

文章编号: 1007-4619 (2001) 06-428-06

海洋 SAR 图像小波 Speckle 滤波及边缘信息提取

郭子祺¹, 卢 刚², 王 超¹, 潘广东¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学开放实验室, 北京 100101; 2. 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘 要: 以海洋 SAR 图像的 speckle 滤波和边缘信息提取为研究目标, 构造了以低通带通窄和时域冲击响应系数分布呈左右对称特征的小波滤波器。这些特征使该小波滤波器在处理突变信号方面具有优良的特性。应用该小波滤波器, 采用 Wiener 滤波算法, 对海洋 SAR 图像进行了 speckle 滤波及采用 Prewitt 算子对边缘信息进行提取。用几种经典小波基函数采用相同的滤波算法和边缘增强算子进行了处理, 并将它们的结果进行了对比分析。结果表明, 虽然小波基函数在用于 speckle 滤波方面, 稍逊其它几种经典小波基函数, 但是在边缘信息保留方面, 效果要明显优于其他小波基函数。

关键词: 小波; SAR 图像; speckle 滤波; 边缘提取

中图分类号: TP79/TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

SAR 图像中的高频噪斑从理论上讲, 其强度的分布服从于负指数形式且具有乘性性质。由于 SAR 图像在许多重要领域有着广泛的应用, 而斑点噪声给图像带来的干扰信息, 往往严重影响 SAR 图像的应用效果。因此, 对斑点噪声抑制技术的研究一直是 SAR 成像技术应用的重要内容之一。海洋 SAR 图像的噪斑信号较强, 许多目标信号如中小尺度海浪与噪斑信号特征相似, 它们往往相互掺杂在一起, 难以识别。因此, 如何有效地压抑 speckle, 尽可能地减少图像信息损失是实际应用中很现实的一个关键技术问题。

目前 SAR 图像压抑噪斑的方法可在频率域和空间域中进行。频率域方法主要是通过根据图像噪斑频率范围, 选取适当的频域带通滤波器进行滤波处理。空间域方法主要采用各种平滑函数对图像进行卷积处理, 以达到压抑除噪声的目的, 如邻域平均 (K-NN)、中值 (Median) 滤波, 几何 (Geometric) 滤波, Sigma 滤波, Gradient-inverse 滤波等都属于这一类方法。还有在对 speckle 统计的基础上的 Lee 滤波、Kuan 滤波等。这些方法在消除或压抑噪斑信号的

同时, 或多或少损失了图像中的微细影纹和边缘特征信息。

与傅里叶变换相似, 小波变换是一种同时具有时-频二维分辨率的变换。其优于傅氏变换之处在于它具有时域和频域“变焦距”特性, 十分有利于信号的精细分析。小波变换的最大特点在于具有极敏感的变焦特征, 它能形成一个可调时-频窗。在低频段采用高的频率分辨率和低的时间分辨率, 而在高频段采用低的频率分辨率和高的时间分辨率, 这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点。在不同的分辨率下, 能反映出图像的不同结构特征, 因而在处理突变信号方面具有较强的能力。从理论上讲, 小波通过变换的另一个特性是能保留图像的均值, 这一点对 SAR 图像的校正研究尤其重要。正应如此, 小波变换在图像处理方面发展很快, 在基于小波分析理论的基础上已提出了多种 speckle 滤波算法。Mallet & Zhong, Ruskai 和 Daubechies 都对小波变换有详细的数学描述^[1-3]。

目前已建立起来的小波函数主要有 Daubechies (Db N , 包括 Haar 小波) 小波族 (N 是指小波函数的阶数, 以下同)、Biorthogonal (Bior $Nr \cdot Nd$) 双正交小波族、Coiflet (Coif N) 小波族和 SymletsA (Sym N) 小波族等。这些小波或小波族在对称性、正则性和支撑长

