

一种新的各向异性扩散 SAR 相干斑抑制算法

黄 倩^{1,2}, 王岩飞¹, 张冰尘¹, 苗 慧^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 该文提出了一种基于各向异性扩散偏微分方程以及鲁棒估计的合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 图像的相干斑噪声的算法. 该算法利用 SAR 图像局部特性和鲁棒估计, 建立了一种新的扩散系数, 对均匀区域进行各向同性扩散, 对边缘细节区域进行各向异性扩散, 不仅可以有效抑制 SAR 图像的相干斑噪声, 较好地保持边缘细节, 而且处理所得的图像结果有着良好的视觉效果.

关键词: 合成孔径雷达; 相干斑; 各向异性扩散

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 09-1553-05

A New Anisotropic Diffusion Method for SAR Speckle Reduction

HUANG Qian^{1,2}, WANG Yan-fei¹, ZHANG Bing-chen¹, MIAO Hui^{1,2}

(1. Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences Beijing 100039, China)

Abstract This paper proposes a new speckle reduction method based on anisotropic diffusion and robust statistics for SAR speckle reduction. With the local statistics values of SAR images and robust statistics, the method establishes a new diffusion coefficient which provides an isotropic diffusion in the heterogeneous area and isotropic diffusion in the homogeneous area.

Key words SAR; speckle; anisotropic diffusion

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 可以获得高分辨率的雷达图像, 但是由于它是一种全相干成像雷达系统, 其产生的图像必然受到相干斑 (Speckle) 噪声的污染, 使得 SAR 图像判读、解译和分类变得困难. 因此, 相干斑噪声的抑制是一个重要的研究课题.

目前, 相干斑噪声的抑制技术大致分为两大类, 即成像之前的多视处理技术和成像后的滤波技术. 多视处理以空间分辨率的降低为代价抑制相干斑噪声. 成像后的滤波技术可分为空间滤波和频域滤波两个分支: 其中, 频域滤波技术包括傅里叶变换、短时傅里叶变换和小波变换^[1,2]等; 空间滤波算法通常采用统计学方法利用局部统计信息对数据进行估计, 不同的估计准则如最小均方误差准则 (MMSE)、极大似然法 (ML) 和最大后验概率 (MAP) 等得到了广泛使用, 例如 Lee^[3], Kuan^[4] 和 Frost^[5] 等滤波器.

近年来, 非线性偏微分方程逐渐应用于边缘检测、图像去噪和纹理分析等领域. 利用各向异性的非线性偏微分

方程降相干斑, 是得到广泛关注的空间滤波算法. 其中 1990 年 Perona 和 Malik^[6] 提出的非线性各向异性扩散 (Anisotropic Diffusion) 方程是一种效果较好的图像平滑方法. Yong-jian Yu 在 SRAD 算法^[7] 中提到, 基于最小均方误差的相干斑滤波器 Lee 和 Frost 滤波器都可以表示为各向同性扩散 (Isotropic Diffusion) 的偏微分方程形式, 而且修改后可得到各向异性扩散方程. 这就把偏微分方程和自适应滤波器联系起来, 也更加引导我们从各向异性扩散偏微分方程中寻找有效的相干斑抑制方法.

针对常用的空间滤波器在实际应用中存在的一些问题, 即这些滤波器大多对边缘附近各个方向抑制平滑程度相同 (即各向同性), 以及这些滤波器的抑制相干斑效果与移动窗口大小密切联系等, 本文提出了一种新的抑制 SAR 图像相干斑噪声的各向异性扩散算法. 本算法基于 Perona 和 Malik 的模型以及鲁棒估计, 利用相干斑图像的局部统计特性, 建立了一种新的针对相干斑抑制的扩散系数表达式. 本文从理论上推导证明了新表达式的有效性, 并通过实验证明, 本算法不仅能够有效地抑制相干斑噪声, 保持

边缘细节,而且处理后的 SAR 图像也有良好的视觉效果.

