

文章编号: 1000-050X(2001)04-0315-05

文献标识码: A

一种基于小波分析的 SAR 图像斑点噪声滤波算法

卜方玲¹ 徐新¹

(1 武汉大学电子信息学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 利用多分辨率小波分析的理论, 分析了 SAR 图像经多分辨率小波分解后生成的系列子图像中信号与斑点噪声能量分布特性及其信噪比的变化规律, 提出了一种新的小波域斑点噪声的滤波算法, 该滤波算法的阈值取决于各细节子图像的序列长度、方差及其所在的层次, 并采用真实 SAR 数据和模拟加噪图像进行了试验。结果表明, 该算法具有较强的噪声抑制和较好的边缘、细节保护能力及目视效果。

关键词: 多分辨率小波分析; 斑点噪声; 阈值; 有效视数

中图法分类号: TP751.1; P237.3

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 是一种工作在微波波段的相干成像雷达, 它以高分辨率和全天候、全天时的数据获取能力而成为世界各国普遍采用的对地观测技术。和任何一种相干成像系统类似, SAR 图像不可避免地受到斑点噪声 (speckle) 的困扰。实践证明^[1], 在影响 SAR 图像质量的各类噪声中, 斑点噪声的影响远比其他噪声大。斑点噪声的存在使 SAR 图像灰阶分辨率可解译性明显变差, 同时也降低了图像的空间分辨率, 隐藏了图像的精细结构, 严重影响了 SAR 图像的目标识别、特征提取、分类和匹配等后续处理和应用。

SAR 图像的斑点噪声通常表示为非相关的乘性噪声模型^[2 3 4], 即

$$z = vx \quad (1)$$

式中, z 为像素的灰度; x 表示信号; v 表示噪声。对该类噪声的滤波处理不能沿用常规的滤波方法。目前斑点噪声的滤波技术可分为两大类: ① 成像前的多视处理技术, 该技术在抑制斑点噪声的同时, 降低了 SAR 图像的空间分辨率; ② 成像后的数字图像滤波技术, 该技术已研究了十多年, 提出了许多斑点噪声的滤波算法, 如 Sigma 滤波、Lee 滤波、增强 Lee 滤波、Frost 滤波、Lopes 滤波等等。这些滤波方法均力求在抑制斑点噪声和保护边缘之间作较好的平衡。现阶段, 在对斑点噪声滤波的同时如何保持图像的纹理和边缘仍然是

SAR 图像斑点噪声滤波技术研究的核心课题。

小波变换是一种调和变换, 它把空间域中有限的能量信号映射到尺度空间有限分布的能量上。与傅里叶变换相比, 小波变换同时具有空间域和频域的局域性, 它能使滤波过程适应信号频率的局域变化。因此, 小波变换能在滤出噪声和保护细节之间取得较好的平衡。

近年来, 小波变换广泛地应用于数字图像处理。对图像噪声的滤波一般基于加性的白噪声模型, 采用软门限滤波方法, 其阈值大都根据 David 的理论^[5]来选取, 即

$$\theta = \sigma \times \sqrt{2 \times \lg(n)/n} \quad (2)$$

式中, θ 为阈值; σ^2 为噪声方差; n 为序列长度。由于斑点噪声单视数时呈瑞利分布^[2], 该滤波方法应用于低视数 SAR 图像斑点噪声滤波时, 难以达到理想效果。

1 二维多分辨率小波分析

图像的小波分析是建立在二维小波变换及相应的多分辨率分析基础上的, 二维小波多分辨率分析 (2-dimension multi resolution analysis, 2-DM RA) 是由一维多分辨率分析 (1-DM RA) 的有关张量积形成的。

