

引用格式:ZHANG Jing, GUO Fengcheng, ZUO Zedan, *et al.* Speckle anisotropic diffusion suppression by multidirectional Sobel[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(5): 1118-1125. [张婧, 郭风成, 左泽丹, 等. 融合多方向Sobel算子的相干斑各向异性扩散抑制[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(5): 1118-1125.]  
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.5.1118

## 融合多方向Sobel算子的相干斑各向异性扩散抑制

张婧<sup>1</sup>, 郭风成<sup>1</sup>, 左泽丹<sup>2</sup>, 丁鹏辰<sup>1</sup>, 陈思悃<sup>1</sup>, 孙 闯<sup>1</sup>, 刘文宋<sup>1</sup>

(1. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116;

2. 苏州规划设计研究院股份有限公司徐州分公司, 江苏 徐州 221112)

**摘要:**相干斑的存在严重干扰了SAR图像质量,亟需对其抑制处理。传统AD(Anisotropic Diffusion)滤波器边缘检测模型精准度仍有提升空间,且噪声抑制效果往往受限于扩散阈值较难准确估计的问题。针对上述问题,提出了一种融合多方向Sobel算子的相干斑各向异性扩散抑制方法。该方法是SRAD(Speckle Reducing Anisotropic Diffusion)的改进算法,其利用多方向Sobel算子在SAR影像各点处构建了全新的边缘检测模型,并基于此,融合高斯核函数建立了新的AD扩散函数,可有效解决传统AD扩散系数受参数估计限制,提升了相干斑各向异性抑制的准确性。实验选取了3景真实SAR影像进行滤波实验,结果表明:该方法可有效提高边缘检测能力,获取更优相干斑抑制效果。

**关键词:**相干斑;噪声抑制;各向异性扩散;边缘检测;多方向Sobel

**中图分类号:**P237;TO25 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2023)05-1118-08

### 1 引言

合成孔径雷达SAR(Synthetic Aperture Radar)是主动遥感对地观测领域内一项重要的空天科技手段,其传感器常安装于飞机、卫星、宇宙飞船等航空航天平台,具备全天候、全天时对地观测能力<sup>[1-2]</sup>,在灾害监测、环境监测、海洋监测、资源勘查、农作物估产、测绘和军事等方面均可发挥独特优势,越来越受到世界各国的重视<sup>[3]</sup>。然而需要指出的是,SAR是一种相干成像系统,受成像机理所致,其影像上会不可避免产生大量相干斑<sup>[4]</sup>。SAR相干斑本质上在地物后向散射系数的固有表达,但其形态上严重干扰了真实地物特征表达,给SAR影像高质量应用带来不利影响,亟需对其抑制处理。

近年来,科技工作者提出了一系列性能优良的滤波方法,主要包括空间域滤波<sup>[5]</sup>、变换域滤波<sup>[6]</sup>、

偏微分方程滤波<sup>[7]</sup>以及基于深度学习的滤波<sup>[8]</sup>等。空间域滤波器可以有效平滑噪声,且算法简单,但较难有效保持强点处的边缘细节<sup>[9]</sup>。变换域滤波器可以有效抑制斑点,但通常需要将影像在不同域间重构处理,算法复杂,且易产生伪吉布斯效应<sup>[10-11]</sup>。近年来,基于深度学习的滤波器备受科技工作关注,但目前仍处于发展期,其滤波性能主要受限于难以获取真实无噪的训练像本。基于偏微分方程的各向异性扩散(AD, Anisotropic Diffusion)滤波器是目前广为使用的一类滤波器,其通过在像素各点构建不同的扩散系数,可理论上实现像素各点不同尺度的相干斑抑制,较好兼顾相干斑抑制与噪声平滑两个方面。

AD滤波器最早以Perona和Malik在加性噪声基础上提出的著名P-M模型为标志<sup>[12]</sup>。但P-M模型无法有效滤除乘性噪声。Yu等<sup>[13]</sup>通过优化边缘

收稿日期:2022-07-28;修订日期:2023-08-31

基金项目:国家自然科学基金项目(62101219、62201232),江苏省自然科学基金项目(BK20210921、BK20201026),江苏师范大学自然科学研究基金项目(20XSRS008)。

