

基于 EMD-CF 的级联光栅微振动传感器光谱优化算法

陆 锋¹, 张俊生^{2,3*}, 赵永强¹

1. 太原工业学院 电子工程系, 山西 太原 030008;
2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;
3. 信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 基于级联光栅的微振动传感器是一种典型的微振动信号测量方案,然而由于光信号在级联光栅中经过多次透射和反射,导致光谱信噪比差、成分复杂等问题。基于此,文中提出一种结合经验模态分解和切比雪夫滤波技术的光谱信号优化算法。首先,将传感器原始光谱通过经验模态分解得到一系列本征模函数;其次,利用所提出的自适应滤波方法,确定包含反射峰成分的本征模函数阶数,并对其进行切比雪夫低通滤波;最后,将滤波器输出进行重构,即得到优化后的传感器光谱。使用振幅为 ± 8 mV、频率为 500 Hz 的微振动激励信号进行实验验证。结果表明:文中所提出算法可以较好地还原激励源发出的微振动信号,相比传统方法精度提高 87.5% 以上。

关键词: 光纤传感器; 振微动; 算法; 光谱

中图分类号: TH744 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210645

Spectrum optimization algorithm of cascaded grating micro-vibration sensor based on EMD-CF

Lu Feng¹, Zhang Junsheng^{2,3*}, Zhao Yongqiang¹

1. Department of Electronic Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China;
2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing & Processing, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The micro-vibration sensor based on cascaded grating is a typical micro-vibration signal measurement scheme. However, due to the multiple transmission and reflection of optical signal in the cascaded grating, the sensor is subject to the poor spectral signal-to-noise ratio and complex components. Based on this, a spectrum signal optimization algorithm combined with empirical mode decomposition and chebyshev filter was proposed in this paper. Firstly, the original spectrum of the sensor was decomposed into a series of intrinsic eigenmode functions by empirical mode decomposition; Secondly, the order of the intrinsic mode functions including the reflection peak component was determined by using the proposed adaptive filtering method, and the chebyshev low-pass filtering was performed on these orders; Finally, the optimized sensor spectrum was obtained by reconstructing the output of the filter. A micro-vibration excitation signal with an amplitude of ± 8 mV and frequency of 500 Hz was used for experimental verification. The results show that the proposed algorithm can effectively restore the micro-vibration signal from the excitation source, and the accuracy is improved by more than 87.5% compared with the traditional methods.

收稿日期:2022-02-25; 修订日期:2022-03-15

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2019L0932, 2020L0624);山西省重点研发计划(201803D121069)

作者简介:陆锋,男,副教授,硕士,主要研究方向为光信息处理、光纤通信。

通讯作者:张俊生,男,副教授,博士,主要研究方向为信息探测与处理。

Key words: fiber optic sensors; micro-vibration; algorithm; spectrum

0 引言

微振动信号普遍存在于各种精密机械设备当中,并对设备的运行产生不利影响。以航天器为例,飞轮系统、天线和帆板驱动等部件的不平衡运动产生的微振动信号,直接影响航天器姿态控制的稳定度^[1]。而对于精度高达数微米的数控机床而言,工作过程中产生的微振动信号对进给、主轴、切削等部件带来干扰,导致加工精度降低^[2]。因此,对精密机电设备的微振动信号进行主动控制和减弱至关重要,而这依赖于对微振动信号的准确测量。

凭借着抗电磁干扰、无源、高精度等优点,光纤传感器在复杂环境下的高精度参数测量中得到了广泛应用^[3-4]。目前已经报道了多种基于光纤干涉仪的振动传感器,包括 Michelson 干涉仪振动传感器^[5]、Mach-Zehnder 干涉仪振动传感器^[6]、Fabry-Pérot 干涉仪振动传感器^[7]。该类型传感器精度较高,然而结构较为复杂,导致测量稳定性较差。另外一类常见的光纤振动传感器以光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 为敏感元件,通过波长调制实现振动传感^[8]。然而,波长解调设备速率较低,造价昂贵,一定程度上限制了这类传感器的应用。此外,还有强度调制型光纤振动传感器^[9]、偏振型光纤振动传感器^[10]、模式调制型光纤振动传感器^[11-12]等,这些传感器同样结构较为复杂、稳定性差、体积较大,无法满足精密机电设备中的微振动测试需求。