假设一元尺度函数 $\phi(x)$ 生成一个分辨率分析 $\{V_{j_1}\}$, 而一元尺度函数 $\phi=\phi(y)$ 生成另一个分辨率分析

辨分析 $\{V_{j_2}\}$, 则 V_{j_1} 与 V_{j_2} 的张量积空间为:

$$V_j^2 = V_{j_1} V_{j_2} \quad (3)$$

$$\phi(x, y) = \phi(x) \phi(y) \quad (4)$$

$$\phi_{j_1, k_1, k_2}(x, y) = 2^j \phi(2^j x - k_1) \phi(2^j y - k_2),$$

$(k_1, k_2) \in \mathbf{Z}^2$ 是 V_j^2 的一组规范正交基。且

$$V_{j+1}^2 = \begin{cases} V_{j_1+1} \otimes V_{j_2+1} \\ (V_{j_1} \oplus W_{j_1}) \otimes (V_{j_2} \oplus W_{j_2}) \\ (V_{j_1} \otimes V_{j_2}) \oplus (V_{j_1} \otimes W_{j_2}) \oplus \\ (W_{j_1} \otimes V_{j_2}) \oplus (W_{j_1} \otimes W_{j_2}) \\ V_j^2 \oplus [(V_{j_1} \otimes W_{j_2}) \oplus (W_{j_1} \otimes \\ V_{j_2}) \oplus (W_{j_1} \otimes W_{j_2})] \\ V_j^2 \oplus W_j^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中, } W_j^2 = (V_{j_1} \otimes W_{j_2}) \oplus (W_{j_1} \otimes V_{j_2}) \\ \oplus (W_{j_1} \otimes W_{j_2}) \quad (6)$$

从式(6)看出, $\psi(x, y) = \phi(x) \psi(y)$, $\psi^2(x, y) = \psi(x) \phi(y)$, $\phi^2(x, y) = \phi(x) \psi(y)$, 而 $\{\psi_{j, k, m} \mid e=1, 2, 3\}$; $(j, k, m) \in \mathbf{Z}^2$ 是 $L^2(R^2)$ 的一组规范正交基。

设 A_j, D_j^1, D_j^2, D_j^3 是从 $L^2(R^2)$ 分别到子空间 $(V_{j_1} \otimes V_{j_2}), (V_{j_1} \otimes W_{j_2}), (W_{j_1} \otimes V_{j_2}), (W_{j_1} \otimes W_{j_2})$ 的投影算子, 则有:

$$A_{j+1}f(x, y) = A_j f + D_j^1 f + D_j^2 f + D_j^3 f \quad (7)$$

一般取原始图像 $f(x, y) \in V_{j+1}^2$, 则经式(7)N步分解后有:

$$f(x, y) = A_{j+1}f = A_{j-N}f + \sum_{j=J}^j \sum_{e=1}^3 D_j^e f \quad (8)$$

从滤波的角度出发, 式(8)表示任一二维输入信号 $(A_{j+1}f)$ 被分解为粗分辨率(coarse resolution)信号 $(A_j f)$ 和细分辨率(detail resolution)信号 $(D_j^e f, e=1, 2, 3)$, 而信号 $(A_j f)$ 又可进一步分解为粗分辨率信号 $(A_{j-1} f)$ 和细分辨率信号 $(D_{j-1}^e f, e=1, 2, 3)$, 如此下去, 就可以将信号 $f(x, y)$ 分解成不同的频道成分。

2 Speckle 小波域滤波算法

式(7)说明二维图像经小波分解后生成4幅子图像, 其中属于 $A_j f$ 的子图像是原图像经行、列低通滤波后生成的, 称为近似图像(approximate image); 其余的3幅子图像称为细节图像(detail images), 它们分别包含了原图像中关于水平、垂直、斜线方向的细节信息, 即高频分量。

由于SAR图像的斑点噪声是乘性噪声, 单视数时呈瑞利分布, 因此, 该噪声对不同频率分量的影响是不同的。按式(8)对SAR图像进行多尺度小波分解生成的系列子图像中, 高频系数的信噪比小, 低频系数的信噪比大。实践证明^[6], SAR图像经4~5级小波分解后, 最后一级的近似图像中斑点噪声的能量极小, 可忽略不计, 因而可以不作滤波处理。各层的细节图像, 由于尺度不同, 所处的频道不同, 因此, 滤波的强弱也应不同。第一层细节图像的频率最高, 应采取较强滤波; 以后, 随着尺度的增加, 噪声能量迅速减小^[1, 4], 滤波的强度应逐层减弱。

