

结合多尺度边缘检测的 SAR 结构邻域滤波方法

邴苏丹 李广侠

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要 噪声抑制是合成孔径雷达(SAR)图像处理的一个重要环节,通常的方法在抑制噪声的同时也使得图像的边模糊。该文提出一种结合宏观边缘信息的 SAR 图像结构邻域滤波方法。首先利用多尺度边缘检测算法获得 SAR 图像主要的边缘信息,在此基础上对结构邻域滤波法进行改进。结构邻域滤波法用一系列反映图像局部方向信息的邻域模板描述图像的细节特性,滤波过程中引入图像的宏观边缘信息,对邻域模板的选择范围进行约束。最后运用模拟退火算法选取合适邻域模板对目标点的强度进行 MAP 估计。实验表明该方法能够较好地保持图像的边缘特征,同时有效抑制了斑点噪声。

关键词 SAR, 滤波, 结构邻域模型, 多尺度, 边缘检测

中图分类号: TP722.6, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1480-05

A SAR Image Filter Method Based on Structured Neighbourhood Model with Multi-scale Edges Detection

Li Su-dan Li Guang-xia

(College of Communication Engineering, Institute of Technology of Liberation Army, Nanjing 210007, China)

Abstract Speckle reducing is an important step in Synthetic Aperture Radar (SAR) image processing, ordinary methods blur image edges while reducing speckle. A SAR image filter method based on structured neighbourhood model with macroscopical edge information is proposed in this paper. First multi-scale edge detector is applied to achieve principal image edges, then structured neighbourhood filter is modified and used. Structured neighbourhood filter adopts a series of templates reflecting regional direction information to describe image detailed property, the macroscopical edge information is introduced to constrain the selection of templates while processing. Finally simulated annealing algorithm is used to get appropriate template, the MAP estimate of the object pixel intensity can be achieved. Experiment indicates this method reduces effectively speckle while preserving image edges.

Key words SAR, Filter, Structured neighbourhood model, Multi-scale, Edge detection

1 引言

SAR 具有全天候、全天时对地球表面进行观察的能力,克服了可见光、红外传感器受气候和光照条件影响的缺点,在地球遥感及军事侦察中发挥重要作用。由于 SAR 受到自身固有的斑点噪声的影响,给图像分割和目标检测等后期处理增加了难度。因此噪声抑制是 SAR 图像处理的一个重要环节。

通过多视处理可以降低噪声的影响,但是会降低图像的空间分辨率,损失了图像细节。以数字图像处理技术为基础,在成像后对噪声进行抑制成为广泛采用的方法^[1-12]。Frost, Lee, Kuan 滤波器是比较经典的 SAR 滤波方法,它们建立在 SAR 统计模型基础上,通过固定窗口估计图像的统计参数实现滤波,因此在平滑噪声的同时使得图像细节损失较大。为了提高算法保持边缘及有意义细节特征的能力,在滤波过程中引入了关于图像局部特征的描述。Lopes 等人^[7]提出改进的 Lee 滤波器,算法以标准差为依据,将图像分为均匀、非均匀和点状目标 3 类,分别采用均值滤波、Lee 滤波或者保持

原始信息等处理方式。由于图像性质的分类建立在局部统计性质基础上,该方法可能将局部较强的噪声作为点状目标保留。Baraldi^[8]提出一种结合边缘检测的几何自适应滤波器 RGMAP,由于考虑到边缘检测问题,图像处理的窗口不能太大,这对于图像局部统计特性的估计和噪声抑制不利。Marc^[9]研究了基于小波分析的 SAR 图像斑点噪声滤波算法,对不同尺度的小波系数通过软门限滤波来实现噪声滤除。Han^[11]利用局部边缘检测模板分别检测水平、竖直和对角方向的对比度,根据对比度确定边缘方向,选择滤波的方向。韩春明^[12]对该方法进行了改进,提升了算法的去噪效果。

SAR 图像的噪声较强,局部边缘检测算子易受干扰。本文利用多尺度边缘检测算子获得 SAR 图像主要的边缘信息,减少噪声干扰。然后在结构邻域滤波器中引入图像的边缘信息,对邻域模板的选择进行约束。由于结构邻域模型建立在像素点的 8 邻域范围内,可以与宏观边缘信息有机结合。通过迭代实现滤波算法,迭代过程中利用模拟退火算法来选择邻域模板,保证算法在平滑噪声的同时较好地保持了边界特征。

