

文章编号: 1001-9014(2010)05-0392-05

# 基于变分的 SAR 图像目标特征增强方法

黄石生, 朱炬波, 谢美华

(国防科技大学 理学院数学与系统科学系, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 研究了 SAR 图像目标特征增强的变分方法. 通过分析 P-M 扩散方程中的扩散系数, 得出梯度 (Canny) 边缘检测算子对 SAR 图像的非恒虚警性使得滤波后图像的边缘变得模糊. 而 ROA 算子能有效地检测出图像中的边缘, 但较难检测出图像中的强散射点目标. 基于 SAR 幅度图像中相干斑噪声的 Rayleigh 分布, 从最大后验概率估计出发, 结合 ROA 边缘检测图像以及 SAR 幅度信息来构造扩散系数, 建立 SAR 图像目标特征增强的变分模型. 实测 SAR 图像处理结果显示该方法在充分抑制均匀区域的相干斑噪声的同时能较好地保护并增强图像的边缘和强散射区域.

**关键词:** SAR 图像; 特征增强; 扩散方程; 边缘检测

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A

## FEATURE ENHANCEMENT FOR SAR IMAGE BASED ON VARIATION APPROACH

HUANG Shi-Sheng, ZHU Ju-Bo, XIE Mei-Hua

(Department of Mathematics and Systems Science, National University of Defense Technology, Changsha 4100731, China)

**Abstract:** A variation approach for SAR image feature enhancement is proposed. By analyzing the diffusion coefficient of P-M diffusion, it was found that it is the non-CFAR character of Canny detector that blurs the edges in the filtered SAR image. Further more, the ROA detector can detect edges in the image, but it lacks the ability of detecting the strong scatters. Based on the Rayleigh distribution of speckle in the amplitude image, the variation model for feature enhancement was established by combining the ROA detected version and the amplitude of SAR image from the MAP estimator. Experiments on the real SAR image demonstrated that the proposed method can suppress speckle efficiently in the homogeneous areas and preserve or even enhance edges and strong targets in the image.

**Key words:** SAR image; feature enhancement; diffusion equation; edge detection

### 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种高分辨率微波成像雷达, 广泛应用于地形测绘、资源勘探以及海洋观测等领域<sup>[1]</sup>. SAR 的应用效能主要取决于获取图像的质量, 其相干成像的特性使所获取的图像受相干斑噪声的污染, 制约着其后续的目标识别、变化检测等应用.

相干斑噪声通常表现为乘性噪声, 使得常用的图像滤波方法不能直接用于 SAR 图像处理. 目前常用的相干斑抑制方法可分为三类. 一类是多视处理, 它以牺牲图像空间分辨率为代价来抑制相干斑噪声, 这在实际应用中是不可取的<sup>[2]</sup>. 二是基于局部

统计参数的滤波方法, 包括著名的 Lee 滤波<sup>[3]</sup>、Frost 滤波<sup>[4]</sup> 及其改进版本等. 三是多分辨分析的方法<sup>[5,6]</sup>, 这类方法基于 SAR 图像的小波系数的统计特性进行滤波. 通常一种好的相干斑抑制方法应该具有以下性质: 1) 均匀区域的相干斑噪声得到充分抑制; 2) 边缘和强散射点等特征信息得到有效保护; 3) 阴影区域受到较好保护.

Yu 等基于 Lee 滤波与 P-M 扩散方程的联系, 提出各向异性扩散相干斑抑制 (SRAD) 方法<sup>[7]</sup>. 但是 SRAD 方法在抑制 SAR 图像中的相干斑时, 会模糊图像的边缘和细节<sup>[8,9]</sup>. 本文指出其原因在于该方法采用梯度 (Canny) 算子来检测边缘进而构造扩散系数, 而梯度边缘检测算子对于 SAR 图像而言是非

收稿日期: 2009-04-30, 修回日期: 2010-03-11

Received date: 2009-04-30, revised date: 2010-03-11

基金项目: 国家自然科学基金 (60802079); 中国博士后科学基金 (20080441289, 20080440218)

作者简介: 黄石生 (1984-), 男, 江西萍乡人, 国防科技大学理学院博士生, 主要从事图像处理、压缩感知等方面的研究.