作者简介:张婧(2001—),女,江苏扬州人,本科生,主要从事SAR相干斑抑制研究。E-mail: 739409323@qq.com

通讯作者:郭风成(1992—),男,江苏宿迁人,副教授,主要从事SAR图像质量提升及信息提取研究。E-mail: fchguo@jsnu.edu.cn

检测算子,发展了一种适用于相干斑乘性噪声的 SRAD (Speckle Reducing Anisotropic Diffusion) 滤波器。至此,AD 滤波器被正式应用于 SAR 相干斑抑制领域。随后,一系列基于 SRAD 滤波器的改进策略被先后提出。AJA-Fernandez'等<sup>[14]</sup>基于 SRAD 滤波器发展了细节保持各向异性扩散滤波方法 (DPAD, Detail Preserving Anisotropic Diffusion), 较好提升了原始 AD 滤波器对边缘信息的保护。张过等<sup>[9]</sup>基于八方向相干系数构建了新的扩散函数,有效提升了边缘探测性能。郭风成等<sup>[3]</sup>引入曲面变分重构 AD 模型,并基于比值影像提升滤波影像边缘保持性能。Riya 等<sup>[15]</sup>提出了一种具有高收敛速度的扩散系数与图像相关的阈值参数。上述滤波器均在边缘检测方面对 AD 滤波模型进行优化。事实上,这也是 AD 滤波器高质量实现各向异性扩散抑制的关键。但目前 AD 滤波器边缘检测模型精准度仍有提升空间,需要构建性能更加优良的 AD 边缘探测器及扩散函数模型。

基于此,提出了融合多方向 Sobel 算子的相干斑各向异性扩散抑制算法 (MSAD, Multidirectional Sobel Anisotropic Diffusion)。MSAD 滤波器在 SRAD 滤波模型基础上,利用多方向 Sobel (MS, Multidirectional Sobel) 算子构建新的边缘检测模型,并融合高斯核函数建立了新的 AD 扩散系数,解决了传统 AD 滤波器扩散函数受参数估计限制,提升了相干斑抑制各向异性的准确性。通过与其他经典的滤波算法进行真实 SAR 影像滤波实验比较,验证该算法的可行性与有效性。

## 2 研究方法

### 2.1 相干斑噪声模型

相干斑噪声被科研工作者广泛认为符合乘性噪声模型,如下:

$$I^O = I^T \cdot N^S \quad (1)$$

其中: $I^O$ 表示原始未滤波影像; $I^T$ 表示真实无噪声影像, $N^S$ 表示相干斑噪声。

### 2.2 传统 AD 滤波器

Yu 等<sup>[13]</sup>在 SAR 影像乘性相干模型的假设基础上提出了 SRAD 滤波器,其扩散方程可表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial I(t)}{\partial t} = \text{div} \left[ c(|\nabla I(t)|) \cdot \nabla I(t) \right] \\ I(0) = I_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: $t$ 表示时间步长; $\text{div}$ 表示散度算子; $\nabla$ 表示梯度算子; $I_0$ 为输入图像。

扩散系数  $c(x)$  有两种可选择的模型,分别为:

$$c(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{k}\right)^2} \quad (3)$$

或

$$c(x) = \exp \left[ -\left(\frac{x}{k}\right)^2 \right] \quad (4)$$

其中: $k$ 表示边缘探测参数。

由式(3)与式(4)可知,当  $x$  远大于  $k$  时,则  $c(x)$  趋向于 0,此时扩散终止。相反,若  $x$  远小于  $k$  时,则  $c(x)$  趋于 1,此时扩散表现为各向同性。由此可以看出,通过构建合适的边缘检测模型,可以实现像素各点不同尺度的相干斑抑制。

### 2.3 MSAD 滤波器

#### 2.3.1 MS 边缘检测模型

由上述分析可知,边缘检测模型的准确构建是 AD 滤波器实现高质量各向异性抑制的关键。目前 AD 滤波器的主要改进方向也聚焦于边缘检测模型优化方面。基于此,研究提出了融合 MS 算子的 SAR 边缘检测策略。

MS 边缘检测模板是 Sobel 基本模板的优化版本,将原两个方向的模板拓展至八方向,以全覆盖像素邻域各方向边缘探测,具体模板如图 1 所示。

基于 MS 模板边缘检测模型具体如下:

$$ED_{ij} = M \left[ \text{abs} \left( \sum_{\alpha=-h}^h \sum_{\beta=-l}^l MS_n \cdot I_{\Omega_{x,y}^D}^D \right) \right], n = 1, 2, \dots, 8 \quad (5)$$

其中: $ED_{ij}$ 为像素点  $i, j$  处边缘检测结果; $MS_n$ 为图 1 所示的第  $n$  个 MS 边缘检测模板; $M[\cdot]$ 表示均值; $\text{abs}$ 表示绝对值; $\Omega_{x,y}$ 表示以  $x, y$  为像素中心的  $5 \times 5$  矩形窗; $I^D$ 表示区域差值影像。

