

基于各向异性扩散的 SAR 图像斑点噪声滤波算法

张良培, 王 毅, 李平湘

(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079)

摘 要: 在 SAR(Synthetic Aperture Radar) 图像噪声抑制处理中, 为了有效地保持图像边缘, 作者在斑点噪声去除的各向异性扩散模型(SRAD 模型) 的基础上, 提出了一个基于各向异性扩散的 SAR 图像斑点噪声滤波算法. 该算法对应的扩散系数从理论上满足 Charbonnier 等人提出的构造扩散系数准则, 同时该算法能够通过边缘直方图上累计百分比和相对信噪比阈值进行调节来得到一系列不同的滤波效果, 从而满足不同的应用需求, 如绘图、高分辨率或细节丰富的处理结果. 实验结果表明, 与传统的方法相比, 该算法不论从噪声去除能力、边缘和纹理保持能力上, 还是从视觉评价效果来看, 都具有一定的优越性.

关键词: 各向异性扩散; 斑点噪声去除; SAR 图像; 扩散系数; 滤波

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)12-2250-05

The Filtering Algorithm for SAR Image Speckle Noise Based on Anisotropic Diffusion

ZHANG Liang-pei, WANG Yi, LI Ping-xiang

(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: In order to effectively preserve SAR image edges while filtering, the authors propose an anisotropic diffusion filtering algorithm for speckle noise based on speckle reduction anisotropic diffusion (SRAD) model. On one hand, it can be proved that the diffusion coefficient in the proposed algorithm theoretically satisfies the conditions for the design of diffusion coefficients presented by Charbonnier, et al; on the other hand, the proposed algorithm can achieve a series of different filtered results, through the simple adjustment of two parameters. One parameter is a threshold of the accumulative histogram in the edge image, and the other one is a threshold of the relative signal to noise ratio. And the algorithm is applicable in different applications, including mapping and applications in which fine details and high resolution are required. The experimental results show that the proposed algorithm has capabilities of efficiently filtering speckle noise and preserving edge and texture features. Moreover, it outperforms the four traditional filtering methods in speckle smoothing, edge and texture preservation and visual assessment.

Key words: anisotropic diffusion; speckle noise reduction; SAR(Synthetic Aperture Radar) image; diffusion coefficient; filtering algorithm

1 引言

合成孔径雷达(SAR)图像被广泛应用于生态、水文、海洋监测和地形测绘等诸多方面. 然而 SAR 图像由于斑点噪声的存在而严重影响了解译和定量化研究. 因此, 在过去的 20 年中, 斑点噪声抑制方法得到了深入研究, 涌现了许多较为成熟的算法. 这些算法主要分两类: (1) 由 Lee、Frost、Kuan 和 Lopes 等人提出的基于局域统计特性的空域滤波^[1~4], 这类滤波器利用了局部统计参数, 能够有效地滤除斑点噪声并保留边缘; (2) 基于多分辨率分析的去斑算法, 其代表是具有多尺度分析能力的小波方法, 它通过多尺度分解在去除噪声的同时可以较好地保留图像的纹理特性.

近年来, 各向异性扩散技术被广泛地应用于图像处理领

域. 其最大特点是能够有效地实现图像保边缘平滑. Yu 和 Acton 等人证明, 基于局域统计特性的自适应滤波器可以转化成线性扩散模型, 于是他们将局部统计特性引入扩散系数中, 提出了 SRAD(Speckle Reducing Anisotropic Diffusion) 模型^[5]. 然而该模型仍然存在以下问题: (1) 需要人为设定迭代次数, 而且迭代过程中没有经过预平滑处理, 方程难以得到最优解; (2) 模型的扩散系数没有严格满足 Charbonnier 提出的构造扩散系数准则^[6]; (3) 由于没有对扩散系数的参数进行必要的控制, SRAD 模型可能模糊高频边缘.