恒虚警的. 对于处于低灰度区域的边缘(如机场跑道、道路等交界处的边缘), 梯度算子并不能很好地检测出来, 使得滤波后的边缘变得模糊.

本文分析了基于 ROA 边缘检测算子构造扩散系数对滤波图像纹理信息的影响, 指出 ROA 算子虽然可以较好地保护图像中的边缘, 但是由于其不能检测出图像中的强散射点, 因此滤波后的图像中强散射区域变得模糊. 由于在 SAR 图像中, 一般幅度值大的像素对应着图像中的强散射区域, 本文结合 SAR 图像的幅度信息构造扩散系数, 进而保护图像中的强散射区域. 基于 SAR 幅度图像中的相干斑噪声服从 Rayleigh 分布, 从最大后验概率估计出发, 综合利用 ROA 边缘检测算子以及图像的幅度信息构造扩散系数, 建立 SAR 图像特征增强的变分模型. 利用 Sandia 实验室的一幅实测 SAR 图像进行实验, 并采用等效视数(Equivalent Number of Looks, ENL)和边缘保持指数(Edge Keeping Index, EKI)评价处理结果, 验证本文方法的有效性. 实验结果表明本文方法在充分抑制 SAR 图像均匀区域的相干斑噪声的同时, 能较好地保护和增强图像中的边缘和强散射区域.

## 1 P-M 扩散方程中扩散系数的构造

### 1.1 P-M 扩散方程

作为一种非线性扩散方程, P-M 扩散方程表述为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \operatorname{div}(c(|\nabla u|)\nabla u) \\ u(x, y, 0) = u_0(x, y) \end{cases}, \quad (1)$$

其中,  $c(|\nabla u|) = 1/(1 + |\nabla u|^2/k^2)$  为扩散系数,  $k > 0$  为边缘指数. 若  $|\nabla u| \gg k$ , 则  $c(|\nabla u|) \rightarrow 0$ , 式(1) 为一个全通滤波器; 若  $|\nabla u| = k$ , 则  $c(|\nabla u|) \rightarrow 1$ , 式(1) 对应 Gauss 低通滤波器. 对于含有加性噪声的图像, 平坦区域的  $|\nabla u|$  很小, P-M 扩散对其进行 Gauss 滤波; 边缘处的  $|\nabla u|$  很大, P-M 扩散对其进行全通滤波. 因此对于受加性噪声干扰的图像, P-M 扩散方程在抑制图像噪声的同时能较好地保护其中的边缘信息.

### 1.2 ROA 边缘检测算子

对于 SAR 图像, 其乘性相干斑噪声通常是非高斯分布, 此时梯度(Canny)算子并不是恒虚警(CFAR)边缘检测算子. 对于处于低灰度区域的边缘, 梯度算子并不能有效地检测出来. SRAD 方法采用梯度算子检测边缘, 进而构造扩散系数, 因此

SRAD 方法滤波后的图像边缘变得模糊. 为此我们改用 ROA 边缘检测算子构造扩散系数.

ROA 检测器是 SAR 图像边缘检测的一类重要方法<sup>[11]</sup>. ROA 检测器的大概步骤为: 在目标像素点两侧设置两个窗口, 计算两个窗口内像素均值  $\hat{R}_1$  和  $\hat{R}_2$  之比. 将检测算子定义为  $R = \min(\hat{R}_1/\hat{R}_2, \hat{R}_2/\hat{R}_1)$ , 当目标像素点的  $R$  值小于预设的门限时, 确定该点为边缘点. 为提高边缘定位精度, 本文采用 MSP-ROA 方法对图像中的边缘进行细化<sup>[12]</sup>.

