

SAR 图像去斑方法

贾承丽 匡纲要

(国防科技大学电子科学与工程学院一系,长沙 410073)

摘要 合成孔径雷达图像固有的相干斑噪声严重降低了图像的可解译程度,影响了后续目标检测、分类和识别等应用。因此,SAR 图像的相干斑抑制问题一直是 SAR 图像应用的重要课题之一。一个理想的去斑算法应该在平滑的同时保持图像的边缘等细节不受损失,目前存在各种各样的算法,但没有一种方法能够完美的满足这一要求。本文对 SAR 图像的相干斑抑制问题进行了全面系统的研究,分析了相干斑的形成原因,总结了目前存在的相干斑抑制算法的主要思路,介绍了具有代表性的算法,并对各种算法的性能进行了定性分析和比较,给出了去斑算法定量评估方法,展望了 SAR 图像相干斑抑制的发展方向。

关键词 SAR 图像 相干斑去除 综述 自适应空域滤波 多分辨分析

中图分类号: TP775 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)02-0135-07

A Review of SAR Speckle Filtering

JIA Cheng-li, KUANG Gang-yao

(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073)

Abstract Speckle, appearing in synthetic aperture radar (SAR) images as granular noise, is generated by the coherent processing of radar signals. It severely affects the image qualities. To alleviate deleterious effects of speckle, various ways have been devised to suppression it. An ideal algorithm should smooth the speckle without blurring edges and fine detail. But most algorithms cannot satisfy these two demands very good. This paper investigates the problem of speckle suppression comprehensively and thoroughly. It first analyzes the principle of speckle forming, then describes the general approaches of speckle reduction filtering, discusses several well-known speckle reduction filters, compares the algorithms qualitatively. To compare speckle smoothing algorithm quantitatively, a set of performance criteria is established. In the end, conclusions are made and the possible future work is explained.

Keywords SAR image, speckle filtering, review, adaptive spatial filtering, multi-resolution analysis

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种工作在微波波段的相干成像雷达,对于 SAR 系统来说,分辨单元总是比发射信号的波长大得多,对分布目标而言每个分辨单元都可以看作由许多尺寸与波长相近的散射体组成,这一单元的总回波是各散射体回波的矢量叠加。由于采用相干微波源进行照射,因此,各散射点的回波是相干叠加的,造成合成矢量的振幅和相位

都有一定的起伏,而且其幅度和相位与回波的方向有很大关系。这样,当相干电磁波照射实际目标时,其散射回来的总回波并不完全由地物目标的散射系数决定,而是围绕这些系数值有很大的随机起伏,使 SAR 对目标散射系数的测量产生很大偏差,使最终得到的图像出现相干斑。形象地讲,SAR 图像上原本具有常数后向散射系数的均匀同质区域的灰度并不均匀,而是围绕着某一均值有随机起伏,造成像素间出现亮度变化,形成相干斑。图 1 为一幅典型的 ERS-1 所成像的单极化 SAR 复数据的不同显示方

基金项目:“十五”国防预研项目(43122020401)

收稿日期:2004-03-12; **改回日期**:2004-06-30

第一作者简介:贾承丽(1980~),女,2001 年于国防科学技术大学获工学学士学位,2001~2002 年于国防科学技术大学攻读硕士学位,2003 年于国防科学技术大学提前攻读博士学位。主要研究 SAR 图像解译。E-mail:jclnudt@163.com