2 各向异性扩散与鲁棒估计

2.1 各向异性扩散: PeronaM alk偏微分方程

边缘的增强和重建可以通过高通滤波或者沿尺度空间逆向扩散(解析度由粗糙变细致)而得到,但前者无降噪能力,后者在数学上是一个病态问题,很难求得数值解. Perona和 M alk通过选取合适的扩散系数,实现了在沿尺度空间前向扩散的同时增强边缘. Perona和 M alk 给出的偏微分方程为(简称 PM 方程):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} &= \text{div}[g(|\nabla I|) \cdot \nabla I(X, Y, t)] \\ I(x, y, t)|_{t=0} &= I(x, y, 0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $I(x, y, t)$ 是图像强度, ∇ 是梯度算子, $\nabla I(x, y, t) = \begin{pmatrix} \partial I / \partial x \\ \partial I / \partial y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix}$, div 是散度算子, $g(\bullet)$ 是扩散系数, 是一个有界非负递减函数. Perona和 M alk 建议的 $g(\bullet)$ 有以下两种形式:

$$\begin{aligned} g_1(|\nabla I|) &= 1/[1 + (|\nabla I|/K)^2] \text{ 以及 } g_2(|\nabla I|) \\ &= \exp[-(|\nabla I|/K)^2] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, K 是图像幅值参数.

简便起见,下面以 $g_1(|\nabla I|)$ 为基础进行研究. 当处理边界内部区域时, $|\nabla I| \ll K$, $g(|\nabla I|) \rightarrow 1$ 对图像平滑加大, 当 $g(|\nabla I|) = 1$ 时即高斯型各向同性扩散; 而当处理边界时, $|\nabla I| \gg K$, $g(|\nabla I|) \rightarrow 0$ 对图像平滑减弱, 当 $g(|\nabla I|) = 0$ 时(绝热扩散条件), 没有任何平滑.

另外, 与热传导方程相比, PM 方程在各个方向上的扩散速度是不同的, 并且沿着图像的棱边方向进行: 考虑图像中的一个像素点, 如果它与各个邻近像素点的梯度幅值 $|\nabla I|$ 不同, 则扩散系数 $g(|\nabla I|)$ 也不同. 因此, 也将 PM 方程称作各向异性扩散方程.

2.2 鲁棒估计

M. J Black^[8]从统计的角度, 阐明了 Perona和 M alk 的扩散方程与从噪声图像中对分段连续的图像进行鲁棒估计是等价的, 各向异性扩散方程中的扩散系数 $g(\bullet)$ 与鲁棒估计中的误差范数 $\rho(\bullet)$ 和 $\varphi(\bullet)$ 密切相关. Perona和 M alk 所提出的扩散方程的离散形式为:

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{1}{|\eta_s|} \sum_{p \in \eta_s} g(\nabla I_{sp}) \nabla I_{sp} \quad (3)$$

式中, I_s^t 是离散采样的图像, s 表示像素的二维位置, t 表示迭代次数; 常数 λ 控制扩散的速度, η_s 表示像素 s 的空间邻域, 并且 $|\eta_s|$ 表示邻域所含像素数目. Perona和 M alk 估计的图像梯度为:

$$\nabla I_{sp} = I_p - I_s, \quad p \in \eta_s$$

对含噪声的图像进行分段平滑估计, 用鲁棒统计方法^[8] 陈述即寻找满足以下最佳判决的图像:

$$m_j \min_{\sum_{p \in \eta_s} \rho(I_p - I_s, \sigma)} \quad (4)$$

式中, $\rho(\bullet)$ 是鲁棒误差范数, σ 是尺度参数. 上式可以通过梯度下降法求解:

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{1}{|\eta_s|} \sum_{p \in \eta_s} \varphi(I_p - I_s, \sigma) \quad (5)$$

式中, $\varphi(\bullet)$ 是 $\rho(\bullet)$ 的导数, $\varphi(\nabla I_{sp}) = \rho'(\nabla I_{sp}) = g(\nabla I_{sp}) \cdot \nabla I_{sp}$.