图 1 为不同方法检测 SAR 图像边缘的结果, (a) 为图 2(a) 中一块区域; (b) 为对(a) 取对数变换后再利用 Canny 算子检测的结果; (c) 为直接利用 Canny 算子检测的结果; (d) 为 ROA 算子检测的结果. 从检测结果可以看出, Canny 边缘检测算子对 SAR 图像是非恒虚警的, 导致在图像亮的地方出现许多虚假边缘, 而有些本应为边缘的地方则检测不出来. ROA 算子能较好地检测出图像中的边缘.

### 1.3 两种扩散系数的比较

本节分析比较基于 Canny 算子及 ROA 算子检测边缘来构造扩散系数的效果. 由于 Canny 算子在 SAR 图像中不具有恒虚警的特性, 在高亮度区域检测边缘虚警率将高于低亮度区域, 如图 1(c) 所示. 若通过 Canny 算子检测边缘来构造扩散系数, 则会使滤波后的图像边缘变得模糊(尤其是低灰度值区域的边缘). ROA 检测器是恒虚警的, 但不能检测出图像中的强散射点, 因此通过 ROA 算子构造扩散系

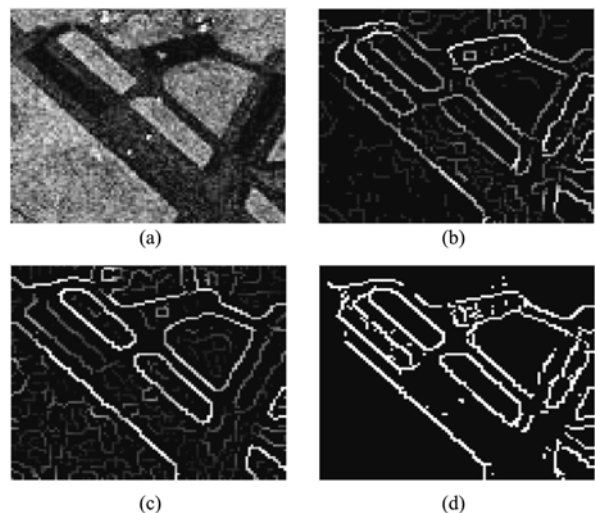


图 1 不同方法边缘检测结果 (a) 原始图像 (b) 对数变换 + Canny 算子 (c) Canny 算子 (d) ROA 算子  
Fig.1 Edge detection results of different methods (a) the original image (b) logarithm transform + Canny (c) Canny (d) ROA

数,则:1)ROA 能较好地检测出图像中的边缘,使得基于 ROA 构造的扩散系数能有效地保护图像中的边缘;2)ROA 较难检测出图像中的强散射点,导致扩散滤波后图像中的亮目标区域(强散射点、区域目标等)变得模糊.

综合上述分析,Canny 算子的非恒虚警性使得所构造的扩散系数模糊图像中低灰度区域的边缘;ROA 算子的恒虚警性使得所构造的扩散系数能较好地保护图像中的边缘,但会模糊亮目标区域.在 SAR 图像中,点目标和区域性目标是很重要的特征.注意到,SAR 图像中的幅度值对应于场景的后向散射系数,幅度值大的区域通常对应于目标区域<sup>[8,9]</sup>.为了保护滤波后图像的目标区域,本文结合 ROA 算子和 SAR 图像的幅度信息来构造扩散系数.

## 2 基于 ROA 边缘检测的变分模型

乘性相干斑噪声使得梯度边缘检测算子失效,解决的最简单的方法是对图像进行对数变换,将乘性噪声转化为加性噪声,然后对变换后的图像进行 P-M 扩散滤波,本文简记这种方法为 Log-PM 滤波方法.下面我们基于最大后验概率估计建立 SAR 图像相干斑抑制的变分模型.

