

小波消噪在外差式激光多普勒振动测量中的应用

燕 帅 尚建华 刘玉英 赵曙光

(东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要 基于小波变换对外差式激光多普勒振动测量系统(HLDV)输出信号进行了噪声抑制性能研究。从外差式激光多普勒测振系统的测量原理出发,结合系统回波信号的特点,考虑测振系统中白噪声的影响,分析并改进了模极大值法和系数相关法两种小波消噪处理算法,并基于以往的阈值去噪算法,提出了新的阈值函数,重点分析了多尺度细化分析对还原原始信号特征及改善信号信噪比(SNR)的影响。结果表明,针对微振动目标运动特征提取,改进后的三种方法在振动信号的特征提取及噪声消除方面具备优异性能。

关键词 测量;外差式激光多普勒测振计;小波变换;模极大值;系数相关;小波阈值

中图分类号 TN247;TN911.4;TN911.72 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.081203

Wavelet Denoising for Heterodyne Laser Doppler Vibrometer

Yan Shuai Shang Jianhua Liu Yuying Zhao Shuguang

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract The properties of the output signal of heterodyne laser Doppler vibrometer (HLDV) under random noise disturbance are studied by means of wavelet transform. Considering the principle of HLDV and the influence of white noise in this system, the modulus maximum and the coefficient correlation algorithms are analyzed and improved. Also, based on the theory of the threshold enhancement, a new threshold function is proposed and used to analyze the effects of multi-scale method on the reconstruction of the oriental signal and improvement of signal-to-noise ratio (SNR). The results show that the improved modulus maximum, coefficient correlation and threshold enhancement algorithms present much more excellent performances in extracting the vibration parameters of the micro-vibration targets.

Key words measurement; heterodyne laser Doppler vibrometer; wavelet transform; modulus maximum; coefficient correlation; threshold enhancement

OCIS codes 120.7280; 280.3340; 110.7410

1 引言

基于激光多普勒测振计(LDV)的激光多普勒振动测量技术可以在远处对各种微弱振动目标的运动速度及位移实现非接触实时测量。相对于传统的振动测量手段^[1],激光多普勒测振技术具有探测灵敏度高、动态响应快、测量范围大及对待测振动界面无破坏等特点^[2,3],因而该技术已广泛应用于机械结构健康监测、材料探伤^[4,5]以及声光通信^[6]等领域。

在利用激光多普勒测振系统实现微弱振动目标运动特征测量时,测振系统固有噪声和工作环境噪声会直接导致系统输出信号信噪比(SNR)低,致使待测振动特征获取困难。因此,在检测微弱振动信号应用中,噪声抑制是非常关键的技术。鉴于傅里叶变换及其改进算法无法对信号进行时频域局部化分析与处理,不能满足实际测量中噪声抑制与信号精确分析的要求^[7],本文借助小波变换的时频多分辨率特性^[8,9]对信号进

收稿日期: 2012-04-24; **收到修改稿日期**: 2012-05-03; **网络出版日期**: 2012-06-15

基金项目: 上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“晨光计划”(11CG36)和纤维材料改性国家重点实验室项目(LK1113)资助课题。

作者简介: 燕 帅(1988—),男,硕士研究生,主要从事信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: jingxuan_ming@163.com

导师简介: 赵曙光(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理方面的研究。E-mail: sgzhao@dhu.edu.cn

行小波分解,得到信号在不同层级的分解系数,针对这些系数的分布特点,使用模极大值法、系数相关法和小波阈值去噪法 3 种小波消噪方法对含有噪声和信号的系数进行处理,最终达到信噪分离的目的。介绍了 3 种信号消噪算法的实现原理,通过对信号的仿真实验结果及实际信号的消噪结果的分析,对 3 种方法的消噪性能进行了全面的比较。

2 小波变换的 3 种信噪分离方法

2.1 离散小波变换

在工程应用中,为了满足计算机数据处理的要求,需将母小波函数的尺度参数 a 与移位参数 b 进行离散处理,因此,根据多分辨率分析中的 Mallat 塔式分解算法^[7~9]得到信号的离散小波分解公式为

$$c_{j,n} = \sum_l h_{l-2n} c_{j+1,l}, \quad d_{j,n} = \sum_l g_{l-2n} d_{j+1,l}, \quad (1)$$