本文在 SRAD 模型的基础上, 提出了一个基于各向异性扩散的斑点噪声滤波算法. 通过利用相对信噪比(Relative Signal Noise Ratio)和中值滤波技术改进 SRAD 模型, 使得方程获得最优解; 同时建立了满足构造准则的扩散系数, 并利用直方

图对系数进行了合理的控制,使得模型能够获得满足不同应用的边缘保持效果。

2 各向异性扩散理论

2.1 PM 各向异性扩散模型

Perona 和 Malik 利用非线性思想,提出了各向异性扩散模型(PM 模型)^[7]:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}[c(\nabla I) \cdot \nabla I] \quad (1)$$

式中 I 是处理图像, $c(\cdot)$ 是扩散系数. 为了控制模型各向异性扩散行为, Perona 和 Malik 提出了下面两个扩散系数:

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

$$c(x) = \exp[-(x/k)^2] \quad (3)$$

式中 k 是梯度阈值. 各向异性扩散最大特点在于能够实现图像保边缘平滑. 传统的各向异性扩散模型虽然适合滤除加性噪声(如高斯噪声),但对斑点噪声的滤波效果不理想,容易将噪声当作边缘保留下来。

2.2 SRAD 模型

传统的自适应空域滤波(如 Lee 滤波和 Frost 滤波)都是基于局域方差系数的,且它们能够有效地滤除斑点噪声. Yu 和 Acton 改进了局域方差系数,提出了 SRAD 模型,其对应的扩散系数为:

$$c(q) = \frac{1}{1 + [q^2(i, j; t) - q_0^2(t)] / [q_0^2(t)(1 + q_0^2(t))]} \quad (4)$$

其中 q 定义为:

$$q^2(i, j; t) = \frac{(1/2)(\nabla I/I)^2 - (1/16)(\nabla^2 I/I)^2}{[1 + (1/4)(\nabla^2 I/I)^2]} \quad (5)$$

式中 $q_0(t)$ 是尺度函数, $q_0(t) = \sqrt{\text{var}[z(t)]/z(t)}$, 为图像平坦区域的局域方差, $\text{var}[z(t)]$ 和 $z(t)$ 分别表示平坦区域 t 时刻的方差和均值. 式(4)的意义在于:当 $q \rightarrow q_0$ 时,表示图像均匀平坦的区域, $c(q) \rightarrow 1$, 此时 SRAD 表现为各向同性平滑滤波器;当 $q \gg q_0$ 时,表示图像的细节边缘区域, $c(q) \rightarrow 0$, SRAD 表现为保持细节. 然而 SRAD 仍有不足:(1)模型需要进行多次实验,才能确定最优结果,从而降低了执行效率;(2) $q(x, y; t)$ 是作为边缘检测算子来识别图像边缘的^[5],但由于 SAR 图像往往受到斑点噪声的影响,且迭代过程中,SRAD 模型并没有对噪声进行必要的抑制,因此难以检测出真实边缘;(3)SRAD 在平滑的过程中对 $q(x, y; t)$ 没有设定相关的控制,因此容易弱化边缘和降低对比度;(4)扩散系数(4)没有严格满足 Charbonnier 提出的构造扩散系数准则。

3 基于各向异性扩散的斑点噪声滤波算法

3.1 滤波算法

3.1.1 改进的扩散系数

针对 PM 模型中各向异性扩散方程解的不适定性问题, Catté^[8] 等人提出了在模型中加入高斯预平滑来获得方程最优解的正则化方法. 然而高斯滤波对斑点噪声效果不理想,且容易造成边缘模糊和易位,因此采用中值滤波来滤除斑点噪声。

本文首先提出一个新的扩散系数:

$$c(q) = 1 / \sqrt{1 + ((q - q_0)/q_0)^2} \quad (6)$$

假设 η 和 ξ 分别对应像素的边缘方向和与边缘垂直的方向,则在 $\eta - \xi$ 坐标系下,基于式(6)的改进模型可以转化成

$$\frac{\partial I}{\partial t} = c_\eta I_{\eta\eta} + c_\xi I_{\xi\xi} = c(q) \left\{ \left[1 + \frac{q'_c(q)}{c(q)} \right] I_{\eta\eta} + I_{\xi\xi} \right\} \quad (7)$$

经验证,式(6)完全满足 Charbonnier 等人提出的构造扩散系数准则,作者简要证明如下:

(1)在图像上均匀平坦区域(q 很接近 q_0),由(6)得 $\lim_{q \rightarrow q_0} c_\xi = \lim_{q \rightarrow q_0} c_\eta = 1$. 这表明在均匀区域,扩散系数式(6)在 η 和 ξ 方向上的扩散速度相同,有助于提高扩散效率。