虽然小波域滤波会损失一部分细微的信息, 但由于小波变换的实际作用与信号解相关, 并将信号的全部信息集中到一小部分大幅值的小波系数中, 这些大幅值系数含有的能量远比小幅值系数大, 且在重构中更重要, 所以, 小波域SAR图像斑点噪声的滤波相对于其他频域滤波方法而言, 损失的信息相对较少, 而抑制噪声的效果较好, 又较好地保持了边缘。

本文提出的SAR图像斑点噪声的滤波算法如下。

1) 选择合适的小波基按式(8)对SAR图像进行多尺度小波分解, 一般分解到4~5层即可。本试验选择db32小波, 分解了4层。

2) 对每一层细节子图像的系数, 按式(9)进行滤波:

$$Y = \begin{cases} \text{syn}(y)(\lfloor y \rfloor - t) & \lfloor y \rfloor \geq t \\ 0 & \lfloor y \rfloor < t \end{cases} \quad (9)$$

式中, t 为阈值, t 按式(10)计算:

$$t = k \frac{\sigma \sqrt{n}}{2^p} \quad (10)$$

式中, σ 为图像的标准方差; n 的含义与式(2)中相同; p 为细节子图像所在的小波分解层; k 为调节系数, 单视数时通常取0.8~1.2, 本试验取值为0.9。

3) 由2)处理后所得的系数重构原图像, 即得滤波后的图像。

3 试验结果及分析

本文采用比照的方式对增强Lee滤波、Sigma滤波、本文提出的小波域滤波算法进行了试验。试验选取一幅我国祁连山区场景的单视数ERS-1 SAR图像, 图像灰度级为每像素16bit, 图像尺寸为1024×1024。将试验结果取同一局部, 尺寸为170像素×170像素, 如图1所示。

