

基于小波域边缘方向特征的 SAR 图象噪声抑制方法

郭小卫 田 铮

(西北工业大学计算机系, 西安 710072)

摘 要 给出了一种新的基于小波变换的合成孔径雷达(SAR)图象斑点噪声抑制方法. 利用每一级小波分解得到的小波系数子带 HL 和 LH, 以及对原图进行水平方向旋转正负 45° 扫描后得到的另外两个正交方向的小波系数子带 rcHL 和 raHL, 可以判断出对应点边缘方向性的强弱, 通过设定方向性阈值, 确定该点是否位于边缘上, 进而对没有位于边缘的点进行平滑, 达到保留图象边缘的同时, 抑制斑点噪声的目的. 为解决对某些振荡型边缘的检测问题, 还结合阈值法, 对该方法做了改进. 实验表明, 与小波域的硬阈值或软阈值去噪方法相比, 此方法在有效地抑制斑点噪声的同时, 更好地保留了 SAR 图象中的边缘和纹理信息.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 合成孔径雷达(SAR) 斑点噪声 小波 边缘方向性

中图分类号: TP751 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)04-0453-06

Speckle Reduction for SAR Images Using Edge Directions in Wavelet Domain

GUO Xiao-wei, TIAN Zheng

(Department of Computer Science and Technology, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract A filter for speckle reduction in SAR image is proposed. On each level of wavelet decomposition, three images are used. One is the original image, and the two others are obtained by rotating the original image by 45° and -45° respectively, and so 12 subbands are gotten. In the 12 subbands, four subbands, HL subband and LH subband corresponding to the original image, and two HL subbands corresponding to the second and third image respectively, are used for edge detection, and the LL, HL, LH, HH subbands of the original image are used for synthesis. By using each point's four wavelet coefficients in the four subbands for edge detection, the edge direction property of the point on the original image is captured, and then the edges are detected by setting a proper threshold. And so, the speckle can be reduced while the edges being preserved well by setting the wavelet coefficients in the synthesis subbands corresponding to the points not on edges to zero but retain the wavelet coefficients in the synthesis subbands corresponding to the points on edges. For detection of some oscillating edges, the filter is improved by combining with the traditional threshold method. Simulations on synthetic images indicate that the new filter performs better than the traditional wavelet domain hard threshold or soft threshold method.

Keywords Computer image processing, Synthetic aperture radar(SAR), Speckle, Wavelet, Edge direction

0 引 言

由于成像系统的相干性, SAR 图象不可避免地受到斑点噪声的污染^[1], 斑点噪声严重影响了 SAR

图象的识别与理解, 因此, 斑点噪声抑制一直是 SAR 图象应用中的一个重要问题. 近年来也提出了一些方法. 这些方法主要可分为多视处理和空域滤波两大类. 多视处理是早期使用的方法, 它在成像过程中进行, 以牺牲空间分辨率为代价, 来抑制相干斑

噪声;空域滤波是在成像后进行的,又可分为基于统计模型的方法和非基于统计模型的方法.前者包括 Lee 算法^[2]、Sigma 滤波^[3]、Kuan 算法^[4]、Gamma-MAP 算法^[5]和小波变换软阈值法^[6]等,而前 4 种方法也被称为局部自适应滤波,因为它们是以局部统计特性为基础的;后者包括中值滤波、均值滤波、几何滤波等.

在理想的情况下,空域滤波器在滤除斑点噪声的同时,应尽可能地保持图象的边缘和纹理,由此可知,上面提到的某些滤波方法,比如中值、均值滤波并不适合用来抑制 SAR 图象的斑点噪声,因为它们没有考虑对边缘和纹理的保持.

为此,给出一种基于小波变换的斑点噪声抑制方法,该方法在保持图象边缘和纹理信息的同时,能很好地抑制斑点噪声.其依据小波系数所表现出来的边缘方向性来判断边缘或纹理.与文献[7]中的方法不同,此方法没有通过采用对每个小波系数判断其相邻小波系数来确定该像素是否位于边缘上,而是利用不同分辨率上每个像素对应的不同方向的小波系数来直接确定该像素是否位于边缘上.

