是参考图像从噪声图像本身获得,并在参考图像上计算灰度测度权重,然后运用交叉双边滤波来获得降噪结果。

双边滤波在极化 SAR 数据降噪领域的研究还处于起步阶段,但其有效去除噪声的同时具备良好的边缘保留特性,使其在极化 SAR 数据降噪领域具有广阔的发展前景。另外,交叉双边滤波在极化 SAR 数据降噪领域还没看到相关研究,能否基于交叉双边滤波实现极化 SAR 数据的降噪是本文的重点研究方向。

2.2 双边滤波器改进方法

双边滤波结果的质量很大程度上取决于像元间灰度值测度计算的准确性。但受相干斑噪声的影响,SAR 数据中的像元灰度值会发生剧烈变化,而这将使从原数据中计算得到的灰度测度权重误差很大,进而导致斑点噪声被双边滤波器误认为是边缘特征而得到保留,无法达到降噪的目的。在没有理想图像的前提下,为提高灰度测度计算的准确性,采用从原含噪图像中产生无噪图像的方式来模拟理想数据(即参考影像)。另外,针对传统双边滤波器应用于极化 SAR 数据降噪领域的不足,文中根据极化 SAR 数据滤波准则对双边滤波原权重核进行了扩展,还根据极化 SAR 数据的特征设计了一种使滤波参数能自适应于滤波窗口同质性程度变化的策略。算法的总体思路是以双边滤波法为整体架构,利用极化 SAR 空间域滤波方法辅助双边滤波来抑制斑点噪声。算法核心环节涉及权重核的扩展、参考影像的选择、空间测度参数设定、灰度值测度参数设定和散射类型测度参数设定等 5 个方面。

2.2.1 权重核的扩展

抑制极化 SAR 数据中的相干斑噪声需要满足 3 条准则(Lee 和 Pottier, 2009): (1) 为保护滤波前数据的极化特征,协方差或相干矩阵的每个元素需选取相同的临近像元并同等程度地进行滤波; (2) 为避免引入极化通道之间的串扰,极化协方差或相干

矩阵的每一通道元素应在空间域独立地进行滤波; (3) 为了保持滤波前的散射特征,应能自适应地选取或加权临近的像元,利用散射类型相似的像元进行滤波处理。根据上述准则,双边滤波应用于极化 SAR 数据降噪时仅能满足前两条准则,即对极化相干矩阵或协方差矩阵进行平等且独立的滤波,但无法满足第三条,即确保具有相同散射特性的像元参与滤波。为解决这一问题,该部分引入散射机制相似度测度来扩展原权重核。散射类型相似度测度具体定义如式(4)所示:

$$s_{ijlm} = e^{-\frac{(S_{ij} - S_{l+j+m})^2}{2\sigma_s^2}} \quad (4)$$

式中, S_{ijlm} 代表散射机制测度, S_{ij} 代表某散射类型功率, σ_s 代表 S_{ijlm} 扩散标准差。

2.2.2 参考影像的获取

Refined Lee 滤波(Lee 等, 1999) 是最为经典的极化 SAR 数据空间域滤波方法。为保持极化信息,它以一种类似于多视处理的方式对极化相干矩阵或协方差矩阵中的所有元素进行独立滤波,这样既避免了通道间的串扰,又保持了通道间的极化信息和统计相关性。相比于 Boxcar 滤波, Refined Lee 滤波由于采用边缘方向窗口和相应的同质区域,可以有效地保持原极化 SAR 数据中的边缘特征和点目标(王超等, 2008)。因此本文将选择 Refined Lee 滤波器的输出结果作为原数据的参考影像。

2.2.3 空间距离方差系数 σ_d 的设定

传统的双边滤波器在滤波过程中采用恒定的 σ_d , 这存在如下问题: 若 σ_d 较大, 虽可以有效抑制同质区域的噪声, 但在异质区域会使邻域像元拥有较大权值而带来细节信息的模糊; 若 σ_d 较小, 虽可有效保留异质区域的边缘等细节信息, 但因邻域像元的权值较小而无法有效抑制同质区域的噪声。因此, 最优 σ_d 参数的设定应能自适应滤波窗口的同质性情况, 而变差系数是检测 SAR 图像同质性程度最常用的指标(Lopes 等, 1990)。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(李金才等, 2012), 再加上同质区的滤波窗口要求 σ_d 具有较大的值, 异质区域则相反, 本文提出以滤波窗口的大小 N 为距离参考, 根据变差系数 C_x 值的变化自动调节 σ_d 的取值, 大致对应关系是 C_x 值越小, 表示滤波窗口同质性程度越高, 则要求 σ_d 取值越大, 相反则要求 σ_d 取值越小。 C_x 和 σ_d 的具体映射关系可用式(5)来表达:

$$\sigma_d = \begin{cases} \frac{C_{x\max} - C_x}{C_{x\max} - C_{x\min}} \times N, C_x \neq C_{x\max} \\ \frac{N}{30}, C_x = C_{x\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $C_{x\min}$ 和 $C_{x\max}$ 分别代表 C_x 的最小值和最大值, 当 $C_x = C_{x\max}$ 时, 为使等式有意义, 给 σ_d 赋值一个很小的值, 文中将其设置为 $1/3N$ 的 $1/10$ 。

对于极化 SAR 数据, 由于总功率 (SPAN) 图像是 HH、HV 和 VV 强度图像的加权和, 因此具有较低的噪声水平, 并且在 HH、HV 和 VV 图像中出现的各种特征都会出现在 SPAN 图像中 (王超等, 2008), 因此将利用 SPAN 图像来确定 σ_d 参数。

2.2.4 灰度相似度方差系数 σ_r 的设定

实验中发现: 由于对极化 SAR 数据定标后, 所得相干矩阵 T 中各元素的值绝大部分都在 0 左右波动, 而标准差取值范围均介于区间 (0, 1) 之间且标准差能很好地反应 T 中各元素的离散情况, 因此本文将以标准差为基元, 以 T 中元素个数为变化单位, 以 k 作为变化量来确定参数 σ_r , 具体数学模型如式 (6) 所示。

$$\sigma_{rij} = \frac{\sqrt{\text{var}(T_{ij})}}{9k} \quad (6)$$

式中, $\text{var}(\cdot)$ 代表计算方差。

2.2.5 散射机制相似度方差系数 σ_s 的设定

对相干矩阵 T 进行 Freeman-Durden 3 分量分解处理后, 由于各散射分量 P 所含值的分布规律与相干矩阵各元素的分布规律相似, 因此采用类似于确定 σ_r 的方式来确定 σ_s , 略有区别的是以 Freeman-Durden 分量分解所得的分量数为变化单位, 具体数学模型如式 (7) 所示。

$$\sigma_{sij} = \frac{\sqrt{\text{var}(P_{ij})}}{3k} \quad (7)$$

2.3 改进算法步骤

根据前面的分析, 改进双边滤波器的实现步骤可总结为:

步骤 1: 解压原始极化 SAR 数据, 获得极化相干矩阵 T 和 SPAN 图像;

步骤 2: 应用 Refined Lee 滤波于 T 上, 得原像元灰度值的参考影像 (即 RT);

步骤 3: 对 RT 做 Freeman-Durden 分解, 得原像元散射类型的参考影像 (即 FD);

步骤 4: 在 SPAN 图上滑动邻域窗, 计算并统计

所有邻域窗的变差系数;

步骤 5: 按式 5、6 和 7 分别计算参数 σ_d 、 σ_r 和 σ_s 的值;

步骤 6: 利用 RT 、 FD 以及 3 个参数对 T 执行双边滤波, 获得初始滤波结果;

步骤 7: 对初始滤波结果再进行一次双边滤波, 获得最终滤波结果。

补充说明: 二次应用双边滤波器时灰度参考影像为初始滤波结果本身, 微调系数 k 的取值可适当增大, 这样可以在平滑均匀区域的同时锐化边缘等细节信息, 而微调系数 k 的取值文中是根据多次实验结果的对比分析来确定的。

3 实验结果与分析

本文使用 AIRSAR 在美国旧金山地区成像的全极化数据进行实验分析, 成像区域大小为 900×1024 , 地面实况的总功率 (SPAN) 图如图 2 所示。对 Boxcar 滤波、IDAN 滤波和 Refined Lee 滤波以及文本所提滤波方法 (灰度值微调系数两次中分别取值 2 和 3, 散射类型微调系数取值 4) 进行滤波效果检验。对比实验结果主要从相干斑抑制与细节信息保留、散射特性保持和极化信息保留等 3 个角度展开, 涉及目视判读和定量指标评价两个方面。