(2)在图像的边缘附近(q 值较大),由式(6)得 $\lim_{q \rightarrow \infty} c_\eta = \lim_{q \rightarrow \infty} c_\xi = 0$, 及 $\lim_{q \rightarrow \infty} (c_\eta / c_\xi) = 0$. 这表明在边缘附近,扩散系数式(6)在两个方向上都不做平滑,且扩散系数在沿 η 方向减小的速度要大于沿 ξ 方向减小的速度,这在一定程度上满足准则,即在沿 η 方向上的扩散作用要小于 ξ 方向上的扩散. 同时, $c_\eta < 0$ 可以保证 η 方向上的逆平滑,从而增强图像细节信息。

(3) $c(q)$ 在 $[q_0, +\infty)$ 上是连续和单调递减的,这能够保证扩散的连续稳定性. 同时 $(c(q))' < 0$ 保证 $c(q)$ 不是非凸函数,避免了引入理论上不合理的解。

3.1.2 选择性平滑的直方图阈值

在 SRAD 模型中,由于 $q(i, j, t)$ 是用来检测图像边缘,因此对扩散模型有着非常重要的影响. 在边缘检测时, SAR 图像通常由于斑点噪声的影响而产生假边缘,为了消除噪声干扰,本文考虑对 $q(i, j, t)$ 产生的边缘图进行直方图阈值化处理,目的是有效地控制扩散模型的边缘保持能力. 假设 α 表示边缘图上对应直方图的累计直方图, thr 表示直方图上 α 处对应的灰度值. 根据式(4),按照经验值或手工设定确定 thr , 使其满足:当 $q(i, j, t) > \text{thr}$ 时,模型仅在 ξ 方向上进行平滑,即 $c_\eta = 0$, $c_\xi = c(q)$,从而保持高频边缘不被破坏;当 $q(i, j, t) \leq \text{thr}$ 时,模型在 η 和 ξ 方向上进行平滑,从而在一定程度上消除噪声干扰. 经过阈值化处理后,图像边缘处噪声得以抑制,同时对对比度提高。

SRAD 模型由于平滑的过程中没有设定类似的相关控制,图像边缘处噪声难以抑制,从而造成边缘弱化和对比度降低;本文算法能够通过设定不同的 thr 来获得满足不同应用目的(如绘图、高分辨率或细节丰富的图像)的滤波结果,其意义在于:因为雷达图像上的地物的强度信息各不同,因此边缘的强弱也各不同,根据经验采用 thr 进行控制,能够获得包含某种或某些地物的边缘图像,从而满足不同的应用需求。

3.1.3 迭代终止准则

一个好的迭代终止准则对于该滤波算法在最短时间内找到理想的解非常重要. 然而在 SRAD 模型中,迭代次数的最优取值是通过取不同值进行比较决定的. 为了更好地控制扩散行为,本文采用相对信噪比,其定义如下^[9]:

$$R_SNR^{(k+1)} = 10 \cdot \log \frac{\sum_{\text{pixels}} (I^{(k+1)})^2}{\sum_{\text{pixels}} (I^{(k+1)} - I^{(k)})^2} \quad (8)$$

式中 $I^{(k)}$ 和 $I^{(k+1)}$ 分别是图像经过第 k 次和第 $k+1$ 次迭代滤

波后的结果. 于是当迭代中止准则

$$\frac{|R_SNR^{(k+1)} - R_SNR^{(k)}|}{R_SNR^{(k)}} \leq \varepsilon \quad (9)$$

满足时, 迭代过程中止. 式中 ε 是预定义好的门限值. 本文采用相对信噪比主要有以下几方面的考虑: (1) 信噪比分析可以看作关于迭代次数的函数最优化问题^[10], 即通过函数曲线确定合适的迭代次数来获得最大信噪比; (2) 由于信噪比需要真实数据作参考, 而雷达图像不可避免地受到噪声的干扰而没有原始参考图像, 因此本文采用相对信噪比作为迭代终止准则; (3) 由式(8)、(9)可以看到, 由于相对信噪比能够衡量迭代前后的图像变化, 因此可以将其变化与 ε 作比较进行分析, 从而避免重要的信息和纹理丢失. ε 对迭代结果影响很大, 处理普通图像时通常选为 0.01, 但是 SAR 图像中包含丰富的纹理信息, 如果阈值设定 ε 过小, 往往难以得到理想的结果, 因此本文实验设定 $\varepsilon \geq 0.01$.