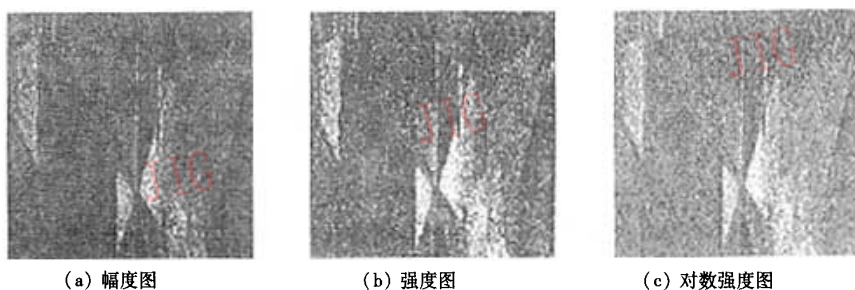


图1 被噪声污染的 SAR 图像

Fig. 1 Noisy SAR images

式,可以看到整幅图像被相干斑噪声覆盖。

因此,对 SAR 图像相干斑抑制方法的研究就成为 SAR 成像处理技术中极为重要的一部分。早在 1976 年 Arsenault 和 April 就证明相干斑噪声是乘性独立同分布的^[1],可表示为

$$I(t) = R(t) \cdot u(t) \quad (1)$$

其中, $I(t)$ 表示观测值, $R(t)$ 表示理想的、不受噪声影响的图像, $u(t)$ 表示相干斑噪声。

从式(1)可以看出,去斑就是从受斑块噪声影响的观测值 $I(t)$ 中忠实恢复理想图像 $R(t)$ 。

2 去斑算法分类

在过去的 20 年中,相干斑噪声抑制方法得到了深入研究,涌现了许多卓有成效的算法。如果从使用的图像数据格式来分,可以将去斑算法分为基于实数的方法和基于复数的方法。其中,对于实数域的算法又可以分为两大类:第 1 类是在成像之前进行去斑处理,称为多视处理,通过降低处理器带宽形成多视图像,然后对多视图像进行非相干叠加

来降低相干斑噪声,但多视处理中图像辐射分辨率的提高以牺牲 SAR 图像的空间分辨率为代价,与空间高分辨率的要求相互矛盾;第 2 类是在成像之后进行去斑处理,这种方法又可以分为两类,一类是基于合成孔径雷达斑点噪声统计特性的空域滤波算法,在图像上取一个滑动窗,以窗内所有像素作为滤波器的输入值,基于其局域统计特性进行滤波处理,典型的如 Lee 算法^[2],Kuan 算法^[3],Frost 算法^[4]等,这些算法较好地滤除了相干斑噪声并保留了边缘及目标等特征;另一类是基于多分辨分析的去斑算法。20 世纪 90 年代以后,多分辨分析作为一种新的信号处理技术,也被用于相干斑抑制,并取得了较好的效果。

目前针对复数据的去斑算法研究较少,具有代表性的是下面两种方法:基于吉布斯先验模型的贝叶斯估计^[5-7];基于最大熵原理的规则化方法^[8]。

但是大量的测试表明,所有的算法都是在去除斑点噪声和保持纹理、边缘等信息之间的折衷,无法获得完全满意的效果。

去斑算法分类图如图 2 所示。

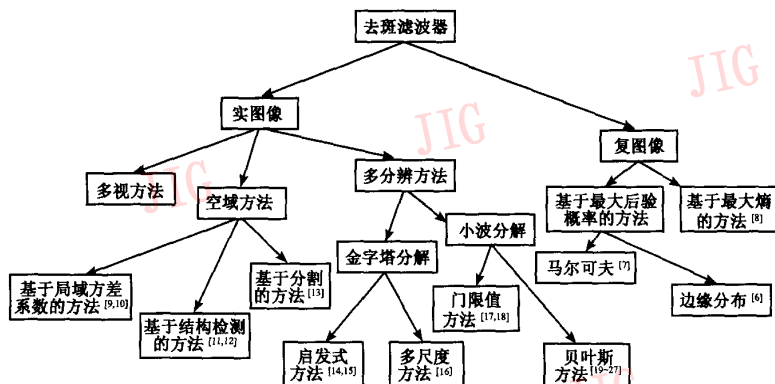


图2 去斑算法分类图

Fig. 2 Classification of speckle filtering algorithms

3 SAR 图像空域去斑算法

3.1 传统的自适应滤波器

3.1.1 Lee 滤波器

在 Lee 滤波器^[2]中,首先将式(1)用一阶泰勒展开为线性模型,然后用最小均方误差估计此线性模型,得到滤波公式:

$$\hat{R}(t) = I(t)W(t) + \bar{I}(t)(I - W(t)) \quad (2)$$

其中, $\hat{R}(t)$ 是去斑后的图像值,即式(1)中的 $R(t)$ 的估计值, $\bar{I}(t)$ 是去斑窗口均值, $W(t)$ 是权重函数:

$$W(t) = 1 - \frac{C_u^2}{C_I^2(t)} \quad (3)$$

C_u 和 $C_I(t)$ 分别是斑块 $u(t)$ 和图像 $I(t)$ 的标准差系数:

$$C_u = \frac{\sigma_u}{\bar{u}} \quad (4)$$

$$C_I(t) = \frac{\sigma_I(t)}{\bar{I}(t)}$$

其中, σ_u 、 $\bar{u}$ 分别是斑块 $u(t)$ 的标准差和均值, $\sigma_I(t)$ 是图像 $I(t)$ 的标准差。

3.1.2 Kuan 滤波器

Kuan 滤波器^[3]首先将乘性噪声模型式(1)改写为与信号相关的加性噪声模型,然后再利用 MMSE 估计模型参数。滤波公式与 Lee 滤波器具有相同的形式,但具有不同的权重。

$$W(t) = \frac{1 - C_u^2/C_I^2(t)}{1 + C_u^2} \quad (5)$$

3.1.3 Frost 滤波器

Frost 滤波器^[4]与 Lee 和 Kuan 的不同之处在于,Frost 滤波器是通过观测图像与 SAR 系统的冲击响应的卷积来估计场景的真实回波。场景回波系数 R 被认为是一个自回归过程。对下式做 MMSE 估计:

$$\varepsilon^2 = E[(R(t) - I(t) * m(t))^2] \quad (6)$$

得到 SAR 系统的冲击响应为

$$m(t) = K_2 \alpha \exp[-\alpha |t|] \quad (7)$$

其中, K_2 是归一化常数, $\alpha^2 = a^2 + 2a \cdot (\bar{u}/\sigma_u)^2 / (1 + (R/\sigma_R)^2)$ ($\bar{R}$ 、 $\bar{u}$ 分别是 R 和 u 的局部均值)。在实际应用中,参数 α 可简化为 $\alpha^2 = K \cdot C_I^2(t)$; $C_I(t) = \sigma_I(t)/\bar{I}(t)$ 是观测值的归一化标准差系数。

3.1.4 Gamma MAP 滤波器

基于乘性噪声模型,假定地面后向散射系数呈

高斯分布,Kuan 等人提出最大后验概率算法^[28] (MAP-maximum a posteriori probability),在此基础上,Lopes 等人用更符合实际情况的 Γ 分布模型取代高斯分布,即假设地面目标雷达散射特性和相干斑都服从 Γ 分布(因此又称 Gamma MAP 滤波算法)^[29]。Gamma MAP 滤波器为

$$\hat{R}(t_0) = \frac{(\alpha - N - 1)\bar{I}(t) + \sqrt{\bar{I}^2(t)(\alpha - L - 1)^2 - 4\alpha L\bar{I}(t)}}{2\alpha} \quad (8)$$

式中,异质参数 $\alpha = (1 - C_I^2(t))/(C_I^2(t) - C_u^2)$, L 是等效视数。

3.2 对传统自适应滤波器的改进

上述方法都是在假设 SAR 图像是平稳过程的基础上,推导出来的具有最小均方误差的滤波算法。事实上,SAR 图像是不平稳的,只能在处理窗内认为近似平稳。而且随着现代 SAR 的分辨率不断提高,图像结构性突出,非平稳性增强。为了适应处理窗内信号较强的非平稳性,通常对传统自适应滤波器做以下改进。

(1) 平稳性强弱分段处理

处理窗内数据的局部统计归一化标准差系数 V_I 可以近似反映信号的非平稳强弱,按 V_I 大小对信号进行分段处理,即

平滑段: $V_I \leq V_{Imin}, \hat{\sigma} = \hat{I}$;

