

基于斑点统计特性保持的SAR影像迭代滤波

李 玉, 王姝运, 赵泉华

(辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院遥感科学与应用研究所, 辽宁阜新 123000)

摘要: 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像中的斑点现象是地物后向散射信号相互干扰产生的,其虽然类似噪声却涉及地物目标的散射特征.同一地物目标的散射特征可通过斑点统计分布模型来刻画,因此降噪过程中可通过恢复影像斑点的统计分布特性来保留斑点包含的地物散射信息.基于该思想,提出一种基于斑点统计特性保持的SAR影像迭代滤波算法.该算法假设给定SAR影像的统计分布函数是先验已知的,即建模为混合Gamma分布,其分布参数可利用影像的像素值估计;接着基于构建的混合Gamma分布模型,运用EM(Expectation Maximization)算法分割影像中的同质区域;再针对不同同质区域,选取拟合误差较大的灰度级,根据分割结果计算像素值为该灰度级的像素的密度,判断其是否是异常像素,并对异常像素运用Frost滤波器进行降噪.重复上述步骤,直到滤波后的影像直方图较好地服从统计分布函数.GF-3和Radarsat-2 SAR影像数据实验结果表明,该算法在保证影像质量的前提下,不仅能获得较好的统计建模结果,而且较好地抑制了相干斑噪声,实现影像降噪.

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 相干斑抑制; 影像直方图; 统计分布函数; 异常像素检测; 统计特性保持

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)09-1809-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20201281

Iterative Filtering of SAR Image Based on Speckle Statistical Characteristic Preservation

LI Yu, WANG Shu-yun, ZHAO Quan-hua

(Institute for Remote Sensing Science and Application, School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: The speckle phenomenon in synthetic aperture radar (SAR) images is caused by the mutual interference of backscattering signals of ground objects. Although it is similar to noise, it involves the scattering characteristics of ground objects. The scattering characteristics of the same ground object can be described by the speckle statistical distribution model. Therefore, in the process of noise reduction, the scattering information of the ground object contained in the speckle can be preserved by restoring the statistical distribution characteristics of speckle. Based on this idea, an iterative filtering method of SAR image based on speckle statistical characteristic preservation is proposed. The proposed method assumes that the statistical distribution function of a given SAR image is known a priori, namely the mixture Gamma distribution, and its distribution parameters can be estimated by the pixel values of the image. Then, the EM (Expectation Maximization) algorithm is used to segment the SAR image based on the mixture Gamma distribution, so as to obtain the homogeneous regions in the image. Subsequently, for different homogeneous regions, select the gray levels with larger fitting errors, calculate the densities of the pixels whose values are the gray levels according to the segmentation results, and judge whether they are abnormal pixels, and the abnormal pixels are filtered by Frost filter. Repeat above procedure until the histogram of filtered image fits the statistical distribution function well. Experimental results of GF-3 and Radarsat-2 SAR image show that, on the premise of maintaining image quality, the proposed method can not only obtain better statistical modeling results, but also suppress speckle well and achieve image denoising.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); speckle reduction; image histogram; statistical distribution function; abnormal pixels detection; statistical characteristic preservation

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统具有全天时、全天候和高分辨率的对地观测能力^[1]. 在 SAR 系统的成像过程中,其接收的散射回波随着散射系数上下波动,由此 SAR 影像将呈现出随机的亮、暗像素,整体上表现为明显的颗粒状外观,即所谓的“斑点”. 斑点的存在不仅降低了影像的视觉效果,而且也降低了后续分类、目标检测和识别等处理的精度^[2]. 因此,相干斑抑制是 SAR 影像处理的主要内容之一.

SAR 影像相干斑抑制方法主要包括空域滤波、偏微分各向异性扩散滤波及变换域滤波. 较常采用的经典空域降噪算法有 Lee 滤波^[3]、Kuan 滤波^[4]、Frost 滤波^[5]、Gamma MAP(Maximum A Posteriori)^[6]滤波算法以及它们的改进算法^[7,8]等. 然而,该类算法受局域窗口尺度的影响较大,存在噪声抑制不充分且难以较好保留目标边缘等问题. Yu 等人^[9]提出了降低斑点的各向异性扩散(Speckle Reducing Anisotropic Diffusion, SRAD)算法. 该方法首次将各向异性扩散引入到 SAR 影像乘性相干斑抑制中. 其改进算法也相继被提出^[10-12]. 该类算法大多利用滑动窗口估计的局部统计量自适应地控制扩散滤波的方向与强度,能在相干斑抑制与边缘细节保持上实现较好的平衡. 但计算量较大且难以确定合适的迭代运算次数. 常见的变换域方法包括小波变换^[13]、Curvelet 变换^[14]和 Contourlet 变换^[15]等. 该类方法主要利用斑点噪声频谱特性与实际信号在频域上的差异,通过自适应阈值降低高频系数来抑制噪声,但边缘信息也存在于高频信号中,因而该类方法容易产生边缘弱化和失真. 上述滤波算法均属于局部加权平均,只考虑了影像的局部邻域信息,没有充分利用影像的结构信息. Buades 等人^[16]提出了非局部均值(Non-Local Means, NLM)滤波算法. 该方法针对加性噪声,在更大范围内寻找相似块,利用非局部特性对相似影像块进行加权平均从而估算影像的真实值,为提高影像噪声抑制性能提供了新思路. 随后, Dabov 等人^[17]对 NLM 算法进行改进,提出了三维匹配块(3Dimensional Matching Block, BM3D)算法,即将变换域及非局部均值相结合,利用影像块之间的相似性进行匹配分类,提升了去噪效果. 但该算法是通过加性噪声模型得来的,而相干斑则是基于乘性噪声. Kervrann 等人^[18]利用求贝叶斯风险的方法重新定义了影像块之间的相似度,提出了 Bayesian NL-means 算法,最终应用在了 SAR 影像降噪上^[19],但这种滤波方法不是无偏的. Deledalle 等人^[20]对 Bayesian NL-means 算法做出了改进,提出了 PPB(Probabilistic Patch-Based)滤波器. 该滤波器利用概率方法定义影像块之间的相似度,取得较好滤波效果,但由于其迭代式滤波耗时过长,不利于实际应用. 还有更多的学者研究基于 NLM 的相干斑抑制算法,

并取得了一定的成果^[21-23]. 此外, Olshausen 和 Field^[24]提出了基于字典学习的稀疏表示方法,利用几个字典原子的线性组合来重建图像并进行滤波. 由于其自适应性强、图像重建效果好等优点,已成为当前研究的热点. 但 SAR 影像中相干斑的存在会使得字典训练结果中含有斑点,导致基于该训练完的字典进行去噪的结果中仍存在较多的斑点噪声.