将上述的算法融入各向异性扩散模型中, 就得到本文的滤波算法. 经过上面的讨论, 可以看出本文提出的算法能够较好地利用 SRAD 模型的优势并有效地滤除斑点噪声, 同时能够选择性保留图像边缘, 从而获得各种应用要求的保边缘平滑效果. 由上文可知, 累计直方图 α 和迭代中止阈值 ε 对模型的扩散行为有着重要的影响: α 越大, 图像上需要保留的边缘越少, 算法的去噪能力越强, 而边缘保持能力越弱; ε 越大, 迭代次数越少, 算法的边缘保持能力越强, 而去噪能力越弱. 因此, 可以考虑对 α 和 ε 进行设置, 来获得不同要求的滤波效果. 虽然 α 和 ε 的设置也有一定的困难, 但它们对滤波结果的影响具有一定的规律性, 这有助于选择合理的参数组合, 从而满足不同的应用要求.

3.2 滤波离散化算法

将时空连续域上的图像 $I(x, y, t)$ 离散化为 $I(ih, jh, nT)$, (i, j) 为坐标点, n 为迭代次数. 迭代公式为

$$\frac{I_{i,j}^{(n+1)} - I_{i,j}^{(n)}}{\Delta t} = c_{\eta}(i, j; n) I_{\eta\eta}(i, j; n) + c_{\xi}(i, j; n) I_{\xi\xi}(i, j; n) \quad (10)$$

并设定边界条件: $d_{-1}^{(n)} = d_{0,j}^{(n)}$, $d_{M,j}^{(n)} = d_{M-1,j}^{(n)}$, $d_{i,-1}^{(n)} = d_{i,0}^{(n)}$,

$d_{i,N}^{(n)} = d_{i,N-1}^{(n)}$ 其中, 扩散系数计算如下:

$$\begin{cases} c_{\eta}(i, j; n) = (q \cdot c(q))' \big|_{i,j;n} \\ = \frac{2 \cdot q_0^2(i, j; n) - q(i, j; n) \cdot q_0(i, j; n)}{q_0^2(i, j; n) + (q(i, j; n) - q_0(i, j; n))^2} \cdot c(q(i, j; n)) \\ c_{\xi}(i, j; n) = c(q(i, j; n)) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $c(q(i, j; n))$ 可以按照文献[5]中的离散方法并结合本文提出的扩散系数(6)进行计算. 二阶导数则参照文献[11]的方法进行计算.

4 实验与分析

4.1 实验

实验采用的是意大利首都罗马北部台伯河流域农作物分布的 SAR 图像, 如图 1(a) 所示. 下面将本文算法同传统滤波方法进行比较.

4.2 实验结果分析

图 1 显示了各种滤波的处理结果. Lee 滤波较好地保留了边缘, 但边缘处的噪声仍然较明显; Frost 和 Gamma 滤波很好地消除了斑点噪声, 但图像边缘变得模糊; SRAD 模型的保边缘滤波效果比较理想, 但高频边缘容易模糊; 本文算法较好地消除了斑点噪声, 由于边缘加入了阈值控制, 所以其边缘保持能力更强.

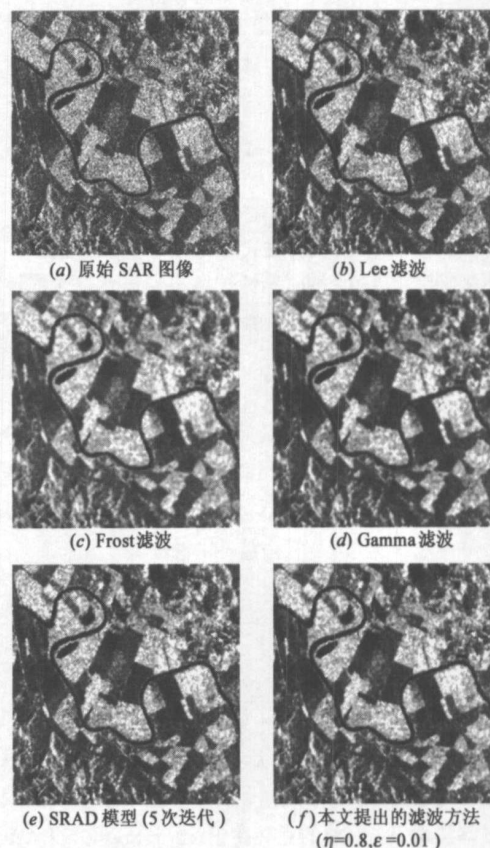


图 1 各种斑点噪声滤波方法处理结果

(1) 去噪能力

实验中选取图像上的湖水一带的均匀区域作为样本(192 个像素). 从计算的结果上看, 本文算法对应的 ENL 值除第一组参数和 Frost 滤波相当外, 都要好于传统滤波和 SRAD 模型.