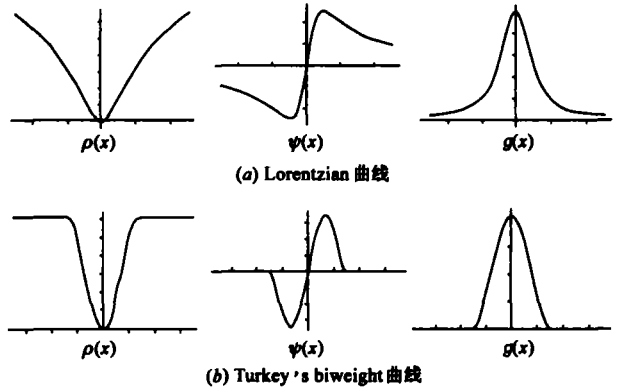


图 1 两种曲线的比较

M. J Black 比较了 Lorentzian Turkey's biweight 误差范数的 $\rho(\bullet)$ 、 $\varphi(\bullet)$ 和 $g(\bullet)$ 的曲线, 分别是, 如图 1(a) 和 (b) 所示. 其中, Lorentzian 对应的分别是

$$\begin{aligned} \rho(x, \sigma) &= \sigma^2 \cdot \text{bg}[1 + x^2 / (2 \cdot \sigma^2)] \\ \varphi(x, \sigma) &= x / [1 + x^2 / (2 \cdot \sigma^2)] \\ g(x, \sigma) &= 1 / [1 + x^2 / (1 \cdot \sigma^2)] \end{aligned} \quad (6)$$

假设 $2 \cdot \sigma^2 = K$, 则得到式 (2) 所示的 Perona 和 M alk 建议的 $g(\bullet)$.

M. J Black 选择的更鲁棒的 Tukey 曲线为:

$$\begin{aligned} \rho(x, \sigma) &= \begin{cases} x^2/\sigma^2 - x^4/\sigma^4 + x^6/3\sigma^6, & |x| \leq \sigma \\ 1/3, & |x| > \sigma \end{cases} \\ \varphi(x, \sigma) &= \begin{cases} x[1 - (x/\sigma)^2]^2, & |x| \leq \sigma \\ 0, & |x| > \sigma \end{cases} \\ g(x, \sigma) &= \begin{cases} 1/2 \cdot [1 - (x/\sigma)^2]^2, & |x| \leq \sigma \\ 0, & |x| > \sigma \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

通过比较可知, 对于给定的 σ , Tukey 曲线在边界上自动实现绝热扩散, 保证边缘不被模糊, 是更加鲁棒的范数.

然而, 将基于上述曲线的扩散方程直接用于 SAR 图像的相干斑抑制还存在一些问题, 因为以上算法不是针对带有相干斑抑制而设计的, 虽然其对于具有加性噪声的图像降噪效果明显, 但对于乘性的相干斑噪声图像有时并不奏效, 甚至会起到相反的作用. 因此, 必须寻找适合抑制相干斑噪声的算法.

3 各向异性扩散相干斑抑制算法

3.1 变差系数与图像均匀性

SAR 图像相干斑噪声的乘性模型为 $I(x, y) = X(x, y) \cdot u(x, y)$, 其中 $X(x, y)$ 表示图像实际纹理, $u(x, y)$ 表示相干斑噪声. 由于随机变量 X 和 u 是由相互独立的物理过程

决定的, 因此可将其视为相互独立. 假设 $E(X) = 1$ 和 $E(u) = 1$ 其中 $E(\bullet)$ 表示均值, $\text{Var}(\bullet)$ 表示方差, 则得到图像的变差系数 (Variation Coefficient)^[9]:

$$C_I = \frac{\sqrt{\text{Var}(I)}}{E(I)} = \sqrt{\sigma_X^2 \cdot \sigma_u^2 + \sigma_X^2 + \sigma_u^2} \quad (8)$$

由式(8)知, 具有相干斑噪声的图像的变差系数 C_I 由三项组成: 纹理方差 σ_X^2 , 相干斑方差 σ_u^2 以及两方差之积 $\sigma_X^2 \cdot \sigma_u^2$. 在均匀区域即 $\sigma_X^2 = 0$ 时, 图像的方差只由相干斑引起, 此时变差系数最小; 图像纹理越不均匀, σ_X^2 越大, 变差系数也越大. 因此, C_I 可以用于度量 SAR 图像局部的非均匀性.

常用的自适应相干斑滤波器, 如 Lee, Frost, Kuan 和 GMAP 滤波器等都是局部统计自适应的, 即它们都是局部统计值的函数, 而这个局部统计值经常选用的就是变差系数.