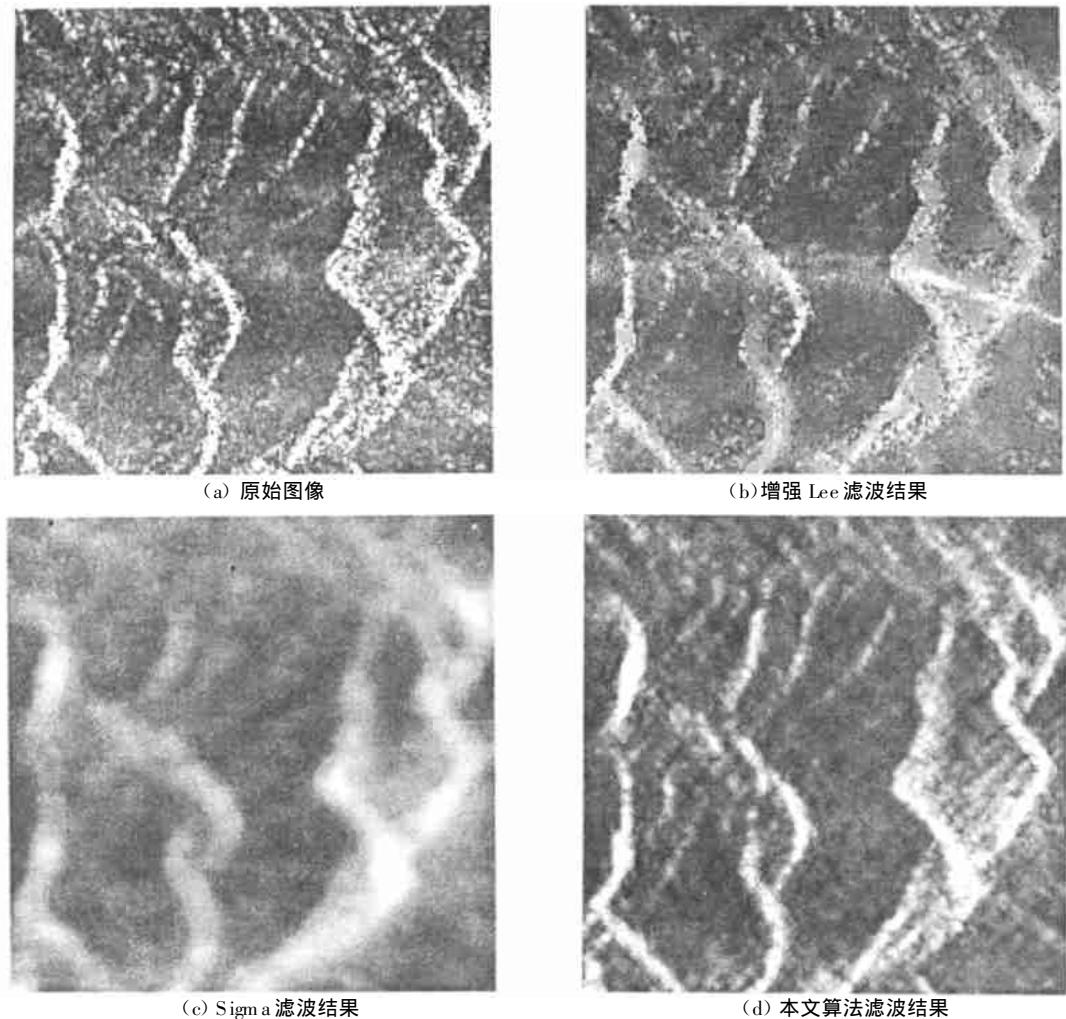


图 1 不同算法处理 SAR 图像的滤波结果

Fig. 1 The Filtering Results of Different Algorithms for SAR Image

从目视效果来看, 经过 Sigma 滤波后的图像过于平滑, 与原图像相比细节信息损失严重; 经增强 Lee 滤波后的图像亮纹理上仍可见明显的斑点噪声, 影响视觉效果; 采用本文提出的滤波算法滤波后, 无论是亮区还是暗区均无明显斑点, 细节、边缘与原图像较接近, 具有较好的视觉效果。

定量地评价 Speckle 滤波效果必须同时考虑去斑点噪声能力和保持图像边缘、细节的能力。综合评价一个 Speckle 滤波器的主要指标有均值 (μ)、相对标准差 (RV) 和有效视数 (ENL, effective number of looks)。均值反映图像灰度的集中程度, 滤波前后均值应保持不变; 相对标准差反映了图像的灰度动态范围, 在保持均值不变的前提下, 相对标准差越小, 越有利于 SAR 图像的分割与分类等后续应用^[8]; 有效视数反映了去斑点噪声的能力, 在综合考虑前两个指标的前提下, ENL 越大, 去 Speckle 能力越强。

相对标准差的计算公式为 $RV = \sigma / \mu$, σ 为图像标准方差。

有效视数又称等效视数, 其计算公式为^[4]:

$$ENL = \frac{1}{\overline{g^4} / (\overline{g^2})^2 - 1} \quad (11)$$

式中, $\overline{g^4}$ 、 $\overline{g^2}$ 分别为图像灰度 4 次方的均值、平方的均值。

表 1 给出了试验中各算法去 Speckle 能力的评价指标。

表 1 不同滤波方法去 Speckle 能力比较

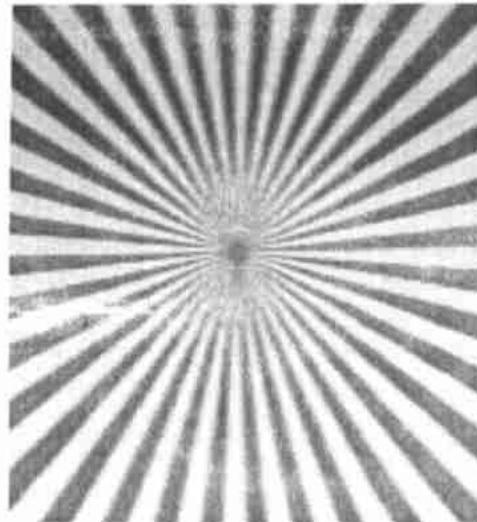
Tab. 1 The Comparison of Different Filtering Methods