受相干斑随机噪声干扰,直接将 MS 模板应用于原始 SAR 影像,其准确性会一定程度受到随机噪声干扰。为进一步降低其对边缘检测的干扰,将对原始影像首先进行区域差值处理,该差值处理融合了邻域像素信息,可有效弱化随机噪声的干扰,具体模型如下:

$$I_{m \times n}^D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1j} & \cdots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2j} & \cdots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{i1} & D_{i2} & \cdots & D_{ij} & \cdots & D_{in} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{m1} & D_{m2} & \cdots & D_{mj} & \cdots & D_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$D_{ij}$ 的构建如下:

$$D_{ij} = \sum_{\alpha=-h}^h \sum_{\beta=-w}^w \left[ I_{ij}(i + \alpha, j + \beta) - I_{xy}(x + \alpha, y + \beta) \right]^2 \quad (7)$$

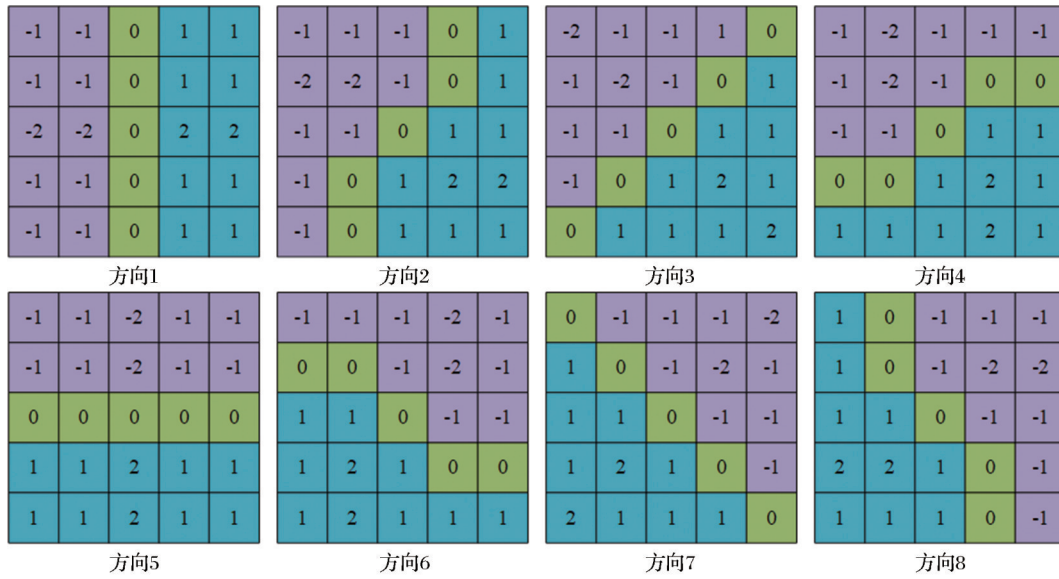


图1 MS边缘检测模板

Fig.1 MS edge detection template

其中: $h$ 与 $w$ 分别表示区域差值计算窗口长与宽的 $\frac{1}{2}$ ;  $I_{x,y}$ 表示当前要计算像素中心点的矩形窗口;  $I_{i,j}$ 表示邻域内 $i,j$ 处的矩形窗口。

### 2.3.2 融合MS模板与高斯核函数的AD扩散系数

需要指出的是,AD滤波器并非需要对像素点是否为边缘点进行是或非的判断,而是需要对像素各点为边缘点进行概率计算。边缘概率越高,该点将进行越低尺度的滤波,相反,边缘概率越低,即同质区域概率越高,该点将进行越高尺度的滤波。

传统AD扩散系数需要估计影像的边缘参数,然而受噪声干扰该参数精准估计较难。为了解决这个问题,引入高斯核函数,并联合区域相似性构建了新的AD扩散系数,公式如下:

$$C = \exp\{-ED\} \quad (8)$$

由式(5)可知, $ED$ 的取值为非负数,则AD扩散系数取值范围为 $[0, 1]$ ,当 $ED$ 越大时,即边缘概率越高,则AD扩散系数越小,此时为低尺度抑制。反之,当 $ED$ 越小时,即同质区概率越高,则AD扩散系数越大,此时为高尺度抑制。

### 2.3.3 MSAD算法流程

MSAD算法是基于SRAD滤波器的改进算法,其利用MS模板构建新的AD边缘探测模型,并基于此,融合高斯核函数构建了新的AD扩散系数。MSAD滤波过程与AD滤波器一致,是通过雅可比迭代的方式求解偏微分方程实现相干斑抑制,具体流程如下所示:

(1)基于新的AD扩散系数构建SAR影像偏微

分方程,公式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial I(t)}{\partial t} = \text{div}[C(ED) \cdot \nabla I(t)] \\ I(0) = I_0 \end{cases} \quad (9)$$

(2)基于公式(5)~(8)构建AD扩散系数;