2 SAR 图像的多尺度边缘检测

SAR图像存在强烈的斑点噪声, 给边缘检测带来一定困难。小尺度检测算子边缘定位准确, 但对噪声极为敏感; 大尺度检测算子可以抑制噪声干扰, 但边缘定位精度差, 甚至会丢失局部细节。固定尺度的边缘检测算子难以兼顾边界定位、噪声抑制和弱边界检测等方面。小波变换具有良好的时频局域化特性及多尺度分析能力^[13], 文献[14]根据多尺度分析构造多尺度边缘检测算子, 通过多尺度边缘融合, 提高定位精度, 减少噪声干扰, 能够有效检测SAR图像的边缘, 图1给出了多尺度边缘检测的处理流程。其主要步骤为:

(1) 设计多尺度离散掩模算子 高斯函数的一阶导数满足允许小波函数的定义, 利用高斯函数构造小波步边缘检测算子。设 $\theta(x, y)$ 均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯函数, $\theta_s(x, y) = (1/s^2)\theta(x/s, y/s)$ 为 $\theta(x, y)$ 的尺度变换函数, s 为伸缩因子, 则 $\psi_s^1(x, y) = s(\partial\theta_s/\partial x)$, $\psi_s^2(x, y) = s(\partial\theta_s/\partial y)$ 为尺度 s 上的小波函数。在尺度 s 上, 函数 $f(x, y) \in L^2(\mathbb{R}^2)$ 的小波变换(WT)定义为

$$\begin{pmatrix} W_s^1 f(x, y) \\ W_s^2 f(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f\psi_s^1(x, y) \\ f\psi_s^2(x, y) \end{pmatrix} = s\nabla(f\theta_s)(x, y) \quad (1)$$

$f(x, y)$ 关于 ψ_s^1 和 ψ_s^2 的 WT 的两个分量为 $f(x, y)$ 的竖直和水平边缘增强图, 记为 $n_1(x, y)$ 和 $n_2(x, y)$ 。令 $I(x, y) = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}$, $A(x, y) = \arctg(n_2/n_1)$ 分别为边缘幅度图和梯度方向图。由于图像是离散的, 需要对 ψ_s^1 和 ψ_s^2 进行采样, 获得多尺度离散掩模算子。

(2) 检测各尺度下边缘候选点 多尺度边缘通过如下方式获得: 选择 n 个相邻的整数尺度, $s = m, m+1, \dots, m+n-1$, $m \in \mathbb{Z}^+$ 作为分解尺度, 分别得到各尺度的掩模算子。图像与掩模算子进行卷积, 局部模极大值点即为检测出的图像的边缘候选点。为边缘幅度设定阈值 T_s , 幅度大于 T_s 的候选点作为边缘点。将连续长度小于阈值 l_s 的边缘删去, 使得检测出来的边缘可信度较高, l_s 一般取 20。最小尺度 m 和最大尺度 $m+n-1$ 根据具体情况选定, 要保证最小尺度下边缘信息比较准确, 没有被噪声边缘淹没; 最大尺度空间边缘失真较小。

(3) 多尺度边缘融合 多尺度边缘的融合并不等于将不同尺度下的边缘简单相加, 因为不同尺度的边缘检测算子对同一边缘的响应并不相同, 因此在不同尺度的边缘增强图像中的位置也不相同, 边缘相加必然会造成边缘冗余, 同时噪

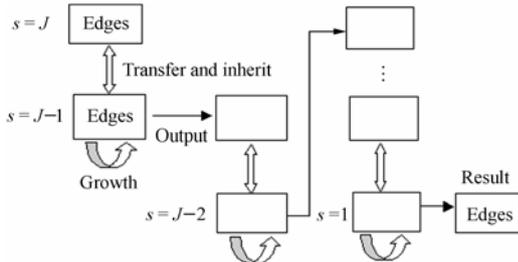


图1 多尺度边缘融合流程

Fig.1 Flow chart of multi-scale edges fusion

声也没有得到抑制。文献[14]利用多尺度边缘在位置、强度

和方向上的联系, 提出边缘传递、继承和生长 3 种处理方法来实现多尺度边缘的融合。

跨尺度的关联是建立在 3×3 的小邻域范围内的, 如图 2 所示。尺度 s 上边缘点的集合为 M_s , 尺度 $s+1$ 上的 3×3 邻域中的像素是尺度 s 边缘点 (i, j) 的关联域, 记为 $F_{s,s+1}(i, j)$ 。用 $C_{s,s+1}(i, j)$ 来表示 s 空间点 (i, j) 与 $s+1$ 空间的相关性。