(2) 边缘保持能力

从图像上选取 49×49 带有明显边缘的区域进行检验, 本文采用边缘保持指数 EPI 来衡量边缘保持能力^[12]. 边缘保持指数越高, 滤波器的边缘保持能力越强. 由表 1 得: (1) Lee 滤波的边缘保持能力虽然最好, 但由 ENL 的结果推断, 有一部分噪声作为边缘保留下来, 从而影响了边缘保持指数; (2) 当 ε 值较小时(如 $\varepsilon = 0.01$), 本文算法能够在消除斑点噪声同时更好地保持图像的细节边缘(EPI 值是除 Lee 滤波外最高的).

(3) 纹理保持能力

表 2 中, 滤波图像直方图的偏度和峰度都比原始图像大. 而当 ε 较大时(如表中 $\varepsilon = 0.02$), 本文算法能够较好地保持纹理信息, 同时四组参数的结果能够覆盖很大范围, 如方差 1208.18~1543.35, 而熵值较好地论证了以上结论.

表 1 本文算法和传统滤波方法 ENL 和 EPI 结果比较

	均值 (Mean)	标准方差 (Std.)	有效视数 (ENL)	边缘保持能力(EPI)
原始 SAR 图像	30.05	14.19	2.12	1.0000
Lee 滤波	30.78	9.21	3.34	0.6328
Frost 滤波	31.81	4.88	6.52	0.3411
Gamma 滤波	32.43	5.90	5.50	0.3386
SRAD	30.52	6.43	4.75	0.4370
本文算法				
($\alpha=0.8$ $\varepsilon=0.02$)	30.55	4.73	6.46	0.3879
($\alpha=0.8$ $\varepsilon=0.01$)	30.74	3.72	8.26	0.4742
($\alpha=0.99$ $\varepsilon=0.02$)	30.66	4.43	6.92	0.3636
($\alpha=0.99$ $\varepsilon=0.01$)	31.33	3.77	8.31	0.4541

表 2 本文算法和传统滤波算法纹理特征比较

	均值 (Mean)	方差 (Variance)	偏度 (Skewness)	峰度 (Kurtosis)	熵 (Entropy)
原始 SAR 图像	133.80	2778.39	0.21	-0.36	7.38
Lee 滤波	134.15	1668.02	0.36	-0.28	7.19
Frost 滤波	134.70	1158.67	0.57	-0.13	6.87
Gamma 滤波	134.84	1146.54	0.58	-0.12	6.86
SRAD	133.89	1404.06	0.47	-0.23	7.06
本文算法					
($\alpha=0.8$ $\varepsilon=0.02$)	133.05	1543.35	0.44	-0.20	7.13
($\alpha=0.8$ $\varepsilon=0.01$)	133.00	1339.64	0.48	-0.19	7.02
($\alpha=0.99$ $\varepsilon=0.02$)	134.25	1419.06	0.54	-0.14	7.06
($\alpha=0.99$ $\varepsilon=0.01$)	134.57	1208.18	0.57	-0.13	6.90