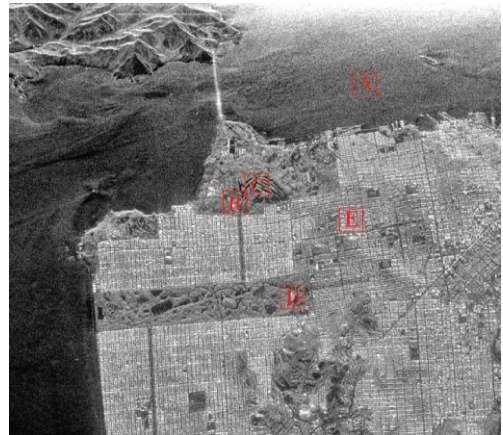


图 2 极化数据滤波前 SPAN 图像
(San Francisco, AIRSAR)

Fig. 2 SPAN image before filtering (San Francisco, AIRSAR)

3.1 同相干斑抑制和细节信息保留情况相关的结果展示与分析

在定量评价方面将利用等效视数 (ENL) 和点目标保持指数 (PPI) (Sheng 和 Xia, 1996) 与边缘保持指数 (EPI) (韩春明, 2003) 来分别评价相干斑抑

制和细节信息保留情况。滤波后数据的 SPAN 图如图 3 所示,点目标和边缘目标的位置选取于图 2 中

的 B 和 C 区域,局部放大图如图 4 和图 5 所示,量化指标统计结果如表 1 所示。

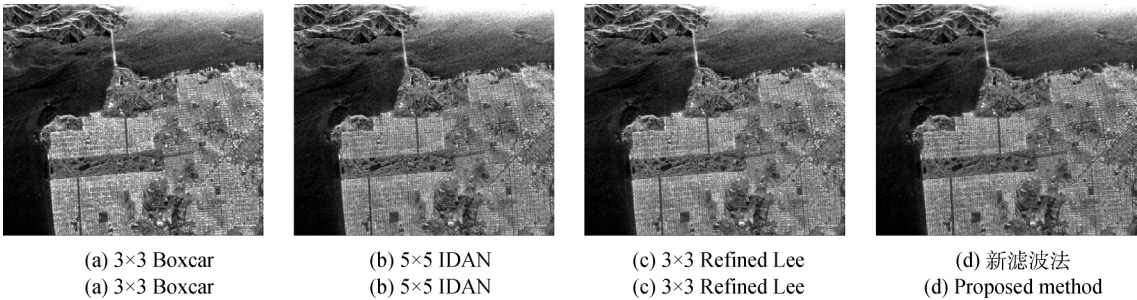


图 3 美国旧金山全极化数据滤波后合成的 SPAN 图像
Fig. 3 SPAN image after filtering (San Francisco)

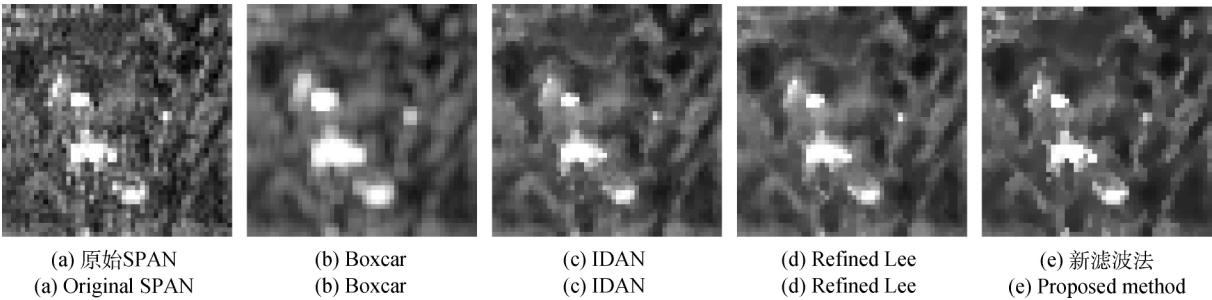


图 4 SPAN 图像 B 区域点目标局部放大图
Fig.4 The 1:1 image of the point target near the area B in the SPAN image