$$C_{s,s+1}(i, j) = \begin{cases} 1, & \exists(m, n) \in F_{s,s+1}(i, j) \& (m, n) \in \text{s.t.} M_{s+1}, \\ & \text{s.t.} |A_s(i, j) - A_{s+1}(m, n)| \leq \alpha \text{ or} \\ & |A_s(i, j) - A_{s+1}(m, n)| \geq 360^\circ - \alpha \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $A_s(i, j)$ 为尺度 s 边缘点 (i, j) 的梯度方向, α 是为方向差设的阈值, 定为 30° 。如果 $C_{s,s+1}(i, j) = 1$, 则说明尺度 s 上边缘点 (i, j) 是与尺度 $s+1$ 上的边缘点相关, 否则不相关。

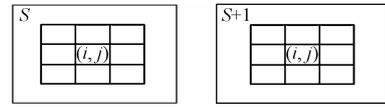


图2 相邻尺度之间边缘点的关联

Fig.2 Associate of edge pixels across neighbor scale

(a) 边缘传递 如果 M_s 中的边缘点 (i, j) 与尺度 $s+1$ 关联, 则认为 (i, j) 是由尺度 $s+1$ 中的某个边缘点 (m, n) 传递而来, 在不同尺度空间反映图像中的同一边缘。经边缘传递后边缘点集合为 $B1_{s,s+1}$, 其组成为: $B1_{s,s+1} = \{(i, j) \in M_s | C_{s,s+1}(i, j) = 1\}$;

(b) 边缘继承 尺度空间 $s+1$ 上存在的某些边缘点不与尺度 s 上的任何边缘点关联, 尺度 $s+1$ 上这部分边缘信息需要保留, 用 $B2_{s,s+1}$ 表示, 其组成为

$$B2_{s,s+1} = \{(m, n) \in M_{s+1} | \forall(i, j) \in M_s, C_{s,s+1}(i, j, m, n) = 0\}$$

$C_{s,s+1}(i, j, m, n)$ 表示 M_s 中点 (i, j) 与 M_{s+1} 中点 (m, n) 的相关性。传递、继承后合成梯度方向图 $A_{s,s+1}$ 为

$$A_{s,s+1}(i, j) = \begin{cases} A_{s+1}(i, j), & (i, j) \in B2_{s,s+1} \\ A_s(i, j), & \text{其他} \end{cases}$$

(c) 边缘生长 边缘传递仅在 3×3 的小窗口内进行, 无法将边缘信息扩展到较远的地方, 边缘生长算法可以充分利用小尺度空间的边缘信息。将从尺度 $s+1$ 和尺度 s 通过传递和继承获得的融合边缘点集合记为 $B_{s,s+1}^0$, $A_{s,s+1}$ 另记为 $A_{s,s+1}^0$, 以此为基础, 使 $B_{s,s+1}^0$ 在 M_s 中迭代扩展。设第 k 次迭代之后的边缘点集合为 $B_{s,s+1}^k$, $k \geq 1$ 。 M_s 中的像素 (i, j) 与 $B_{s,s+1}^{k-1}$ 中的像素的相关性用 $D_s^{k-1}(i, j)$ 表示。如果 $D_s^{k-1}(i, j) = 1$, 表示 M_s 中的像素 (i, j) 与 $B_{s,s+1}^{k-1}$ 中的像素相关联; 否则不关联。 $D_s^{k-1}(i, j)$ 通过下面的判别式获得:

$$D_s^{k-1}(i, j) = \begin{cases} 1, & \exists(m, n) \in B_{s,s+1}^{k-1}, \\ & \text{s.t.} |A_s(i, j) - A_{s,s+1}^{k-1}(m, n)| \leq \alpha \text{ or} \\ & |A_s(i, j) - A_{s,s+1}^{k-1}(m, n)| \geq 360^\circ - \alpha \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$B_{s,s+1}^k$ 与 $B_{s,s+1}^{k-1}$ 的关系为 $B_{s,s+1}^k = B1_{s,s+1}^k \cup B2_{s,s+1}^k$, 其中