(3)求解偏微分方程 $C(ED) \cdot \nabla I(t)$ 的散度,公式如下:

$$d_{ij}^{n+1} = C_{i+1,j}^{n-1}(I_{i+1,j}^{n-1} - I_{ij}^{n-1}) + C_{i,j}^{n-1}(I_{i-1,j}^{n-1} - I_{ij}^{n-1}) + C_{i,j+1}^{n-1}(I_{i,j+1}^{n-1} - I_{ij}^{n-1}) + C_{i,j-1}^{n-1}(I_{i,j-1}^{n-1} - I_{ij}^{n-1}) \quad (10)$$

(4)计算偏微分方程数值完成滤波,公式如下:

$$I_{ij}^n = I_{ij}^{n-1} + \frac{\Delta t}{4} \cdot d_{ij}^{n-1} \quad (11)$$

## 3 实验数据与评价方法

### 3.1 实验数据

为了有效评估滤波器性能,分别选取了GF-3 SAR影像(C波段、VV极化、3 m分辨率)、TerraSAR-X SAR影像(X波段、HH极化、3 m分辨率)、RadarSAT-2 SAR影像(C波段、HV极化、8 m分辨率)进行滤波实验,如图2所示。实验所采用的影像均为幅度格式。

### 3.2 滤波方法选取

为了全面评估提出的MSAD滤波器性能,研究选取了其他性能较好的经典滤波器作为对比。由于MSAD是SRAD滤波器<sup>[13]</sup>的改进算法,因此首先选择了SRAD滤波器作为对比方法。同时,在AD类滤波器中,还选取了较为经典的DPAD滤波器<sup>[14]</sup>。此外,在其他类滤波器中,选取了滤波效果



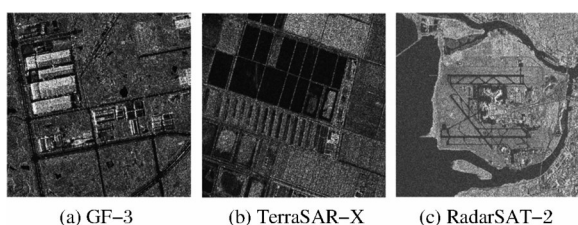


图2 滤波实验影像

Fig.2 Filtering experimental images

较好的 EnLee 滤波器<sup>[5]</sup>、PPB 滤波器<sup>[11]</sup>作为对比方法。上述滤波器代码均网上在线获取,相关参数设置均参考算法原始文献。

### 3.3 评价指标选取

为了有效评价提出的滤波器性能,需对滤波结果进行定性与定量评估。定性评价采用目视评估的方式,即通过对滤波结果和比值影像进行直观目视评价。比值影像是未滤波影像与滤波后影像作比获得的影像,若噪声被完美滤除,则比值影像中将仅包含相干斑。定量评价采用指标评估的方式,研究综合选取了 ENL (Equivalent Number Look)、SSI (Speckle Suppression Index)、ESI (Edge Saving Index)以及 M 指标<sup>[16]</sup>。ENL 与 SSI 指标可以有效反映滤波器噪声抑制能力,ESI 指标可以评估滤波后影像的边缘保持能力,M 指标综合评估滤波器性能。上述4个指标均为滤波算法评估常用指标,具体模型如下:

#### 3.3.1 ENL 指标

ENL 指标定义如下:

$$\text{ENL} = \frac{\mu^2[I_{HR}]}{\text{var}[I_{HR}]} \quad (12)$$

其中: $\mu$ 和 $\text{var}$ 分别表示均值和方差; $I_{HR}$ 表示影像 $I$ 的

同质区域。ENL 值与滤波器相干斑噪声平滑能力成正比,其值越大,滤波器噪声平滑能力越好。

#### 3.3.2 SSI 指标

SSI 指标定义如下:

$$\text{SSI} = \left( \frac{\sqrt{\text{var}[I^F]}}{\mu[I^F]} \right) \cdot \left( \frac{\mu[I^O]}{\sqrt{\text{var}[I^O]}} \right) \quad (13)$$

其中: $I^F$ 和 $I^O$ 分别表示滤波后影像与未滤波影像。SSI 值与滤波器相干斑噪声平滑能力成反比,其值越低,表明抑制能力越强。

#### 3.3.3 ESI 指标

ESI 指标定义如下:

$$\text{ESI} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{(I_{ij}^F - I_{i+1j}^F)^2 + (I_{ij}^F - I_{ij+1}^F)^2}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{(I_{ij}^O - I_{i+1j}^O)^2 + (I_{ij}^O - I_{ij+1}^O)^2}} \quad (14)$$