收稿日期: 2000-10-11; 修订日期: 2001-02-16

基金项目: 国家 863 项目 (818-06-02) 资助

作者简介: 郭子祺 (1963—), 男, 1997 年毕业于中国科技大学固体地球物理专业, 获硕士学位。现为中国科学院遥感应用研究所副研究员。目前主要从事遥感基础与应用方面的研究, 已在核心刊物上发表论文 5 篇。

度各不相同。在小波变换过程中,作为基函数的小波并不是唯一的,小波子空间的特征依赖于基本小波的选择,不同的小波基分析同一个问题时会产生不同的结果,因而在实际应用中就可根据问题的具体特点来选取小波基。对于一个正交小波,在多分辨分析的应用中,用尺度函数和小波函数来进行分析。对于一个 FIR 滤波器在构造正交小波时,由于在精确重建和严格对称方面并不完全满足理想条件,所以在构建一个小波滤波器时存在一些不可避免的缺陷,必须对小波的正交性进行让步,而使用双正交滤波器(如 Bior Nr. Nd),但这种让步也是有限的。常见的小波函数波形见图 1。为达到理想的处理效果,在对称性、正则性和支撑长度综合方面更优化,本文采用更合理的假设条件,希望能构造出适用于海洋 SAR 图像 speckle 滤波的小波滤波器。

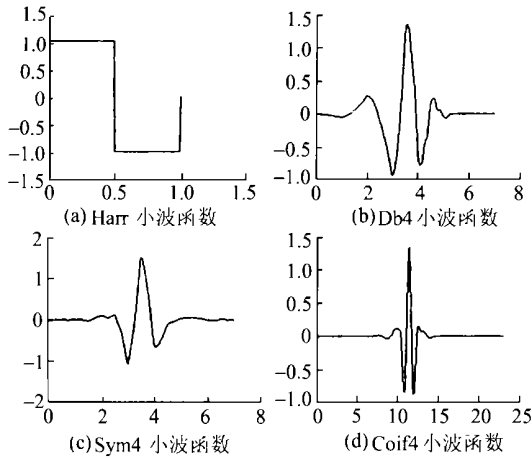


图 1 几种小波函数的波形图

Fig. 1 The graphics of several wavelet functions

2 小波变换函数

可以把小波变换看作是一种用具有高、低能功能的滤波器对原信号进行滤波处理。平滑函数 $\phi(x)$ 的 Fourier 变换由 Mallet 和 Zhong^[1] 给出:

$$\Phi(\omega) = \prod_{j=1}^{+\infty} H(\omega/2^j) \quad (1)$$

其中, 2^j 是尺度因子。

从上式可得:

$$\Phi(2\omega) = H(\omega) \Phi(\omega) \quad (2)$$

尺度函数由 Dong^[4] 给出:

$$\Phi(\omega) = \left[\frac{\sin(\omega/2)}{\omega/2} \right]^4 \quad (3)$$

从公式 2 和 3 得

$$H(\omega) = \cos^4 \left[\frac{\omega}{2} \right] \quad (4)$$

由于小波函数是以余弦函数为核心的,故将此构建的小波基函数命名为 $\cos x$ 小波函数,组成的小波族为 $\cos xN$ 。

3 小波滤波器

从线性正交小波变换的基本关系得:

$$\hat{H}(Z) H(Z) + \hat{H}(-Z) H(-Z) = 2 \quad (5)$$

假设滤波器服从 FIR(有限长序列)状态可得:

$$H(Z) = Z\bar{G}(-Z) \quad (6)$$

和

$$G(Z) = -Z\hat{H}(-Z) \quad (7)$$

由式(4)-(7)组成基本关系,现需求出 $\hat{H}(Z)$, $G(Z)$, $\bar{G}(Z)$ 并由它们给出用于小波分解和重建运算用的小波滤波器系数 $h(n)$, $\bar{h}(n)$, $g(n)$, $\bar{g}(n)$ 。

在 $\omega \in [0, \pi]$ 时, $H_0(\omega)$ 为以 $\omega = \frac{\pi}{2}$,

$H_0(\omega)|_{\omega=\frac{\pi}{2}}=1$ 为对称中心的函数,故 $H_0\left(\frac{\pi}{2}\right)=1$,