$$B1_{s,s+1}^k = \{(i, j) \in M_s \mid D_s^{k-1}(i, j) = 1\} \quad (4)$$

$$B2_{s,s+1}^k = \{(m, n) \in B_{s,s+1}^{k-1} \mid \forall (i, j) \in M_s, D_s^{k-1}(i, j, m, n) = 0\} \quad (5)$$

$$A_{s,s+1}^k(i, j) = \begin{cases} A_{s,s+1}^{k-1}(i, j), & (i, j) \in B2_{s,s+1}^{k-1} \\ A_s(i, j), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$D_s^{k-1}(i, j, m, n)$ 表示集合 M_s 中点 (i, j) 与集合 $B_{s,s+1}^{k-1}$ 中点 (m, n) 的相关性。如果点 (i, j) 在 $B_{s,s+1}^0$ 中是一个边缘的端点, 而在 M_s 中某条边缘的中间, 通过上述迭代, $B_{s,s+1}^k$ 就会扩展到整个的边缘, 完成边缘生长。

多尺度边缘融合从最大尺度开始, 先进行边缘传递; 无法传递的大尺度边缘得到保留; 然后在小尺度空间进行边缘的生长扩展。由于扩展只是在像素的8邻域范围内逐步进行, 并且有方向的限制, 因此可以克服噪声边缘的干扰。以上步骤逐层向下进行, 如图1所示, 最后得到多尺度融合的边缘。

3 基于结构邻域模型的 SAR 图像滤波

3.1 结构邻域模型

图像中的每个像点, 必然存在强度相近的相邻像素, 这些相近的像素在一起体现了图像的局部结构。对于每个目标像素点, 考虑它的8邻域范围内的像素。为了简化邻域结构, 同时有效利用邻域信息, 选择一系列体现边界信息的模板, 引入方向敏感性。对于一个像素而言, 通过它的可能边界如图3所示, 一共包含了16个结构邻域模板, 将这16个邻域模板的集合定义为 N 。把中间的像素定义为 i_0 , 相邻的两个像素分别定义为 i_1 和 i_2 。实际上这些模板反映了通过像素 i_0 的所有可能边界, 选择体现图像局部特征的模板, 对像素 i_0 的强度进行估计, 能够保证滤波后图像的局部特征较好的保留。

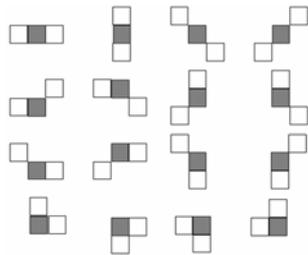


图3 结构邻域模板

Fig.3 Templates of structured neighbourhood

3.2 基于结构邻域模型的雷达反射强度 MAP 估计

对于一个邻域模板, 在已知观测强度 I_0 情况下, 雷达反射强度 μ 根据 Bayes 准则进行估计,

$$p(\mu \mid I_0) = \frac{p_{\text{speckle}}(I_0 \mid \mu) p_{\mu}(\mu)}{p_I(I_0)} \quad (7)$$

$p_{\text{speckle}}(I_0 \mid \mu)$ 描述在已知期望反射强度情况下观测强度分布的概率密度函数, 可由下式描述:

$$p_{\text{speckle}}(I_0 \mid \mu) = \left(\frac{L}{\mu}\right)^L \frac{I_0^{L-1}}{\Gamma(L)} \exp\left[-\frac{LI_0}{\mu}\right] \quad (8)$$

其中 L 为 SAR 图像的视数, 来自 SAR 的成像参数, 也可估计出来^[15]。因此有

$$p(\mu \mid I_0) \propto p_{\text{speckle}}(I_0 \mid \mu) p_{\mu}(\mu) \quad (9)$$