3.2 算法的提出

基于以上讨论, 本文新算法的扩散系数 $g(\bullet)$ 利用 Tukey 函数. 另外, 考虑到变差系数在衡量 SAR 图像局部非均匀性方面的优势, 本文采用实际图像纹理的局部变差系数的平方 C_X^2 代替 $g(\bullet)$ 中的 $|\nabla I|$ 而采用图像中均匀区域的变差系数平方的二倍 $2 \cdot C_u^2$ 代替 $g(\bullet)$ 中的 K .

因为 $C_I^2 = \frac{\text{Var}(I)}{[E(I)]^2} = \frac{E(I^2)}{[E(I)]^2} - 1$ 且 $C_u^2 = \frac{\text{Var}(u)}{[E(u)]^2} =$

$\frac{E(u^2)}{[E(u)]^2} - 1$, 故图像纹理的变差系数为

$$C_X^2 = \frac{\text{Var}(X)}{[E(X)]^2} = \frac{E(X^2)}{[E(X)]^2} - 1 = \frac{E(I^2) E(u^2)}{[E(I)]^2 [E(u)]^2} - 1 = \frac{C_I^2 - C_u^2}{1 + C_u^2} \quad (9)$$

因此, 得到以下偏微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} I(x, y, t) = \text{div}[g(C_I^2) \cdot \nabla I(x, y, t)] \quad (10)$$

$$g(C_I^2) = \begin{cases} I(x, y, t) |_{t=0} = I_0 \\ 1/2 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{C_I^2 - C_u^2}{2 \cdot C_u^2 (1 + C_u^2)} \right]^2 \right\}^2, \\ | (C_I^2 - C_u^2) / (1 + C_u^2) | \leq 2 \cdot C_u^2 \\ 0 \text{ 其它} \end{cases} \quad (11)$$

然而, 当图像受相干斑噪声严重污染时, 图像的信噪比较低, 则变差系数大幅度的振荡将导致大量虚假边缘点, 可能将噪声当作边缘而保存下来, 甚至增强. 因此, 需要对式(11)的新扩散系数进一步改进.

根据文献 [10], 本文采用高斯平滑核 $G_v(x, y) = C \cdot v^{-1/2} \cdot \exp(-(x^2 + y^2)/4v)$ 对原图像进行平滑滤波, 则 G_v^* 形成一个尺度空间, 是原图像在尺度 v 下的映像. 这样, 通过高斯低通滤波后, 再对图像进行局部统计特性估计, 可以大大降低噪声的影响. 下面将 $g(C_{G_v^*}^2)$ 代替式(10)中的 $g(C_I^2)$, 即得到本文的算法:

$$\frac{\partial}{\partial t} I(x, y, t) = \text{div}[g(C_{G_v^*}^2) \cdot \nabla I(x, y, t)] \quad (12)$$

$$g(C_{G_v^*}^2) = \begin{cases} 1/2 \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{C_{G_v^*}^2 - C_u^2}{2 \cdot C_u^2 (1 + C_u^2)} \right]^2 \right\}^2, \\ | (C_{G_v^*}^2 - C_u^2) / (1 + C_u^2) | \leq 2 \cdot C_u^2 \\ 0 \text{ 其它} \end{cases} \quad (13)$$

3.3 算法的特点

考虑式(13), 令 $q^2 = C_{G_v^*}^2$, $q_0^2 = C_u^2$, 则 $g(C_{G_v^*}^2) = g(q)$

$$= \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left[\frac{q^2 - q_0^2}{2 \cdot q_0^2 (1 + q_0^2)} \right]^2 \right\}^2, \text{ 式(12)变为:}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} I(x, y, t) = \text{div}[g(q) \cdot \nabla I(x, y, t)]$$

$$= g(q) \cdot \Delta I + g'(q) \nabla^2 I(\nabla I \cdot \nabla I) / |\nabla I| \quad (14)$$

上式中 $\nabla^2 I(\nabla I \cdot \nabla I) = I_{xx} \cdot I_x^2 + 2I_{xy} \cdot I_x \cdot I_y + I_{yy} \cdot I_y^2$.