1 结合小波域边缘检测的斑点噪声抑制

文献[1]分析了斑点噪声的统计特性,证明了当成像系统的分辨单元相对于目标的细节很小,且被斑点噪声污染的图象采样间隔足够大时,斑点噪声可被认为是一种乘性噪声; $z = x \cdot v$,其中, z 为实际观测图象, x 为原始图象, v 为噪声.对 SAR 图象做对数变换后,斑点噪声能近似为 Gaussian 加性噪声模型^[8],即 $\tilde{z} = \tilde{x} + \tilde{v}$,其中, $\tilde{z} = \ln(z)$.由于噪声的高频性质,使得在频域中分离信号与噪声成为可能,而小波变换正是这样的有力工具.

小波变换具有一些优良的性质,如时频局部性、多

分辨分析、有快速算法等,在特定条件下,也可满足正交性,线性相位等性质.这使得小波变换在信号处理领域,尤其在信号的压缩和去噪方面得到广泛应用.

对小波系数进行阈值处理,一直是基于小波变换去噪的主要方法.由于对小波系数做阈值处理时将某些小波系数直接置为零,导致了小波系数的不连续,进而又引入新的噪声或块效应. Donoho 首次引入了软阈值处理方法^[6],较好地解决了这一问题.

然而,对于 SAR 图象斑点噪声的抑制,仅做高频小波系数的软阈值处理是不够的,因为这同样会损失一些边缘和纹理信息,特别是低幅度的边缘和纹理.因此,一些学者提出了结合阈值法与局部像素分析的去噪方法^[7],这些方法在抑制斑点噪声的同时,较好地保留了图象的边缘和纹理信息.

结合边缘检测的斑点噪声抑制方法,与文献[7]中的方法不同,该方法没有采用判断每个小波系数与相邻小波系数的强弱来确定该像素是否位于边缘或纹理上,而是利用了每一分辨率上对应于同一位置 4 个方向的小波系数来直接确定该像素是否位于边缘或纹理上.

1.1 基于边缘方向性的边缘检测

可分离情况下的 2 维离散小波变换,实际上是对原图象依次做水平方向和垂直方向的一维离散小波变换,因此,在一级小波分解后得到 4 个子带(图 1(a)).除 LL 子带外,其他 3 个子带均携带有很强的边缘和纹理信息,当然还有高频噪声.其中 HL 子带反映了水平方向的高频变化,因而携有垂直方向的边缘纹理信息;LH 子带反映了垂直方向的高频变化,因而携有水平方向边缘纹理信息;HH 子带则反映了在水平方向和垂直方向共同变化的高频信息,因而携有斜方向的边缘纹理信息(图 1(c)).因此,可以考虑利用这 3 个子带上对应于同一位置的 3 个小波系数来判断该点是否为边缘或纹理.

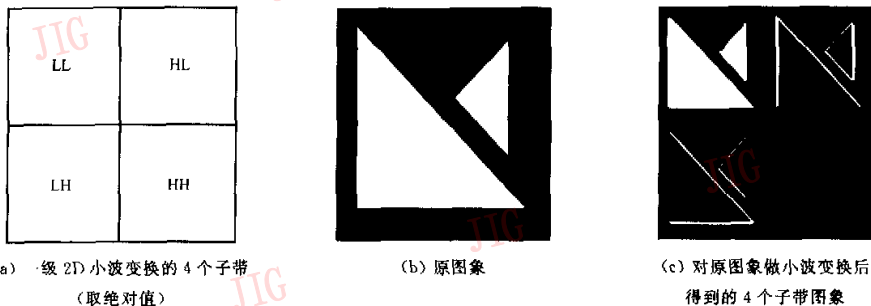


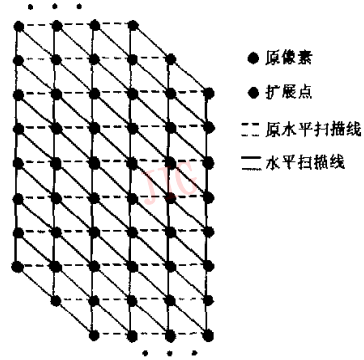
图 1 一级 2D 小波变换结果

那么,能否利用 3 个方向的小波系数来判断该像素是否位于边缘或纹理上呢?显然,对于水平方向边缘或纹理上的点,它在 HL 子带的系数接近于零,而在 LH 子带的系数较大;对于垂直方向边缘或纹理上的点,它在 HL 子带的系数较大,而在 LH 子带的系数接近于零,因此,利用 HL 和 LH 子带小波系数的方差,就可以确定对应点是否位于水平或垂直方向的边缘或纹理上。然而,仅利用这两个子带不足以确定所有方向的边缘或纹理,例如,对于斜方向边缘上的点,HL 和 LH 子带的小波系数很接近,而且同 HH 子带的系数也很接近,因此,即使附加上 HH 子带也不足以确定斜方向的纹理(见图 1(c))。