(4) 参数的影响

由图 2 知, 随着 α (thr) 的增大, 平滑区域变大, 需要保留的边缘更少, 因此 ENL 有一定的提高, EPI 的结果会下降; 随

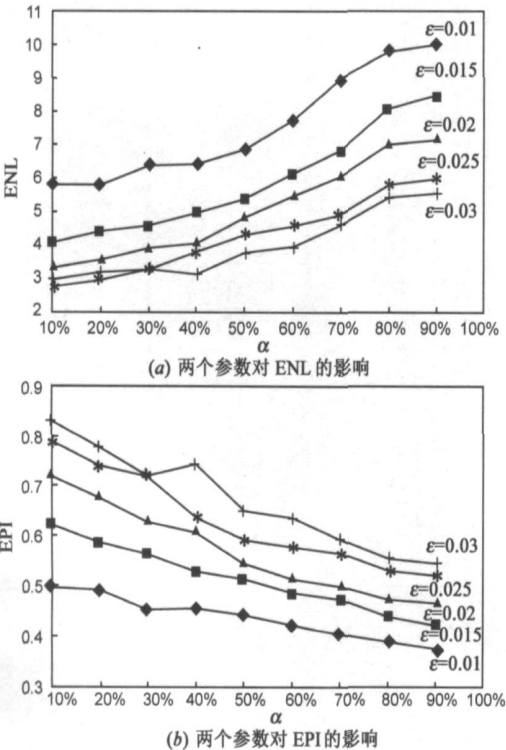


图 2 模型参数 α 和 ε 对 ENL 和 EPI 的影响

着 ε 的减小(α (thr) 固定), 算法的迭代次数增加, 图像变得更平滑, 因此 ENL 有较大的提高, 而 EPI 的结果会有较大的下降, 这和上面对模型参数的分析是一致的. 由于参数的设定不同, 实验结果有一定的规律性, 因此模型较好地满足了不同应用的要求.

由上文知, α 和 ε 不同的组合能够产生不同效果的扩散结果. 在实际处理中, 可以将边缘检测图和原始雷达图像进行比较, 按照特定的应用需求, 通过多次实验的比较确定 α 的大致范围. 而实验结果证明, 由于迭代次数对 ε 非常敏感, 因此细微的调整 ε 的值就能更有效地获得满意的处理结果.

5 结论

本文在 SRAD 模型的基础上, 提出了一个满足 Charbonnier 构造准则的扩散系数, 并对扩散系数中的参数进行了合理控制, 使得模型能够有选择性的保留边缘. 而利用相对信噪比作为迭代中止准则避免了迭代次数的设定, 使得本文算法具有较好的自适应性. 实验结果证明, 本文的算法在去噪能力、边缘保持和纹理保持能力上优于传统的基于统计特性的自适应滤波和 SRAD 模型. 作者下一步的研究目标是根据 SAR 图像的斑点噪声自适应得到参数的最优组合以及滤波结果对 SAR 图像分割和分类的影响.

参考文献:

[1] Lee J S, Digital enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, 2(2): 165- 168.

[2] Frost V S, Siles 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.

[3] 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.

[4] Lopes A, Nezry E, Touzi R, Laur H. Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images [A]. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 90)[C]. Maryland, USA: IEEE, 1990. 2409- 2412.

[5] Yu Y J, Acton S T. Speckle reduction anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(11): 1260- 1270.

[6] Charbonnier P, Blanc Feraud L, Aubert G, et al. Deterministic edge preserving regularization in computed imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(2): 298- 311.

[7] Perona P, Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629- 639.

[8] Caté F, Lions P L, Morel J, et al. Image selective smoothing

and edge detection by nonlinear diffusion[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1992, 29(1): 182– 193.

- [9] 吕忆松, 陈亚珠, 郭玉红. 基于各向异性散布的医学图像非线性滤波法[J]. 北京生物医学工程, 2003, 22(2): 81– 84.

Lü Yr Song, Chen Yr Zhu, Guo Yr Hong. A medical image nonlinear filtering based on anisotropic diffusion[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2003, 22(2): 81– 84. (in Chinese)

- [10] Ke Chen. Adaptive smoothing via contextual and local discontinuities[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1552– 1567.

- [11] You Y L, Xu W Y, Tannenbaum A, et al. Behavioral analysis of anisotropic diffusion in image processing[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(11): 1539– 1553.

- [12] 韩春明, 郭华东, 王长林, 范典. 一种改进的 SAR 图像斑点噪声滤波方法[J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 121– 127.

Han Chur Ming, Guo Hua Dong, Wang Chang Lin, Fan Dian. An enhanced SAR image speckle filter[J]. Journal of Remote

Sensing, 2004, 8(2): 121– 127. (in Chinese)

作者简介:



张良培 男, 1962 年生, 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室教授, 博士生导师, 主要研究方向为: 高光谱遥感、遥感应用理论与方法、遥感影像处理等.

E-mail: zlp62@public.wh. hb. cn



王 毅 男, 1979 年生, 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室摄影测量与遥感专业博士研究生, 主要研究方向为: 遥感图像处理、模式识别和高光谱遥感.

E-mail: wangyi@whu. edu. cn