式中 h_l 和 g_l 称为分解滤波器组,且 h_l 等效于低通滤波, g_l 等效于高通滤波; $c_{j,n}$ 与 $d_{j,n}$ 是信号在各小波空间的分解系数,且 $c_{j,n}$ 表征尺度 j 下信号的概貌, $d_{j,n}$ 表征信号的细节部分。因此,信号重构公式可表示为

$$c_{j+1,n} = \sum_l (\tilde{h}_{n-2l} c_{j,l} + \tilde{g}_{n-2l} d_{j,l}), \quad (2)$$

式中 \tilde{h}_l 和 \tilde{g}_l 为重构滤波器组。

2.2 模极大值法

由于信号与白噪声的 Lipschitz 指数特性^[10,11]不同,因此,可以筛选出带噪信号中噪声对应的模极大值,并进行消除。白噪声的 Lipschitz 指数 $\alpha < 0$,随着小波分解尺度增大,白噪声的模极大值逐渐减小;信号的 Lipschitz 指数 $\alpha > 0$,随着小波分解尺度的增大,信号的模极大值相应增大。鉴于上述分析,采用模极大值法实现信号与噪声的分离并进行信号重建,算法框图如图 1 所示。

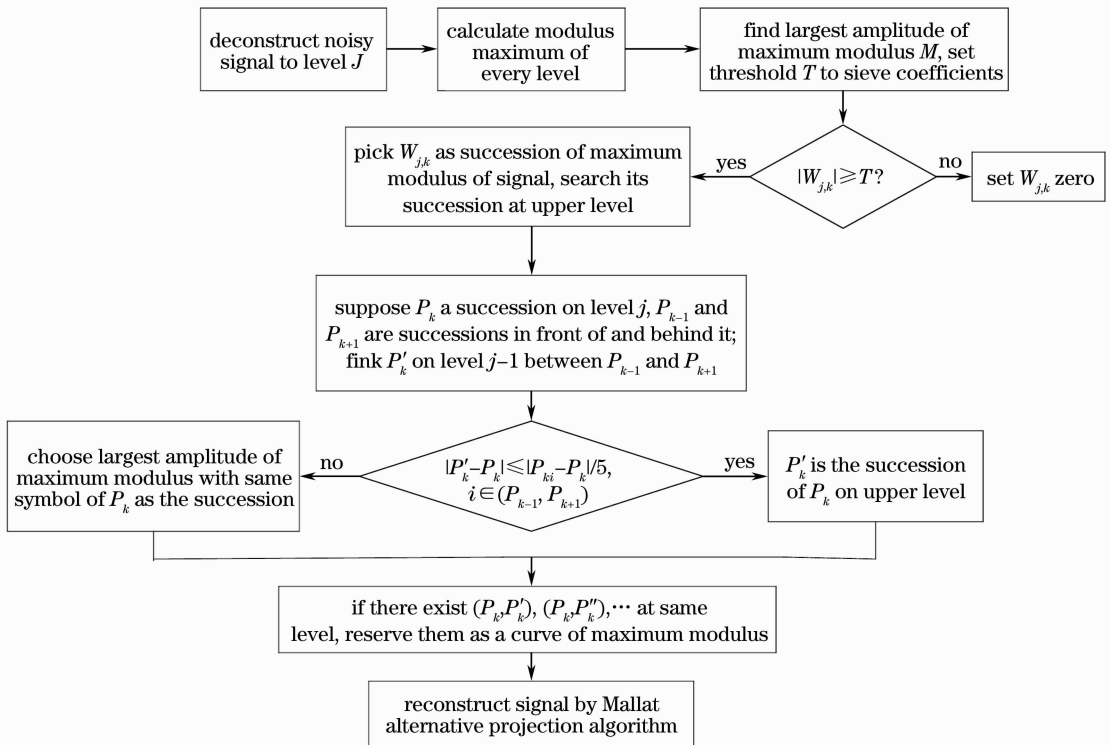


图 1 模极大值法流程图

Fig. 1 Flow chart of modulus maximum algorithm

由于最后一层小波系数模极大值主要由信号决定,据此设定阈值 T 进而筛选出信号的模极大值:

$$T = CM/J, \quad (3)$$

式中 J 表示小波分解尺度层级数,通常为 5 层或 6 层; M 为 J 层模极大值的最大幅值; C 为常数。 Q 为从第一

层小波系数提取的噪声功率谱估计值,且 C 和 Q 满足

$$C = \text{lb}(1 + 2\sqrt{Q}). \quad (4)$$

2.3 系数相关法

带噪信号经离散小波变换后,信号在各层级之间的小波系数相关性较强,而噪声对应的小波系数相关性不明显。此外,信号能量集中分布在较大尺度范围内,而噪声能量则主要集中在小尺度范围内。并且,随着分解尺度的增大,信号能量与噪声能量的差级也随之增大,有利于原始信息的提取。