### 2.1 MAP 估计

完全发育的斑点噪声的乘性模型可写为

$$A(x,y) = R(x,y) \times F(x,y), 1 \leq x \leq M \quad 1 \leq y \leq N, \quad (1)$$

其中  $(x,y)$  表示空间中方位向和距离向的坐标; $A(x,y)$  为观测到的被相干斑噪声污染的图像; $R(x,y)$  为目标真实的雷达散射特性,常称为目标的真实 RCS; $F(x,y)$  表示斑点噪声.对于 SAR 幅度图像,常假设相干斑噪声  $F(x,y)$  服从 Rayleigh 分布

$$p(s) = \frac{s}{\sigma^2} \exp(-\frac{s^2}{2\sigma^2}), s > 0, \quad (2)$$

由此可以推出条件分布<sup>[13]</sup>

$$p_{A|F}(a|f) = \frac{p_F(\frac{a}{f})}{f},$$

其中  $a,f$  分别表示  $A$  和  $F$  在密度函数中的变量, $p_F(\cdot)$  表示  $F$  的概率密度函数, $p_{A|F}(a|f)$  表示  $f$  已知时  $a$  的条件分布.假设  $R(x,y)$  满足 Gibbs 先验

$$p_R(r) = \frac{1}{Z} \exp(-\gamma\phi(r)),$$

其中  $Z$  为归一化参数, $\phi(r)$  为非负函数.由 Bayes 公式  $P(R|A) \propto P(A|R) \cdot P(R)$ ,可得 MAP 估计最小化下列函数

$$\int_{\Omega} (2\ln R + \frac{A^2}{(2R^2\sigma^2)}) dx dy + \gamma \int_{\Omega} \phi(R) dx dy, \quad (3)$$

其中  $\Omega$  为积分空间.令上式关于  $R$  的导数等于零

$$\frac{2}{R} - \frac{A^2}{R^3\sigma^2} + \gamma \cdot \phi'(R) = 0, \quad (4)$$

式(4)解即为  $R$  的 MAP 估计.

若取  $\phi'(R) = \text{div}(c(|\nabla R|) \nabla R)$ ,则式(4)可转化为抛物方程求解

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{2}{R} - \frac{A^2}{R^3\sigma^2} + \gamma \cdot \text{div}(c(|\nabla R|) \nabla R) \\ R(x,y,0) = A(x,y) \end{cases} \quad (5)$$

### 2.2 特征增强的变分模型

大场景 SAR 图像中含有丰富的目标信息,在 SAR 图像的质量评价中,最常用的指标分为基于点目标和基于面目标两种.我们增强 SAR 图像目标特征时也主要考虑对其中的点目标和边缘信息进行保护和增强,而对均匀区域的相干斑噪声进行抑制.为此,建立 SAR 图像增强的变分模型为

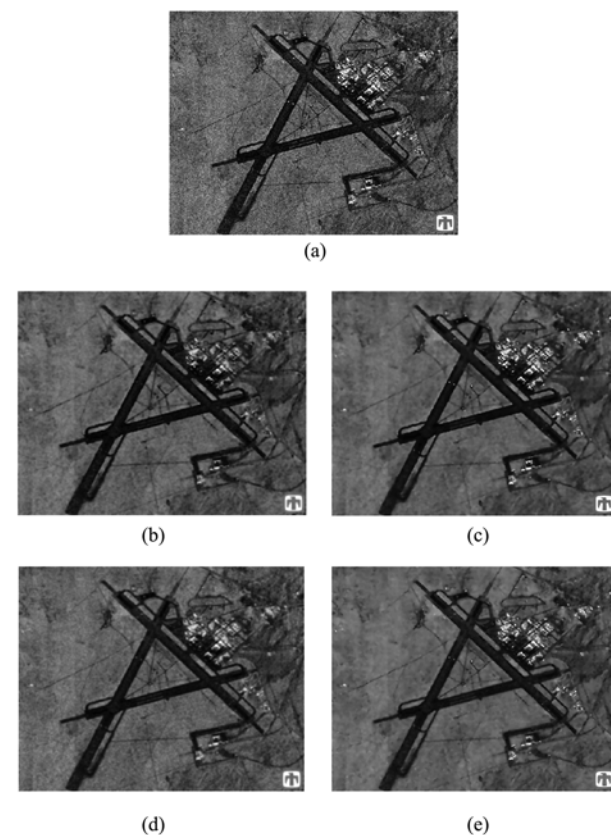


图2 实测图像处理结果 (a)原始图像 (b)Log-PM (c)PM (d)SRAD (e)ROA-PM  
Fig.2 Enhancing results of real image for different methods (a)the original image (b)logarithm transform based PM diffusion (c)PM diffusion (d)SRAD (e)ROA-PM diffusion

