

基于二维经验小波变换的金属断口图像消噪方法研究



谷士鹏¹, 常志远², 马曼曼², 李志农², 龙盛蓉³, 程娟¹

1. 中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089

2. 南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063

3. 南昌航空大学 江西省图像处理与模式识别重点实验室, 江西 南昌 330063

摘要: 针对传统小波变换在金属断口图像分析中存在的不足, 结合二维经验模态分解和小波分析, 本文提出了一种基于二维经验小波的断口图像消噪算法。该方法通过自适应构造滤波器组构造了经验小波函数, 实现了在频域上分割傅里叶频谱的同时又分离出了信号的不同模式, 从而提取了具有紧支撑傅立叶频谱的 AM-FM 成分。将所提方法与传统小波变换方法进行对比, 结果表明, 不论是从峰值信噪比还是从结构相似指数来看, 二维经验小波算法的图像消噪效果都明显优于小波变换方法。最后, 将二维经验小波算法应用到金属断口图像消噪中, 进一步验证了所提方法的有效性。

关键词: 二维经验小波; 金属断口; 图像消噪; 小波变换; 二维经验模态分解

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.10.009

由于低熵性、多分辨率分析、去相关等特性, 小波变换在图像去噪、数据压缩、故障诊断和多传感器定位等领域取得了良好的效果^[1-5]。小波变换通常被用来处理一维信号。当将一维小波基推广到处理二维图像时, 由于其支撑区间将变为正方形, 因此小波变换的方向性较差。如果直接用二维小波处理图像, 不能有效地逼近图像的奇异性曲线, 导致无法准确地提取目标的边缘特征。特别是在高维情况下, 传统的小波变换无法直接利用图像的几何特征对其进行最优或者最稀疏表示, 即无法保证相应的滤波器是最佳的。因此, 寻求一种能够根据图像自身包含的信息来生成自适应表示的算法是本文需要解决的重要问题之一。经验模态分解(EMD)^[6]通过其特有的时间尺度特征将信号分解为多个模态函数和残差趋势项, 使得信号平稳化, 从而实现对信号的自适应表示。近年来, EMD 算法在图像处理领域得到了初步的应用^[7-11]。J.Gilles^[12]给出了经验小波变换(EWT), 并将所提方法由一维扩展到二维, 提出了二维经验小波变换(2D-EWT)方法。EWT 是基于 Littlewood Paley

小波提出的通过设计适当的小波滤波器组来提取信号的不同模式。与 EMD 一样, 经验小波变换可以从信号中提取出调幅—调频(AM-FM)成分。在傅里叶域中, 经验小波变换的支撑区域不是由二进制分解得到的, 而是根据所分析的信号自适应选择的。基于 2D-EWT 算法的独特优势, 本文将该算法应用到金属断口图像消噪中, 同时, 对比研究传统的小波变换的金属断口图像消噪方法, 通过仿真和试验验证提出的方法的有效性。

1 二维经验小波变换

二维经验小波变换是在经典的二维 Littlewood Paley 小波变换的基础上改进的, 它的滤波器组在傅里叶(Fourier)域内具有环形支撑, 支撑的内、外半径固定在 Fourier 域的二元分解平面上, 即尺度因子^[13]。这里, 应用经验分析方法对环形支撑的每个环进行检测。检测是在傅里叶的伪极坐标平面下进行的, 因此可以用频率模量 $|\omega|$ 来表示边界。为了解决伪极点傅里叶变换的构造问题, 参考文献[14]和[15]

收稿日期: 2022-03-28; 退修日期: 2022-05-16; 录用日期: 2022-07-15

基金项目: 航空自然科学基金(20194603001); 江西省图像处理与模式识别重点实验室开放基金(ET202008414); 江西省教育厅科学与技术项目(GJJ180525)

引用格式: Gu Shipeng, Chang Zhiyuan, Ma Manman, et al. Research on denoising method of metal fracture image based on two-dimensional empirical wavelet transform[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(10): 66-73. 谷士鹏, 常志远, 马曼曼, 等. 基于二维经验小波变换的金属断口图像消噪方法研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(10): 66-73.

提出了一些方法,并且提供了一个算子 $F_p(f)(\theta,|\omega|)$ 对其进行构造。在傅里叶支撑中,一维傅里叶谱存在于每个角度 θ 中。然而,在张量变换下,如果单独对每个角度 θ 进行傅里叶边界检测,则其输出频谱中将会产生一些不连续性。为了避免这种影响,二维经验小波变换采用了张量变换的思想来计算平均频谱,即

$$\tilde{F}(|\omega|) = \frac{1}{N_\theta} \sum_{i=0}^{N_\theta-1} F_p(f)(\theta_i,|\omega|) \quad (1)$$

式中, N_θ 为离散角度的数量。然后,对频谱 $\tilde{F}(|\omega|)$ 进行边界检测,进而得到集合 $\{\omega^n\}_{n=0,\dots,N}$ ($\omega^0=0, \omega^N=\pi$)。使用这组集合构建一组二维经验 Littlewood Paley 小波

$$B^{\text{ELP}} = \left\{ \varphi_1(X), \{\psi_n(X)\}_{n=1}^{N-1} \right\} \quad (2)$$