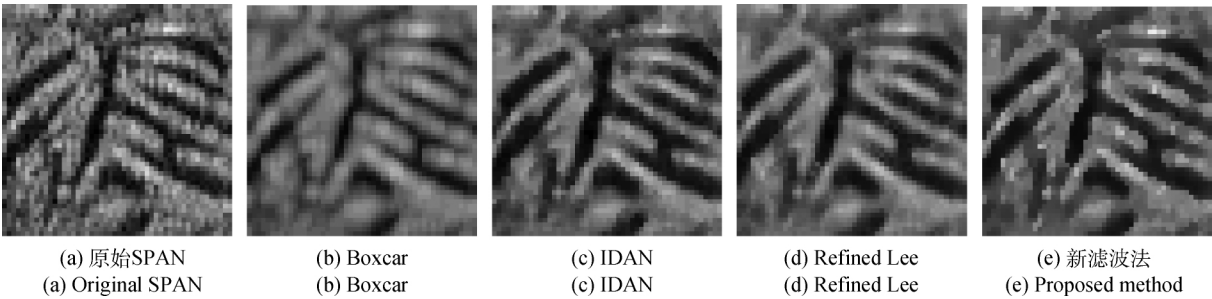


图 5 SPAN 图像 C 区域边缘目标局部放大图
Fig.5 The 1:1 image of the edge target near the area C in the SPAN image

表 1 各滤波器在相干斑抑制和细节信息保持方面的定量比较

Table 1 Quantitative comparison in speckle reduction and detail preservation between four filters					
	原 SAR 数据	Boxcar	IDAN	Refined Lee	新滤波法
ENL	17.05	79.52	56.67	71.96	83.61
PPI	1.00	0.32	0.72	0.67	0.84
EPI	1.00	0.37	0.75	0.74	0.87

通过观察局部放大图(图 4 与图 5) 可以看到: 经 3 种滤波器处理得到的 SPAN 图像较滤波前图像中的相干斑都有所减少,其中 Boxcar 滤波器对相干

斑抑制效果最明显,但点目标和边缘等细节信息损失严重,在图像中表现为点目标被放大,边缘目标被加粗;而 IDAN 滤波器、Refined Lee 滤波器和新滤波法则有效克服了 Boxcar 滤波器的不足。详细对比可以发现:新滤波法的输出结果使同质区域得到进一步的平滑,区域内更加均匀一致,而点目标和边缘等细节信息被进一步锐化,在图像中形状和轮廓更加清晰。量化指标的对比结果与目视判读结果是相一致的,各种滤波方法的 ENL 较原始值都有增加且 Boxcar 滤波器的 ENL 值最大,PPI 与 EPI 值都有减小且 Boxcar 滤波器的值均最小。指标参数的详细对比可以发现:新滤波法的 ENL 值、PPI 值与

EPI 值均高于其他 3 种滤波器,进一步说明新滤波法相干斑抑制能力和细节信息保留的能力更强。

3.2 同散射信息保留情况相关的结果展示与分析

滤波前后散射信息的目视效果是通过 Freeman–

Durden 3 分量分解合成的 RGB 图像进行描述,整体效果图如图 6 所示,局部放大图选取于图 2 中的 E 区域,如图 7 所示。定量评价是基于散射功率变化率(SPR) (欧阳群东 等,2011) 指标,其统计结果如表 2 所示。