滤波段: $V_{Imin} \leq V_I \leq V_{Imax}$, 滤波处理;

保持段: $V_{Imax} \leq V_I, \hat{\sigma} = I$ 。

其中, V_{Imin} 、 V_{Imax} 是两个预先设定的阈值,分别指图像 $I(t)$ 的归一化标准差系数的下限和上限。

(2) 改变窗口尺寸或形状

根据 V_I 变化自动调整处理窗尺寸,归一化标准差系数大时,窗缩小,归一化标准差系数小时,窗放大。处理窗大小一般在 5×5 到 15×15 之间变化。或者根据 V_I 寻找窗口内的包含中心点在内与中心点相同的最大均匀区域。

(3) 结合结构检测或分割处理过程

对图像进行边缘、线、强点检测,结构区保持,非结构区滤波,滤波处理过程可以在检测之后或与检测过程同时进行。结合分割的处理是先将区域分成若干块同质区域,然后在这些区域内部利用传统的自适应滤波器进行滤波。

具体地说,在传统自适应滤波器基础上发展起

来的最有影响力的空间域去斑算子包括:

(1) Touzi^[9] 提出的增强的 Frost 滤波器、Kuan 滤波器、Lee 滤波器。

(2) 基于结构检测的统计自适应 MAP 滤波器 (SDF)^[11,12,30,31]。

(3) 先验均值滤波器^[32] (APM—a posteriori mean)。

(4) T 线性滤波器^[33] (与 APM 近似)。

(5) 通过区域增长检测最大尺度均匀区域的 MAP 滤波器^[34]。

(6) 基于模型的去斑滤波器 (MBD), 利用贝叶斯理论和高斯-马尔可夫随机场^[35]。

(7) 保边缘最优斑点噪声滤波 (EPOS) 技术^[10]。

其中, 每一种算子都有自己定义的用以计算局部统计量的去斑邻域。这些去斑邻域系统包括:

(1) 分析窗口的尺寸固定, 无结构检测。

(2) 利用局域标准差 V_i , 将滑窗分为几个部分, 寻找滑动窗口内包含中心点的最大均匀区域 (注: 当区域的归一化系数低于一定的门限值时, 认为该区域是均匀的)。

(3) 基于比率边缘检测 (ratio edge detector) 或广义似然比 (generalized likelihood ratio) 的局部检测分析窗口^[11]。

(4) 滑动窗和一个分割区域的交集^[13]。

(5) 由分割定义的整个区域^[13]。

将上面所有的方法应用于仿真 SAR 图像、单视以及多视 SAR 图像进行测试, 可以得出以下结论:

(1) 在所有的不进行结构检测的固定滑动窗口尺寸的滤波器中, Frost 滤波器是最好的选择 (具有最佳的滤波效果)。由于它通过对周围邻域中的点到中心点距离的指数函数进行加权, 因此, 可以把出现边缘的情况考虑进去, 而其他的估计算子则产生较模糊的滤波图像。但是, 当图像视数增加时, 各种估计算子之间的滤波性能差别将会降低。

(2) 通过结构或均匀区域的局部检测可以大大提高去斑性能。例如 APM、T 线性和 SDF 都获得较好的效果。APM 和 T 线性是无偏的, 能够得到均匀区域雷达回波的最精确的估计。SDF 滤波算子在非结构区使用 MAP 进行滤波, MAP 稍有偏差, 但对纹理和精细结构保持得特别好, 特别适合视觉解译。

(3) 基于最优结构检测的方法比基于最大均匀区域检测的方法的性能好, 特别是在保持精细纹理方面。

(4) 基于区域分割的滤波器, 就目前的研究来看, 依赖于先验分割, 对单一图像数据的滤波效果不如基于结构检测的滤波器。

(5) 基于马尔可夫随机场的方法使用在一个相对较小的区域中 (典型的是 3×3 或 5×5), 但通过迭代, 能够获得较精确的雷达回波估计和较好的空间自适应性; 基于贝叶斯理论和马尔可夫随机场的 MBD 滤波器将优秀的检测保持与均匀区域的滤波结合起来, 获得了很好的效果。