式中, $\psi_n(X)$ 为经验小波函数, $\phi_1(X)$ 为经验尺度函数; B^{ELP} 为所建立的一组二维经验小波。该定义是一维经验小波的直接扩展^[16]。由于在 $\omega^{N-1} \leq |\omega| \leq \omega^N = \pi$ 上扩展环是为了保持傅里叶域的“角”,因此除最后的环形外,其定义如式(3)~式(5)所示。

$$F_2(\varphi_1)(\omega) = \begin{cases} 1 & |\omega| \leq (1-\gamma)\omega^1 \\ \cos \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\gamma\omega^1} (|\omega| - (1-\gamma)\omega^1) \right) \right] & (1-\gamma)\omega^1 \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega^1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

如果 $n \neq N-1$

$$F_2(\psi_n)(\omega) = \begin{cases} 1 & (1+\gamma)\omega^n \leq |\omega| \leq (1-\gamma)\omega^{n+1} \\ \cos \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\gamma\omega^{n+1}} (|\omega| - (1-\gamma)\omega^{n+1}) \right) \right] & (1-\gamma)\omega^{n+1} \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega^{n+1} \\ \sin \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\gamma\omega^n} (|\omega| - (1-\gamma)\omega^n) \right) \right] & (1-\gamma)\omega^n \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega^n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

如果 $n = N-1$

$$F_2(\psi_{N-1})(\omega) = \begin{cases} 1 & (1+\gamma)\omega^{N-1} \leq |\omega| \\ \sin \left[\frac{\pi}{2} \beta \left(\frac{1}{2\gamma\omega^{N-1}} (|\omega| - (1-\gamma)\omega^{N-1}) \right) \right] & (1-\gamma)\omega^{N-1} \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega^{N-1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

信号 f 的二维经验小波变换的细节系数定义为

$$W_f^{\text{ELP}}(n, X) = F_2^*(F_2(f)(\omega) \overline{F_2(\psi_n)(\omega)}) \quad (6)$$

近似系数(约定用 $W_f^{\text{ELP}}(0, X)$ 表示)为

$$W_f^{\text{ELP}}(0, X) = F_2^*(F_2(f)(\omega) \overline{F_2(\varphi_1)(\omega)}) \quad (7)$$

其逆变换为

$$f(x) = F_2^*(F_2(W_f^{\text{ELP}})(0, \omega) F_2(\varphi_1)(\omega) + \sum_{n=1}^{N-1} F_2(W_f^{\text{ELP}})(n, \omega) F_2(\psi_n)(\omega)) \quad (8)$$

由以上可以得出 2D-EWT 处理图像的算法流程:

(1) 输入: 图像 $f(x)$, 滤波器的数量(N)。

(2) 计算 $F_p(f)(\theta, |\omega|)$, 求出平均频谱

$$\tilde{f}(|\omega|) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N_\theta-1} |F_p(f)\theta_i, |\omega|| \quad (9)$$

(3) 由式(3)~式(5)检测傅里叶边界, 得到频谱半径集合 Ω 和对应的滤波器组

$$B = \left\{ \varphi_1(X), \{\psi_n(X)\}_{n=1}^{N-1} \right\} \quad (10)$$

(4) 利用式(6)和式(7)对原始图像进行过滤, 得到目标图像 f 。

(5) 输出: $B^{\text{ELP}}, W_f^{\text{ELP}}(n, X)$ 。

2 仿真研究

为了验证所提方法是否有效, 以 Lena 图像为对象进行仿真研究。在仿真研究中, 分别给 Lena 图像人为地加入不同比例的椒盐噪声或高斯白噪声, 噪声的阈值由式(11)给出

$$\delta = \sqrt{2 \log N_p} \quad (11)$$

式中, N_p 为像素数量。

为了比较去噪效果, 在此对于算法效果评价引入业内常用的两个指标: 代表图像失真或者噪声水平的峰值信噪比 (PSNR) 和反映人类视觉特性的结构相似指数 (SSIM)^[15]。

PSNR 定义为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{\text{Max}^2}{\text{MSE}} \right) \quad (12)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{N_p} \|I_x - I_y\|_2^2 \quad (13)$$

式中, Max 表示灰度级; I_x 是原始含噪图像; I_y 是过去噪处理后的图像。

SSIM 用来计算两个图像的相似度。其结果接近 1, 则表示两个图像在结构上越相似, 它可被定义为

$$\text{SSIM} = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (14)$$

式中, μ_x, μ_y 是 I_x, I_y 的平均值, σ_x, σ_y 分别是 I_x, I_y 的协方差。

c_1, c_2 的定义分别为

$$c_1 = (0.01L)^2, c_2 = (0.03L)^2 \quad (15)$$

式中, L 是动态范围(见参考文献[14])。

图1和图2分别是基于小波、经验小波变换两种算法在不同噪声环境下去噪的效果图。表1表示加入不同噪声后,不同样本的峰值信噪比和结构相似指数的计算结果。

表1 两种噪声环境下Lena图像的去噪效果

Table 1 Denoising of Lena images in two noisy environments

	Lena(高斯, SNR=-35dB)		Lena(椒盐, $\sigma=57$)	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
Noisy	20.01	0.3602	22.27	0.64
Wavelet	23.56	0.5014	24.35	0.67
2D-EWT	26.20	0.72	25.80	0.71