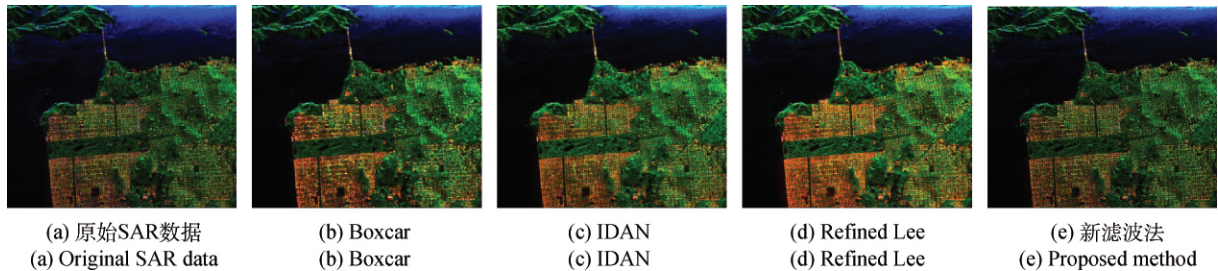


图 6 Freeman-Durden 3 分量分解合成的 RGB 整体效果图

Fig. 6 Overview of the Freeman-Durden decomposition

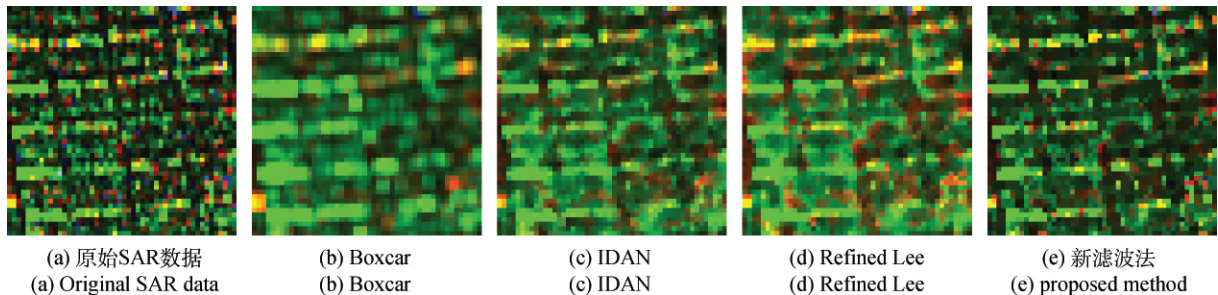


图 7 Freeman-Durden 3 分量分解合成的 RGB 局部放大图

Fig. 7 The 1:1 image of the portion of Freeman-Durden decomposition

表 2 各滤波器在散射特性保持方面的定量比较

Table 2 Quantitative comparison in scattering characteristics preservation between four filters

滤波器	SPR(s)	SPR(d)	SPR(v)	$\overline{SPR}$
Boxcar	41.82	183.57	0.70	75.36
IDAN	39.07	120.56	0.49	53.37
Refined Lee	36.54	100.18	0.48	45.73
新滤波法	30.61	81.66	0.45	37.57

* 注: s 代表奇次散射, d 代表偶次散射, v 代表体散射。

无论是观察总体效果图(图 6) 还是局部放大图(图 7) 均可以看到: 新滤波法的彩色合成图像较经典滤波器更接近滤波前的图像,说明在散射信息保留方面新滤波法更优。表 2 中量化指标的对比结果也说明了这个问题: 经典滤波器的 $\overline{SPR}$ 值均大于新滤波法,这说明经典滤波器保留散射信息的能力弱于新滤波法。

3.3 同极化信息保留情况相关的结果展示与分析

滤波前后极化信息的目视效果可以通过极化特征图(王超 等,2008) 来判读,包括同极化特征图和交叉极化特征图,实验结果如图 8 和图 9 所示,选取于图 2 中的 D 区域。量化分析使用的是极化功率比的变化量(PRC) (邓少平 等,2011) ,该指标首先在整个图像区域中逐像元分别计算 3 种散射机制功率变化的百分比,然后求算三者的均值,统计结果如表 3 所示。

表 3 各滤波器在保持极化信息方面的定量比较

Table 3 Quantitative comparison in polarization information preservation between four filters

极化功率比	原 SAR 数据 / %	Boxcar / %	IDAN / %	Refined Lee / %	新滤波法 / %
$P(HH)$	39.60	39.68	37.66	38.21	38.99
$P(HV)$	10.98	11.02	10.35	10.92	10.83
$P(VV)$	49.42	49.30	51.99	50.87	50.18
PRC	0.00	0.22	5.14	2.91	1.52