针对不同的邻域结构, 运用最大后验概率(MAP)估计, 可以获得目标像素期望强度的估计值。假设中心像素与两个相邻的像素具有相同的期望反射强度, 先验概率 $p_{\mu}(\mu)$ 可以通过下式来表示,

$$p_{\mu}(\mu) = \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^{\nu} \frac{I_1^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} \exp\left(-\frac{I_1\nu}{\mu}\right) \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^{\nu} \frac{I_2^{\nu-1}}{\Gamma(\nu)} \exp\left(-\frac{I_2\nu}{\mu}\right) \quad (10)$$

其中 ν 是局部阶次参数, 可以从 I_0 的邻域中估计出来。对应于每一种邻域模板 $i \in N$, 都可以获得反射强度的最大似然估计

$$\mu_i = \frac{I_0 + \frac{\nu}{L}(I_{i1} + I_{i2})}{1 + 2\frac{\nu}{L}} \quad (11)$$

由于图像的视数是固定的, μ_i 仅依赖于 ν 的值, 当 ν 值较小时, 即图像在目标像素点变化较大, μ_i 倾向于原始图像值 I_0 , 特征得到保留; ν 值较大时, 即图像在目标像素点变化较小, μ_i 则倾向于 $(I_1 + I_2)/2$, 图像得到平滑。

4 引入边缘信息的 SAR 结构邻域滤波

4.1 边缘信息的利用

滤波过程中, 需要选择体现了图像局部特征的模板, 以它为基础获得目标像点的 MAP 估计。结构邻域滤波器仅从图像的局部信息(8邻域范围)出发, 对邻域模板进行选择。某些情况空间特征在局部条件下并不是非常突出, 导致选择的邻域模板并不准确, 这样滤波就会使局部特征损失。为了克服这一缺点, 需要在结构邻域模型中考虑图像的宏观边界特征。由于结构邻域模型处理的信息是8邻域范围内的, 它可以与边缘信息有机的结合。步骤如下:

(1)首先利用多尺度边缘检测算子获得完整、准确的边缘特征, 并在图像中进行标记;

(2)采用结构邻域模型进行滤波的时候针对目标点(图3中的像素0)的性质进行不同的处理:

(a)如果像素0是边界点, 则要求邻域中的另外两个像素1和2必须同样是边界点, 不满足条件的邻域类型被剔除;

(b)如果像素0是边界点, 但是仅存在一个相邻的边界点(像素0为边界的端点), 这时为像素0特定一种邻域类型, 其中像素1和2的强度等于相邻的边界点强度;

(c)如果像素0不是边界点, 则如果其某个邻域类型中包含边界点, 该邻域类型被剔除。

(3)在邻域类型的范围内, 选择合适的模板, 利用它完成目标像素的强度估计。

如果像点是一个边界点, 可选的邻域结构中另外两个点也必须是边界点, 这样非边界点的信息就无法传递到边界点的估计中; 如果像点是一个非边界点, 则其可选的邻域结构中不能包含边界点, 这样边界的信息也无法传递到区域内部像点的估计。通过图像的边缘信息对邻域模板的选择范围进行约束, 能够保证滤波后边界特征不会损失。模板的选择通过模拟退火算法来实现。

4.2 基于模拟退火的模板选择

由于 SAR 图像的噪声很强, 一次滤波难以有效抑制噪声, 本文通过迭代来提高滤波效果。迭代过程中利用模拟退火算法来选择邻域结构。根据本文的优化目标:

$$\mu_{\text{MAP}} = \max_{\mu_i, i \in N} (p_{\text{speckle}}(I_0 | \mu_i) p_{\mu}(\mu_i)) \quad (12)$$

设计能量函数 $E = -[\log p_{\text{speckle}}(I_0 | \mu) + \log p_{\mu}(\mu)]$ 。令 $E_{\min} = \min_{i \in N} E_i$, $\Delta E_i = E_i - E_{\min}$, 则每一个邻域模板的选择概率为 $P_i = \frac{\exp(-\Delta E_i/T)}{\sum_{i=1}^N \exp(-\Delta E_i/T)}$, T 为温度。当某邻域模板中像素 0 与像素 1 和 2 的强度接近时, 该模板就体现了图像的某种局部特征, 得到的选择概率会比较大。