斑点噪声与影像中其它类型的噪声有着本质上的区别. 严格地说,相干斑噪声不应该仅仅被视为无用信号,是包含地物反射特性信息和噪声的混合体. 上述滤波算法都以平滑斑点噪声为目标,而没有考虑保留其蕴含的有用信息. 本文尝试将相干斑看作一种影像信号,提出了基于斑点统计特性保持的 SAR 影像迭代滤波算法. 与其它空域滤波器不同的是,该滤波算法从灰度级而非单个像素的角度出发,旨在通过使 SAR 影像的直方图尽可能地拟合先前假设的统计模型的分布函数来实现影像降噪,从而保持斑点的统计特性.

2 斑点统计特性保持的迭代滤波

2.1 降噪模型及统计模型

令 z 表示给定 SAR 影像的像素图, z_i 为影像上像素 i 的强度值, $i \in H$ 为像素点索引, $H = \{1, \dots, n\}$ 为像素索引集, n 为总像素数, $z_i \in G = \{0, \dots, g-1, \dots, 255\}$, G 为强度集合, $g = 1, \dots, 256$ 为灰度级索引, 则 $G_g = g-1$. 令 $H_g = \{i; z_i \in G_g\}$ 表示强度值为 $g-1$ 的像素索引集合. $n_g = \#H_g$ 为 H_g 中像素数, $\#$ 为求取集合中元素数的操作. 所以,影像的灰度直方图可表示为 $\{q_g = n_g / n\}$, q_g 可视为离散概率密度函数的估计. 从统计学的角度来看,影像可以被视为从连续随机分布中采样的数据集,该分布具有已知的概率密度函数(probability density function, pdf) \hat{q}_g , 其定义了给定像素值在影像 z 内发生的可能性. 可以用给定的样本来估计概率密度函数的参数.

与传统上乘性斑点噪声模型和基于均值的加性噪声模型均不相同,提出的噪声模型定义在影像直方图和拟合的 pdf 上,

$$q_g = \hat{q}_g + \varepsilon_g \quad (1)$$

其中, ε_g 是由于斑点噪声而引起的影像灰度直方图与分布函数之间的拟合误差, 则总拟合误差可表达为,

$$\varepsilon_{\text{total}} = \sum_{g=1}^{256} \varepsilon_g \quad (2)$$

根据式(1)噪声模型,设计的滤波器将通过逐步调整各灰度级中像素数 n_g , 尽可能减小各灰度级的拟合误差 ε_g , 从而减少总拟合误差 $\varepsilon_{\text{total}}$, 使影像直方图能更高程度地遵循先验假设统计分布.

由于不同地物具有各异的散射特性,因此其斑点噪声服从的统计分布规律亦各不相同. 为了使设计的

滤波方法能够精准恢复各类地物斑点噪声的统计分布特性,首先需要将给定SAR影像按地物分割为不同的同质区域.对于SAR强度影像而言,各同质区域的像素服从不同的Gamma分布,因而SAR强度影像可建模为包含 K (为同质区域数)个分量的混合Gamma分布^[25],即运用 K 个参数不同的Gamma分布表达 K 种不同的地物目标,其概率密度函数为,

$$p(z_i | w, a, \beta) = \sum_{k=1}^K w_k F(z_i, \alpha_k, \beta_k) = \sum_{k=1}^K w_k \frac{\beta_k^{-\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)} (z_i)^{\alpha_k - 1} \exp\left(-\frac{z_i}{\beta_k}\right) \quad (3)$$

其中, $F(z_i, \alpha_k, \beta_k)$ 是形状参数为 α_k 和尺度参数为 β_k 的Gamma分布, k 为同质区域索引, K 为同质区域数, $\alpha = \{\alpha_k; k = 1, \dots, K\}$, $\beta = \{\beta_k; k = 1, \dots, K\}$, $w = \{w_k; k = 1, \dots, K\}$, w_k 为第 k 个Gamma分布的混合比,其满足

$$\sum_{k=1}^K w_k = 1 \quad (4)$$

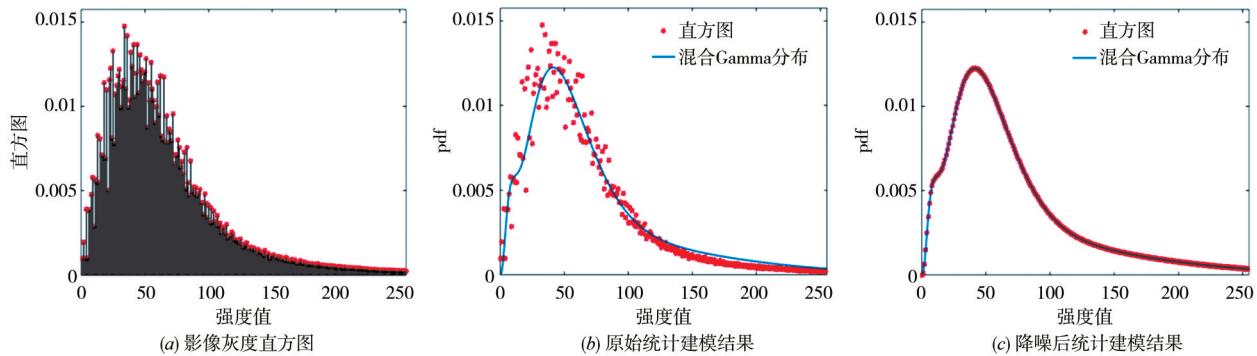


图1 相干斑统计分布图

2.2 影像分割

基于影像混合模型,可采用EM(Expectation Maximization)算法^[26]实现SAR影像分割,并设分割结果为 $s, s_i \in \{1, \dots, K\}$ 为像素 i 的类属标号.