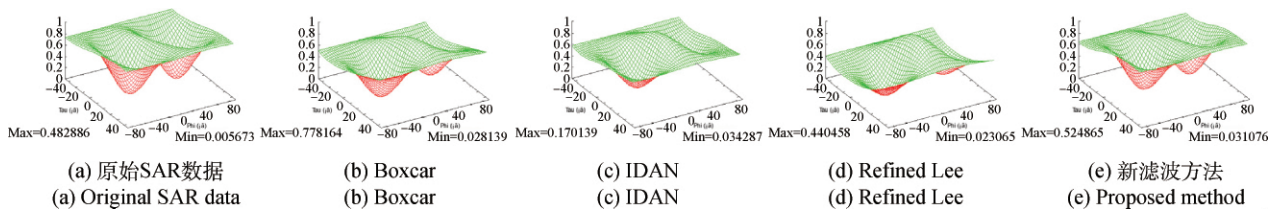


图8 美国旧金山地区全极化数据同极化特征图

Fig. 8 Co-polarization response of the AIRSAR data at San Francisco

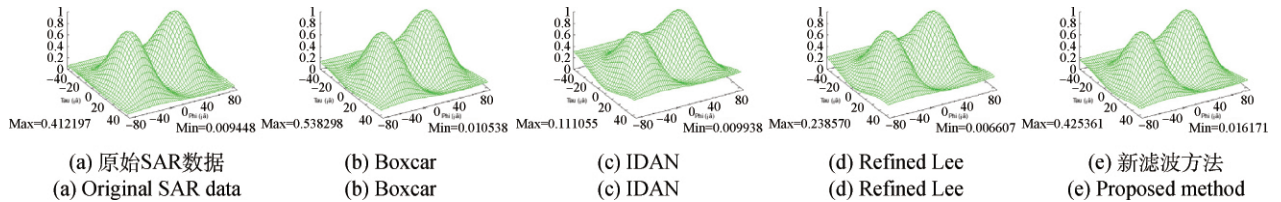


图9 美国旧金山地区全极化数据交叉极化特征图

Fig. 9 Cross-polarization response of the AIRSAR data at San Francisco

滤波后交叉极化特征图同滤波前均非常相似,而同极化特征图略有差异,与原始数据极化特征图相似度最好的是 Boxcar 滤波器和新滤波法,其次是 Refined Lee 滤波器,最差的是 IDAN 滤波器。从 PRC 量化指标的分析结果看,4 种滤波器的极化信息均损失较少,进一步对比可得 Boxcar 滤波器的 PRC 值最小,其次是新滤波法,再次是 Refined Lee 滤波器,最大的是 IDAN 滤波器,这与目视判读的结果基本相一致。

综合以上分析可以得到以下结论:新滤波法在有效抑制极化 SAR 数据中相干斑的同时,既能很好地保持原数据中的点目标和边缘等细节信息,又能减少原始数据散射信息和极化信息的损失,而取得这样的效果同新滤波器的设计息息相关:(1)交叉双边滤波思想的引入可以极大地改善原始数据灰度相似性计算的准确性,使新滤波法具备良好的相干斑抑制能力;(2)良好的细节信息保留能力要归功于双边滤波器本身的性能;而空间距离扩散标准差自适应于滤波窗口同质性程度的变化再一次确保了新滤波法良好的相干斑抑制能力和优秀的细节信息保留能力;(3)引入散射类型测度来扩展原权重核,使对中心像元贡献大的邻域像元不仅要求空间距离近、灰度值差异小,还要求散射类型相近,而这奠定了新滤波法在保持原始数据中极化散射信息方面的良好性能。

4 结 论

本文将交叉双边滤波器扩展到极化 SAR 数据

降噪领域。为满足滤波准则的要求,在距离测度和灰度测度的基础上引入了散射类型测度。滤波过程中,参考影像使用的是 Refined Lee 滤波的输出结果;距离测度参数是根据 SPAN 图像来确定,而灰度测度参数和散射机制测度参数则是通过分析参考图像的特征来确定。为验证新滤波法的性能,从定性判读和定量分析两个方面进行了较全面的分析。实验结果表明:新滤波法较经典滤波器在有效抑制原数据中相干斑噪声的同时,既提高了对点目标和边缘等细节信息的保留,又降低了对原数据中散射信息和极化信息的损失,从而为基于极化 SAR 数据的后续应用奠定了良好的基础。

参考文献(References)