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{2}{R} - \frac{A^2}{R^3 \sigma^2} + \gamma \cdot \operatorname{div}(c(p, R) \nabla R) \\ R(x, y, 0) = A(x, y) \end{cases}, \quad (6)$$

其中  $p$  表示 ROA 边缘检测后的图像. 如果  $p$  中像素值明显非零, 则可认为其处于图像的边缘处. 函数  $c(p, R)$  意味着在构造扩散系数时综合考虑了图像的边缘信息和幅度信息. 本文  $c(p, R)$  选为

$$c(p, R) = \begin{cases} -0.1 & \text{如果 } R > \text{Thr} \\ \frac{1}{1 + \frac{p^2}{k^2}} & \text{其它} \end{cases}. \quad (7)$$

在构造  $c(p, R)$  时, Thr 表示阈值(即我们基于阈值来检测 SAR 图像中的强散射点目标). 式(7)可解释为: 如果当前像素点位于边缘处, 则  $p \neq 0$ , 从而  $c(p, R)$  能较好地保护图像中的边缘; 如果当前像素点位于非边缘处, 则  $p = 0$ , 从而  $c(p, R) = 1$ , 模型(6)将在该像素点处进行 Gauss 平滑滤波; 如果当前像素点满足  $R > \text{Thr}$ , 则认为该像素点为强散射目标, 扩散方程将对其进行局部的逆扩散滤波, 实现强散射目标的增强处理. 虽然逆扩散滤波不存在稳定解, 但是 Gilboa 等证明了, 当扩散系数只在局部范围内取负值时, 可以保证方程解的稳定性<sup>[14]</sup>. 阈值 Thr 的选取旨在突出图像中的强散射点, 基于最强散射点对应于图像中的最大灰度值, 取  $\text{Thr} = \max \text{value} / d$ , 其中  $\max \text{value}$  表示图像中的最大灰度值, 而  $d$  是用户调节参数, 反应图像中强散射点的多少, 本文取  $d = 1.4$ . 对于边缘指数  $k$  的选取, 可以这样考虑: 在边缘检测后的图像中, 如果一个像素点处在边缘上, 则  $\frac{p^2}{k^2}$  大于 1, 否则, 其值将为 0, 因此边缘指数取为  $k = 1$  即可较明显的区分一个像素点是否为边缘.  $\gamma$  为一个正则化参数, 它控制着等式右边两项的折中, 其选取通常比较复杂, 为简单起见, 我们取  $\gamma = 1$ . 在实验中, 采用有限差分法进行求解, 迭代步长取为 0.1, 迭代步数选 5 ~ 10 即可得到较为满意的结果.

### 3 数值实验

选用 Sandia 实验室的实测 SAR 图像进行实验, 验证本文方法的有效性. 比较 Log-PM 扩散方程、PM 扩散方程、SRAD 及本文提出的 ROA-PM 扩散方程在 SAR 图像特征增强中的效果. 实验中选用等效视数和边缘保持指数来衡量处理结果. 等效视数主要用来评价均匀区域相干斑噪声的抑制效果, 其定义为<sup>[2]</sup>