由式(4),得:

$$H_0(\omega)|_{\omega=\pi} = H(\omega)H(\bar{\omega})|_{\omega=\pi} = 0$$

$$H_0(\omega)|_{\omega=0} = H_0(\pi-\omega)|_{\omega=\pi} = 2 - H_0(\omega)|_{\omega=\pi} = 2 \quad (8)$$

由以上各式得到的边界条件:

$$\begin{cases} H_0(0) = 2 \\ H_0\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

可以设计出 $H_0(\omega)$ 在 $\omega \in [0, \frac{\pi}{2}]$ 内的部分,然后再利用 $H(\omega)$ 在 $[0, \pi]$ 区间关于 $\left[\frac{\pi}{2}, 1\right]$ 点的中心对称性得到 $H_0(\omega)$ 在 $[\frac{\pi}{2}, \pi]$ 部分,最后再利用 $H_0(\omega)$ 的偶特性可得到 $H_0(\omega)$ 在 $(-\pi, 0)$ 内部分的值,这样在 $H_0(\omega)$ 的一个周期内的值就确定下来了。

实际构造中,将 $H_0(\omega)$ 用幂函数来拟合,设

$$H_0(\omega) = a + b\omega^c, \quad \omega \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \quad (10)$$

由(9)式可得:

$$\begin{cases} a = 2 \\ b = \left[\frac{2}{\pi}\right]^c \end{cases} \quad (11)$$

导出(12)式:

$$H_0(\omega) = \begin{cases} 2 - \left(\frac{2\omega}{\pi}\right)^c, & \omega \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ H_0(-\omega), & \omega \in \left[-\pi, 0\right] \\ \left[\frac{2(\pi-\omega)}{\pi}\right]^c, & \omega \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right] \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{H}(\omega) = \frac{H_0(\omega)}{H(\omega)} = \begin{cases} 2 - \left(\frac{2\omega}{\pi}\right)^c, & \omega \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ \frac{\left[\frac{2(\pi-\omega)}{\pi}\right]^c}{\cos^4 \frac{\omega}{2}}, & \omega \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right] \\ 0, & \omega = \pi \\ \hat{H}(-\omega), & \omega \in \left(-\pi, 0\right) \end{cases} \quad (13)$$

注意到:函数 $\left[\frac{2(\pi-\omega)}{\pi}\right]^c$ 在 $\omega \rightarrow \pi$ 处为 C 阶无穷小,而函数 $\cos^4\left[\frac{\omega}{2}\right]$ 在 $\omega \rightarrow \pi$ 处为 4 阶无穷小,因此只有取 $c > 4$ 才能保证 $\hat{H}(\omega)|_{\omega \rightarrow \pi}$, 即 $\hat{H}(\omega)$ 在 $\omega = \pi$ 处连续。

由进一步的推导可得式(14):

$$G(\bar{\omega}) = -e^{j\omega} \times \begin{cases} 0, & \omega = 0 \\ 2 - \left[\frac{2(\pi-\omega)}{\pi}\right]^c, & \omega \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right] \\ \frac{\left[\frac{2\omega}{\pi}\right]^c}{\cos^4 \frac{\pi-\omega}{2}}, & \omega \in \left[\frac{\pi}{2}, \pi\right] \\ G(-\omega), & \omega \in \left(-\pi, 0\right) \end{cases} \quad (14)$$

和式(15)

$$\tilde{G}(\omega) = -e^{j\omega} \sin^4 \frac{\pi}{2}, \omega \in \left(-\pi, \pi\right] \quad (15)$$

这样,通过式(12)-(15)基本关系式, $H(\omega)$, $\hat{H}(\omega)$, $G(\omega)$, $\tilde{G}(\omega)$ 全部解出。