4 SAR 图像多分辨分析去斑方法

基于多分辨分析的滤波技术是近几年发展起来的新技术, 由于它的高效率和显著效果而得到了广泛关注。基于多分辨分析去斑方法的思路就是对输入图像进行多分辨分解, 自适应滤除每个分辨率层的噪声。一旦所有的分辨率层 (包括基带) 的噪声都被自适应平滑掉, 那么将得到一个无噪图像。多分辨分析方法又可以分为基于塔式 (pyramidal) 分解的方法和基于小波分解的方法。

基于塔式分解的方法包括: 启发式方法^[14,15]; 多尺度方法^[16]。

利用小波的降噪技术也获得了很好的效果。小波理论为非稳定信号的时频分析提供了一个新的强有力工具, 小波变换的优越性主要在于它可以对信号的不同频率进行局域描述, 与短时谱分析不同的是, 小波变换可以同时提供信号在频率和时间 (空间) 上的局部信息。Mallat 已将小波变换应用于图像处理; Donoho 等人首先提出了小波域阈值滤波算法^[36]; 另外还出现了多种专门应用于 SAR 图像的小波域滤波算法。现存的小波 SAR 图像去斑算法主要分为两类: 第 1 类是门限值方法^[17,18], 其通过修正小波系数达到去噪的目的; 第 2 类是贝叶斯方法^[19-27], 其从理想信号和噪声的小波系数的统计模型出发, 由观测值的小波系数计算理想无噪信号的小波系数后验概率, 进而计算理想信号的小波系数。

多分辨分析对图像的平稳性不做要求, 非常适于非平稳 SAR 图像的处理。多分辨率滤波器可以结合 MMSE 或 MAP 准则设计, 来加强均匀区域的滤波效果, 为了增强结构、纹理保持还可以融入马尔可夫随机场模型。

5 去斑质量评估

SAR 图像质量的正确评价是一个很有意义的研究课题。通常从以下 4 个方面去衡量一种算法的品质:

- (1) 抑制相干斑噪声的程度;
- (2) 点目标的保持情况;
- (3) 保持边缘细节信息的多少;
- (4) 能否保持图像的平均后向散射系数。

抑制相干斑与保持边缘细节信息是一对矛盾,绝大多数算法都不能很好地满足这 4 方面的要求,存在着不同程度上的缺点。为了定量地评价各种相干斑抑制算法,需建立一系列 SAR 图像的质量评估指标来测量算法。

5.1 量化评估相干斑噪声抑制程度的方法

(1) 等效视数。等效视数是衡量一幅图像相干斑噪声相对强度的一种指标,等效视数越大,表明图像上的相干斑越弱,可解译性越好。其定义为

$$f_{\text{ENL}} = \frac{u_I^2}{\sigma_I^2} \quad (9)$$

式中, u_I 和 σ_I 分别为图像中 $I(t)$ 中一块均匀区域的均匀值和标准差。

(2) 均匀区域的标准差。标准差应随着斑块的降低而降低。

5.2 量化评估图像的后向散射系数保持情况的方法

(1) 含噪图像 $I(t)$ 与去噪图像 $\hat{R}(t)$ 之比

$$r_k = \frac{I(t)}{\hat{R}(t)} \quad (10)$$

理想情况下,比率 r_k 为纯斑块噪声的统计幅值,均值为 1。实际得到的值的均值与 1 相差越大,表明辐射度失真越厉害^[37]。

(2) 信号与均方差之比。 S/MSE 越大,表明分辨率保持得越好。设原始的无噪图像为 $\hat{R}$,降噪后的图像为 $\hat{R}$,则有

$$S/MSE = 10 \cdot \log \frac{\sum_{\text{pixels}} R^2}{\sum_{\text{pixels}} (\hat{R} - R)^2} \quad (11)$$