ESI 值越大,滤波后影像边缘保持性能越好。

#### 3.3.4 M 指标

M 指标定义如下<sup>[16]</sup>:

$$M = r_{\hat{\text{ENL}}, \hat{\mu}} + \delta h \quad (15)$$

其中: $r_{\hat{\text{ENL}}, \hat{\mu}}$ 和 $\delta h$ 分别反映了散斑平滑和边缘保持性能,其具体模型公式参考文献<sup>[16]</sup>。M 指标越接近于0,则滤波的综合性能越好,反之则越差。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 GF-3 SAR 影像

首先对 GF-3 SAR 影像进行滤波实验,滤波结果如图3所示。基于未滤波影像与滤波后影像获取的比值影像如图4所示。指标评价结果如表1所示。

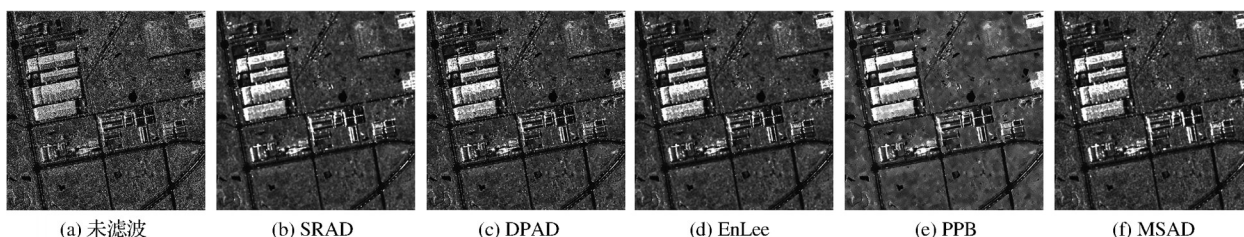


图3 GF-3 SAR 影像不同滤波器滤波结果。

Fig.3 Original GF-3 SAR image (Filtered images by SRAD, DPAD, EnLee, PPB, and MSAD)

从图3可以看出,对比未滤波影像,5种滤波器均可以很好地平滑掉噪声。从图4所示的比值影像可以看出,5种滤波器均一定程度上损失了一定边缘信息。从指标上看,在 ENL 方面,5种滤波器较未滤波影像均有明显提升。在5种滤波器中,PPB 滤波器获得的 ENL 最高,较未滤波影像提升 17.38

倍,MSAD 滤波器表现虽不是最佳,但较未滤波影像提升了 10.55 倍,表现出了较好的斑噪平滑性能。在 SSI 方面,MSAD 滤波器表现最佳,优于 MRAD 与 PPB 滤波器。在 ESI 方面,DPAD 滤波器表现最佳,MSAD 与 PPB 滤波器表现次最佳。在 M 指标方面,MSAD 滤波表现最佳,其次是 PPB 滤波器。

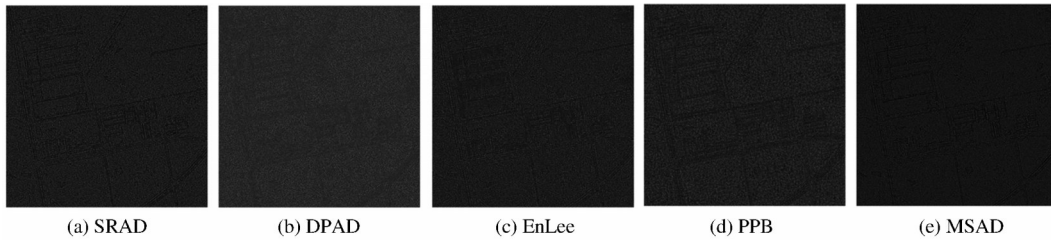


图 4 GF-3 SAR 影像不同滤波器获取的比值影像

Fig.4 Ratio images between noisy and filtered GF-3 images by filters

表 1 GF-3 SAR 影像不同滤波器指标评价结果

Table 1 Index evaluation on GF-3 filtered images

滤波方法	ENL	SSI	ESI	M 指标
未滤波	2.77	-	-	-
SRAD	38.38	0.59	0.24	15.89
DPAD	17.50	0.80	0.32	22.49
EnLee	31.87	0.85	0.21	16.53
PPB	50.92	0.67	0.31	14.03
MSAD	32.00	0.54	0.31	5.82

综合来看,MSAD 滤波器针对 GF-3 SAR 影像具有较好的相干斑平滑能力与边缘保持性能,其有效性得到了验证。

#### 4.2 TerraSAR-X SAR 影像

接下来对 TerraSAR-X SAR 影像进行滤波实验,滤波结果如图 5 所示。基于未滤波影像与滤波后影像获取的比值影像如图 6 所示。指标评价结果如表 2 所示。