构造出该小波滤波器,所生成的滤波器的波形如图 1。

生成滤波器性质如图 2。由于采用了尺度函数,因而具有正交性质。在分解低通滤波器中其幅

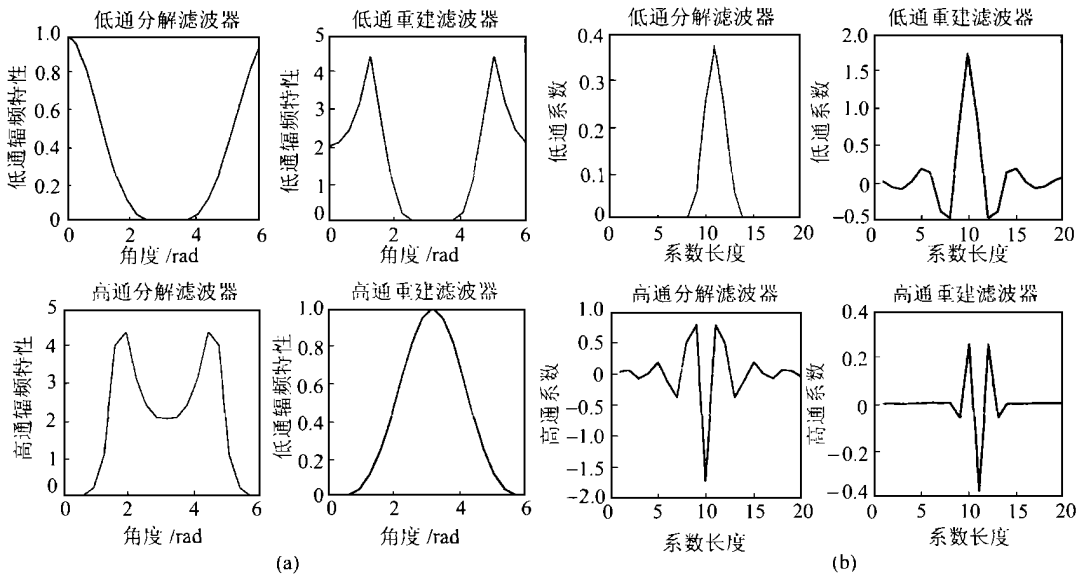


图 2 构造滤波器的低通和高通幅频特征和其相应的滤波器系数

Fig. 2 The feature of amplitude-frequency and relative coefficient of conformation filter in Lowpass and Highpass

频特性带通很窄,这样分解后可使图像噪声主要分布在高频率子图像中,便于后续除噪滤波。滤波器时域冲击响应系数分布呈左右对称,使其波形分布理想,这是由于在构造滤波器过程中使用了一些改进的假设条件。在低通重建滤波器中,低通系数在系数长度为 20 的范围内,波形对称性较图 1 中的其它小波波形要好,分布更合理。

但值得指出的是分解低通滤波器通带窄会造成重建低通滤波器通带展宽,结果重建低通滤波器冲

击响应系数收敛较慢,即支撑长度变大。在运算时如果滤波器系数长度取得短就会引入误差,而滤波器系数长度取得长会造成运算时间长。所以应根据处理图像的目标的特点,综合考虑定出系数长度。