由表1可见,基于二维经验小波算法的图像消噪峰值信噪比(PSNR)明显高于小波算法。图1和图2可以直观地观察到利用该算法消噪具有的优越性,可见即使是简单的取阈值,二维经验小波变换算法消噪的PSNR与典型的小波变换算法消噪相当,甚至更高。在中等程度噪声背景下,二维经验小波算法处理图像的能力在视觉上更清晰,特别是对于重建边缘和微小非奇异的线性结构非常有效。SSIM方面分析,也能体现出该算法在两种噪声环境下优于小波变换表达图像的能力。

3 试验研究

二维经验小波变换可以根据图像自身包含的信息来生成图像的自适应表示,并且该算法在提取图像纹理方面有突出的优点。在图像处理中,多数图像在频域中的模式差异并不明显。所以,要检测有用的傅里叶支撑来获取图像的相关模式。经验小波变换方法中,傅里叶频谱的边界检测是至关重要的。该算法使用了一个由低通滤波器和 $N-1$ 个带通滤波器组成的滤波器组在信号谱中选择相关模式。其中,低频分量集中了大量能量,还含有较多来自同一模式的局部最大值,表示图像平坦变化的部分。为了验证二维经验小波变换在金属断口图像中的有效性,在此,分别取沿晶、解理、韧窝三种纹理图像来进行消噪分析。

图3给出了三种金属断口图像及其傅里叶谱边界检测的效果图。可以看到,每幅图像的二维经验小波变换的傅里叶支撑都尝试分离不同的模式,这直接关系到二维经验小波变换自适应分解的结果。由图3知,该算法可以提取