	原始图像	增强 Lee 滤波	Sigma 滤波	本文算法
均值	306	305	255	305
相对标准差	1.12	0.89	0.52	0.72
有效视数	0.79	1.25	3.68	1.90

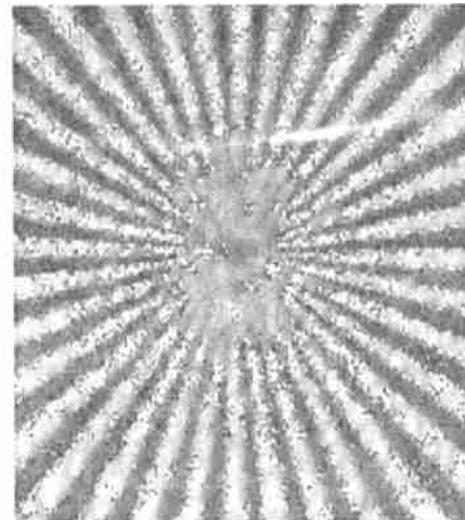
从表 1 可以看出, 虽然 Sigma 滤波结果的有效视数最大, 但其均值偏离原图较远, 相对标准差最小, 反映图像灰度动态范围较小, 图像细节损失较多; 增强 Lee 滤波结果的均值保持最好, 灰度动态范围较大, 但有效视数最低, 说明图像边缘细节