假设带噪信号 $f(t)$ 经 J 层分解后,在尺度 j 上的小波系数为 $W_{j,k}$ 。由于在计算相关系数变量^[12]时每层小波分解系数中的微小偏移量会降低计算的准确性,因此通过区域系数相互关联削弱该不利影响。定义相关系数为

$$C_{W_{j,k}} = N_{W_{j,k}} N_{W_{j,k+1}}, \quad j = 1, \dots, J-1 \quad (5)$$

式中

$$N_{W_{j,k}} = \min \left[\sum_i^{-2 \sim 2} (W_{j,k+i} - N_{W_{j,k}})^2 \right]. \quad (6)$$

为使相关系数和小波函数在能量分布上具有可比性,定义归一化相关系数为

$$\tilde{W}_{j,k} = C_{W_{j,k}} \sqrt{P_{W_j} / P_{C_{W_j}}}, \quad (7)$$

式中

$$P_{W_j} = \sum_k W_{j,k}^2, \quad P_{C_{W_j}} = \sum_k C_{W_{j,k}}^2. \quad (8)$$

因此,归一化后的系数 $\tilde{W}_{j,k}$ 与原小波系数具有相同能量。具体算法实现框图如图 2 所示。

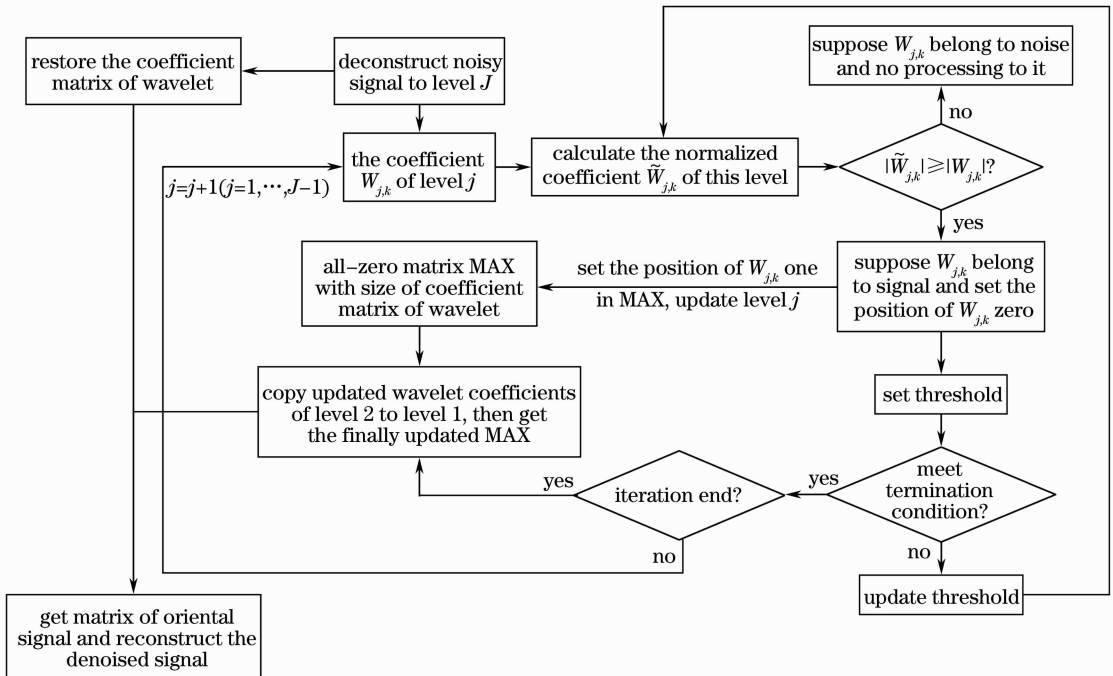


图 2 系数相关法处理流程图

Fig. 2 Flow chart of coefficient correlation

为了使选取的阈值具有实际意义,根据系数本身的能量表征设定每层的阈值。新阈值表达式使用更新的 $\overline{P_{C_{W_j}}}$ 表征剩余的小波系数能量,迭代阈值为