图1 Lena椒盐去噪效果图

Fig.1 Denoising of Lena image with the salt and pepper noise

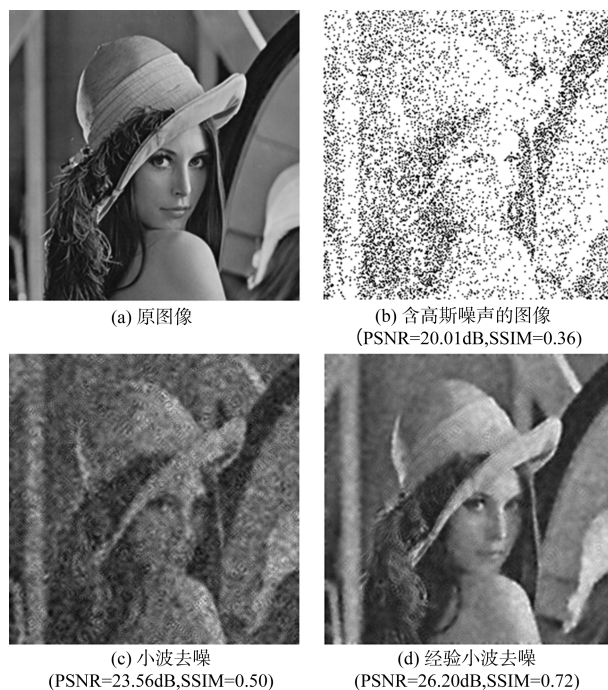


图2 Lena高斯去噪

Fig.2 Denoising of Lena image with the Gaussian noise

出信号的不同模式,表达出较强自适应性的特点。

为了突出提出方法的优越性,这里分别给三种金属断口图像添加椒盐噪声(噪声方差 $\sigma=57$)与高斯白噪声

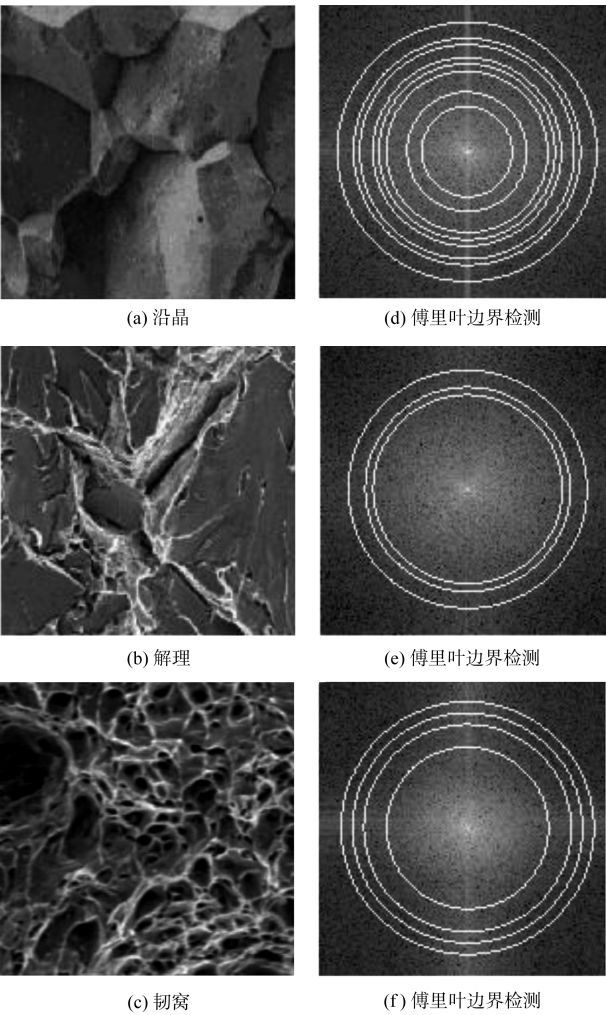


图3 金属断口原图像及其傅里叶频谱边界检测
Fig.3 Original metal fracture image and its Fourier spectrum boundary detection

(SNR=-35dB),在不同噪声强度与噪声环境下,对金属断口图像分别进行二维经验小波变换,并进行消噪分析。最后改变噪声强度,在不同噪声环境下,分别抽取20组断口图像数据作样本,进行对比分析,并通过图像质量评价指标PSNR与SSIM来反映。

表2和表3分别是在椒盐噪声和高斯白噪声下,图像质量评价指标的消噪结果。表2和表3中PSNR和SSIM两个图像质量评价指标结果,更有力地验证了二维经验小波比经典小波提供了更好的结果。

图4、图6、图8和图5、图7、图9分别是在两种噪声环境下,对一组断口图像进行消噪后的直观显示结果。图4~图9表明,在不同噪声强度与噪声环境下,二维经验小波变换算法图像消噪效果优于小波变换,其中。图4(a)中PSNR=22.45dB, SSIM=0.58; 图4(b)中 PSNR=27.70dB, SSIM=

表2 椒盐噪声下,噪声方差 $\sigma=57$,三种断口图像的去噪效果

Table 2 Denoising effect of fracture image under salt and pepper noise with $\sigma=57$

	沿晶		解理		韧窝	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
Noisy	22.45	0.58	22.81	0.72	21.85	0.79
Wavelet	27.70	0.68	25.14	0.75	22.90	0.79
2D-EWT	30.51	0.77	28.87	0.87	25.85	0.88

表3 高斯白噪声下SNR=-35dB,三种断口图像的去噪效果
Table 3 Denoising effect of fracture image under Gaussian white noise with SNR=-35dB

	沿晶		解理		韧窝	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
Noisy	20.01	0.51	19.88	0.45	20.10	0.62
Wavelet	22.63	0.61	23.07	0.58	22.59	0.62
2D-EWT	23.74	0.69	25.13	0.70	26.77	0.81

0.68; 图4(c)中 PSNR=30.51dB, SSIM=0.77。图5(a)中 PSNR=20.01dB, SSIM=0.51; 图5(b)中 PSNR=22.63dB, SSIM=0.61; 图5(c)中 PSNR=23.74dB, SSIM=0.67。图6(a)中 PSNR=22.81dB, SSIM=0.72; 图6(b)中 PSNR=25.14dB, SSIM=0.75; 图6(c)中 PSNR=28.87dB, SSIM=0.87)。图7(a)中 PSNR=19.88dB, SSIM=0.45; 图7(b)中 PSNR=23.70dB, SSIM=0.58; 图7(c)中 PSNR=25.13dB, SSIM=0.70。图8(a)中 PSNR=21.85dB, SSIM=0.79; 图8(b)中 PSNR=22.90dB, SSIM=0.79; 图8(c)中 PSNR=25.85dB,

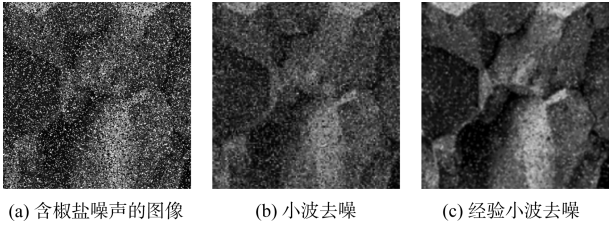


图4 沿晶-椒盐去噪效果图
Fig.4 Yanjing-salt and pepper denoising effect

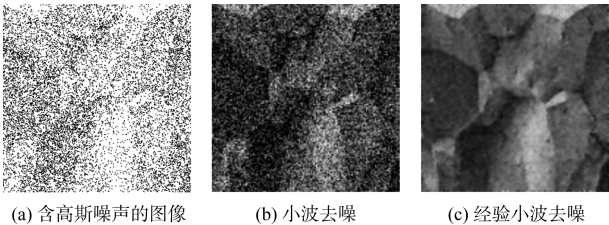
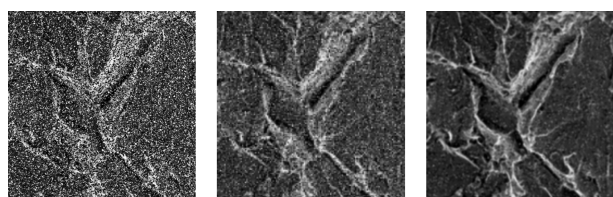