EM算法是一个迭代求解的过程,迭代过程大致上可以划分为两步:E-步:求隐藏随机变量的分布;M-步:最大化目标函数.在E步中假设当前估计的模型参数是准确的,然后用它计算求得隐藏随机变量的分布.在M步中又假设当前的概率分布是正确的,重估模型参数使评价函数最大化.经过反复迭代,算法最终收敛到最佳估计值.

在统计学上假设各像素强度之间相互独立,则SAR影像的概率分布可表示为

$$p(z | w, a, \beta) = \prod_{i=1}^n p(z_i | w, a, \beta) = \prod_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^K w_{ik} \frac{\beta_k^{-\alpha_k}}{\Gamma(\alpha_k)} (z_i)^{\alpha_k - 1} \exp\left(-\frac{z_i}{\beta_k}\right) \right] \quad (6)$$

令 $\alpha_k, k = 1, \dots, K$,等于影像视数,利用最小二乘原理求得参数 w 和 β 的估计值.

$$\{\hat{w}, \hat{\beta}\} = \arg \min_{\{w, \beta\}} \sum_{g=1}^{256} \|q_g - p_g\|_2^2 \quad (5)$$

根据统计建模结果,可求得每个灰度级的拟合误差 ε_g 和总拟合误差 ε_{total} ,从而可以获得较大拟合误差 ε_g 所对应的灰度级 g 以及统计分布函数的整体拟合情况.

算法的降噪思想如图1所示.图1(a)为影像灰度直方图,图1(b)为混合Gamma分布对原始SAR影像的统计建模结果.通过逐渐调整影像灰度直方图,尽可能减小统计分布拟合误差,使降噪影像达到如图1(c)所示的理想统计建模结果,从而使SAR强度影像更好地服从先验假设的统计分布函数,即混合Gamma分布.可以看出,提出的滤波算法试图保持SAR影像斑点噪声服从的统计分布特性,而不是简单地对其进行平滑处理.

其中,分量权重 w_{ik} 表示像素 i 隶属于类别 k 的先验概率.

$$\sum_{k=1}^K w_{ik} = 1 \quad (7)$$

根据贝叶斯定理^[27]可构建像素 i 隶属于类别 k 的后验概率为

$$X_{ik} = \frac{w_{ik} F(z_i | a_k, \beta_k)}{\sum_{k'=1}^K w_{ik'} F(z_i | a_{k'}, \beta_{k'})} \quad (8)$$

E-步:对式(6)取对数,并取期望作为新的目标函数,即

$$J(w, a, \beta) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K X_{ik} \log [w_{ik} F(z_i | a_k, \beta_k)] \quad (9)$$

M-步:利用上式(9)对 w_{ik} 和 β_k 求偏导,并令其为0,可得到分量权重 w_{ik} 和尺度参数 β_k 的解析式为

$$w_{ik} = \frac{X_{ik}}{\sum_{k'=1}^K X_{ik'}} \quad (10)$$

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ik} z_i}{\alpha_k \sum_{i=1}^n X_{ik}} \quad (11)$$

2.3 异常像素检测及其滤波

定义像素 i 的空间邻域是以该像素为中心、边长为 $(2 \times \text{SpatialEps} - 1)$ 个像素的矩形像素区域 W_i , 其中 SpatialEps 为像素 i 的空间邻域半径. 令 H_i 表示 W_i 内像素的索引集合, 若 $s_i = s_j, j \in H_i$, 则像素 i 和 j 为同类地物像素. 定义 W_i 内包含的和像素 i 同类的像素数为该像素的点密度 $M_i = \#\{j; s_j = s_i, j \in H_i\}$. 给定阈值 P , 若 $M_i > P$, 则表明像素 i 与邻域像素分割为同一类地物的概率较大, 其与邻域像素的差异程度较小; 反之, 则表明像素 i 与其邻域像素的差异性较大, 其为异常像素的可能性也越大, 从而

将该像素视为待滤波像素. 对于一幅尺度为 $m \times m$ 像素的影像, SpatialEps 和 P 取值的表达式为,

$$\text{SpatialEps} = \left\lceil \frac{\mu \times m}{2} \right\rceil \quad (12)$$

$$P = \left\lceil \frac{(2 \times \text{SpatialEps} - 1)^2}{2} \right\rceil \quad (13)$$

其中, “ $\lceil \cdot \rceil$ ” 为向上取整的符号, μ 取值在 0.02~0.03 之间. 对给定 SpatialEps , 像素 i 的空间邻域内有 $(2 \times \text{SpatialEps} - 1)^2$ 个像素. 根据式(13)可知, P 为 W_i 内像素数的一半, 这样取值的原因是如果像素 i 不是异常像素, 则像素 i 的强度或与之相近的强度应该在 W_i 内占主导地位, 那么该像素所属的类别应该在 W_i 内的主要类别, 因而与其分割为相同类别的像素数较多, 密度较大. 图 2 所示为异常像素检测示例.