$$\overline{P_{C_j}} \geq (N - N_0) \sigma^2, \quad (9)$$

式中 N 为信号长度, N_0 为处理后的小波系数置 0 次数, σ^2 为白噪声方差估计值,且与第一层小波系数能量值相关,依据白噪声方差估计法^[13]可得

$$\sigma = \text{Median}(|W_{1,k}|) / 0.6745, \quad (10)$$

式中 $W_{1,k}$ 为第一层对应的小波系数, $\text{Median}(|W_{1,k}|)$ 为小波系数的幅度平均值。

2.4 小波阈值去噪法

阈值去噪是信号小波消噪中最常用的方法,本文在文献[14]的基础上提出改进型阈值函数

$$\tilde{W}_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k}) \left\{ |W_{j,k}| - a\lambda + \frac{a\lambda^2}{2[1 + \exp(-|W_{j,k}|)]} \right\}, & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ \frac{a^2}{2\lambda} |W_{j,k}|^2, & |W_{j,k}| \leq \lambda \end{cases} \quad (11)$$

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \lg N / \lg(j+1)}. \quad (12)$$

由(11)式,(12)式可知,处理后的小波系数 $\tilde{W}_{j,k}$ 与低频尺度系数共同对信号实施重建,得到消噪后的信号。其中, σ^2 的估计方法与(9)式相同, N 为信号数据长度, j 为尺度层数, $0 < a < 1$ 。

当 a 等于 0 和 1 时,分别等效为硬、软阈值两种情况^[13],此时,阈值去噪法对 λ 依赖性较强,去噪性能的稳定性无法得到较好保证。因此,修正 a 的取值范围,降低去噪算法对 λ 的依赖程度,进而获得去噪能力优于传统软硬阈值方法的改进型阈值函数。

3 实验与结果

3.1 外差式激光多普勒振动测量系统

外差式激光多普勒振动测量系统(HLDV)如图 3 所示。激光器输出光信号经光纤隔离器和 1×2 光纤分束器作用后分为两路:第一路经过声光移频器作用,激光频率上移 55 MHz,第二路经环形器及望远镜后聚焦到待测振动界面上,回波信号光经同一望远镜返回系统,与第一路光信号在 2×2 光纤耦合器中相干,产生的光拍频信号经平衡探测器转换为电信号输出,该电信号是中心频率为 55 MHz 的调频信号,调制频率为压电陶瓷振动引起的激光多普勒频移量。为了提取压电陶瓷的振动特征,平衡探测器输出信号首先经正交解调电路作用,去除信号载波频率;然后,经数据采集卡采集后,通过软件数字鉴频处理提取原始振动信息。振动测量实验中,待测振动信号由压电陶瓷振动装置及信号发生器模拟产生,其中,压电陶瓷表面紧密粘贴薄玻璃,在信号发生器的作用下,压电陶瓷及其表面玻璃做简谐振动。