- Buades A, Coll B and Morel J M. 2008. Nonlocal image and movie denoising. *International Journal of Computer Vision*, 76(2): 123 - 139 [DOI: 10.1007/s11263-007-0052-1]
- Deng S P, Li P X, Zhang J X and Huang G M. 2011. Filtering of polarimetric SAR imagery based on multiplicative model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 36(10): 1168 - 1171 (邓少平, 李平湘, 张继贤, 黄国满. 2011. 基于乘积模型的极化 SAR 滤波. *武汉大学学报(信息科学版)*, 36(10): 1168 - 1171)
- D'Hondt O, Guillaso S and Hellwich O. 2013. Iterative bilateral filtering of polarimetric SAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3): 1628 - 1639 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2256881]
- Eisemann E and Durand F. 2004. Flash photography enhancement via intrinsic relighting. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 23(3): 673 - 678 [DOI: 10.1145/1186562.1015778]
- Goze S and Lopes A. 1993. A MMSE speckle filter for full resolution

- SAR polarimetric data. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 7(5): 717–737 [DOI: 10.1163/156939393X00831]
- Han C M. 2003. The Study of SAR Image Speckle Filter. Institute of Remote Sensing Applications. Beijing: Chinese Academy of Sciences (韩春明. 2003. SAR 图像斑点滤波研究. 北京: 中国科学院遥感应用研究所)
- Han J W, Kim J H, Cheon S H, Kim J O and Ko S J. 2010. A novel image interpolation method using the bilateral filter. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 56(1): 175–181 [DOI: 10.1109/TCE.2010.5439142]
- Lee J S, Grunes M R and De Grandi G. 1999. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2363–2373 [DOI: 10.1109/36.789635]
- Lee J S, Grunes M R and Mango S A. 1991. Speckle reduction in multi-polarization, multifrequency SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(4): 535–544 [DOI: 10.1109/36.135815]
- Lee J S and Pottier E. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications*. Boca Raton: CRC Press
- Lee J S, Wen J H, Ainsworth T L, Chen K S and Chen A J. 2009. Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1): 202–213 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2002881]
- Li J C, Huang S X, Peng Y X and Zhang W M. 2012. A novel method to configure the parameters of the bilateral filtering for synthetic aperture radar images speckle reduction. *Journal of Physics*, 61(11): 119501–1–119501–5 (李金才, 黄思训, 彭宇行, 张卫民. 2012. 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. *物理学报*, 61(11): 119501–1–119501–5)
- Liu G Q, Huang S J, Torre A and Rubertone F. 1998. The multilook polarimetric whitening filter (MPWF) for intensity speckle reduction in polarimetric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 1016–1020 [DOI: 10.1109/36.673694]
- Lopes A, Touzi R and Nezry E. 1990. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(6): 992–1000 [DOI: 10.1109/36.62623]
- Novak L M and Burl M C. 1990. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 26(2): 293–305 [DOI: 10.1109/7.53442]
- Ouyang Q D, Wu Z C and Peng J G. 2011. An improved method of Lee refined polarized filter. *Science of Surveying and Mapping*, 36(5): 136–138 (欧阳群东, 巫兆聪, 彭检贵. 2011. 一种改进的精制极化 Lee 滤波算法. *测绘科学*, 36(5): 136–138)
- Perona P and Malik J. 1990. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(7): 629–639 [DOI: 10.1109/34.56205]
- Petschnigg G, Szeliski R, Agrabala M, Cohen M, Hoppe H and Toyama K. 2004. Digital photography with flash and no-flash image pairs. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 23(3): 664–672 [DOI: 10.1145/1186562.1015777]
- Pi Y M, Zou Q and Huang S J. 2002. Speckle reduction of polarimetric SAR—polarimetric whitening filter. *Journal of Electronics and Information Technology*, 24(5): 597–607 (皮亦鸣, 邹琪, 黄顺吉. 2002. 极化 SAR 相干斑抑制—极化白化滤波器. *电子与信息学报*, 24(5): 597–607)
- Qiu Y, Wang S Y and Yu Y Z. 2013. An improved self-cross bilateral filter based on curvelet transform. *Journal of Southwestern China Normal University (Natural Science Edition)*, 38(2): 96–105 (邱宇, 王世元, 余勇志. 2013. 一种基于曲线波的改进自交叉双边滤波方法. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 38(2): 96–105) [DOI: 10.3969/j.issn.1000–5471.2013.02.021]
- Sheng Y W and Xia Z G. 1996. A comprehensive evaluation of filters for radar speckle suppression // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1996. IGARSS 96. Lincoln, NE: IEEE: 1559–1561 [DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516730]
- Tomasi C and Manduchi R. 1998. Bilateral filtering for gray and color images // *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision*. Bombay: IEEE: 839–846 [DOI: 10.1109/ICCV.1998.710815]
- Vasile G, Trouvé E, Lee J S and Buzuloiu V. 2006. Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6): 1609–1621. [DOI: 10.1109/TGRS.2005.864142]
- Wang C, Zhang H, Chen X, Liu Z and Yan D M. 2008. *Polarimetric Synthetic Aperture Radar Image Processing*. Beijing: Science Press (王超, 张红, 陈曦, 刘智, 闫冬梅. 2008. 全极化合成孔径雷达图像处理. 北京: 科学出版社)
- Wang S, Yu J P, Liu K, Hou B and Jiao L C. 2014. Polarimetric SAR speckle reduction based on bilateral filtering. *Journal of Radars*, 3(1): 35–44 (王爽, 于佳平, 刘坤, 侯彪, 焦李成. 2014. 基于双边滤波的极化 SAR 相干斑抑制. *雷达学报*, 3(1): 35–44) [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13133]
- Zhang J Y, Lei B and Liu T J. 2013. A new spatial speckle reduction method for polarimetric SAR data. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 30(1): 60–67 (张静怡, 雷斌, 刘团结. 2013. 一种新型的空域极化 SAR 数据相干斑滤波方法. *中国科学院研究生院学报*, 30(1): 60–67) [DOI: 10.7523/j.issn.1002–1175.2013.01.010]
- Zhang M and Gunturk B K. 2008. Multiresolution bilateral filtering for image denoising. *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(12): 2324–2333 [DOI: 10.1109/TIP.2008.2006658]
- Zhao Z M. 2013. *Speckle Filtering for Polarimetric SAR Based on Non-local Means*. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University (赵忠民. 2013. 基于非局部均值的极化 SAR 相干斑抑制方法研究. 郑州: 解放军信息工程大学)