模拟退火过程中温度从高向低逐步降低, 温度较高时, 各种邻域模板都有选中的概率, 滤波产生平滑效果; 当 $T \rightarrow 0$ 时, 只有选择概率大的模板会被选中, 图像的细节得到保持。如果像素 0 位于一个区域的内部, 所有邻域模板的能量会比较接近, 因此在退火过程中它们被选择的概率也比较接近, 各邻域交替使用的结果使得区域得到平滑; 如果像素 0 位于边缘上, 只有与边缘相吻合的邻域模板能够被选中, 这样就保持了区域的边界。边界信息的引入限制了模板的选择, 特征得到更好保留。

温度的下降按照如下的公式进行:

$$T_k = \frac{T_0}{\log(1 + \beta k)}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

其中 T_0 为初始温度, β 用来控制温度下降的速度。可以根据图像的噪声强度调整 T_0 和 β , 来影响退火的进程。其中 T_0 范围在 2-5 之间, β 取值在 2-5 之间。对于噪声很强的图像, 通过提高初始温度 T_0 和减小 β , 使得温度下降较慢, 增大平滑效果。对于噪声较弱的图像, 降低初始温度 T_0 和增大 β , 使滤波收敛加快, 提高细节的保持能力。

5 实验结果分析

下面通过具体实验来验证本文算法的有效性。图 4(a) 为一幅航空 SAR 的灰度图像, 大小为 512x512, 分辨率为 30cm, 图像中包含田野、公路、树林、河流等特征区域, 原图斑点噪声较强; 图 4(b) 为输入图像 A 区的突出显示; 图 4(c) 是 Lee 滤波器对 A 区进行 8 次迭代滤波处理的结果, 处理窗口为 3x3; 图 4(d) 是 Frost 滤波器的处理结果, 窗口大小为 5x5。图 4(e) 是结构邻域滤波器的处理结果, 迭代次数为 200 次, 选择 $T_0 = 3$, $\beta = 4$; 图 4(f) 是多尺度边缘检测算子得到的边缘图像, 尺度空间选择 6 到 3, 归一化之后 T_s 为 0.06; 边缘较准确地反映了图像的宏观线性特征(河岸、道路等)和局部边界特征(树林中树冠与阴影的边界等); 图 4(g) 是引入边缘信息后结构邻域滤波器的滤波结果, 迭代次数也是 200, $T_0 = 3$, $\beta = 4$ 。对比几种滤波算法, 可以看出 Lee 和 Frost 滤波在对噪声进行抑制的同时模糊了区域的边界。结构邻域滤波与引入边缘信息后改进的结构邻域滤波对于均质区域都取得显著效果, 但在局部细节的保持方面改进的结构邻域滤波器做