除了以上方案,将长周期光纤光栅 (Long Period Fiber Grating, LPFG) 与 FBG 进行级联,利用两种光栅的透射和反射特性,将波长调制转换为强度调制,也是一种典型的振动和应变测量方法^[13-14]。这种方法具有传感器体积小、系统结构简单、动态性能好等优点。然而,由于经过多次 LPFG 透射和 FBG 反射,导致级联光栅的反射光谱信号成分复杂、信噪比较低,对于幅值变化很小的微振动信号,严重限制了其测量精度。因此,有必要对级联光栅传感器信号进行优化,提高反射光谱信噪比,进而提高微振动测量精度。目前常用的光谱优化算法主要基于各种滤波器,包括 Chebyshev 滤波器、Wiener 滤波器、Butterworth

滤波器和 S-G 滤波器等^[15]。其中, Chebyshev 滤波器由于阻带较陡,因此可以高效地分离光谱中不同频率成分的噪声分量。此外,小波变换^[16]、噪声中值^[17]和人工神经网络^[18]等算法也被用于复杂信号的优化和处理。然而,这些算法自适应性较差,难以满足复杂环境下的高可靠运行需求。经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 是 Huang 等人在 1998 年提出的一种自适应信号时频处理方法。相比于上述算法, EMD 具有更好的自适应性、直观性和直接性,因此近年来被广泛应用于信号优化、参数识别、故障诊断等领域^[19-20]。

在文中,基于 EMD 自适应性强和 Chebyshev 滤波器阻带陡峭的特点,提出一种结合 EMD 和 Chebyshev 滤波器 (Empirical Mode Decomposition-Chebyshev Filter, EMD-CF) 的信号优化算法。通过对级联光栅传感器光谱进行 EMD 分解、自适应滤波、重构等处理,得到了不受高频噪声等成分干扰的级联光栅反射峰。实验结果验证了文中所提算法在微振动测试中的有效性,并体现出较高的测量精度。

1 级联光栅微振动传感系统

通过采用 LPFG 与 FBG 的双光栅级联方案,振动信号对 LPFG 和 FBG 的波长调制被转换为强度调制,因此系统无需使用价格昂贵的波长解调设备,显著降低了系统成本。此外,由于光信号被 FBG 反射,因此传感器实现了单端结构,便于复杂应用环境下的传感器安装。基于级联光栅的微振动测量系统如图 1(a) 所示。光源发出的光经过环形器端口 1 和端口 2 进入级联光栅微振动传感器,之后经 LPFG 透射和 FBG 反射,反射光通过环形器端口 3 进入光电转换器,转换后的电信号通过数据采集卡输入电脑,并进行相应算法处理和优化。级联光栅微振动传感器结构如图 1(b) 所示。传感器外形为 6061 铝合金材质的立方体外壳,其杨氏模量约为 72 GPa。立方体边长为 120 mm,在立方体顶面中心处有一直径为 10 mm 的圆孔,光纤由该圆孔穿入立方体内,并分别在立方体的顶面和底面处进行预拉伸和固定,固定点分别处于顶面和底面中心。光纤从上到下分别刻写有 LPFG

和 FBG, 并穿过实心立方体振子, 振子材质同样为 6061 铝合金, 边长为 6.5 mm。在振子竖直方向正中心有一内径为 1.5 mm 的圆孔, 光纤穿过该孔, 并使用环氧胶进行固化, 从而将振子固定至光纤上。LPFG 和 FBG 长度都为 10 mm, 二者之间距离为 8 mm。在传感器制作过程中, 首先将振子固定在 FBG 以下

20 mm 的光纤上, 之后将光纤沿传感器立方体顶面的圆孔伸入。在传感器立方体底面中心, 有一直径为 1.5 mm 的圆孔, 光纤通过该圆孔穿出, 并在该圆孔处使用环氧胶进行固化。之后, 再在立方体顶面圆孔处同样使用环氧胶进行预拉伸和固定, 从而完成传感器制作。