由于主要是针对具有乘性性质噪斑的海洋 SAR 图像,滤波算法采用 Wiener 滤波算法。利用构造出的小波滤波器,用单尺度二维小波分解和重建对图像进行处理。

4 结果评价

用 3 种经典的小波基参与评价。Db N , Coif N 和

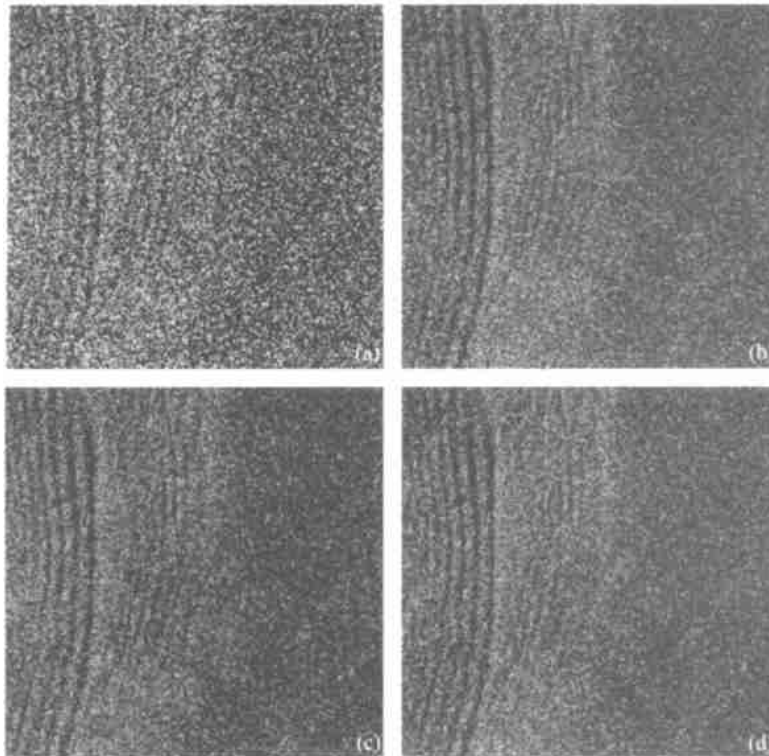


图 3 多种小波基函数对 ERS-1 海洋 SAR 图像(1024×1024)的 speckle 滤波图像
采用 Wiener 滤波算法, 3×3 滤波窗口: (a) 原始图像; (b) $\cos x^5$ 小波基; (c) Db5 小波基;
(d) Coif5 小波基

Fig. 3 The suppressing speckle results of the Ocean SAR image (1024×1024) processed
by the several mother wavelet functions

表 1 多种小波基函数 Wiener 滤波算法图像数值统计

Table 1 Results of the image relevant statistical value of the
various wavelet mother functions

小波函数	最小值	均值	中值	标准偏差	最大值
Original	0	127.8	127	72.0	255
$\cos x^5$	1	127.8	125	30.4	254
Db5	0	126.9	125	29.4	239
coif5	1	126.9	125	29.8	251
Boir5	20	126.9	125	29.5	248

一般定量评价 SAR 滤波图像的标准有等效视数、均值差、边缘保存程度和计算时间等, 但最重要的评价因素是均值的保留、标准偏差的减小和边缘的保存^[5-7]。从多种小波函数对海洋 SAR 图像的 speckle 滤波数值统计结果(表 1)可以看出, 新构造的小波基函数(如 $\cos x^5$) 在标准偏差的减小方面虽

Boir N (N 指小波函数阶数)。选用一幅 ERS-1 海洋 SAR 图像(1024×1024)。采用 Wiener 滤波算法, 3×3 滤波窗口, 用不同的小波基函数进行滤波, 图像滤波结果见图 3, 滤波图像统计结果见表 1。

然稍逊于其它小波基函数, 但在均值保持方面和在边缘信息保留方面则完全优于其它小波基的滤波结果。在上述处理图像的基础上, 截取一块 100×100 大小的图像进行的精细结构分析可视图见图版 I 图 4。

在高频噪声平滑方面, Db N 小波函数表现最好, 其次是 Bior N , 它们的图形表现的很平滑, 这一点从表 1 的标准偏差值中就可看出, 其余均不理想。在边缘信息细节保留方面, $\cos xN$ 和 Coif N 小波函数表现较理想, 但从图形看, $\cos xN$ 小波函数在突变信号精细结构保留方面, 优于 coif N 小波函数。

为进一步对 $\cos xN$ 小波函数全面评价, 与其它小波函数一样, 采取相同的 Prewitt 边缘增强算子, 进行边缘信息提取, 提取结果见图 5。 $\cos xN$ 小波函数在边缘的平滑性和连续性方面, 效果明显优于其它小波函数。