保持较好,但去 Speckle 能力不强;本文提出的算法均值与增强 Lee 算法结果一样,相对标准差适中,有效视数相对增强 Lee 算法有较大提高。

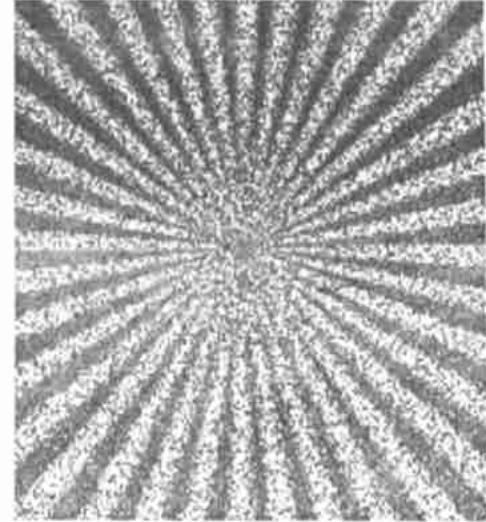
本文还采用了一幅如图 2(a)所示条状辐射



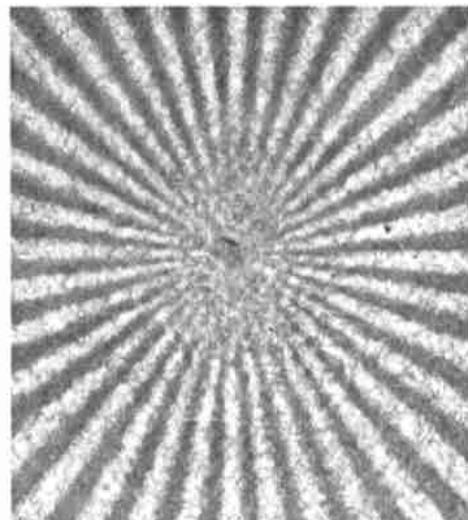
(a) 模拟图原图



(c) 增强 Lee 滤波结果



(b) 加噪后的图像



(d) 本文算法滤波结果

图 2 模拟加噪图像及滤波结果

Fig. 2 A Synthetic Speckled Image and the Filtering Results

处理,处理结果分别示于图 2(c)和图 2(d)。

从图 2 可知,增强 Lee 滤波处理后的图像虽然边缘保持较好,仍可见明显的斑点噪声,而且条状辐射中心出现模糊现象,该部分细节损失严重;本文提出算法的滤波结果中,边缘保持与增强 Lee 滤波相当,但无明显的斑点噪声,基本保持了原有的细节信息,较增强 Lee 滤波算法在纹理较丰富区域具有更好的细节保持能力。

综合图 1 和图 2,本文提出并实现的斑点噪声滤波算法在处理单视数 SAR 图像时优于其他两种滤波算法。但还应看到,本算法虽然力求在去 Speckle 和保持边缘、细节方面作较好的平衡,但处理结果中高频部分依然有较大的损失。又由

模拟灰度图像(256 像素×256 像素),在其上叠加了均值为 1、服从瑞利分布的乘性噪声模拟 Speckle, 加噪后的图像见图 2(b)。作者分别采用增强 Lee 滤波算法和本文提出的算法进行了滤波

于采用软门限技术,造成了滤波后的图像细节较原始图像粗糙。如何在高频频段上选择合适的小波尺度作更加精细的图像分析,如何对 SAR 图像各小波分解层的小波分解系数进行处理,以及在滤波的同时最大限度地保持精细结构是值得进一步深入研究的问题。

4 结 论

本文依据多分辨率小波分析的理论,选择合适的小波基对 SAR 图像进行多层次小波分解,分解生成的系列子图像包含了原图像在不同频道上的信息。根据 SAR 图像信号与斑点噪声在不同

频道上能量分布规律及信噪比的变化规律, 提出了阈值基于各细节子图像的方差、序列长度及其所在的小波分解层的 SAR 图像斑点噪声小波域滤波算法。真实 SAR 图像和模拟 Speckle 图像的滤波处理结果证明, 该算法在目视效果、斑点噪声抑制和细节保护这两个方面获得了比增强 Lee 滤波、Sigma 滤波等传统方法更好的效果。应该指出的是, 本算法的研究还有待在 SAR 图像的后续应用如分类、识别等方面得到进一步的检验和完善。

参 考 文 献

- 1 唐健, 王贞松. 利用小波分析来抑制合成孔径雷达图像的相干斑噪声. 电子科学学刊, 1997, 7(4): 451~457
- 2 乌拉比 F T, 穆尔 R K. 微波遥感(第一、二卷). 冯健超, 黄培康, 汪一飞译. 北京: 科学出版社, 1987
- 3 Fukuda S, Hirosawa H. Suppression of Speckle in Synthetic Aperture Radar Images. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(3): 507~519
- 4 Wakabayashi H, Arai K. A Method of Speckle Noise Reduction for SAR Data. Remote Sensing, 1996, 17(10): 1 837~1 849
- 5 David L D. De-Noise by Soft-Thresholding. IEEE Trans. on Information Theory, 1995, 41(3)
- 6 Marc S, Gianfranco DeGrandi, Thomson K P B, et al. Analysis of Speckle Noise Contribution on Wavelet Decomposition of SAR Images. IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(6): 1 953~1 962
- 7 Mark G, Jasper M H, Michael R I. Comparison of Speckle Reduction Techniques Applied to Airborne SAR Imagery. IGARSS' 94 Pasadena, California, 1994. 172~174
- 8 Dong Y, Forster B C, Milne A K, Morgan A. Speckle Suppression Using Recursive Wavelet Transforms. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(2): 317~330
- 9 Kenneth R C. Digital Image Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall International, Inc., 1996
- 10 Mallat S. A Theory of Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation. IEEE Trans. PAMI, 1989, 11: 674~693