$$\text{ENL} = \frac{\mu^2}{\delta^2}, \quad (8)$$

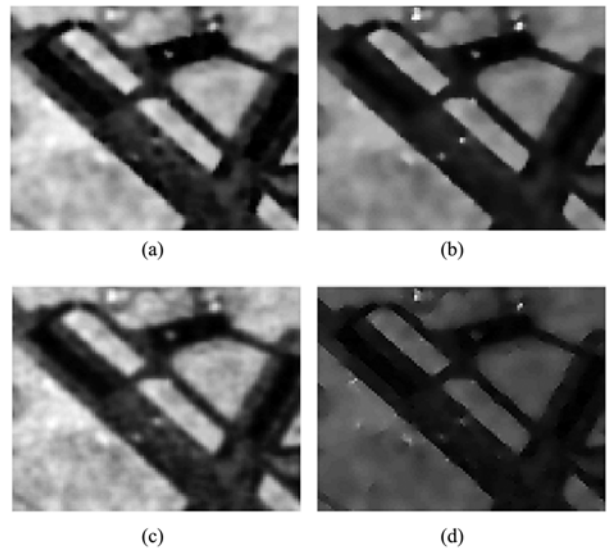


图3 图2中图像放大显示 (a) Log-PM (b) PM (c) SRAD (d) ROA-PM

Fig. 3 Zoom of partial area in Fig. 2 (a) logarithm transform based PM diffusion (b) PM diffusion (c) SRAD (d) ROA-PM diffusion

其中  $\mu$  为图像均匀区域的图像灰度值的均值,  $\delta$  为相应的标准偏差. 等效视数 ENL 越大时说明相干斑抑制越好, 反之相干斑抑制越差. 由于 SAR 图像中的边缘也是一种目标, 因此可用边缘保护指数来衡量对图像的边缘和目标的保护程度, 这种边缘保持指数为<sup>[8]</sup>

$$\text{EKI} = \frac{\sum_{i=1}^m G'(w_i)}{\sum_{i=1}^m G(w_i)}, \quad (9)$$

其中  $G(\omega_i)$  和  $G'(\omega_i)$  分别表示有边缘存在的同一窗口滤波前后灰度值梯度的最大值,  $m$  表示取样窗口数. EKI 的取值越大表明边缘保持越好, 反之则越差.

图2(a)为原始图像, 可以看出该图像存在较为严重的相干斑噪声; (b)为 Log-PM 扩散滤波结果, 即首先对图像取对数变换, 然后进行 P-M 扩散方程滤波, 最后对滤波后的结果取指数变换; (c)为对(a)图像直接进行 P-M 扩散方程滤波结果; (d)为 SRAD 方法处理结果; (e)为本文的 ROA-PM 扩散方程滤波结果. 为更清晰地比较各种方法的处理结果, 对图2中的各幅图像截取相同的一块放大显示在图3中, 图3中显示的是图1(a)中区域处理结果. 图4为图3中第32行像素灰度值曲线. 由图3及图4可知, 基于梯度算子构造的扩散系数, 其滤波后的图像中亮灰度值区域得到较好的保持, 但是图像中的边缘变得模糊, 而本文提出的 ROA-PM 滤波方法能在