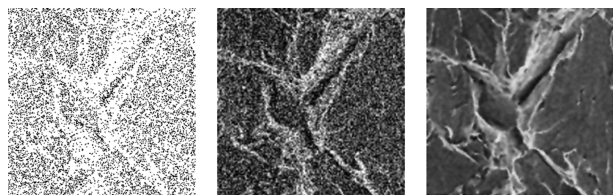
图5 沿晶-高斯去噪效果图
Fig.5 Yanjing-Gaussian denoising effect



(a) 含高斯噪声的图像 (b) 小波去噪 (c) 经验小波去噪

图6 解理-椒盐去噪效果图

Fig.6 Jieli-salt and pepper denoising effect

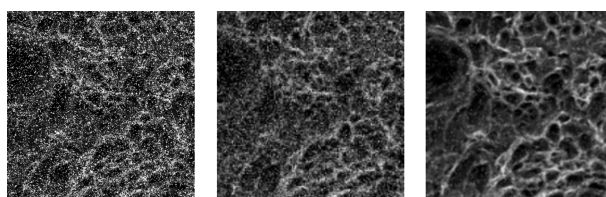


(a) 含高斯噪声的图像 (b) 小波去噪 (c) 经验小波去噪

图7 解理-高斯去噪效果图

Fig.7 Jieli-Gaussian denoising effect

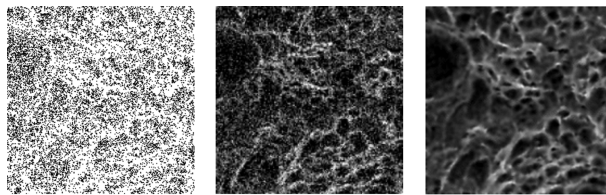
SSIM=0.88。图9(a)中 PSNR=20.10dB, SSIM=0.62; 图9(b)中 PSNR=22.56dB, SSIM=0.62 图9(c)中 PSNR=26.77dB, SSIM=0.81。



(a) 含高斯噪声的图像 (b) 小波去噪 (c) 经验小波去噪

图8 韧窝-椒盐去噪效果图

Fig.8 Renwo-salt and pepper denoising effect

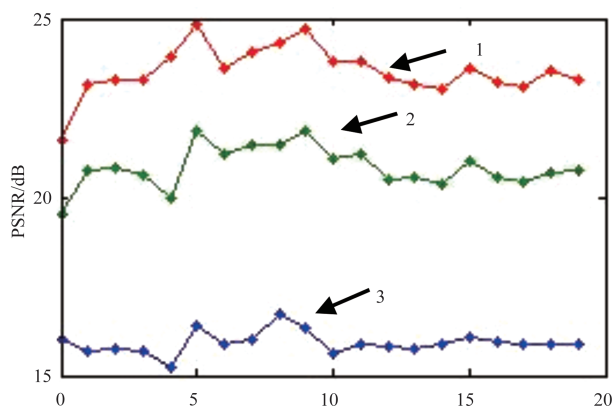


(a) 含高斯噪声的图像 (b) 小波去噪 (c) 经验小波去噪

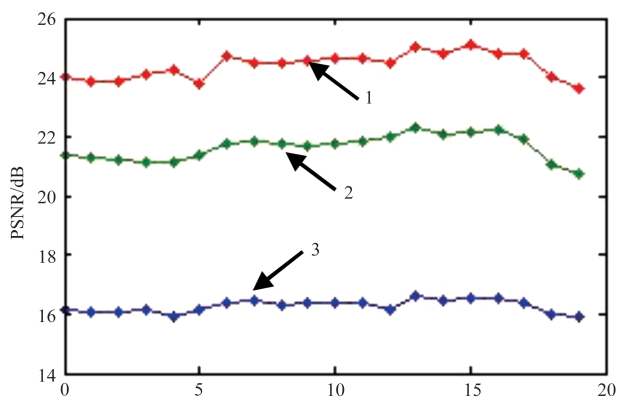
图9 韧窝-高斯去噪效果图

Fig.9 Renwo-Gaussian denoising effect

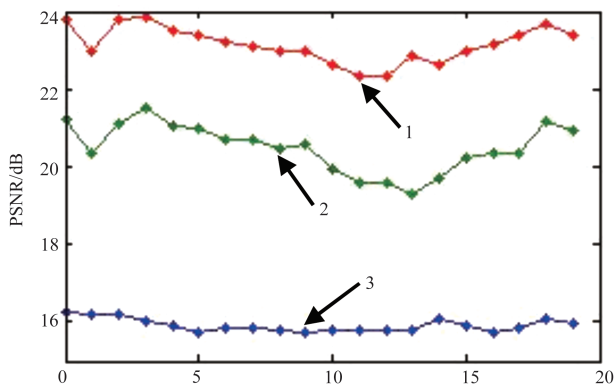
图10和图11分别是在两种噪声环境下对于不同噪声强度,20组样本数据的PSNR与SSIM两个度量指标的曲线对比图。1为2D-EWT变换算法去噪;2为小波变换算法去