为此,对原图象改变扫描方式,以获得两个斜方向的高频小波系数。比如为获得 45°方向的高频小波系数,可将原图的水平方向扫描改为 45°方向扫描,而垂直方向的扫描保持不变。为使经这种扫描后得到的图象仍为矩形,需要对原图进行垂直或水平方向的扩展,扩展点的灰度可均置为零,如图 2(a)所示。图中采用了垂直方向扩展。图 2(b)是图 1(b)经该方式扫描后得到的图象。经这样处理后,得到的新图象水平方向实际上对应于原图的 45°方向。因此,对新图象做一级小波分解后,HL 子带就反映了原图象 45°方向的高频变化信息,为区别于原图象经一级小波分解后得到的 HL 子带,记该子带为 rcHL。同理,将原水平方向扫描改为 -45°方向扫描并保持垂直方向扫描不变,进而做一级小波分解,可得到反映 -45°方向的高频信息的 HL 子带,记为 raHL。注意,为使 rcHL 和 raHL 与 HL、LH 同一位置的小波系数相对应,还应对 rcHL、raHL 做逆扫描处理。

这样,就得到了 4 个方向的小波系数:HL、LH、rcHL 和 raHL,它们分别表示了水平方向、垂直方向、45°方向和 -45°方向的高频分量。根据每个像素对应的 4 个方向的小波系数,可以判断:如果 4 个方向小波系数间的差异较大,则该像素位于边缘或纹理上,反之,该像素位于光滑区,或为光滑区中的孤立点或噪声。因此,利用这 4 个方向的小波系数,足以检测出任何方向的边缘或纹理。

需要指出的是,经过上述的扫描处理后,得到的图象是原图象的变形而非旋转,此时再做小波变换,对原图象而言,已不是可分离情形下的小波变换,因为这两个分解方向并不正交,但实验结果表明,通过调整阈值,该方法是可行的。



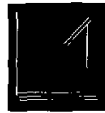
(a) 水平方向 45°扫描示意图



(b) 对图 1(b)原图做水平方向 45°扫描并垂直扩展得到的图象



(c) 对图 1(b)做水平方向 -45°扫描并垂直扩展得到的图象



(d) 对图 2(b)做小波分解得到的 HL 分量 rcHL



(e) 对图 2(c)做小波分解得到的 HL 分量 rcHL

图 2 改变扫描方式一级小波变换结果

1.2 噪声抑制

对原图象应用上述方法做 N 级小波分解,每级分解得到 5 个新的子带 HL、LH、HH、rcHL 和 raHL。其中,HL、LH、rcHL 和 raHL 4 个子带用于判断边缘方向性,记为 $B_i^{(n)}$, $i=1,2,3,4$,表示第 i 个子带, $n=1, \dots, N$ 表示分解级数,而 HL、LH 和 HH 3 个子带用于阈值处理并重构图象,记为 $C_i^{(n)}$ 。用第 n 级分解得到的 4 个子带 $B_i^{(n)}$ 中对应于同一位置的 4 个小波系数的方差 $S^{(n)}$ 来表示它们之间的差异,即:

$$S^{(n)}(j,k) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [B_i^{(n)}(j,k) - B_i^{(n)}(j,k)]^2$$

其中, $\bar{B}^{(n)}(j, k) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 B_i^{(n)}(j, k)$.

通过设定合适的阈值 $T_S^{(n)}$, 当 $S^{(n)} \geq T_S^{(n)}$ 时, 就认为当前点位于边缘或纹理上, 对该级 HL, LH, 和 HH 子带相应的小波系数予以保留, 否则, 对它们置零, 就可以达到抑制斑点噪声目的. 具体算法如下:

- (1) 对 SAR 图象做对数变换;
- (2) 做 2~3 级小波分解;
- (3) 对每一级做如下处理: 对 4 个方向的小波系数求方差; 对 3 个子带的小波系数进行阈值处理

$$C_i^{(n)}(j, k) = \begin{cases} C_i^{(n)}(j, k) & S^{(n)}(j, k) \geq T_S^{(n)} \\ 0 & S^{(n)}(j, k) < T_S^{(n)} \end{cases}$$

其中, $i=1, 2, 3, n=1, 2, \dots, N$;

- (4) 逆小波变换;
- (5) 指数变换.