- (3) 原始图像均值的保持。
- (4) 直方图保持,斑块的去除不应该改变原始图像的直方图形状。
- (5) 理想图像与去斑图像的均方误差。

5.3 量化评估保持边缘细节信息情况的方法

(1) 边缘品质图^[4]——用以衡量边缘保持程度

Frost 等为了得到每一个滤波器的量化估计,引入了边缘品质图(edge figure of merit)。具体步骤如下:

- ① 仿真一个含噪边缘(约含 50 到 200 个像素点的阶越边缘);
- ② 使用待测试的滤波器对仿真边缘进行滤波;
- ③ 用 Robert 梯度算子进行边缘检测,并门限化得到一个二值图;
- ④ 计算边缘品质图(FOM)。

假定图像 I 和 A , 分别表示理想的实际的单步阶越边缘,图像 I 中包含 N_I 个边缘点,图像 A 中包含 N_A 个边缘点,如果 d 是实际的边缘点到理想边缘的距离,那么可以定义 FOM 为

$$f_{\text{FOM}} = \frac{100}{\max(N_A, N_I)} \sum_{i=1}^{N_A} \frac{1}{1 + \beta d^2} \quad (12)$$

其中, β 是对偏差边缘像素的惩罚值(在这里选择 $\beta = 10$)。最理想的去斑,其 $f_{\text{FOM}} = 100\%$ 。形成二值边缘图的门限值的选取原则是选择使 f_{FOM} 达到最大值的值。

(2) 相关度

$$\gamma = \frac{\Gamma(\Delta R - \overline{\Delta R}, \Delta \hat{R} - \overline{\Delta \hat{R}})}{\sqrt{\Gamma(\Delta R - \overline{\Delta R}, \Delta R - \overline{\Delta R}) \cdot \Gamma(\Delta \hat{R} - \overline{\Delta \hat{R}}, \Delta \hat{R} - \overline{\Delta \hat{R}})}} \quad (13)$$

其中, $\Gamma(R_1, R_2) = \sum_{i=1}^K R_1 \cdot R_2$

R 是理想的无噪图像, $\hat{R}$ 是含噪图像的滤波结果。 ΔR 和 $\Delta \hat{R}$ 是 R 和 $\hat{R}$ 通过 3×3 像素的标准 Laplacian 算子的高通滤波结果。对于理想的边缘保持, γ 应该接近于 1^[38]。

(3) 边缘增强指数(EEI)^[39]

对于一个 n 像素长、1 像素宽的边缘,EEI 定义为

$$f_{\text{EEI}} = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{R}_{01} - \hat{R}_{02}|}{\sum_{i=1}^n |R_1 - R_2|} \quad (14)$$

其中, R_1, R_2 分别为此边缘两边的点,而 $\hat{R}_{01}, \hat{R}_{02}$ 为相应点的滤波值。 f_{EEI} 越高,表明滤波器的边缘保持能力就越强。

5.4 量化评估点目标的保持情况的方法

(1) 点特征保持指数(PPI)^[39]

$$f_{\text{PPI}} = \frac{\text{Mean}(\hat{T}_{\text{point}})}{\text{Mean}(\hat{T}_{\text{neighbor}})} \cdot \frac{\text{Mean}(T_{\text{neighbor}})}{\text{Mean}(T_{\text{point}})}$$

其中, $T_{\text{point}}, T_{\text{neighbor}}$ 分别表示原图像中的点目标和它

的邻域, $\hat{T}_{\text{point}}$ 、 $\hat{T}_{\text{neighbor}}$ 为相应的滤波值。 f_{PPI} 的值越大, 表明点目标保持的越好。

(2) 3 维显示点目标及其邻近区域。这种方法并不完全属于量化评估, 但却是各种文献中运用的最多、最有效的方法。

6 结论与展望

相干斑抑制已取得了丰硕的研究成果, 基本上能够满足去斑要求, 即在减少斑点噪声的同时又不破坏图像的空间分辨率以及边缘等细节信息。但事实上, 测试表明这些方法总是在去除斑点噪声和保持有用信息之间折衷, 不能够产生完全满意的效果; 单视图图像最难滤波, 不同的滤波器在单视图图像上获得的结果差异很大, 而且对于不同的传感器或不同的场景类型, 相对性能也不同。