如图 5 所示,与 GF-3 SAR 影像滤波实验类似,5 种滤波器均较好抑制了相干斑噪声。图 6 所示的比值影像中,5 种滤波器同样均存在一定程度的边

缘损失。在指标评估方面,MSAD 滤波器的 ENL 较未滤波影像提升 21.21 倍,表现出较好斑噪抑制效果。在 SSI 方面,PPB 与 MSAD 滤波器表现最佳。在 ESI 方面,MSAD 滤波器表现次最佳。在 M 指标中,MSAD 滤波器表现最佳。综合来看,MSAD 滤波器针对 TerraSAR-X SAR 影像具有较好的相干斑平滑能力与边缘保持性能,其有效性得到了验证。

#### 4.3 RadarSAT-2 SAR 影像

最后对 RadarSAT-2 SAR 影像进行滤波实验,滤波结果如图 7 所示。基于未滤波影像与滤波后影

表 2 TerraSAR-X SAR 影像不同滤波器指标评价结果

Table 2 Index evaluation on TerraSAR-X filtered images

滤波方法	ENL	SSI	ESI	M 指标
未滤波	3.50	-	-	-
SRAD	97.15	0.65	0.17	13.94
DPAD	24.58	0.74	0.30	11.89
EnLee	61.38	0.67	0.12	20.13
PPB	138.50	0.63	0.22	26.08
MSAD	77.74	0.63	0.24	10.97

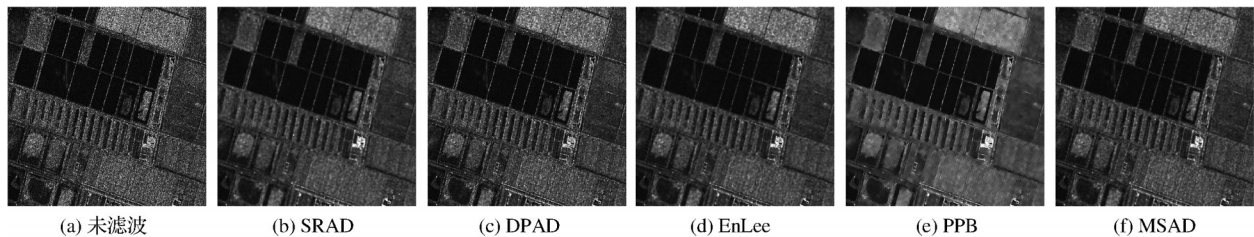


图 5 TerraSAR-X SAR 影像不同滤波器滤波结果

Fig.5 TerraSAR-X SAR image filtered images by different filters

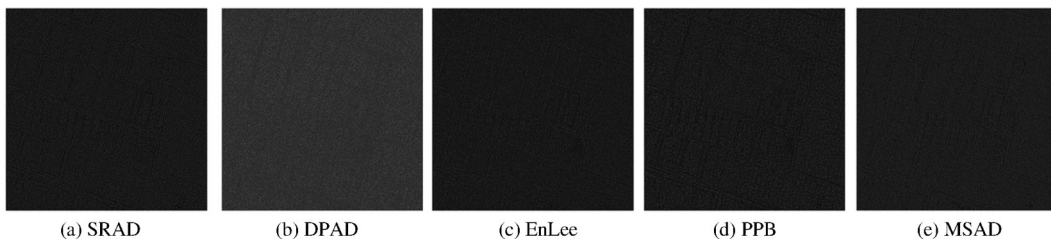


图 6 TerraSAR-X SAR 影像不同滤波器获取的比值影像

Fig. 6 Ratio images between noisy and filtered TerraSAR-X images by different filters



像获取的比值影像如图8所示。指标评价结果如表3所示。从图7和图8可以看出,RadarSAT-2 SAR影像滤波结果与前面实验结果类似,5种滤波器均较好平滑掉了相干斑噪声,而比值影像中均存在一定的边缘损失。在指标方面,MSAD滤波器具有次

最佳的ENL,较未滤波影像提升69.99倍。在SSI、ESI以及M指标中,MSAD滤波器均表现最佳。综合来看,MSAD滤波器针对RadarSAT-2 SAR影像具有较好的相干斑平滑能力与边缘保持性能,其有效性得到了验证。