1.3 方法的改进

与阈值处理方法使用小波系数的幅度信息去噪不同, 上述方法是根据小波系数提取边缘和纹理的方向信息去噪. 这样做有以下优点:

- (1) 对连续边缘的保留较好, 比硬阈值法和软阈值法处理得到的边缘清晰;
- (2) 对点目标的保留也明显优于硬阈值和软阈值方法;
- (3) 能够从被噪声淹没的低幅度区域中检测出细微的纹理.

通过实验, 很容易验证这几项, 然而, 本方法也有一个明显的缺点, 就是对于不连续的边缘(沿边缘方向上有快速振荡的边缘)不能很好地保留, 这是因为对于这类边缘, 仅凭借单个点 4 个方向的小波系数不足以判断边缘方向, 这种方向性可能在更大的尺度上才表现出来, 见图 3(d) 右上角部分 45° 方向边缘. 因此, 考虑结合阈值法对该方法做一些改进, 即在保留方向性很强的点对应的小波系数的同时, 也保留那些具有较强幅度的小波系数. 具体的改进算法如下:

- (1) 对 SAR 图象做对数变换;
- (2) 做 2~3 级小波分解;
- (3) 对每一级做如下处理: 对 4 个方向的小波系数求方差; 对 3 个子带的小波系数进行阈值处理

$$C_i^{(n)}(j, k) = \begin{cases} C_i^{(n)}(j, k) & S^{(n)}(j, k) \geq T_S^{(n)} \text{ or } |C_i^{(n)}(j, k)| \geq T_C^{(n)} \\ 0 & S^{(n)}(j, k) < T_S^{(n)} \text{ and } |C_i^{(n)}(j, k)| < T_C^{(n)} \end{cases}$$

其中, $i=1, 2, 3, n=1, 2, \dots, N$;

(4) 逆小波变换;

(5) 指数变换.

另外, 适当调整 $T_S^{(n)}$ 和 $T_C^{(n)}$, 可以决定哪个方法在去噪过程中起主导作用, 如果 $T_S^{(n)}$ 相对较大, 则信号的平滑基本上由 $T_S^{(n)}$ 控制, 即阈值法起主导作用; 反之, 如果 $T_C^{(n)}$ 相对较大, 则信号的平滑基本上由 $T_C^{(n)}$ 控制, 即边缘方向性分析法起主导作用. 在实际应用中, 对所有的 $T_S^{(n)}$ 设定一个权值 W_S , 对所有的 $T_C^{(n)}$ 设定一个权值 W_C , 选择好初始的 $T_S^{(n)}$ 和 $T_C^{(n)}$ 后, 可以通过调整这两个权值来决定阈值法和边缘方向性分析法在去噪过程中的主导地位.

1.4 参数的选择

在经过改进的方法中, 共有 3 组参数: $\{T_S^{(n)} | n=1, \dots, N\}$, $\{T_C^{(n)} | n=1, \dots, N\}$ 和 $\{W_S, W_C\}$. 其中 $\{W_S, W_C\}$ 是为便于确定边缘方向性分析法和阈值法在去噪过程中的比重而设立的, 初始值可取为 $W_S = W_C = 0.5$, 在调整过程中, 只要满足 $W_S + W_C = 1$ 就可以了. $\{T_S^{(n)} | n=1, \dots, N\}$ 和 $\{T_C^{(n)} | n=1, \dots, N\}$ 的取值基本上是先验确定的, 一般情况下, 随着分解级数 n 的增加, 小波系数的能量迅速减小, $T_S^{(n)}$ 一般也随之减小. 实验中, 取 $T_S^{(1)}$ 在 1500~3000 之间, 并保持 $T_S^{(n)} = T_S^{(1)}/2^n$, 就能取得较好的效果. 文献[6]给出了 $T_C^{(n)}$ 的选择方法: $T_C^{(n)} = \sigma \cdot \sqrt{2 \log(n)/n}$, 其中 σ 为噪声的方差, 在 σ 未知的情况下, 一般取 $T_C^{(n)} = \max(|C_i^{(n)}(j, k)|)/2$.