设 η 是沿边缘的方向, ξ 是垂直于边缘的方向, 二者构成正交坐标系 (ξ, η) , 其中

$$\left. \begin{aligned} \xi &= (\cos(\theta), \sin(\theta)) = (-I_y, I_x) / |\nabla I| \\ \eta &= (\sin(\theta), -\cos(\theta)) = (I_x, I_y) / |\nabla I| = |\nabla I| / |\nabla I| \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由此我们可以得到

$$\left. \begin{aligned} I_\xi &= \nabla I \cdot \xi, I_{\xi\xi} = \nabla^2 I(\xi \cdot \xi) \\ &= (I_{xx} \cdot I_y^2 - 2I_{xy} \cdot I_x \cdot I_y + I_{yy} \cdot I_x^2) / |\nabla I|^2 \\ I_\eta &= \nabla I \cdot \eta, I_{\eta\eta} = \nabla^2 I(\eta \cdot \eta) \\ &= (I_{xx} \cdot I_x^2 + 2I_{xy} \cdot I_x \cdot I_y + I_{yy} \cdot I_y^2) / |\nabla I|^2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 $I_{\xi\xi}$ 和 $I_{\eta\eta}$ 分别为垂直于 ∇I 方向和沿 ∇I 方向的扩散项, 从而式(12)可写为

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = \text{div}[g(q) \cdot \nabla I(x, y, t)] = g(q) \cdot I_{\xi\xi} + \Phi'(q) \cdot I_{\eta\eta} \quad (17)$$

其中 $\Phi'(q) = [q \cdot g(q)]'$, 为沿边缘方向的扩散系数; $g(q)$ 为垂直于边缘方向的扩散系数.

(1) 在均匀区域, 本算法是各向同性的.

分析式(17)知, 当处于均匀区域时, $q^2 \rightarrow q_0^2$, ξ 和 η 方向的扩散系数以及二者比值分别为

$$\lim_{q \rightarrow q_0} g(q) = 1/2, \lim_{q \rightarrow q_0} \Phi'(q) = \lim_{q \rightarrow q_0} [g(q) + q \cdot g'(q)] = 1/2$$

$$\lim_{q \rightarrow q_0} [\Phi'(q) / g(q)] = 1$$

也就是说, 在均匀区域, 本文的算法对各方向平滑程度相同, 即各向同性扩散.

(2) 在边缘区域, 本算法是各向异性的.

在边缘和细节区域, 图像变差系数较大, $q^2 \gg q_0^2$. 此时式(13)有 $g(q) = 0$ 即停止平滑滤波. 而当 $q_0^2 < (q^2 - q_0^2) / (1 + q_0^2) \leq 2q_0^2$ 时, 即 $q_0^4 + 2q_0^2 < q^2 \leq 2q_0^4 + 3q_0^2$ 时, 已经开始对于部分边缘进行处理. 此时若 $q^2 \rightarrow 2q_0^4 + 3q_0^2$ 则

$$\lim_{q \rightarrow 2q_0^4 + 3q_0^2} g(q) = 0, \lim_{q \rightarrow 2q_0^4 + 3q_0^2} \Phi'(q) = 0$$

$$\lim_{q \rightarrow 2q_0^+} [\Phi'(q) / g(q)] \rightarrow -\infty$$

这说明沿边缘方向的扩散系数远大于垂直于边缘的扩散系数,所以沿边缘方向的扩散比垂直边缘方向速度快,也即各向异性扩散.并且当 $q^2 \gg q_0^2$ 时, $g(q) = 0$ 及时截止了对边缘细节的滤波.因此,本文的算法有效抑制了对边缘的平滑,大大提高了边缘的保持效果.

3.4 实现步骤

(1)对第 n 次迭代图像 I^n (大小为 $M \times N$) 进行高斯低通滤波,得到图像 J^n .

(2)求 J^n 的均匀区域的变差系数 C_{u^n} .

(3)在以 (i, j) 为中心的 4 邻域移动窗口 $\bar{\eta}_i$ 中,求 J^n 的变差系数 $C_{J^n}^2, i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$.

(4)利用式 (13) 求 (i, j) 处的扩散系数 $g_{i,j}$.