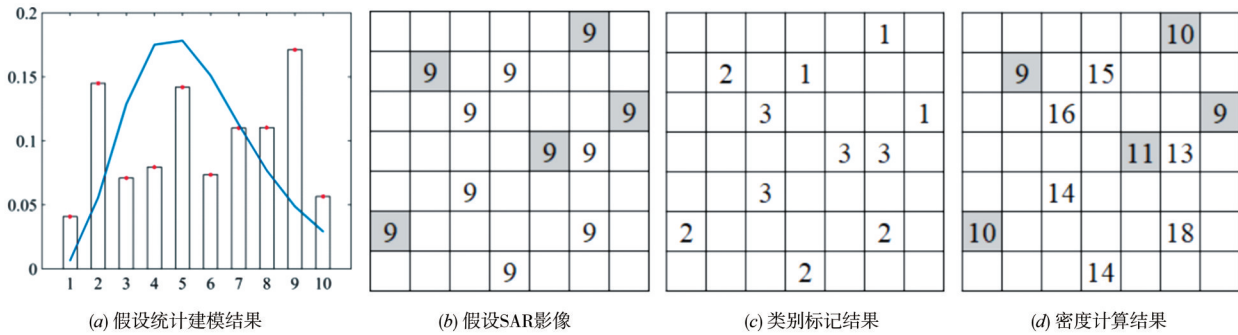


图 2 异常像素检测示意图

图 2(a) 所示为假设的统计建模结果. 根据图 2(a), 可以发现强度值 9 具有较大的拟合误差, 然后在原影像中定位强度值为 9 的像素, 如图 2(b) 所示. 这些像素对应的类别标记结果如图 2(c) 所示. 根据类别标记结果计算这些像素的密度值, 结果如图 2(d) 所示. 根据图 2(d), 找到小于阈值 P 的像素密度值 M_i , 与这些 M_i 相对应的像素被判断为异常像素, 例如 $P = 13$, 则图 2(d) 中深色区域为小于该阈值的像素密度值, 图 2(b) 中的深色区域为对应的异常像素, 即待滤波像素.

在强度值为 G_g 的像素索引集合 H_g 中, 异常像素的索引集合可表示为 $A_g = \{i; i \in H_g, M_i < P\}$. 对于异常像素 $i \in A_g, g = 1, \dots, 256$, 运用 Frost 滤波器^[5]进行滤波, 以减小影像直方图与分布函数之间的总拟合误差 ϵ_{total} , 从而使影像直方图更好地服从统计模型分布.

2.4 算法流程

图 3 所示为提出算法的流程图. 首先, 估计统计分布函数的参数, 得到混合 Gamma 分布的概率密度函数; 其次, 利用概率密度函数进行统计建模, 从而可以计算各灰度级的拟合误差, 并选取具有较大拟合误差的灰度级. 同时, 基于混合 Gamma 分布, 运用 EM 算法进行

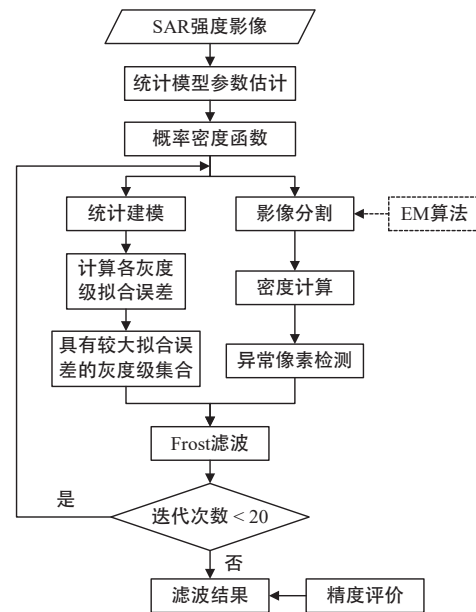


图 3 算法流程图

影像分割得到分割结果, 据此计算像素密度, 根据像素密度的大小判断其是否为异常像素; 然后, 结合拟合误

差较大的灰度级和异常像素检测结果,运用典型的 Frost 滤波器进行降噪,实现一次迭代滤波;最后,若迭代次数满足要求,则输出滤波结果,若不满足,则再次进行迭代降噪过程.

3 实验结果及分析

本文采用 2 幅真实 SAR 影像进行降噪实验,以验证提出算法的有效性. 实验影像数据如图 4 所示. 其中,图 4(a)为 C 波段 GF-3 单视 SAR 影像数据,尺度为 500×500 像素,分辨率为 3.12m,包含河流,耕地和居民地. 图 4(b)为 C 波段 Radarsat-2 单视 SAR 影像数据,尺度为 350×350 像素,距离向和方位向的分辨率分别为 7.4m 和 5.2m,包含草本沼泽和河流.

对比算法包括 Enhanced Lee 滤波算法^[7]、PPB 滤波算法^[20]和 GA-NLM 滤波算法^[23]. 对用于算法比较的滤波器,其滤波参数均采用文献中推荐的最佳参数,即 Enhanced Lee 采用 5×5 像素的局域窗口,PPB 采用 7×7 像素的影像块、 21×21 像素的搜索窗口和 25 次迭代,GA-NLM 采用算法中介绍的匹配函数,根据实验影像数据自适应确定像素的影像块和搜索窗口尺度.

图 5(a)和图 5(b)所示为 GF-3 和 Radarsat-2 影像直方图及其混合 Gamma 分布拟合结果,图 5(c)为影像降

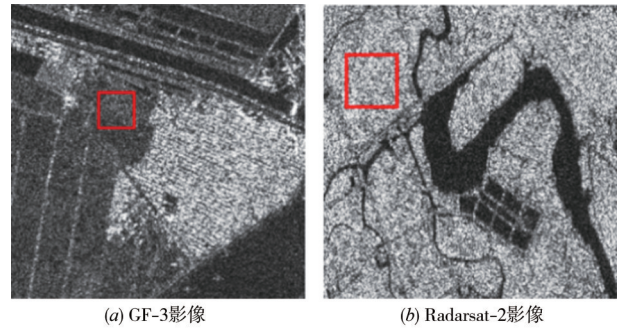


图 4 SAR 影像数据

噪中拟合总误差 ϵ_{total} 随迭代次数 D^i 的变化规律. 由图 5(a)和图 5(b)可知,影像直方图在总体变化趋势上与拟合的统计分布函数相符,但由于受到斑点的影响,两者的拟合在某些强度值上产生了较大的误差. 因而,提出算法将以减少该误差为目标,使降噪结果直方图较好服从统计分布函数. 由图 5(c)可知,随着迭代次数的增加, ϵ_{total} 开始快速减少,然后缓慢降低,最后基本保持不变,达到稳定收敛的状态. 迭代终止可选在 ϵ_{total} 的拐点处,此时即可得到较好的降噪结果,精度损失应在允许的范围之内. 在本实验中,为了保证提出算法的充分收敛,实验采用 20 次迭代.