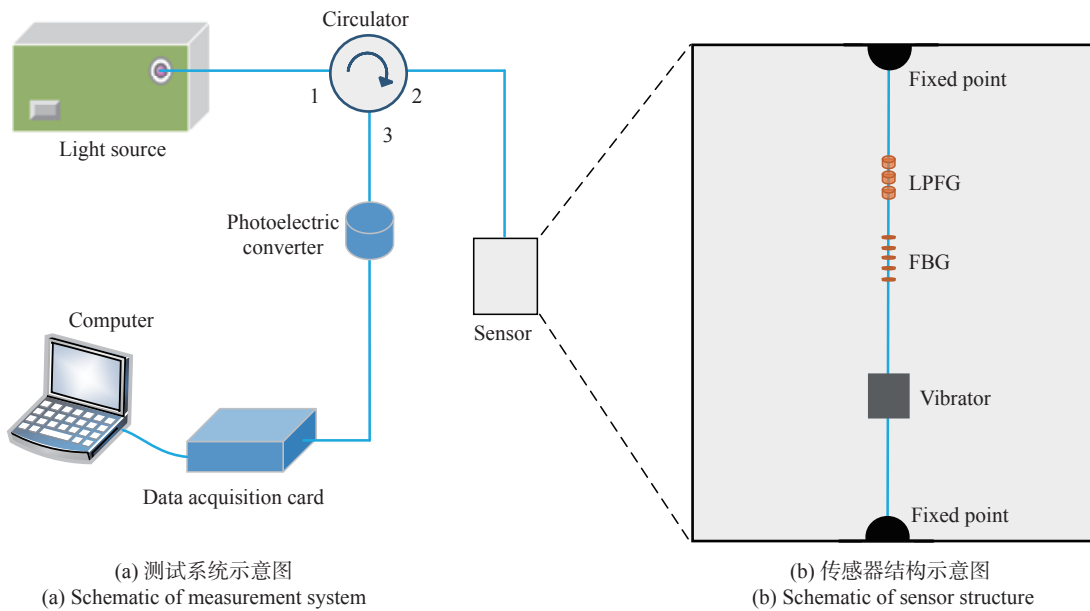


图 1 基于级联光栅的微振动传感系统

Fig.1 Micro-vibration sensing system based on cascaded-grating

基于级联光栅的微振动测量原理如图 2 所示。LPFG 透射光谱表现为“陷波滤波器”光谱, 谐振波长为 λ_2 。在透射光谱的上升段, 波长范围从 $\lambda_1 \sim \lambda_1'$, 幅值线性增加。FBG 反射光谱的谐振波长为 λ_0 , 其中 $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_1')/2$ 。当微振动信号作用于传感器时, 在振子牵引作用下, 光纤轴向应变发生改变, 导致 LPFG 透射光谱和 FBG 反射光谱的谐振波长同时发生偏移。由于 LPFG 和 FBG 的应变灵敏度不同, 因此 LPFG 透射光谱和 FBG 反射光谱之间的相对位置发生偏移, 进而导致级联光栅反射光谱幅值变化。通过监测反射光谱幅值, 即可实现微振动信号的测量。

以图 2 右侧的正弦微振动信号为例, 振幅为 0 时, 对应反射光谱幅值为 I_0 ; 当振幅处于正向最大值时, 对应反射光谱幅值为 I_1' ; 当振幅处于负向最大值时, 对应反射光谱幅值为 I_1 。在实际应用中, 由于微振动信号振幅较弱, 导致反射光谱幅值变化较小, 测量难度较大; 此外, 光信号在经过 LPFG 透射和 FBG 反

射之后, 光谱中存在明显的噪声成分, 进一步限制了对反射光谱幅值的准确测量。因此, 必须对传感器的反射光谱信号进行优化, 减小噪声等高频成分的干扰, 提高测量精度。