进一步提高去斑性能, 可在如下方面做进一步的研究:

(1) 充分利用 SAR 图像数据原始形态——复数据。SAR 图像最原始的数据形式是复数据。但直至目前, 通常的去斑算法仅使用了 SAR 图像的幅度数据, 而忽略了相位信息, 基于复数据的方法仍没有得到充分的重视。对复数据建模并在其基础上研究去斑算法, 将可能成为今后提高去斑性能的突破口。

(2) 进一步研究小波分析在相干斑抑制领域的应用。从研究趋势来看, 从 20 世纪 70 年代末到 90 年代初, 去斑以空间域自适应方法为主, 从 90 年代后期, 自从 Donoho 将小波分析应用于图像去噪开始, 基于小波分析的方法异军突起, 逐渐成为了主流, 2000 年以后发表的去斑算法绝大部分是基于小波分析的。小波分析是新兴的数学工具, 通过研究 SAR 图像小波分解系数的统计模型, 并结合贝叶斯理论框架、马尔可夫随机场等理论, 可望更好地解决去斑问题。但是如何对 SAR 图像的小波分解系数进行建模以及参数估计问题也是具有挑战性的问题。

参考文献 (Reference)

- 1 Arseault H H, April G. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, **66**(11): 1160 ~ 1163.
- 2 Lee J S, Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. *IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, **2**(2): 165 ~ 168.
- 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 Frost V S, 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 Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, **4**(2): 157 ~ 165.
- 5 Derin H, Kelly P A, Vezina G, *et al.* Modeling and segmentation of speckled images using complex data [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, **28**(1): 76 ~ 87.
- 6 Hetzheim H. Using Martingale representation to adapt models for non-linear filtering [A]. In: *Proceedings of International Conference on Signal Processing* [C]. Beijing, China, 1993: 32 ~ 35.
- 7 Rignot E, Chellappa R. Segmentation of synthetic-aperture-radar complex data [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1991, **A8**(9): 1499 ~ 1509.
- 8 Frieden B R, Bajkova A T. Bayesian cross-entropy reconstruction of complex images [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(2): 219 ~ 226.
- 9 Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, **28**(6): 992 ~ 1000.
- 10 Hagg W, Sites M. Efficient Speckle filtering of SAR Image [A]. In: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '94)* [C], City Hall, Pasadena. California, USA, 1994, **4**: 2140 ~ 2142.
- 11 Lopes A, Nezry E, Touzi R, *et al.* Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(9): 1735 ~ 1758.
- 12 Nezry E, Lopes A, Touzi R. Detection of Structural and Textural Feature for SAR Images Filters [A]. In: *Proceedings of IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium* [C], Espoo, Finland, 1991, **4**: 2169 ~ 2172.
- 13 Fjørtoft R, Lebon F, Sery F, *et al.* A region-based approach to the estimation of local statistics in adaptive speckle filters [A]. In: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [C], Lincoln, Nebraska, USA, 1996, **1**: 457 ~ 459.
- 14 Meer P, Park R H, Cho K. Multi-resolution adaptive image smoothing [J]. *Computer Vision and Graphic Image Processing*, 1994, **56**(2): 140 ~ 148.
- 15 Ranganath S. Image filtering using multi-resolution representations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(5): 426 ~ 440.
- 16 Fosgate C H, Krim H, Irving W W, *et al.* Multiscale segmentation and anomaly enhancement of SAR imagery [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(1): 7 ~ 20.
- 17 Guo H, Odegard J E, Lang M, *et al.* Speckle Reduction via Wavelet Shrinkage with Application to SAR Based ATD/R [R]. Technical Report CML TR94-02, CML, Rice University, Houston, 1994.
- 18 Sveinsson J R, Benediktsson J A. Speckle reduction in the complex wavelet domain [A]. In: *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [C], CD Rom, Sydney, Australia,