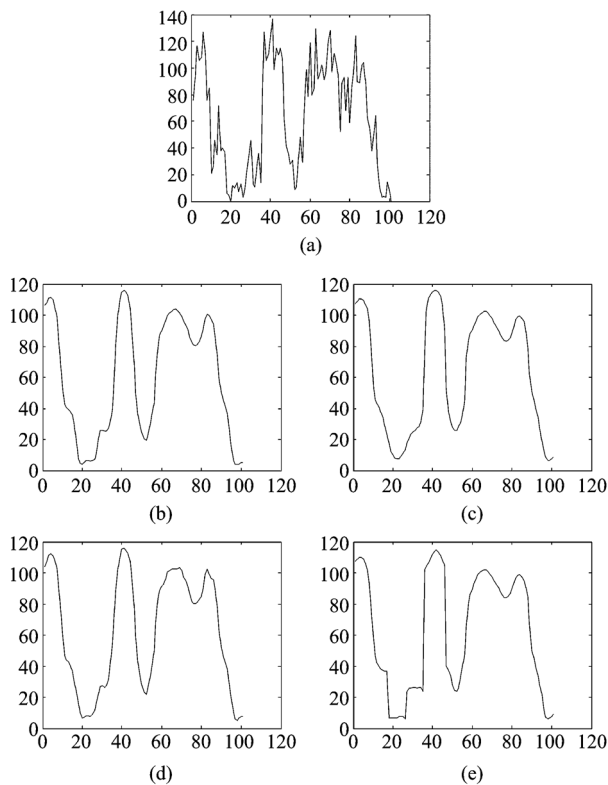


图4 图3中第32行像素灰度显示 (a)原始图像 (b)Log-PM (c)PM (d)SRAD (e)ROA-PM

Fig. 4 Display the 32th row of pixels in Fig. 3 (a) the original image (b) logarithm transform based PM diffusion (c) PM diffusion (d) SRAD (e) ROA-PM diffusion

图像中的平坦区域充分地抑制相干斑噪声,同时保护图像中的边缘,增强图像中的强散射点目标。

表1为不同方法处理后图像的ENL和EKI指标评价结果,从表中数据可知,基于P-M扩散方程的滤波方法去相干斑噪声的效果较好,但是这四种方法均不同程度地模糊了图像的边缘,比较而言,本文提出的ROA-PM扩散方程滤波方法在抑制相干斑噪声与保护图像边缘方面均具有优势。

#### 4 结论

本文提出了一种基于变分的SAR图像特征增强方法。分析了基于Canny和ROA边缘检测算子构造扩散系数对SAR图像中边缘和强散射区域的影响,提出了利用边缘和幅度信息的扩散系数构造方

法,并结合SAR幅度图像相干斑噪声的统计分布,建立SAR图像特征增强的非线性扩散方程滤波方法。实验结果表明本文方法具有以下三大优势:1)能充分地抑制图像均匀区域的相干斑噪声;2)保护图像中的边缘信息;3)保护和增强图像中的强散射区域。

#### REFERENCES

- [1] YUAN Xiao-Kang. *Introduce to the spaceborne synthetic aperture radar* [M]. Beijing: National defense industry press (袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京:国防工业出版社), 2005.
- [2] Ouliver C, Quegan S. *Understanding synthetic aperture radar images* [M]. Norwood, MA: Artech House, 1998.
- [3] Lee S J. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1980, **2** (2): 165—168.
- [4] Frost S V, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1982, **4** (2): 157—166.
- [5] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. SAR speckle reduction using wavelet denoising and markov random field modeling [J]. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 2002, **40** (10): 2196—2212.
- [6] Solbo S, Eltoft T. Homomorphic wavelet-based statistical despeckling of SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 2004, **42** (4): 711—721.
- [7] Yu Y, Acton S T. Speckle reduction anisotropic diffusion [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2002, **11** (11): 1260—1270.
- [8] XIE Mei-Hua, WANG Zheng-Ming. Nonlinear diffusion equation for image denoising based on SAR amplitude and gradient information [J]. *J. Astronautics* (谢美华, 王正明. 基于SAR图像幅度与梯度综合信息的非线性扩散去噪方法. *宇航学报*), 2006, **27** (2): 83—87.
- [9] XIE Mei-Hua, WANG Zheng-Ming. SAR image enhancement based on regularization variation model [J]. *J. Infrared Millim.* (谢美华, 王正明. 基于正则化变分模型的SAR图像增强方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **35** (6): 467—471.
- [10] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1990, **12** (7): 629—639.
- [11] Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 1988, **26** (6): 764—773.
- [12] Ganugapati S S, Moloney C R. A ratio edge detector for speckled images based on maximum strength edge pruning [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 1995 (2): 165—168.
- [13] Aubert G, Aujol J F. A variational approach to removing multiplicative noise [J]. *SIAM J. Appl. Math.*, 2008, **68** (4): 925—946.
- [14] Gilboa G, Sochen N, Zeevi Y Y. Forward and backward diffusion processes for adaptive image enhancement and denoising [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2002, **11** (7): 689—703.

表1 不同方法处理图像的指标评价

Table 1 Evaluation of the results of different methods

	Original	Log-PM	PM	SRAD	ROA-PM
ENL	18.13	80.91	98.64	82.76	106.96
EKI		0.40	0.49	0.32	0.57