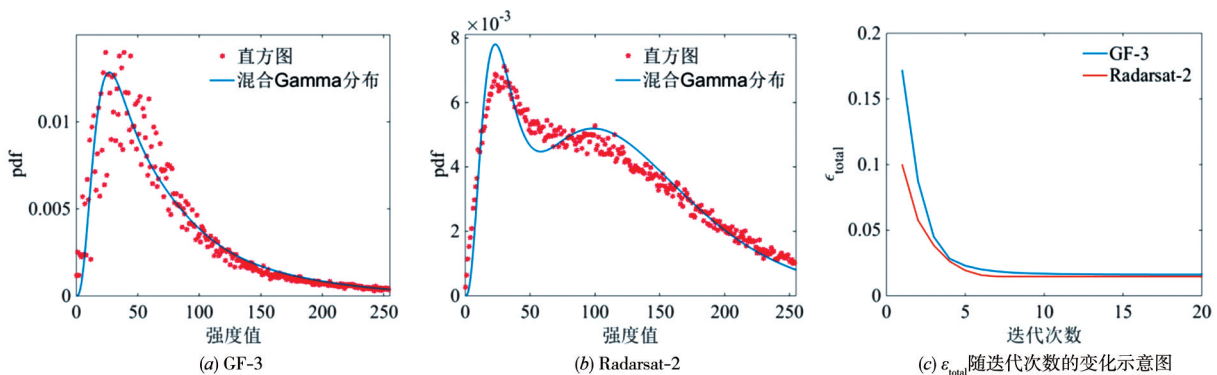


图 5 SAR 影像统计建模结果

图 6(a)~图 6(d)为 GF-3 影像降噪结果,图 6(e)~图 6(h)为 Radarsat-2 影像降噪结果. 从图 6 中可以看出,Enhanced Lee 算法的相干斑抑制能力较弱;基于非局部均值的迭代 PPB 和 GA-NLM 算法在同质区域的平滑效果较显著,降噪结果有了质的提升,但在包含边缘和纹理的复杂区域,容易产生过平滑现象. 二者相比而言,GA-NLM 算法的降噪结果中边缘较明显. 本文提出的基于斑点统计特性保持的滤波算法不仅具有平滑效果,同时降噪后的结果几乎保持了原影像的纹理结构.

图 7(a)~图 7(d)和图 7(e)~图 7(h)所示分别为不同算法对 GF-3 和 Radarsat-2 影像降噪结果的统计分布,其总拟合误差如表 1 所示. 从图 7 和表 1 可以看出,对比算

法降噪结果的影像直方图与统计分布函数之间的偏差较大,具有较大的总拟合误差. 这是由于对比算法致力于平滑影像中的斑点噪声,而忽略了斑点的统计特性. 在本文算法降噪影像的统计建模结果中,部分灰度级的拟合效果略有偏差,例如 GF-3 影像的拖尾部分与 Radarsat-2 影像的第二个低峰部分,但相较于原始影像的统计建模结果,在极大程度上降低了总拟合误差,且达到收敛后总拟合误差值较小,影像直方图整体上较好地服从统计模型分布,实现了斑点统计特性的保持.

GF-3 原始影像和不同算法降噪影像的分割结果如图 8(a)~图 8(e)所示, Radarsat-2 原始影像和不同算法降噪影像的分割结果如图 8(f)~图 8(j)所示. 由上述算法描述