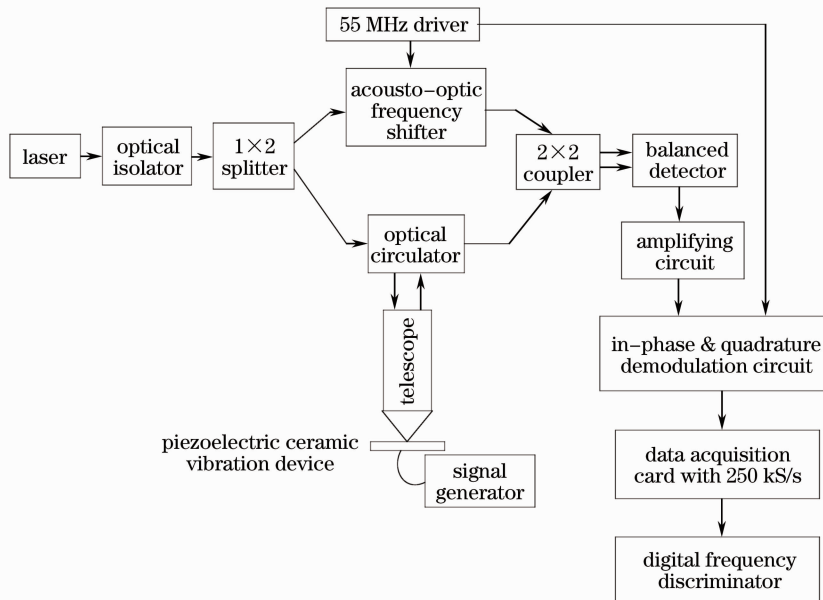


图 3 外差式激光多普勒振动测量系统

Fig. 3 Arrangement of the heterodyne laser Doppler vibrometer

由于激光多普勒振动测量系统固有噪声及工作环境噪声的影响,测振系统输出信号信噪比与信号发生器输出信号相比,有明显下降;其次,结合噪声的频域分布特性及规律,可知白噪声是影响信噪比的关键因素。因此,根据激光多普勒振动测量系统的工作原理,借助计算机仿真手段,分别判断 3 种小波消噪方法的

性能。

3.2 信号消噪实验仿真结果分析

在 Matlab 环境下^[8,15]对理论信号施加高斯白噪声,通过外差式激光多普勒测振系统振动测量仿真实验分析对比 3 种小波消噪方法的效果。

假设压电陶瓷振动引起的激光多普勒频移信号为初始相位为 0 的正弦信号 $f(t)$,信号为幅值大小均为 1 的 3 kHz 与 6 kHz 正弦信号之和。依据外差式激光多普勒测振计的工作原理,选取系统中数据采集卡的采样频率为 1 MHz,为了判断 3 种小波消噪方法的去噪性能,在 Matlab 仿真中分别加入不同强度的高斯白噪声。其中,模极大值消噪方法使用 db10 小波,系数相关消噪方法使用 sym8 小波,阈值去噪方法使用 sym10 小波。每种方法消噪后的信噪比(R_{SN})与均方误差(E_{MS})值为在初始信噪比条件下迭代 50 次后再取平均值。带噪信号消噪后的信噪比和均方误差值可以计算为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{\sum_{n=1}^N [f(n)]^2}{\sum_{n=1}^N [f(n) - \tilde{f}(n)]^2}, \quad (13)$$

$$E_{MS} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [f(n) - \tilde{f}(n)]^2, \quad (14)$$

式中 $f(n)$ 为原始信号, $\tilde{f}(n)$ 为消噪后的信号。

图 4 为不同方法消噪模拟波形。由图 4 可以得出,3 种小波变换消噪方法在噪声较强的情况下均能较好地还原出原始信号的频率特性。图 5 为初始信噪比为 ± 2.0 dB, ± 1.5 dB, ± 1.0 dB, ± 0.5 dB 与 0,从小到大顺序排列 9 个值。从图中可以看出消噪结果最好的两种为模极大值与阈值增强法,初始信噪比小于 0 时阈值增强效果最好,大于 0 时模极大值效果最佳。同时证明阈值增强法实际去噪效果优于软硬阈值去噪,剩余 3 种方法消噪效果为:软阈值最佳,硬阈值居中,系数相关法最差。此外,从曲线的分布特性上可知,随着初始信噪比的进一步增大,系数相关法的去噪效果显著优于硬阈值去噪方法。