作者简介: 卜方玲, 副教授, 博士生, 现主要从事遥感信息处理、数字信号处理等方面的研究。已发表论文 7 篇。

E-mail: pufangling@163.net

A Speckle Filtering Method of SAR Images Based on Wavelet Analysis

BU Fangling¹ XU Xin¹

(1 School of Electrical Information, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

Abstract: The images of synthetic aperture radar (SAR) have been widely used in many important fields. Like any coherent imaging system, SAR systems are subject to speckle effects. This noise is conspicuous in single-look SAR images which disturb image interpretation and target classification. Therefore, to extent the use of SAR images, effective speckle reduction techniques are highly desirable.

Based on the principle of multiresolution wavelet analysis, a new filter for suppression speckle in SAR is proposed. For images, an algorithm similar to the one-dimensional case is possible for two-dimensional wavelets and scaling functions obtained from one-dimensional ones by tensorial product. This kind of discrete two-dimensional wavelet transform leads to a decomposition of approximation coefficients at level $j+1$ in three components: the approximation at level j and the details in three orientations (horizontal, vertical, and diagonal). The “approximate image” at level j is composed of the low frequency parts in both row and column directions of approximate image at level $j+1$. And the there “detail images” contains its high frequency components separately in horizontal, vertical, diagonal directions. The approximate image is iteratively decomposed into four sub-images level by level. A pyramidal wavelet decomposing structure is thus constructed. It is tes-

(下转第 330 页)

ing found. Several approaches have been proposed to resolve those problems. In this paper, the mathematical geomorphology is considered as a new way while being applied for remote sensed image. The details of the principles have been discussed. As the operation of dilation is sensitive to the edges, the effects are more distinguished when compared with the original image. Same effects could be found when using the operation of erosion, while the analysis for opening and closing has shown the better results with less influence of noise. The discussion about the combination of different operations has been also introduced for further applications. The image resulted from dilation and that from erosion can be put into a new one in which the edges could be enhanced with precise positions. Other combinations such as that for opening and closing can have the better effects than that by using dilation or erosion only. The structure elements of different size of windows have been discussed according to their effects. The experiments for comparison with conventional gradient operator show that the method of mathematical morphology has the advantages of edge enhancement and less influence of noise.

Key words: mathematical geomorphology; edge enhancement; structural elements

About the author: LIU Huimin, master candidate. She is concentrated on the research of image processing and GIS.

E-mail: liuhm21cn@263.net

(上接第319页)

tified that the subspaces level of 4 or 5 is adequate for multiresolution wavelet analysis of an image (1024×1024). At each stage of the multiresolution pyramid, the approximate signal is low-pass filtered and decimated. And the wavelet coefficients are computed by high-pass filtering. It is proved that the signal energy concentrates on the wavelet coefficients of higher absolute value, and that the coefficients of high absolute value is more valuable than that of low absolute value in the signal wavelet reconstruction. It is also demonstrated that the effect of speckle is more serious in higher frequency parts, and the speckle decrease sharply as the image is low-filtered. So it can be considered that the speckle in 4 or 5 level approximate image can be ignored. The detail images of each subspace in which the ratio of signal to speckle is comparatively low are processed. The speckle of detail image at high frequency level is suppressed comparatively more by soft-threshold technique while the speckle at low frequency is suppressed comparatively less. The filter's threshold is computed according to the number of level, the variance and the length of each detail images.

The result image which is reconstructed by the processed detail images of each level is estimated through the effect of vision, the quantitative analysis such as mean, standard and variance, and the analysis of preservation of edge and detail. The filtering results of ERS-1 SAR image and image with simulated speckle show that the method proposed in this paper is satisfying in visual appearance, speckle suppression and detail preservation.

Key words: multiresolution wavelet analysis; speckle; threshold; effective number of looks

About the author: BU Fangling, associate professor, Ph. D candidate. Her research interests include remote sensing information processing, and digital signal processing etc. She has published 7 papers.

E-mail: pufangling@163.net