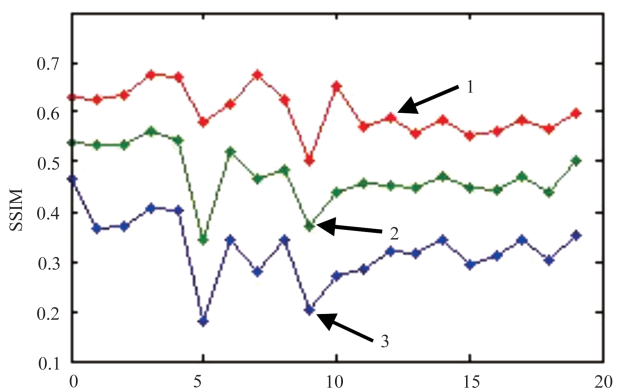
(a) 沿晶



(b) 解理



(c) 韧窝



(d) 沿晶

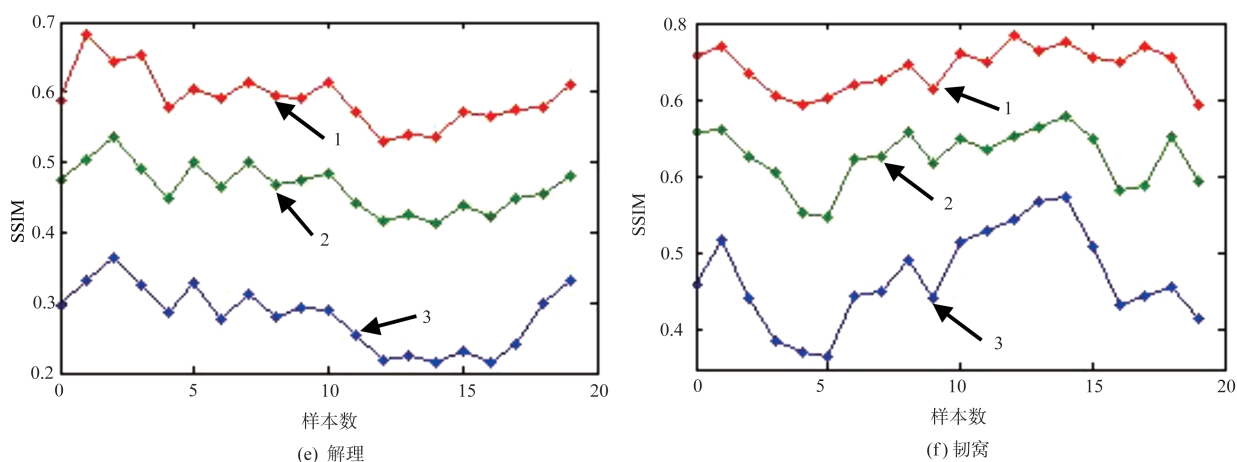


图10 椒盐噪声下(噪声方差 $\sigma=72$)各方法不同断口图像的PSNR与SSIM值曲线对比

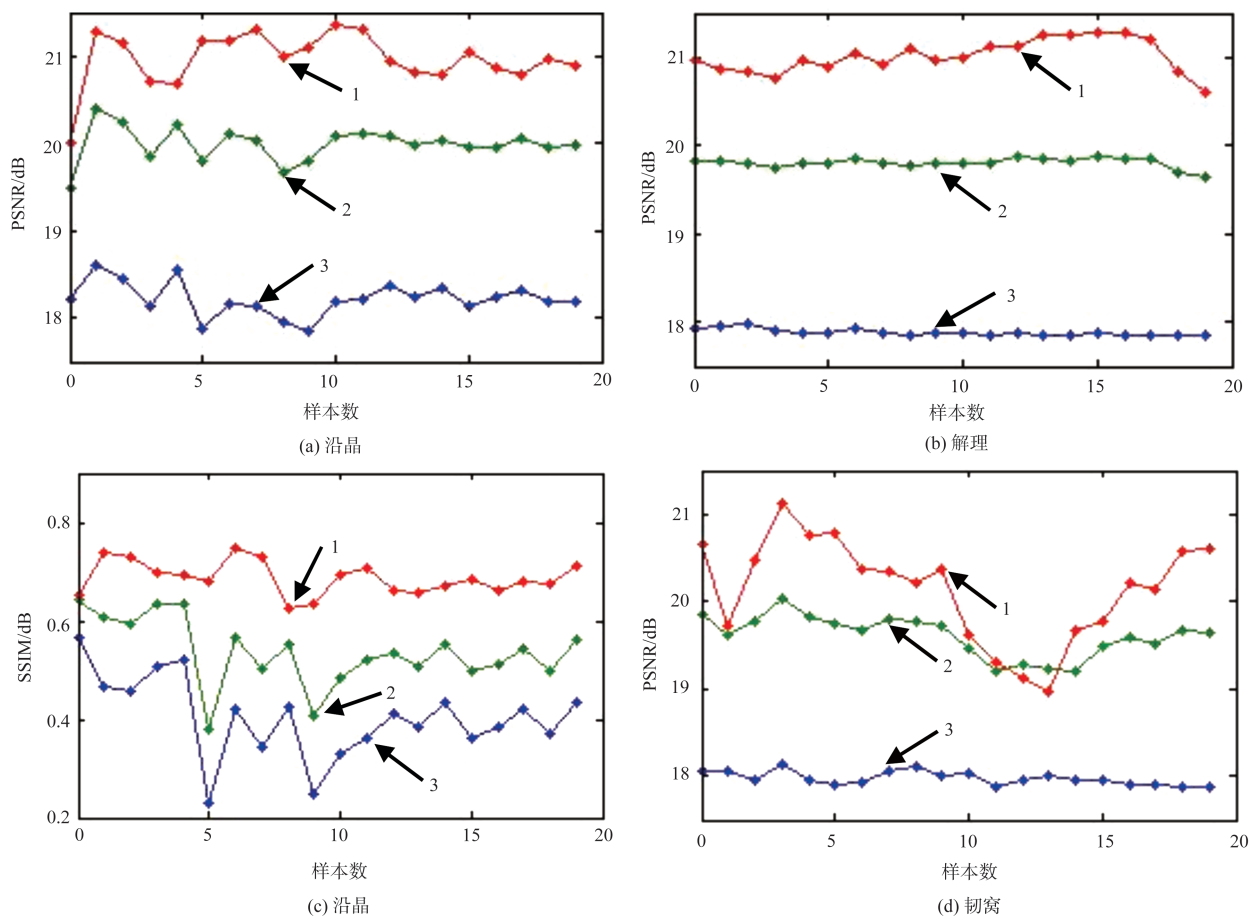
Fig.10 Salt and pepper noise (noise variance $\sigma=72$) PSNR and SSIM comparison for different fracture images of the two algorithms