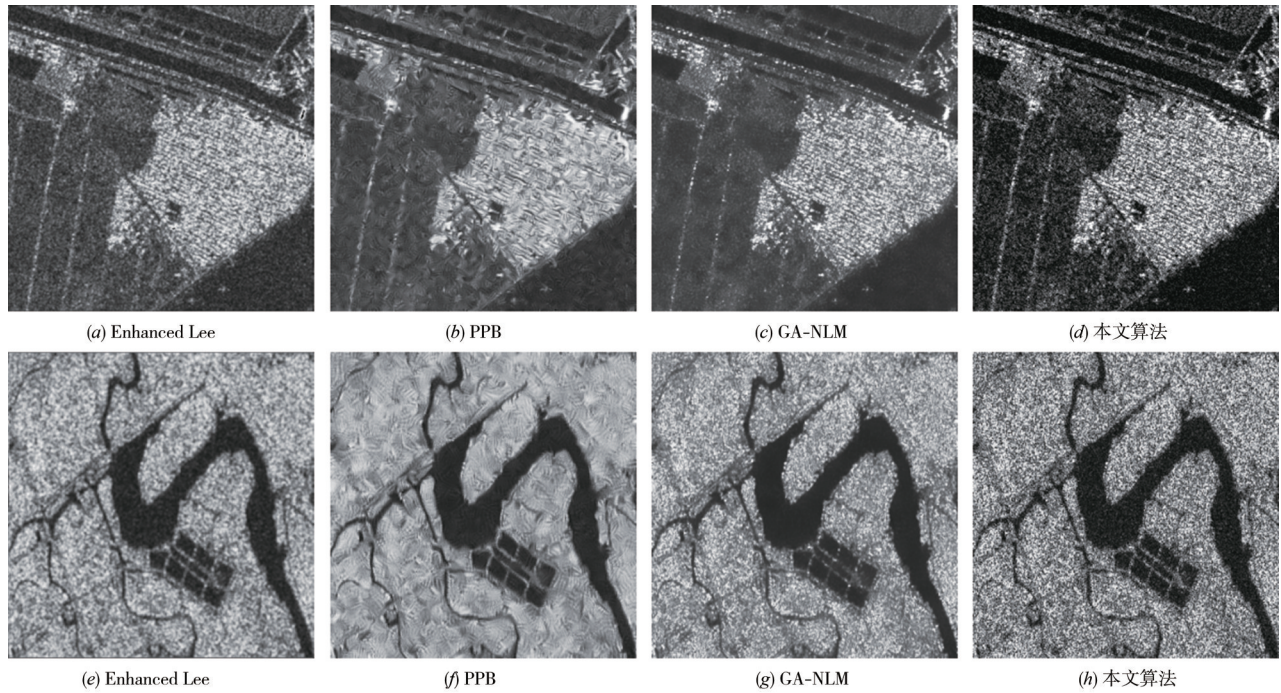


图6 SAR影像滤波结果

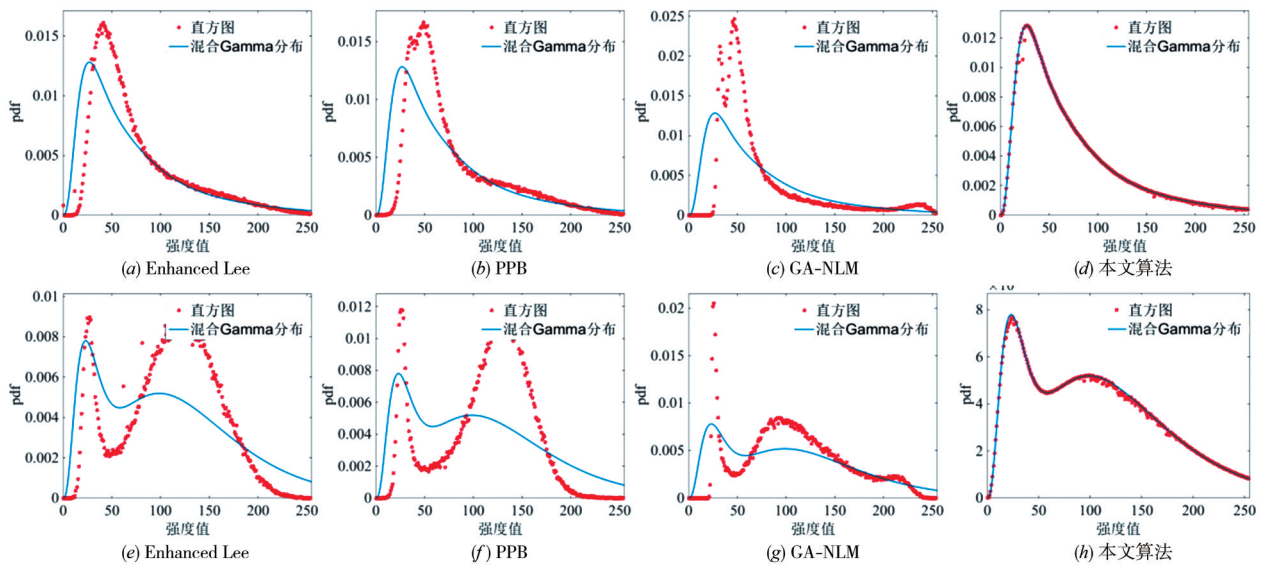


图7 不同算法降噪影像的统计建模结果

表1 不同算法降噪影像的总拟合误差

		原始影像	Enhanced Lee	PPB	GA-NLM	本文算法
ε_{total}	GF-3	0.1717	0.3379	0.4127	0.5961	0.0122
	Radarsar-2	0.0997	0.4680	0.6429	0.4060	0.0108

可知,较好的分割结果有助于增加异常像素检测的准确性,从而有利于更好地实现SAR影像降噪;而降噪后的影像有助于提高分割精度,得到较好的分割结果.因而,在实验迭代过程中,降噪结果和分割结果可以互相优化,从

图8(a)和图8(e)以及图8(f)和图8(j)中可以看出,本文算法降噪影像的分割结果确实优于原始影像的分割结果.且相比于对比算法降噪影像的分割结果,本文算法的分割结果更符合原始影像的地物类别,说明本文算法能够更好地去除同质区域中的异常斑点,同时降噪结果更好地保持了地物特征,有助于影像后续的分割解译.

为了定量评价算法的去噪效果,本文采用常规的SAR影像滤波评价指标,包括:均值偏差(Bias)^[28]、图像清晰度(Def)^[29]、等效视数(Equivalent Number of Looks,

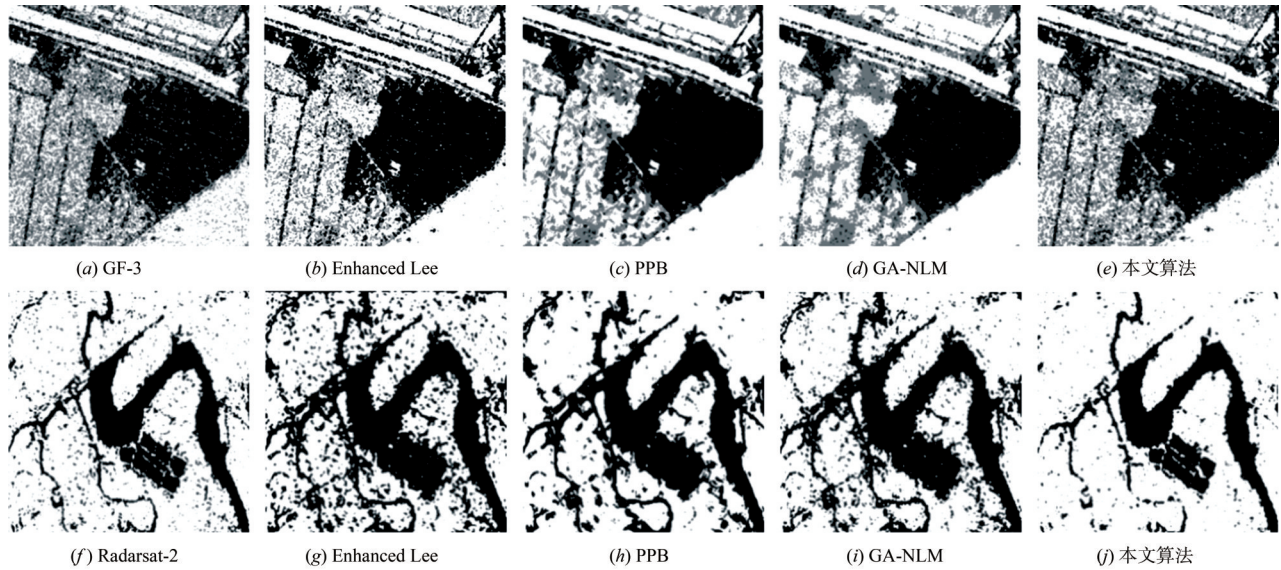


图 8 不同算法降噪影像的分割结果

ENL)^[30]和基于平均比的边缘保持度(Edge Preserved Degree based on Ratio Of the Average, EPD-ROA)^[31]. Bias 值越接近于零,表明滤波方法对图像均值的保持程度越好;Def 值越大,影像越清晰,算法保持地物真实反射特性的能力越强;ENL 越大,代表影像的噪声水平越低,算法抑制效果越好;EPD-ROA 越接近于 1,表明算法的边缘保持性能越好. 文中计算了 GF-3 和 Radarsat-2 影像中红色矩形框区域的 ENL 和整个影像沿水平方向(Horizontal Direction, HD)和垂直方向(Vertical Direction, VD)的 EPD-ROA. 各评价指标计算结果如表 2 所示.