(5)设空间步长为 h , 离散化式 (12) 求得迭代差为:

$$d_{i,j}^n = \frac{1}{h^2} [g_{i+1,j}^n (I_{i+1,j}^n - I_{i,j}^n) + g_{i,j}^n (I_{i-1,j}^n - I_{i,j}^n) + g_{i,j+1}^n (I_{i,j+1}^n - I_{i,j}^n) + g_{i,j}^n (I_{i,j-1}^n - I_{i,j}^n)]$$

(6)根据离散更新方程 $I_{i,j}^{n+1} = I_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{|\bar{\eta}_i|} \cdot d_{i,j}^n$ 得到迭代后的新图像, Δt 为时间步长.

(7)是否结束迭代, 是则停止, 否则继续从第 (1) 步进行.

4 实验结果

一个好的 SAR 相干斑滤波器应具有以下特点^[11]: ①保留局部均值信息; ②减小图像标准差; ③保留或增强图像纹理和边缘细节信息.

根据以上特点, 我们使用均值、标准差、等效视数、辐射分辨率和视觉效果衡量各方法抑制相干斑的效果. 其中, 等效视数由 $ENL = \frac{E^2(I)}{V \cdot ar(I)}$ 求出; 辐射分辨率由 $\gamma = 10 \cdot \log_0 \left[1 + \frac{\sqrt{V \cdot ar(I)}}{E(I)} \right]$ 求得. 下面采用中科院电子所某机

载 SAR 图像进行实验, 来验证本文所提出的算法的有效性, 并与窗口大小为 5×5 的 Lee 滤波器及 P-M 算法进行比较, 见图 2 图 3 和图 4 是对图 2(a) 方框所示均匀区域和边缘细节区域的滤波结果. 表 1 为从图 4 所示均匀区域求得的参数. 本文算法的参数取 $h = 1, \Delta t = 0.05$ 迭代 50 次.

表 1 各滤波器的相干斑抑制效果比较

图像	均值	标准差	等效视数	辐射分辨率
原始图像	19.8848	9.9008	4.0337	1.7548
Lee 滤波 (5×5)	20.9880	3.5899	34.1804	0.6857
PM 算法	20.5199	3.2371	40.1833	0.6362
本文算法	19.8819	3.3108	36.0628	0.6689