噪; 3为原图含噪。由图10和图11可知,根据处理图像的不同种类,随着噪声强度的增强,在经验小波变换优于小波变换的基础上,经验方法的结果根据处理图像的不同而表现不同,有时甚至与小波变换相当,但绝大部分表现出了更好的效果,这也充分表现了经验小波变换能够从图像本身提取一些几何信息,建立自适应小波表示的自适应性的特

点,随着噪声强度的增加,提出的方法相比小波变换具有更强的表达图像的能力。

4 结论

本文提出了一种基于2D-EWT的金属断口图像消噪方法,并进行了仿真和试验验证,对比分析二维经验小波变换



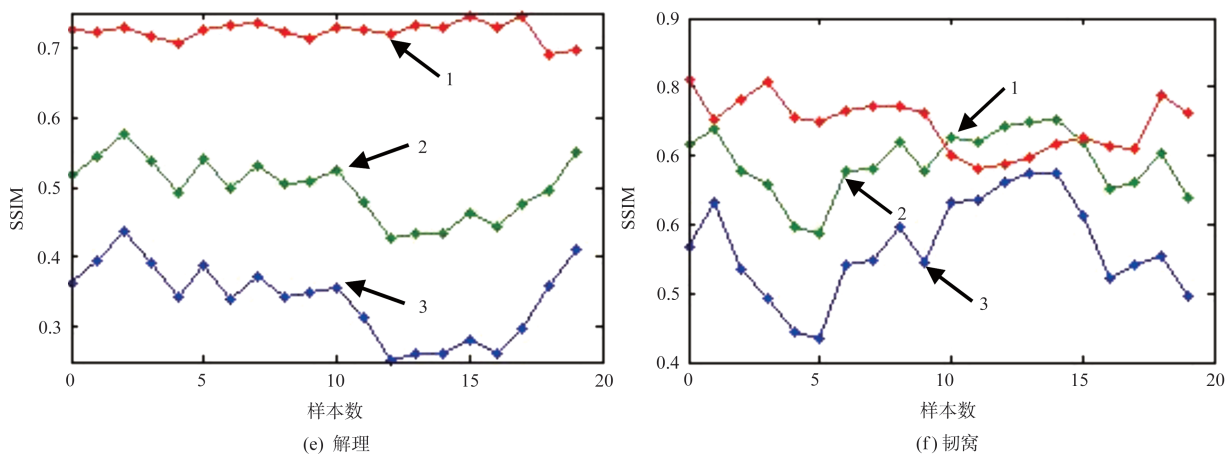


图 11 高斯白噪声下各方法不同断口图像的 PSNR 与 SSIM 值曲线对比

Fig.11 Gaussian white noise (PSNR=-40dB) PSNR and SSIM curve comparison results for different fracture images of the two algorithms

和小波变换在不同噪声强度与环境下图像的消噪效果,并通过性能指标 PSNR 与 SSIM 来反映。结果表明,提出的方法明显优于小波分析方法,随着噪声强度的增加,提出的方法相比小波变换该算法具有更强的表达图像的能力。这是因为二维经验小波变换可以根据图像自身包含的信息来生成其自适应表示,该优越性使二维经验小波变换的自适应分解结果更有利于图像处理。