Speckle filtering for polarimetric SAR data based on self-cross bilateral filter

XIAO Shichen^{1,2}, LIAO Jingjuan¹, SHEN Guozhuang¹

1. *Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract: Polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) data record an increased amount of scattering information of ground targets with fully polarimetric patterns. Thus, polarimetric SAR has become a key issue in development. Polarimetric SAR technologies have made significant progress in applications such as military and civil remote sensing. However, because of the limitation of coherent imaging, speckle in SAR and polarimetric SAR data seriously affects the relative information extraction. Therefore, speckle suppression is an important step in SAR and polarimetric SAR data processing. Subsequent applications with polarimetric SAR data could be supported. The Bilateral Filter (BF) that combines spatial closeness and gray similarity to suppress speckle is an excellent edge preservation filtering algorithm. This paper proposes an Improved Cross Bilateral Filter (ICBF) to resolve the deficiency of the BF in speckle suppression of polar metric SAR data. The reference image was imported to improve the gray similarity measurement accuracy of the original data, and a new strategy that sets two key parameters of bilateral filter based on the variance coefficient of filter window was presented to adapt to the change in the homogeneity degree of the filter window. The ICBF added scattering mechanism measurement to extend the original weight kernel, adjusted spatial closeness variance via the local coefficient of variation by using SPAN image, and measured the similarity of gray value and scattering mechanism by using a reference image. The experiment was conducted with AIRSAR polar metric data in the San Francisco region. The proposed filter algorithm was then compared with classic filter algorithms, such as Boxcar, IDAN, and Refined Lee, based on speckle suppression, detailed information preservation, scattering and polarization information preservation with the visual and index methods. The experimental results show that ICBF could improve the gray similarity measurement accuracy of the original data and that ICBF can suppress speckle and preserve detailed information, such as point targets and edges in the original data, better than the classic filter algorithms. By contrast, the measurement of scattering mechanism was combined in the kernel function of bilateral filter, the parameter of the space distance weight was obtained from SPAN image, and the weights of gray value and scattering mechanism were measured with the standard deviation of the corresponding data. Thus, the polarization information and scattering characteristics of the original data were preserved well. Compared with classic filtering algorithms, the ICBF can smooth noise and preserve detailed information better. Furthermore, polarization information and scattering characteristics of the original data are maintained to support subsequent application based on polarimetric SAR data.

Key words: polarimetric synthetic aperture radar, cross bilateral filtering, despeckling, filtering