- 2001;2346 ~ 2348.
- 19 Simoncelli E P, Adelson E H. Noise removal via Bayesian wavelet coring[A]. In: Proceedings 3rd International Conference on Image Processing[C], Lausanne, Switzerland, 1996, 1:379 ~ 382.
- 20 Malfait M, Roose D. Wavelet based image denoising using a markov random field a prior model[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(4):549 ~ 565.
- 21 Achim A, Tsakalides P, Bezerianos A. SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed modeling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(8): 1773 ~ 1784.
- 22 Crouse M S, Nowak R D, Baraniuk R C. Wavelet-based signal processing using hidden markov models[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(4):886 ~ 902.
- 23 Hua X, Pierce L E, Ulaby F T. SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(10): 2196 ~ 2212.
- 24 Achim A, Bezerianos A, Tsakalides P. Ultrasound image denoising via maximum a posteriori estimation of wavelet coefficients[A]. In: Proceedings of 23-rd Annual International Conference of the IEEE-EMBS (EMBC-2001) [C], Istanbul, Turkey, 2001, 3: 2553 ~ 2556.
- 25 Achim A, Bezerianos A, Tsakalides P. Novel Bayesian multiscale method for speckle removal in medical ultrasound images[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 20(8):772 ~ 783.
- 26 Achim A, Bezerianos A, Tsakalides P. An alpha-stable based bayesian algorithm for speckle noise removal in the wavelet domain[A]. In: Proceedings of 5th IEEE EURASIP Biennial International Workshop on Nonlin. Signal and Image Processing (NSIP-01)[C], Baltimore, Maryland, USA, 2001:1 ~ 4.
- 27 Achim A, Bezerianos A, Tsakalides P. SAR image denoising: a multiscale robust statistical approach[A]. In: Proceedings of 14th International Conference on Digital Signal Processing (DSP 2002) [C], Santorini, Greece, 2002, 2:1235 ~ 1238.
- 28 Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, *et al.* Adaptive restoration of images with speckle[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, 35(3):373 ~ 383.
- 29 Lopes A, Nezry E, Touzi R, *et al.* Maximum a posteriori filtering and first order texture models in SAR images[A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Washington, D C, 1990:2409 ~ 2412.
- 30 Baraldi A, Parmiggiani F. A modified version of the SAR speckle filter based on structure detection[A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium, CD-ROM Version[C], Pasadena CA, 1994, 4:2168 ~ 2172.
- 31 Baraldi A, Parmiggiani F. A refine Gamma MAP SAR speckle filter with improved geometrical adaptively[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(5):1245 ~ 1257.
- 32 Lopes A, Bruniquel J, Sery F, *et al.* Optimal Bayesian texture estimators for speckle filtering and classification of polarimetric data[A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Singapore, 1997:1044 ~ 1046.
- 33 Boucher J M, Hillion A. Non-linear filtering and edge detection in speckled radar images[A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Edinburgh, Scotland, 1988, 3:1267 ~ 1268.
- 34 Wu Y, Maytre H. Smoothing speckled synthetic aperture radar images by using maximum homogeneous regions filters[J]. Optical Engineering, 1992, 31(8):1785 ~ 1792.
- 35 Walessa M. Texture preserving despeckling of SAR images using GMRFs[A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Hamburg, Germany, 1999, 3: 1552 ~ 1554.
- 36 Donoho D L, Johnstone I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrink[J]. Journal of the American Statistical Association, 1995, 90(432):1200 ~ 1224.
- 37 Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images [M]. Boston: ArtechHouse, 1998.
- 38 Ioannidis A, Kazakos D, Watson D D. Application of median filtering on nuclear medicine scintigram images[A]. In: Proceedings of 7th International Conference on Pattern Recognition [C], Montreal, Canada, 1984:33 ~ 36.
- 39 Sheng Yong-wei, Xia Zong-guo. A comprehensive evaluation of filters for radar speckle suppression[A]. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C], Lincoln, Nebraska USA, 1996, 3:1559 ~ 1561.