2 实验结果

图 3、图 4 分别是机载 X 波段双视 SAR 图象, 以及机载 X 波段单视 SAR 图象采用不同方法进行滤波的结果, 其空间分辨率为 3m. 其中, 图 3(b)、图 3(c)、图 4(b)、图 4(c) 采用的阈值为 $T_C^{(n)} = 128$, $n=1, 2, 3, 4$; 图 3(d)、图 3(e)、图 4(d)、图 4(e) 采用的阈值为 $T_S^{(1)} = 1600$, $T_C^{(n)} = 128$, $n=1, 2, 3, 4$.

表 1、表 2 分别给出了图 3、图 4 经几种不同的滤波方法处理后在不同区域的等效视数 (ENL) 比较. 等效视数定义为 $ENL = E^2(I)/\sigma^2(I)$, I 为对应的均匀区域. 等效视数越大, 则对应区域越光滑. 由表 1、表 2 可见, 本文的方法有效地抑制了斑点噪声, 其 ENL 均值之所以比其他两个方法的小, 是因为其保留了更多的边缘和纹理细节的缘故.

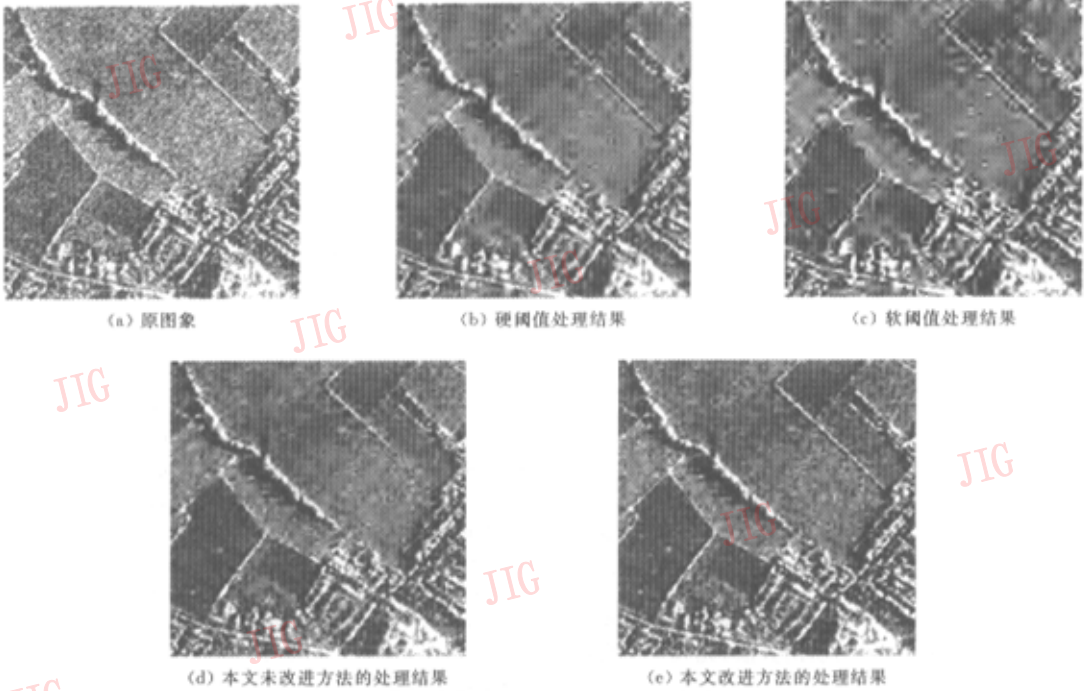


图 3 机载 X 波段双视 SAR 图象采用不同方法进行滤波的结果

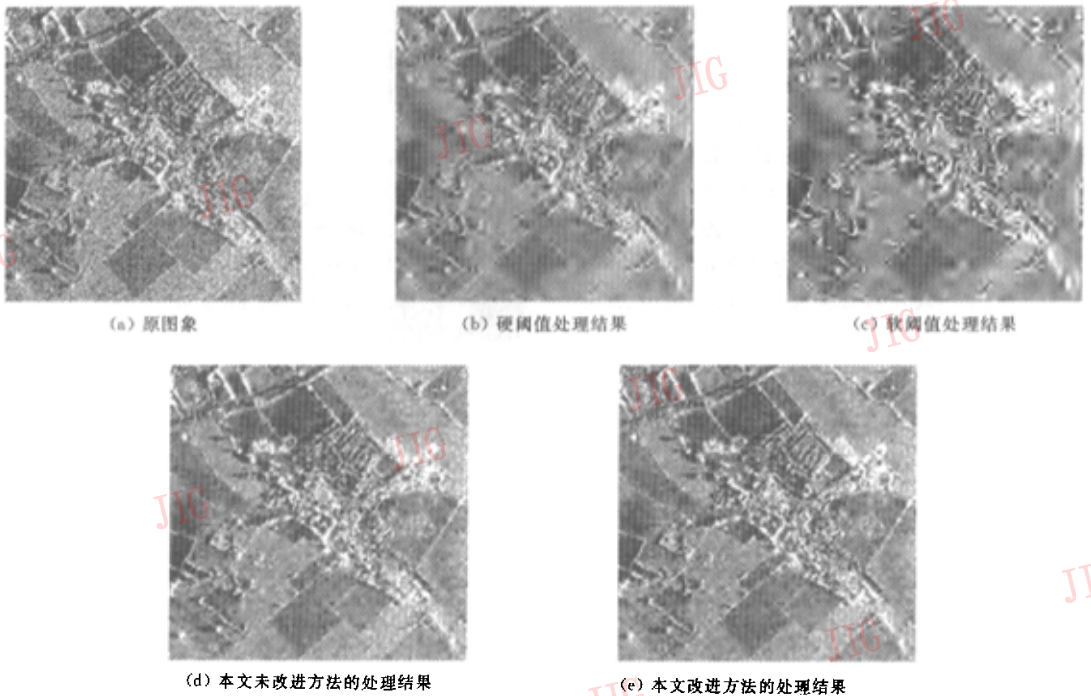


图 4 机载 X 波段单视 SAR 图象采用不同方法进行滤波的结果

表1 图3(a)滤波后的等效视数(ENL)比较

滤波器	区域1	区域2	区域3	均值
原图	7.00	5.51	7.39	6.63
硬阈值法	61.00	27.53	35.38	41.30
软阈值法	41.15	10.41	28.75	26.77
本文方法	23.18	18.18	19.86	20.41

表2 图4(a)滤波后的等效视数(ENL)比较

滤波器	区域1	区域2	区域3	均值
原图	17.51	11.25	8.68	12.48
硬阈值法	171.32	58.74	34.72	88.26
软阈值法	110.27	36.27	35.71	60.75
本文方法	97.45	47.38	21.67	55.50

3 结论

大多基于小波变换的斑点噪声抑制方法是通过对小波系数的阈值处理来实现的,这种方法虽然有效,但会损失一定程度的边缘和纹理信息,特别是低幅度的边缘或纹理。本文给出的方法,尤其是结合阈值法的改进方法,能够在抑制SAR图象斑点噪声的同时很好地保留边缘和纹理。不同于其他一些结合局部像素分析的小波系数阈值处理方法,该方法没有基于局部窗口的像素分析,而是直接由同一位置不同方向的小波系数间的差异来确定该像素是否位于边缘和纹理上。这种方法计算简单、行之有效,但是,如前所述,其两个斜方向的小波系数并不能如实反映这两个方向的高频变化,如何利用不可分离情况下的二维离散小波变换或利用二维连续小波变换的旋转特性来获得真正意义上的多个方向的小波系数,并将之用于边缘纹理检测和斑点噪声抑制,将是下一步要进行的工作。

参考文献

- 1 Goodman J W. Some fundamental properties of speckle [J]. Jour. of Optical Society of America, 1976,66(11):1105~1150.

- 2 Lee J S, Jurkevich I. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review [J]. Remote Sensing Reviews, 1994,8(3): 313~340.
- 3 Lee J S. Digital image smoothing and the sigma filter [J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1983,24: 255~269.
- 4 Kuan DT, Sawchuk, Strand A A, Chavel T C, A daptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985,7(2):165~177.
- 5 Lopes A, Nezry E, Laur H. Structure detection and statistical, adaptive speckle filtering in sar images [J]. Int. J. Remote Sensing, 1993,14(9):1735~1758.
- 6 Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995,41(3):613~627.
- 7 Fukuda Seisuke, Hirosawa Haruto. Suppression of speckle in synthetic aperture radar [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(3):507~518.
- 8 Arsenault H H, April G. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically trans-formed [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976,66:1160~1163.



郭小卫 1971年生,博士生。主要从事图象处理与分析、模式识别等方面的研究。



田 锋 1946年生,教授,博士生导师。主要从事非线性时间序列分析、非参数统计、小波变换与人工神经网络等智能化信息处理的理论和方法的研究。