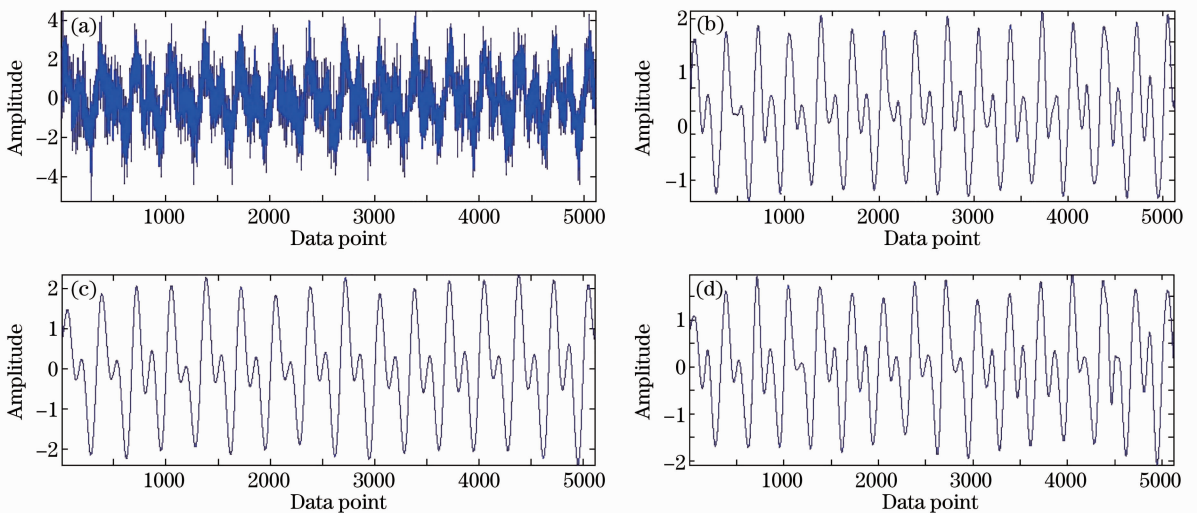


图 4 带噪信号经 3 种方法消噪后的仿真波形($R_{SN}=0$)。(a)带噪信号;(b)模拟大值法;(c)系数相关法;(d)阈值增强法

Fig. 4 Simulation results of noisy signal denoised by three methods ($R_{SN}=0$). (a) Noisy signal; (b) result of modulus maximum; (c) result of coefficient correlation; (d) result of threshold enhancement

表 1 是几种算法的运行时间的平均值,基于 Mallat 交替投影法的数据处理时间明显高于其他几种方法,这是因为 Mallat 交替投影法中信号系数投影值的迭代往往需多次才能达到迭代条件要求。由于系数相关法的计算复杂度与其他几种阈值处理方法基本持平,因此可以证明系数相关法中的迭代阈值的设定能够更好地兼顾数据处理复杂性与有效性。

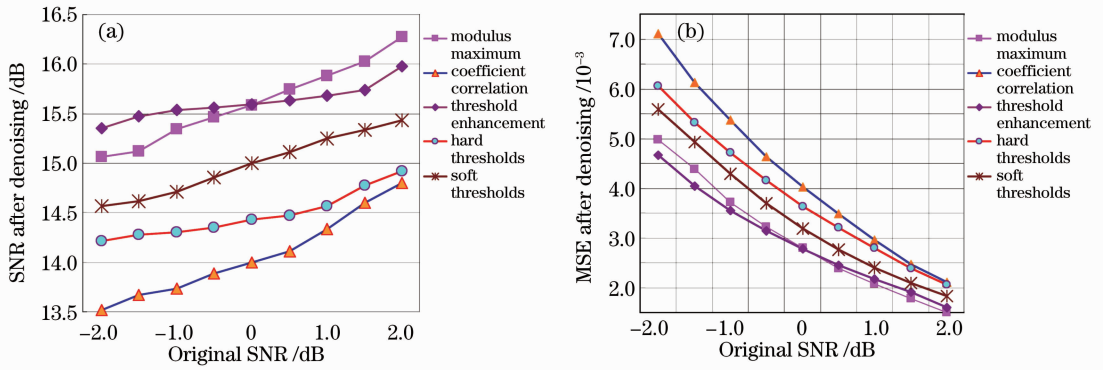


图 5 不同消噪方法消噪后的信噪比(a)与均方误差值(b)

Fig. 5 Values of (a) SNR and (b) MSE by different denoising methods

表 1 不同算法运行时间(单位:ms)

Table 1 Processing time for different algorithms (unit: ms)

Modulus maximum	Coefficient correlation	Threshold enhancement	Hard thresholds	Soft thresholds
5823	2005	1983	1657	1726

3.3 外差式激光多普勒测振系统输出信号的处理结果

在借助信号消噪仿真实验验证系数相关法、模极大值法和阈值增强法 3 种小波消噪方法有效性的基础上, 直接对实际环境下外差式激光多普勒测振系统的输出信号进行小波变换消噪, 进而对 3 种消噪方法的实际消噪性能进行比较分析。如图 3 所示, 压电陶瓷振动装置在信号发生器作用下做简谐振动, 信号发生器输出信号幅度为 50 mV、频率为 6 kHz 的正弦波。外差式激光多普勒测振系统探测压电陶瓷的振动特性, 经光学相干检测、正交解调及微分鉴频后, 原始输出如图 6(a) 所示。再经过模极大值法、系数相关法和阈值增强法 3 种小波消噪方法处理后信号的时频如图 6(b)~(d) 所示。