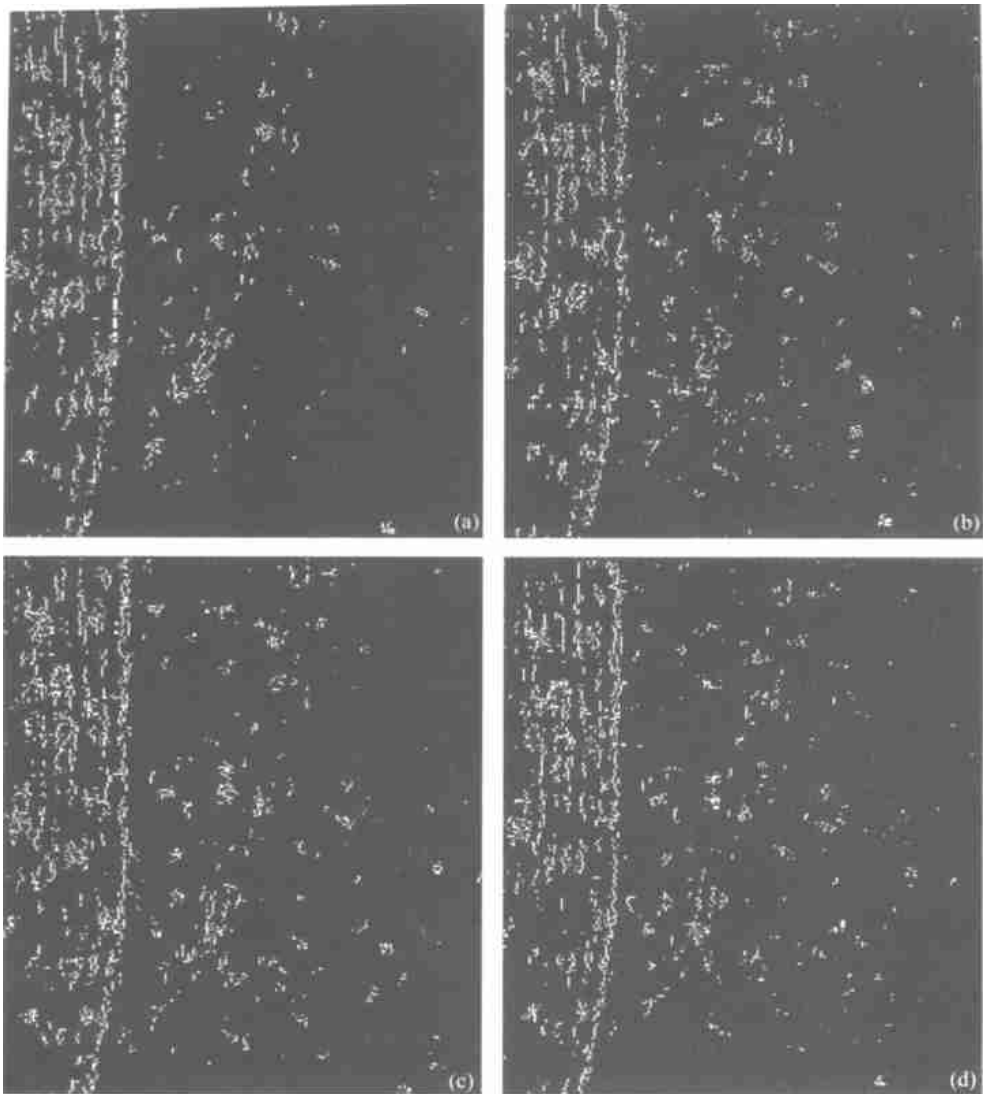


图 5 采用 prewitt 边缘增强算子, 11×11 算子窗口对不同小波基函数图像进行边缘特征提取结果图
其中, (a) 子图是 $\cos x^9$ 小波基函数; (b) 是 Db5 小波基函数, (c) 是 Coif5 小波基函数, (d) 是 Boir1.5 小波基函数

Fig. 5 The extracting edge results of different mother wavelent functions

5 结论与讨论

综合上述评价结果, 不难看出, 构造出的 $\cos x/N$ 小波函数在评价 speckle 滤波的 3 个重要因素中, 均值保留和边缘信息保存优于其它小波函数, 而标准偏差稍逊于其它小波函数。图像处理结果表现为构造的小波函数在 speckle 滤波方面, 平滑程度没有其它小波函数高, 但在边缘信息细节保留方面, 要明显优于其它小波函数。这完全是由构造的小波函数本身的特征决定的。分解低通滤波器带通很窄及对称程度高, 能使其具有良好的边缘信息保存能力。SAR 图像的 speckle 滤波的平滑程度与边缘细节信息的保留程度是个互补的关系, 对不同的研究目标,