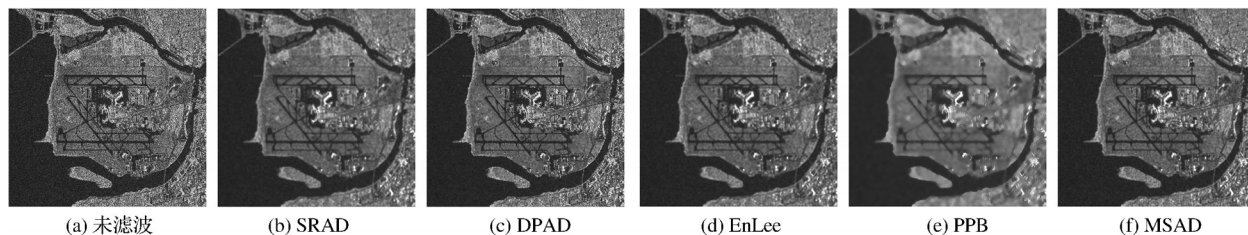


图7 RadarSAT-2 SAR影像不同滤波器滤波结果

Fig.7 RadarSAT-2 SAR image. Filtered images by different filters

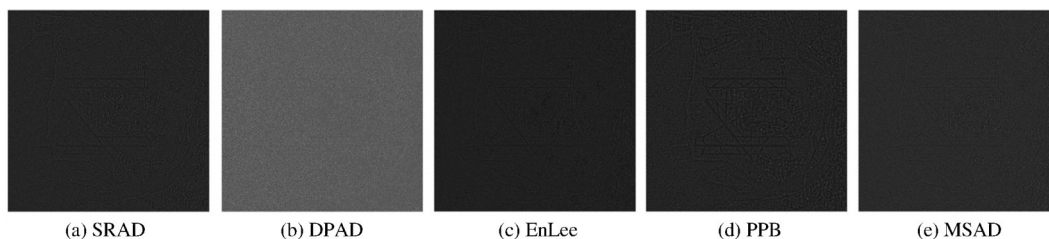


图8 RadarSAT-2 SAR影像不同滤波器获取的比值影像

Fig. 8 Ratio images between noisy and filtered RadarSAT-2 images by different filters

表3 RadarSAT-2 SAR影像不同滤波器指标评价结果

Table 3 Index evaluation on RadarSAT-2 filtered images

滤波方法	ENL	SSI	ESI	M指标
未滤波	12.19	-	-	-
SRAD	943.60	0.60	0.18	32.71
DPAD	301.17	0.74	0.20	130.77
EnLee	691.58	0.66	0.10	36.88
PPB	3 669.70	0.58	0.16	31.18
MSAD	865.31	0.56	0.23	27.18

## 5 讨论

完美的SAR相干斑抑制是将原始SAR影像中的斑点状噪声完全滤除且不发生边缘损失。但事实上,目前的相干斑抑制模型难以完全实现这一目标。从上述实验部分可以看出,噪声平滑一定程度上会产生边缘损失,且噪声平滑越好,往往会产生更多边缘损失。因此,如何加大噪声滤除同时尽可能降低边缘损失便是相干斑噪声抑制模型研制的真实需求与具体目标,即如何最大化平衡斑噪抑制与边缘保持这两个方面。

基于上述目标,利用提出的MS边缘检测模型可较好探测到SAR边缘信息,以更好适用于AD滤波模型的扩散尺度构建,完成噪声更为准确地各向

异性抑制。本实验利用提出的MSAD滤波模型对3景真实SAR影像进行滤波实验,并对滤波结果进行目视定性评估以及指标定量评估。从目视评估结果上看,提出的MSAD滤波模型滤除噪声显著,且其获得的比值影像具有相对较少的边缘损失,表明了其具有较佳的噪声平滑与边缘保持性能。从指标评估结果上看,MSAD滤波器在与SRAD、DPAD、EnLee以及PPB 4种性能较佳的滤波模型对比中,SSI与M指标均能表现最佳,ESI指标总体表现最佳或次最佳,ENL虽未能表现最佳,但其较未滤波影像最低提升了10.55倍,最高提升了69.99倍,再次验证了提出的滤波模型的有效性与优良性。

## 6 结论

相干斑的存在严重影响SAR图像高精度解译工作。传统AD滤波器在均衡斑噪平滑与边缘保持方面仍有进步空间。基于此,提出了融合多方向Sobel算子的相干斑各向异性抑制。提出的方法基于MS算子构建了AD边缘检测模型,并基于此融合高斯核函数建立了新的AD扩散函数,有效提升了SAR相干斑各向异性抑制的准确性。基于3景

真实 SAR 影像开展滤波实验,实验结果显示提出的方法可较好地实现相干斑平滑以及边缘信息保持,其有效性与优良性得到验证。但同时需要指出,提出的算法仅针对 3 景真实 SAR 影像进行实验,缺少仿真数据实验以及更多场景的真实 SAR 影像滤波实验,后续将在上述方面继续开展工作。