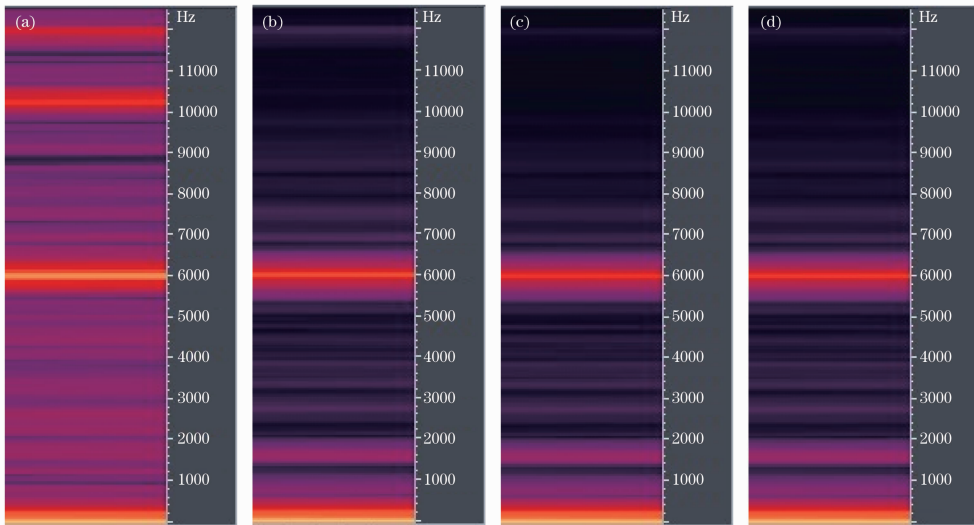


图 6 外差式激光多普勒测振系统输出信号消噪前后时频图。(a) 系统输出信号; (b) 模极大值法; (c) 系数相关法; (d) 阈值增强法

Fig. 6 Time-frequency analysis of (a) original signal of HLDV with (b) modulus maximum (c) coefficient correlation and (d) threshold enhancement

由图 6 测振系统输出信号消噪前后的时频图可知, 测振系统原始输出信号[图 6(a)]能够有效检测压电陶瓷的振动频率 6 kHz, 但系统输出信号存在宽带噪声干扰, 其中, 10 kHz 和 12 kHz 处噪声干扰严重。从图 6(b)~(d) 可知, 在分别采用模极大值法、系数相关法和阈值增强法对原始信号消噪后, 信号的背景噪声能够被有效抑制。

为了明确各消噪算法对测振系统输出信号本底噪声谱线以及 6 kHz 信号信噪比的影响,图 7 给出了外差式激光多普勒测振系统输出信号消噪前后的频谱图。

选取相同时间长度的数据进行分析,原始信号在 6 kHz 处的信噪比为 43.5 dB,经过系数相关法、模极大值法和阈值增强法三种方法消噪后,信号在 6 kHz 处的信噪比分别为 47.8 dB、46.3 dB 和 45.0 dB,且系数相关法处理后的信号本底噪声谱线最低,因此,对于外差式激光多普勒测振系统输出振动信号,系数相关法的消噪性能最强,阈值增强法的消噪性能最弱。

上述结论与仿真实验获得的结论不完全一致,主要是因为:外差式激光多普勒测振系统中数据采集卡的采样速率为 250 kS/s,在信号采样频率较高的情况下,系数相关法能够更好地针对不同尺度小波系数的相关特性进行处理,且对信号分解层数的依赖性较弱(一般为 5 层分解),而模极大值与阈值增强法需根据信号频率所属频段进行预估计进而确定分解层数;此外,测振系统实际测量中,噪声的分布特征不仅包括广义白噪声,还有低频段的 $1/f$ 噪声 $g-r$ 噪声以及中频段的有色噪声等,这些都对小波消噪算法中噪声方差的准确估计提出了更高要求,增加了合适阈值的选取难度。三种消噪算法中,模极大值法和阈值增强法的系数处理均直接依赖于阈值的设定,系数相关法并不直接处理小波系数,而是借助阈值确定系数处理的迭代条件。综上所述,针对外差式激光多普勒测振系统实际测量情况,系数相关法具有最佳的去噪效果。

4 结 论

分析并改善了模极大值法和系数相关法两种小波消噪处理算法,并在经典阈值去噪算法的基础上提出了新的阈值函数。各小波消噪方法的有效性 with 实用性主要取决于如何根据信号特征合理设定算法的阈值,进而依据该阈值准确处理各小波系数,达到还原原始信号幅频特性的目的。针对各算法不同的实际特性,结合外差式激光多普勒测振系统的工作原理,在阈值选择上相应进行了较好的匹配。仿真实验结果表明,3 种小波变换消噪方法在较强白噪声环境下能够有效提取振动信号特征,而基于模极大值与阈值增强的小波变换方法则具有更优的噪声消除性能;针对测振系统实际输出信号,由于数据采集卡的采样速率设置以及噪声的多样性,系数相关法的去噪效果是 3 种小波变换消噪方法中最好的。