两者程度大小是不同的。在小波分析应用中, SAR 图像的低频信息特征提取依赖于小波基函数, 通过它可以决定高低频成分的比例程度。海洋 SAR 图像主要在海浪谱参数反演、浅海地形反演、船尾迹探测以及监测海面油膜等方面应用, 所需信息的提取主要依赖于原有图像中较微弱的边缘特征信息, 因此, 在 SAR 图像 speckle 滤波中很自然注重了对边缘信息的保留。目前 speckle 滤波的工作多集中在算法上, 而对小波函数的研究不够。本文通过构造出的 $\cos x/N$ 小波函数对海洋 SAR 图像的 speckle 滤波, 表明该小波基函数对目标信息特征提取是有效的, 应该对小波函数的研究引起重视。尽管本文构造出的小波函数能够有效去除噪斑, 但也仍然存在一些不足之处。这些缺陷在今后的工作中需要不断地加

以修正,使应用于海洋 SAR 图像 speckle 滤波的该小波基函数逐渐完善。

参考文献 (References)

- [1] Mallat S, Zhong S. Characterization of signal from multiscale edges [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**: 710—732.
- [2] Ruskai M B, Beylkin G *et al.* Wavelet and their applications [C]. Boston: Jones and Bartlett Publishers, 1992.
- [3] Daubechies I. Ten lecture notes on wavelets [M]. Philadelphia: Society for industrial and applied mathematics, 1992.
- [4] Dong Y, Forster B *et al.* Speckle suppressing using recursive wavelet transforms [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(2): 317—330.
- [5] Lopes A, Touzi R. Adaptive speckle filtering for SAR images [C]. IGARSS '88, 1988.
- [6] Dewaele P, Osterlinck A *et al.* Comparison of some speckle reduction techniques for SAR images [C]. IGRASS '90, 1990.
- [7] Xu X, Liao M, Pu F. An adaptive method for speckle filtering of SAR image based on local relative standard deviation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(3): 214—218. [徐新, 廖明生, 卜方玲. 一种基于相对标准差的 SAR 图像 speckle 滤波方法[J]. 遥感学报, 2000, **4**(3): 214—218]

Using Wavelet for Filtering Speckle and Extracting Edge from Ocean SAR Image

GUO Zi-qi¹, LU Gang², WANG Chao¹, PAN Guang-dong¹

(1. LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China;

2. Department of Electric Engineering of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Due to the fact that SAR generates images by coherently processing the scattered signals, the images are highly susceptible to speckle effects, and the intensity of speckle noise obeys a negative exponential distribution and is a multiplicative noise. This phenomenon seems special more obvious on the ocean SAR images than the others. According to the feature of the speckle of ocean SAR image, a new mother wavelet function was constructed. It possesses narrow band in the low-pass and symmetry distribution of impulsion response coefficient in time region, enabling it has an excellent performance in dealing with wave signal aspect. For an original ocean SAR image with size of 1024 by 1024, the Wiener filter algorithm was adopted and the new wavelet filter was applied in order to firstly suppress speckle and then to extract the edge information with Prewitt filter algorithm. Compared several classic mother wavelet functions with the new wavelet function using the same processing method and uniform image, the result shows that the new mother wavelet function is much better than other compared mother wavelet functions in preserving the image's edge information, though its performance is not good enough in suppressing speckle. Based on the above discussion, it is obvious that the wavelet filter is a very effective method in speckle filtering and the new constructed mother wavelet function plays an important role in extracting SAR image edge feature.