从表 2 中数据可以看出,四种算法均在相干斑抑制和影像平滑上起到一定作用. 相比而言,从 Bias 和 Def 值可以看出,本文算法降噪结果对原始影像的均值保持程度最好,且降噪结果较为清晰,地物真实反射特性保持能力较强. 从 ENL 和 EPI 可以看出,本文算法的降噪能力明显优于 Enhanced Lee 滤波算法和 PPB 算法,略优于 GA-NLM 算法,同时具有最好的边缘保持能力. 究其

原因,Enhanced Lee 滤波算法采用局部特性,较难充分利用影像结构信息进行降噪,因而算法降噪能力和边缘保持能力都较弱;PPB 算法扩大了相似像素的区域搜索范围,提高了降噪和边缘保持性能,但 PPB 算法由于缺乏对参与滤波影像块的筛选,在一定程度上模糊影像细节的问题;GA-NLM 算法提出了自适应块匹配算法框架,并利用 Gabor 滤波器重新定义块相似性度量函数,以增强相似块度量的鲁棒性,因而具有较为客观的降噪和边缘保持效果;本文算法由于降噪目的不同,每次迭代过程中选择拟合误差较大且异常的强度像素,并非逐像素进行降噪,因而具有较好的边缘保持效果,且由于循环迭代过程,也较好地实现了相干斑抑制.

本文利用 MATLAB R2016a 平台,在含有 3 个 CPU,频率为 2.70GHz、内存为 8GB 的 Intel Core i5-6400 处理器上实现滤波算法. 算法效率通过运行时间来衡量. GF-3 和 Radarsat-2 影像在不同算法下的运行时间如表 3 所示. Enhanced Lee 滤波算法只需要滑动窗口的局部统

表 2 不同算法降噪结果的评价指数

		未滤波	Enhanced Lee	PPB	GA-NLM	本文算法
Bias	GF-3	0	-0.0054	0.0144	-0.0389	0.0039
	Radarsat-2	0	-0.0041	0.0167	-0.0273	0.0030
Def	GF-3	70.4102	23.6888	34.3061	36.9222	57.4378
	Radarsat-2	106.2565	29.8310	49.5979	51.8886	91.6773
ENL	GF-3	3.1564	11.5910	19.7139	26.1060	27.2472
	Radarsat-2	4.1244	18.8241	28.7543	37.2156	37.6133
EPD-ROA (HD)	GF-3	1	0.4347	0.6637	0.7647	0.8761
	Radarsat-2	1	0.5013	0.7005	0.7171	0.9086
EPD-ROA (VD)	GF-3	1	0.4049	0.6403	0.7314	0.8625
	Radarsat-2	1	0.4574	0.6629	0.6827	0.8925

计信息,然后进行自适应平均,时间性能较好;PPB算法和 GA-NLM 算法都属于非局部滤波器,它们需要在一个搜索区域内重复计算两个影像块的相似度,因此计算速度较慢,且 PPB 算法需要迭代,时间性能较差;本文算法为了减小拟合误差也需要迭代运算,因此运行时间略长,但在每次迭代中无需运用非局部方法逐像素降噪,从而比 PPB 算法的运行时间少。

表 3 运行时间

		Enhanced Lee	PPB	GA-NLM	本文算法
运行	GF-3	18.4294s	398.1560s	197.5388s	264.3000s
时间	Radarsat-2	8.8962s	227.8806s	95.0763s	118.0063s

4 结论

本文提出了一种基于斑点统计特性保持的 SAR 影像迭代滤波算法. 该算法利用影像的直方图信息,采用统计建模的方法,通过使影像直方图尽可能服从先前假设的统计模型分布函数来实现影像降噪,旨在保持斑点的统计特性,保留其中隐藏的信息,而不是单纯地将相干斑看作噪声,运用局部或非局部的方法逐像素对其进行平滑. 运用 GF-3 和 Radarsat-2 影像进行降噪实验,结果表明,在统计建模上,本文算法可以较大程度减少直方图拟合误差,整体上得到较好地统计建模结果,实现斑点统计特性的保持;在降噪上,本文算法具有一定程度地相干斑抑制效果,同时取得了较为理想的边缘保持效果,总体上得到较为可观的滤波结果。