#### 参考文献(References):

- [1] GUO Huadong, WU Wenjin, ZHANG Ke, *et al.* New SAR for earth observation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 862-872. [郭华东, 吴文瑾, 张珂, 等. 新型 SAR 对地环境观测[J]. *测绘学报*, 2022, 51(6): 862-872.]
- [2] WAN Ling, YOU Hongjian, CHENG Yuebing, *et al.* Research progress of synthetic aperture radar image segmentation [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(1): 20-24. [万玲, 尤红建, 程跃兵, 等. 合成孔径雷达图像分割研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(1): 10-24.]
- [3] JIN Yaqiu. Microwave remote sensing and its development in China[J]. *Journal of Microwaves*, 2020, 36(1): 1-6. [金亚秋. 微波遥感及其在中国的发展[J]. *微波学报*, 2020, 36(1): 1-6.]
- [4] GUO Fengcheng, ZHANG Guo, ZHANG Qingjun, *et al.* Fusion despeckling based on surface variation anisotropic diffusion filter and ratio image filter [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(4): 2398-2411.
- [5] LEE J S, WEN J, AINSWORTH T L. Improved Sigma filter for speckle filtering of SAR imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 202-213.
- [6] KIM K I, BAHNG S I, CHOE R N. Despeckling method of ultrasound images using closed-form shrinkage function based on cauchy distribution in wavelet domain [J]. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 2020, 18(4): 2050026. DOI: 10.1142/S0219691320500265
- [7] GUO F C, ZHUO C C, LIU W S, *et al.* Pixel difference function and local entropy-based speckle reducing anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5229516. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3182886
- [8] MA X S, WANG C, YIN Z X, *et al.* SAR image despeckling by noisy reference-based deep learning method [J]. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(12): 8807-8818.
- [9] ZHANG G, GUO F C, ZHANG Q J, *et al.* Speckle reduction by directional coherent anisotropic diffusion [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2768. DOI: 10.3390/rs11232768
- [10] LI Chunsheng, YU Ze, CHEN Jie. Overview of high-resolution spaceborne SAR imaging and image quality improvement methods [J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 717-731. [李春升, 于泽, 陈杰. 高分辨率星载 SAR 成像与图像质量提升方法综述[J]. *雷达学报*, 2019, 8(6): 717-731.]
- [11] DELEDALLE C A, DENIS L, TUPIN F. Iterative weighted maximum likelihood denoising with probabilistic patch-based weights [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(12): 2661-2672.
- [12] PERONA P, MALIK J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1990, 12(7): 629-639.
- [13] YU Y J, ACTON S T. Speckle reducing anisotropic diffusion [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(11): 1260-1270.
- [14] AJA-FERNANDEZ S, ALBEROLA-LOPEZ C. On the estimation of the coefficient of variation for anisotropic diffusion speckle filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(9): 2694-2701.
- [15] RIYA, GUPTA B, LAMBA S S. An efficient anisotropic diffusion model for image denoising with edge preservation [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2021, 93(4): 106-119.
- [16] GOMEZ L, OSPINA R, FRERY A C. Unassisted quantitative evaluation of despeckling filters [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 389. DOI: 10.3390/rs9040

## Speckle Anisotropic Diffusion Suppression by Multidirectional Sobel

ZHANG Jing<sup>1</sup>, GUO Fengcheng<sup>1</sup>, ZUO Zedan<sup>2</sup>, DING Pengchen<sup>1</sup>,  
CHEN Siguo<sup>1</sup>, SUN Chuang<sup>1</sup>, LIU Wensong<sup>1</sup>

(1.School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2.Suzhou Planning and Design Research Institute Co., Ltd. Xuzhou Branch, Xuzhou 221112, China)

**Abstract:** Speckle is an inherent property of SAR image, but its existence seriously interferes with the quality of SAR image and affects the high-quality application based on SAR image, so it is urgent to suppress it. The accuracy of the edge detection model of the traditional AD (Anisotropic Diffusion) filter still has room for improvement, and the noise suppression effect is often limited by the problem that it is difficult to accurately estimate the diffusion threshold. To solve the above problems, a novel AD filter based on Multidirectional Sobel (MSAD) is proposed. MSAD filter is an improved algorithm of SRAD. It builds a new edge detection model based on Multidirectional Sobel templates. Based on this, a new AD diffusion coefficient is established by integrating Gaussian kernel function, which can effectively solve the limitation of traditional AD diffusion coefficient by parameter estimation and improve the accuracy of speckle anisotropy suppression. Three real SAR images are selected for filtering experiments. In experiments, SRAD, DPAD, EnLee, and PPB filters are selected as the comparison algorithms; ENL, SSI, ESI, and M-Index are selected to evaluate the performance of proposed algorithms. Experiments show that MSAD filter can effectively improve the edge detection ability and obtain better speckle suppression effect.

**Key words:** Speckle; Noise suppression; Anisotropic diffusion; Edge detection; Multidirectional sobel