得更好。

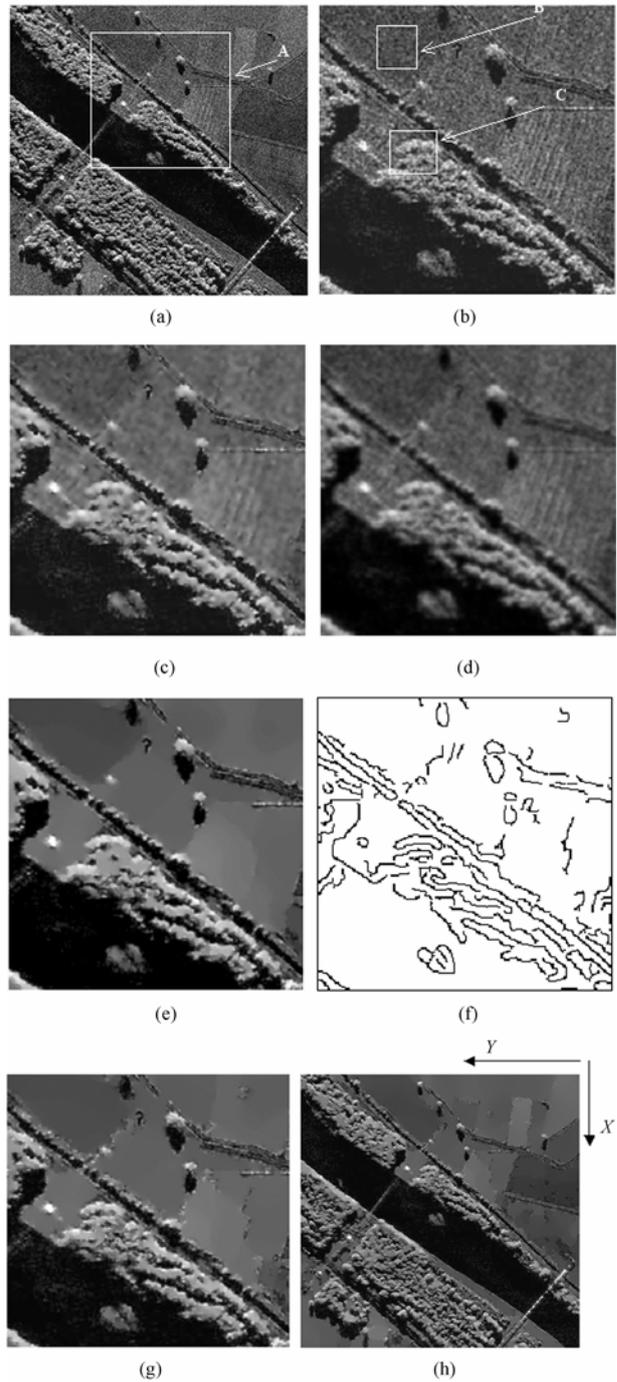


图 4 多种算法滤波结果比较 (a) 输入图像 (b) A 区的原始图, $\text{Std}_B=18.91$ (c) A 区 Lee 滤波结果, $\text{Std}_B=7.13$ (d) A 区 Frost 滤波结果, $\text{Std}_B=7.64$ (e) A 区结构邻域滤波结果, $\text{Std}_B=0.91$ (f) A 区边缘图 (g) A 区本文算法的滤波结果, $\text{Std}_B=0.91$ (h) 输入图像本文算法的滤波结果

Fig.4 Filter result comparison of filter algorithms (a) Input image (b) Original image of area A, $\text{Std}_B=18.91$ (c) Lee filter result of area A, $\text{Std}_B=7.13$ (d) Frost filter result of area A, $\text{Std}_B=7.64$ (e) Structure filter result of area A, $\text{Std}_B=0.91$ (f) Edge image of area A (g) Filter result of area A with algorithm proposed in this paper (h) Filter result of input image with algorithm proposed in this paper

为了定量地比较各种算法的处理效果, 选择图 4(b) 中的 B、C 区域作为测试区。其中区域 B 是一块均质区域, 用来考察算法对均匀区域的噪声平滑能力, 用测试区像点的标准差

Std_B 来衡量。标准差越小,表明对均质区域的平滑作用越强。可以看出,结构邻域滤波器与改进的结构邻域滤波器的标准偏差远小于Lee和Frost滤波器,说明其对均匀区域的平滑效果非常好,并且二者的效果基本相同。区域C是一块树林,包含比较细微的树冠和阴影特征,用来考察算法保持细节特征的能力,利用三维网格图来体现,各种算法的处理结果如图5所示。图5(a)是区域C的三维网格图,其中X, Y方向与图4(h)中的X, Y方向相同。从图5(b)和图5(c)看出, Lee, Frost滤波器抑制噪声的同时弱化了区域的边界特征。图5(d)是结构滤波器的处理结果,虽然算法对噪声的平滑非常突出,由于缺乏准确的边缘信息,图像细节损失较大。图5(e)是区域C的边缘图。图5(f)是引入宏观边缘信息后,改进的结构滤波器处理结果,它很好地保持了图像的细节。综合噪声滤除和细节保留,本文的方法具有最佳的处理效果。