参考文献

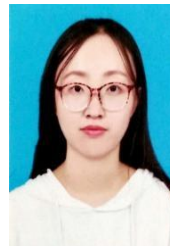
- [1] 蒋李兵,王壮,雷琳,等. 基于模型迭代匹配的单幅高分辨 SAR 图像遮挡建筑物高度估计方法[J]. 通信学报, 2013, 34(3): 68 – 75.
JIANG Li-bin, WANG Zhuang, LEI Lin, et al. Occluded building height estimation from single HR SAR image based on an iterative model matching technique[J]. Journal on Communications, 2013, 34(3): 68 – 75.(in Chinese)
- [2] 杨学志,叶铭,周芳,等. 采用混合特征相似性的极化 SAR 图像降噪算法[J]. 电子学报, 2016, 44(11): 2583 – 2591.
YANG Xue-zhi, YE Ming, ZHOU Fang, et al. Speckle reduction for PolSAR images using hybrid features similarity[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(11): 2583 – 2591.(in Chinese)
- [3] LEE J S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 17(1): 24 – 32.
- [4] KUAN 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.
- [5] FROST V S, STILES J A. 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 – 166.
- [6] LOPES A, NEZRY E, TOUZI R, et al. Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images[A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Washington DC, USA: IEEE, 1990. 2409 – 2412.
- [7] LEE J S. Refined filtering of image noise using local statistics[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 15(14): 380 – 389.
- [8] 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.
- [9] YU Y, ACTON S. Speckle reducing anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(11): 1260 – 1270.
- [10] 张良培,王毅,李平湘. 基于各向异性扩散的 SAR 图像斑点噪声滤波算法[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2250 – 2254.
ZHANG Liang-pei, WANG Yi, LI Ping-xiang. The filtering algorithm for SAR image speckle noise based on anisotropic diffusion[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2250 – 2254.(in Chinese)
- [11] LI H C, FAN P Z, KHAN M K. Context-adaptive anisotropic diffusion for image denoising[J]. Electronics Letters, 2012, 48(14): 827 – 829.
- [12] 朱磊,韩天琪,水鹏朗,等. 一种抑制合成孔径雷达图像相干斑的各向异性扩散滤波方法[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 179502-1 – 179502-11.
ZHU Lei, HAN Tian-qi, SHUI Peng-lang, et al. An anisotropic diffusion filtering method for speckle reduction of synthetic aperture radar images[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 179502-1 – 179502-11.(in Chinese)
- [13] SUMAIYA M N, KUMARI R S S. SAR image despeckling using heavy-tailed Burr distribution[J]. Signal, Image Video Processing, 2016, 11(1): 49 – 55.
- [14] CUI H, YAN G, SONG H. A novel curvelet thresholding denoising method based on chi-squared distribution[J]. Signal, Image Video Processing, 2015, 9(2): 491 – 498.
- [15] TIAN X, JIAO L, ZHANG X. Despeckling SAR images based on a new probabilistic model in nonsubsampled contourlet transform domain[J]. Signal, Image Video Processing, 2014, 8(8): 1459 – 1474.
- [16] BUADES A, COLL B, MOREL J. A non-local algorithm for image denoising[J]. Computer Vision and Pattern Rec-

- ognition, 2005, 2(7): 60 – 65.
- [17] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image restoration by sparse 3D transform-domain collaborative filtering[J]. *Browse Journals and Magazines*, 2007, 16(8): 2080 – 2095.
- [18] KERVRANN C, BOULANGER J, COUPE P. Bayesian non-local means filter, image redundancy and adaptive dictionaries for noise removal[A]. *International Conference on Scale Space and Variational Methods in Computer Vision*[C]. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2007. 520 – 532.
- [19] ZHONG H, LI Y W, JIAO L C. Bayesian nonlocal means filter for SAR image despeckling[A]. *Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*[C]. Xi'an, China: IEEE, 2009. 1096 – 1099.
- [20] DELEDALLE C A, DENIS L, TUPIN F. Iterative weighted maximum likelihood denoising with probabilistic patch-based weights[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(12): 2661 – 2672.
- [21] CHEN S B, HOU J H, ZHANG H, et al. De-speckling method based on non-local means and coefficient variation of SAR image[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(18): 1314 – 1316.
- [22] MARTINO G D, SIMONE A D, IODICE A, et al. Scattering-based nonlocal means SAR despeckling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(6): 3574 – 3588.
- [23] 陈世媛, 李小将. 基于自适应非局部均值的SAR图像相干斑抑制[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(12): 2683 – 2690. CHEN Shi-yuan, LI Xiao-jiang. SAR image despeckling based on adaptive non-local means[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(12): 2683 – 2690.(in Chinese)
- [24] OLSHAUSEN B A, FIELD D J. Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images[J]. *Nature*, 1996, 381(6583): 607 – 609.
- [25] 江金龙, 孙洪, 陈嘉宇, 等. SAR图像的Gamma混合分布建模方法[J]. *信号处理*, 2014, 30(5): 504 – 510. JIANG Jin-long, SUN Hong, CHEN Jia-yu, et al. Gamma mixture distribution modeling method with SAR image[J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, 30(5): 504 – 510.(in Chinese)
- [26] DEMPSTER A P, LAIRD N M, RUBIN D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm[J]. *Journal of Royal Statistical Society(Series B)*, 1977, 39(1): 1 – 38.
- [27] 赵泉华, 石雪, 王玉, 等. 可变类空间约束高斯混合模型遥感图像分割[J]. *通信学报*, 2017, 38(2): 34 – 43. ZHAO Quan-hua, SHI Xue, WANG Yu, et al. Remote sensing image segmentation based on spatially constrained Gaussian mixture model with unknown class number[J]. *Journal of Communications*, 2017, 38(2): 34 – 43.(in Chinese)
- [28] 王晓军, 孙洪, 管鲍. SAR图像相干斑抑制滤波性能评价[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(9): 1165 – 1183. WANG Xiao-jun, SUN Hong, GUAN Bao. Evaluation for coherent speckle suppression filters of SAR images[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(9): 1165 – 1183.(in Chinese)
- [29] 薛存金, 温晓阳, 董庆. SAR图像的自适应边缘保持去噪滤波[J]. *应用科学学报*, 2011, 29(1): 44 – 50. XUE Cun-jin, WEN Xiao-yang, DONG Qing. Adaptive despeckling filter with edge-preservation for SAR image[J]. *Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering*, 2011, 29(1): 44 – 50.(in Chinese)
- [30] PARRILLI S, PODERICO M, ANGELINO C V, et al. Nonlocal SAR image denoising algorithm based on LMMSE wavelet shrinkage[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(2): 606 – 616.
- [31] FENG H, HOU B, GONG M. SAR image despeckling based on local homogeneous region segmentation by using pixel relativity measurement[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2724 – 2737.

作者简介



李 玉 男, 1963年3月出生, 吉林省长春人. 现任辽宁工程技术大学教授、博士生导师. 主要研究方向为遥感数据处理理论与基础应用研究, 包括空间统计、随机几何、模糊数学在遥感数据建模与分析中的应用、目标几何与特征提取.
E-mail: liyu@lntu.edu.cn



王姝运 女, 1994年11月出生, 河北省张家口人. 硕士. 主要研究方向为遥感图像处理.
E-mail: 761367857@qq.com



赵泉华 女, 1978年出生, 河北省承德人, 现任辽宁工程技术大学教授、博士生导师. 主要研究方向为遥感图像建模与分析以及随机几何在遥感图像中的应用.
E-mail: zqhlby@163.com