参 考 文 献

- Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Zhao Jianlin *et al.*. Temperature-insensitive acceleration sensing technology based on π phase of double fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205006
刘钦朋, 乔学光, 赵建林 等. 双光栅 π 相位差温度不敏感加速度传感技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205006
- Jianhua Shang, Shuguang Zhao, Yan He *et al.*. Experimental study on minimum resolvable velocity for heterodyne laser Doppler vibrometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(8): 081201
- Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter for vehicle inertial navigation system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1316~1321
周 健, 龙兴武. 用于车载自主惯性导航系统的激光多普勒测速仪[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1316~1321
- A. R. Harland, J. N. Petzing, J. R. Tyrer *et al.*. Application and assessment of laser Doppler velocimetry for underwater acoustic measurements[J]. *J. Sound and Vibration*, 2003, **265**(3): 627~645
- C. Cristalli, N. Paone, R. M. Rodriguez. Mechanical fault detection of electric motors by laser vibrometer and accelerometer measurements[J]. *Mech. Syst. Signal Process.*, 2006, **20**(6): 1350~1361
- He Yan, Shang Jianhua, Liu Dan *et al.*. Heterodyne laser Doppler vibrometer for underwater acousto-optic communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 189~192
贺 岩, 尚建华, 刘 丹 等. 用于水下声光通信的外差式激光多普勒测速仪[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 189~192

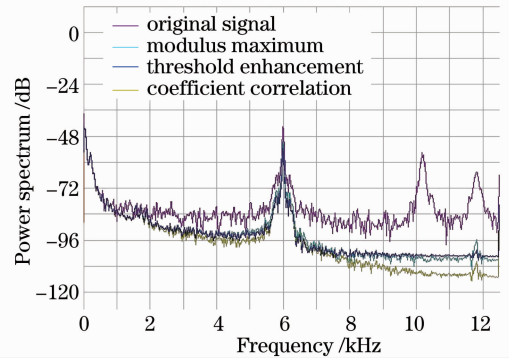


图 7 外差式激光多普勒测振系统输出信号消噪前后的频谱图

Fig. 7 Spectrum of original and denoised signal of HLDV

- 7 Qiu Weiwei, Sui Qingmei, Zhang Guitao *et al.*. Study on fiber-optic BOTDR temperature sensor signal denoising based on wavelet transform[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(11): 26~29
邱卫卫, 隋青美, 张桂涛 等. 基于小波变换的 BOTDR 光纤温度传感系统去噪声研究[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(11): 26~29
- 8 Hu Guangshu. Modern Signal Processing Course[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- 9 S. Mallat. A theory for multi resolution signal decomposition, the wavelet representation[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7): 674~693
- 10 Lin Hu, Guo Shuxu, Zhao Wei *et al.*. Wavelet transform for evaluation of semiconductor laser reliability[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1050~1054
林 虎, 郭树旭, 赵 蔚 等. 小波变换用于半导体激光器可靠性分析[J]. 中国激光, 2004, **31**(9): 1050~1054
- 11 Shi Weiren, Luo Xuesong, Hu Ning *et al.*. Wavelet based multiresolution analysis noise elimination[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, **25**(6): 59~62
石为人, 罗雪松, 胡 宁 等. 基于小波多分辨率分析的信号消噪[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, **25**(6): 59~62
- 12 Q. Pan, S. Zhong. Characterization of signals from multiscale edges[J]. *IEEE Trans. Signal Process*, 1999, **47**(12): 3401~3406
- 13 D. L. Donoho. Denosing soft-thresholding[J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 1995, **41**(3): 613~627
- 14 Cui Hua, Song Guoxiang. A kind of modified project based on the wavelet threshold denoising method[J]. *Measurement & Control Technology*, 2005, (1): 8~11
崔 华, 宋国乡. 基于小波阈值去噪的一种改进方案[J]. 测控技术, 2005, (1): 8~11
- 15 Hu Changhua. System Analysis and Design Based on Matlab: Wavelet Analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999
胡昌华. 基于 Matlab 的系统分析与设计: 小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999