从以上图表中可以看出, Lee 滤波器在一定程度上降

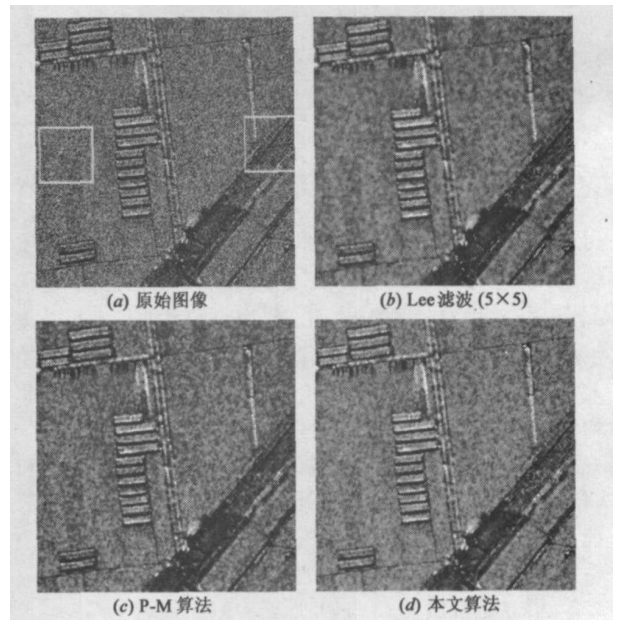


图 2 各种降相干斑算法效果比较 (400×400 像素), 幅度图像

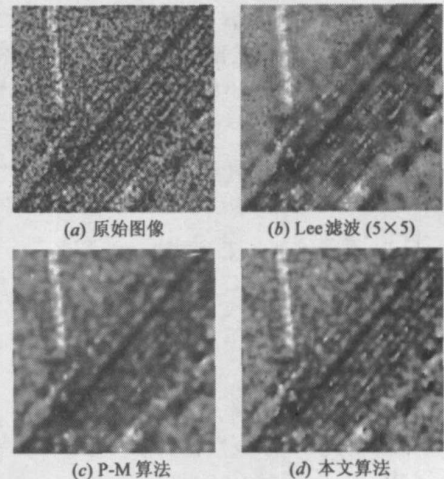


图 3 边缘细节 (100×100 像素) 比较, 幅度图像

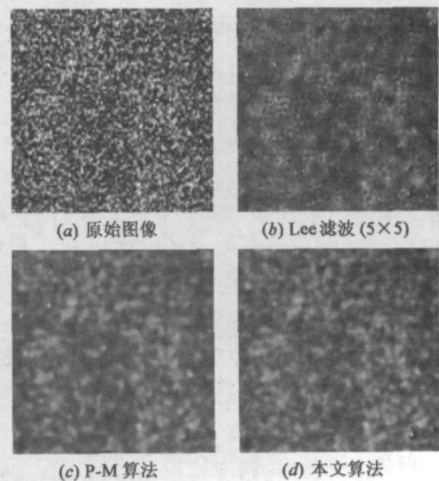


图 4 均匀区域 (100×100 像素) 比较, 幅度图像

低了图像标准差,且等效视数较大,但是在保留边缘细节方面效果较差,从视觉效果来说平滑效果也不理想, SAR 图像失去真实感;经过 P-M 算法滤波后的图像虽然等效视数较大,但对图像平滑得过多,对细节保留效果较差;而本文的算法不仅可以较好地保持均值,大大降低标准差,对均匀区域的平滑效果较好,而且在保持和增强边缘细节方面效果也很明显(如图 3(d)所示),所得到的 SAR 图像有良好的视觉效果,并且空间分辨率没有明显下降。

5 结束语

本文根据 SAR 相干斑图像的局部统计特性和鲁棒估计,建立了新的扩散系数,提出了一种新的各向异性扩散抑制 SAR 图像相干斑的算法。从实验结果可以看出,本算法大大提高了图像的等效视数,有效地消除了 SAR 图像中的相干斑噪声,并且很好地保持了 SAR 图像的目标特性和细节。无论是从目视解译,还是从辐射分辨率等参数来看,本文所提出的算法都是一种非常有效的 SAR 图像相干斑噪声抑制方法。

参考文献:

- [1] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans Information Theory, 1995, 41(3): 613-627.
- [2] Xie Hua, Pierce L E, Uhlby F T. SAR speckle reduction using wavelet denoising and markov random field modeling[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(10): 2196-2211.
- [3] Lee J S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 17: 24-32.
- [4] Kuan D T, Sawchuck A A, Strand T C, Chavel P. Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(2): 165-177.
- [5] Frost V S, Stiles J A, Sharmugan K S, Holtzman J C. A model for radar images and its application to adaptive digital

filtering of multiplicative noise[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(2): 157-166.

- [6] Pietro Perona, Jitendra Malik. Scale-space and edge detection using an isotropic diffusion[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629-639.
- [7] Yu Yongjian, Acton Scott T. Speckle reduction anisotropic diffusion[J]. IEEE Trans Image Processing, 2002, 11(11): 1260-1270.
- [8] Michael J Black, Guillermo Sapiro, David H Marmont, David Heeger. Robust anisotropic diffusion[J]. IEEE Trans Image Processing, 1998, 7(3): 421-432.
- [9] Chris Oliver, Shaun Quegan. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Boston: Artech House, 1998: 88.
- [10] CATTŪ F, Lions P L, Morel J M, Coll T. Image selective smoothing and edge detection diffusion II[J]. SIAM J Numer Anal, 1992, 29(1): 182-193.
- [11] Dong Y, Milne A K, Foster B C. Toward edge sharpening a SAR speckle filtering algorithm[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(4): 851-863.

作者简介:



黄倩女, 1979年8月出生于山东省淄博市, 博士生, 主要研究方向为数字图像处理, 雷达信号处理及其应用。

E-mail: aqian36@yahoo.com.cn

王岩飞 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达, 数字信号处理。E-mail: yfwang@mail.ie.ac.cn

张冰尘 男, 1973年5月出生于浙江省温州市, 副研究员, 研究方向为数字信号处理, 微波成像雷达。E-mail: zhangbc@sina.com

苗慧女, 1979年5月生于新疆乌鲁木齐, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。E-mail: miaohuei7956@sohu.com