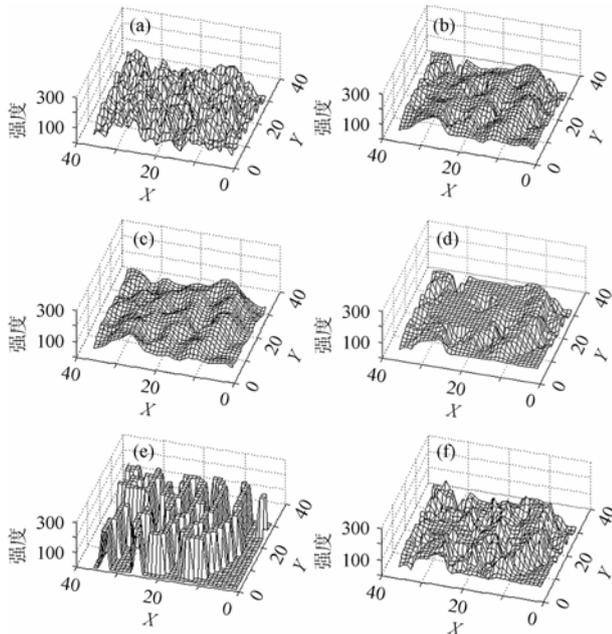


图5 不同算法的细节保持能力比较

(a) C区的三维网格图 (b) Frost 滤波结果 (c) Lee 滤波结果
(d) Frost 滤波结果 (e) 边缘图 (f) 本文算法的滤波结果

Fig.5 Detail preservation comparison of filter algorithms

(a) Mesh of area C (b) Result of Frost filter (c) Result of Lee filter
(d) Result of structure filter (e) Edge image (f) Filter result of algorithm proposed on this paper

6 结束语

本文提出一种基于多尺度边缘检测的 SAR 图像滤波方法,将边缘信息引入结构邻域滤波器内。多尺度边缘融合由边缘传递、继承和生长 3 个过程组成,能够克服 SAR 图像噪声的影响,获得准确可靠的边缘,体现了图像的宏观信息。在此基础上对结构邻域滤波器进行了改进。基本的结构邻域滤波器用一系列局部邻域模板来描述图像的细节特性。本文将宏观边缘信息引入结构邻域滤波器,对邻域模板的选择进行约束,使得滤波过程中信息无法跨越边界传递。由于结构邻域模型建立在像素点的 8 邻域范围内,可以与边缘信息有

机的结合。因此边缘检测算法和结构滤波算法都可以充分发挥自己的优势,不会相互制约,两者相结合体现了宏观信息与局部信息的互补。实验比较表明本文的方法取得良好的处理效果,无论是噪声抑制还是边缘保持方面都明显优于 Lee, Frost 及结构邻域滤波器。算法可以获得非常平滑的均质区域,为 SAR 图像分割和目标提取等后期处理奠定良好基础。

参考文献

- [1] Shi Zhenghao, Fung K B. A comparison of digital speckle filters [C]. IGARSS'94: 2129-2134.
- [2] Lopes A, Nezry E, Touzi R. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images [J]. *Int. J. of Remote Sensing*, 1993, 14(9): 1735-1758.
- [3] Ulaby F T, Kouyate F. Texture information in SAR images [J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1986, 24(2): 235-245.
- [4] Lee J S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images[J]. *Computer Graphic and Image Processing*, 1981, 17(1): 24-32.
- [5] Kuan D T, Sawchuk A A. Adaptive noise smoothing filter for signal-dependent noise[J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1985, 7(2): 165-177.
- [6] Frost V S, Stiles J A. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. *IEEE Trans. on PAMI*, 1982, 4(2): 157-166.
- [7] Lopes A, Tonzi R, Nezry E. Adaptive speckle filter and sense heterogeneity[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1990, 28(6): 992-1000.
- [8] Baraldi A, Parmiggiani F. A refined gamma MAP SAR speckle filter with improved geometrical adaptivity[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1995, 33(5): 1245-1257.
- [9] Marc S, Gianfranco D G. Analysis of speckle noise contribution on wavelet decomposition of SAR images[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1998, 36(6): 1953-1962.
- [10] Dong Y, Milne A K, Forster B C. Toward edge sharpening: a SAR speckle filtering algorithm [J]. *IEEE Trans. on GRS*. 2001, 39(4): 851-863.
- [11] Han C M, Guo H D, Wang C L, et al.. A novel method to reduce speckle in SAR images [J]. *Int. J. of Remote Sensing*, 2002, 23(23): 5095-5101.
- [12] 韩春明, 郭华东. 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.
- [13] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. *IEEE. Trans. on Information Theory*, 1992, 38(3): 617-643.
- [14] 郦苏丹, 李广侠. SAR 图像的多尺度边缘检测方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(3): 307-310.
- [15] Oliver C J, Quegan S. Understanding synthetic aperture radar images[M], Washington: Artech House Inc, 1998, Chapter 5.
- [16] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999, 第 3 章.

郦苏丹: 男, 1973年生, 博士, 研究领域为图像分析、遥感信息处理.

李广侠: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为信号处理.