AST

参考文献

- [1] 于天河,孟雪,潘婷,等.小波变换和自适应变换相结合的图像增强方法[J].哈尔滨理工大学学报,2018,23(6): 100-104.
Yu Tianhe, Meng Xue, Pan Ting, et al. Image enhancement based on wavelet transform and contrast limited adaptive histogram equalization [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018, 23(6): 100-104. (in Chinese)
- [2] 关雪梅.一种基于中值滤波和小波变换的图像去噪处理算法研究[J].中州大学学报,2020,37(1): 121-124.
Guan Xuemei. An algorithm for image denoising based on median filtering and wavelet transform [J]. Journal of Zhongzhou University, 2020, 37(1): 121-124. (in Chinese)
- [3] 夏峰,卢才武,顾清华.无人机采场图像二维经验小波变换降噪研究[J].测绘科学,2021,46(1): 108-113.
Xia Feng, Lu Caiwu, Gu Qinghua. Research on 2D empirical wavelet transform noise reduction of UAV stope images [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(1): 108-113. (in Chinese)
- [4] 陈雅娟,周子健,李清华,等.基于磁场矢量相位差的多传感器定位技术研究[J].航空科学技术,2021,32(10): 74-79.
Chen Yajuan, Zhou Zijian, Li Qinghua, et al. Research on multi-sensor positioning technology based on phase difference of magnetic field vector[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(10): 74-79. (in Chinese)
- [5] 刘杰薇,王平,徐福建,等.基于小波熵的滚动轴承早期微弱故障信息提取[J].航空科学技术,2019,30(2): 66-73.
Liu Jiewei, Wang Ping, Xu Fujian, et al. Early weak fault information extraction of rolling bearing based on CWT-entropy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(2): 66-73. (in Chinese)
- [6] Kommuri S V R, Singh H, Kumar A, et al. Bidimensional empirical mode decomposition-based diffusion filtering for image denoising [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2020, 39: 5127-5147.
- [7] Zhang Cunyong. Slope instability detection for muddy submarine channels using sub-bottom profile images based on bidimensional empirical mode decomposition[J]. Geo-Marine Letters, 2021, 41(1): 1.
- [8] 朱攀,黄战华.基于二维经验模态分解和高斯模糊逻辑的红外与可见光图像融合[J].光电子·激光,2017,28(10): 1156-1162.
Zhu Pan, Huang Zhanhua. Fusion of infrared and visible images based on BEMD and GFL [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017, 28(10): 1156-1162. (in Chinese)
- [9] Mozaffarilegha M, Joybari A Y, Mostaar A. Medical image fusion using bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) and an efficient fusion scheme[J]. Journal of

- Biomedical Physics & Engineering, 2020, 10(6): 1-10.
- [10] 王跃跃, 陈蓉, 于丽君, 等. 结合二维EMD与自适应高斯滤波的遥感卫星影像去噪[J]. 测绘通报, 2019(2): 22-27.
- Wang Yueyue, Chen Rong, Yu Lijun, et al. Denoising from remote sensing satellite image based on two-dimensional EMD and adaptive Gauss filtering [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(2): 22-27. (in Chinese)
- [11] Zhou Zhenguo. Two-dimensional EMD method and its application in image processing [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [12] Gilles J. Empirical wavelet transform [J]. IEEE Transactions in Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [13] Grafakos L, Arber W. Classical Fourier analysis [M]. 2ed. Springer-Verlag New York: Current Topics in Microbiology and Immunology, 2008.
- [14] Averbuch A, Coifman R R, Donoho D L, et al. Fast and accurate polar Fourier transform [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2006, 21: 145-167.
- [15] Averbuch A, Coifman R R, Donoho D L, et al. A frame work for discrete integral transformations-i-the pseudopolar Fourier transform [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2008, 30 (2): 764-784.
- [16] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

Research on Denoising Method of Metal Fracture Image Based on Two-Dimensional Empirical Wavelet Transform

Gu Shipeng¹, Chang Zhiyuan², Ma Manman², Li Zhinong², Long Shengrong³, Cheng Juan¹

1. China Flight Test and Research Institute, Xi'an 710089, China

2. Key Laboratory of Nondestructive Testing Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

3. Key Laboratory of Jiangxi Province for Image Processing and Pattern Recognition, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

Abstract: Based on the shortcomings of traditional wavelet transform in metal fracture image analysis, a fracture image denoising algorithm is proposed while being combined with two-dimensional empirical mode decomposition and wavelet analysis, i.e., 2D empirical wavelet transform. This method constructs the empirical wavelet function by adaptively constructing the filter bank, realizes the segmentation of the Fourier spectrum in the frequency domain, and separates the different modes of the signal, so as to extract the AM-FM component with tightly supported Fourier spectrum. The proposed method is compared with the traditional wavelet transform. The results show that the image denoising effect of 2D empirical wavelet algorithm is obviously better than that of wavelet transform, whether in terms of peak signal-to-noise ratio or structural similarity index. Finally, the 2D empirical wavelet algorithm is applied to metal fracture image denoising to further verify the effectiveness of the proposed method.

Key Words: 2D empirical wavelet; metal fracture; image denoising; wavelet transform; 2D empirical mode decomposition

Received: 2022-03-28; **Revised:** 2022-05-16; **Accepted:** 2022-07-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20194603001); Open Fund of Key Laboratory of Jiangxi Province for Image Processing and Pattern Recognition (ET202008414); Science and Technology Project of Jiangxi Education Department (GJJ180525)