Key words: Wavelet; SAR image; filtering speckle; extracting edge feature

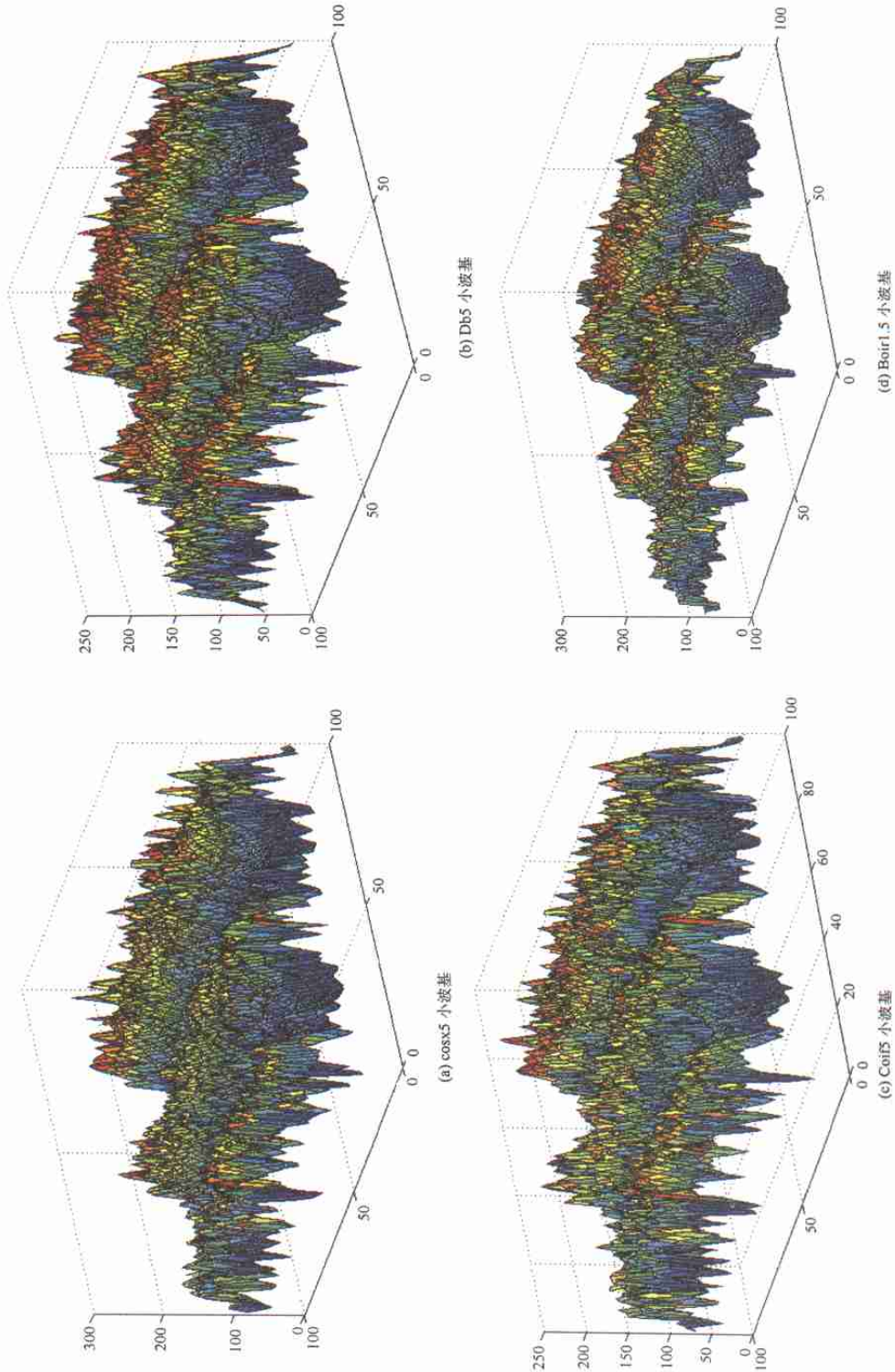


图 5 采用 Wiener 滤波算法 (7*7 滤波窗口对 100*100 大小的图像进行精细结构分析可视图)