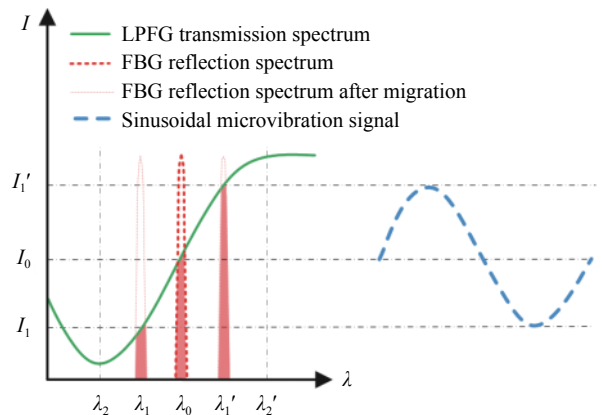


图 2 基于级联光栅的微振动传感原理图

Fig.2 Schematic diagram of micro-vibration sensing based on cascaded-grating

2 EMD-CF 算法理论介绍

在原始光谱中,级联光栅的反射峰为低频成分,而噪声等干扰信号为高频成分。因此,通过结合 EMD 和 Chebyshev 滤波,提出一种高效的信号优化算法。算法流程图如图 3 所示,算法详细过程介绍如下:

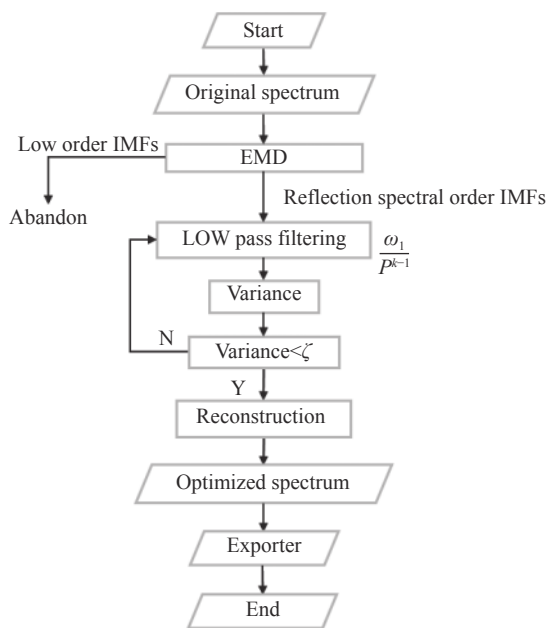


图 3 EMD-CF 算法流程图

Fig.3 Flow chart of EMD-CF algorithm

Step 1: 原始反射光谱通过 EMD 分解为一系列本征模函数 (Intrinsic Mode Function, IMF)。

$$x_o(\lambda) = \sum_{i=1}^{M+1} f_i(\lambda) \quad (1)$$

式中: $f_{M+1}(\lambda)$ 为分解余量。低阶 IMF 主要包含了高频噪声等干扰成分,随着 IMF 阶次增加,高频噪声等干扰成分逐渐减少,而低频的反射峰成分逐渐增多。

Step 2: 使用 Chebyshev 滤波器进行自适应低通滤波,提取 IMF 中的反射峰成分。将包含反射峰成分的 IMF 阶数定义为“反射光谱阶”,并用 Q_{ref} 表示。将分解余量 $f_{M+1}(\lambda)$ 作为最后一阶 IMF,从 $f_{M+1}(\lambda)$ 开始,使用 Chebyshev 低通滤波器 $c_i(\lambda)$ 对所有“反射光谱阶” IMF 进行滤波。滤波器输出即每阶 IMF 中的反射峰成分。

$$spec_i(\lambda) = c_i(\lambda) * f_i(\lambda), \quad i = M + 2 - Q_{ref}, \dots, M + 1 \quad (2)$$

式中: * 表示卷积。随着 IMF 阶数的降低, IMF 中的反

射峰成分越来越少,而高频噪声等干扰成分越来越多。因此,将 $c_i(\lambda)$ 的截止频率规定为: 设最后一阶 IMF 的滤波器 $c_{M+1}(\lambda)$ 截止频率为 ω_1 , 则第 k 个低通滤波器的截止频率为 $\frac{\omega_1}{P^{k-1}}$, 其中 $P > 1$ 为频率折叠数。滤波器输出 $spec_i(\lambda)$ 表示从每阶 IMF 中提取的反射峰成分,将其用于确定“反射光谱阶” Q_{ref} 。每个 $spec_i(\lambda)$ 的方差定义为:

$$var\{spec_i(\lambda)\} = \frac{1}{L-1} \sum_0^{L-1} [spec_i(\lambda) - \mu_{spec_i}]^2 \quad (3)$$

式中: μ_{spec_i} 为 $spec_i(\lambda)$ 的平均值; L 为原始反射光谱的采样点数量。从最后一阶 IMF 开始计算, Q_{ref} 的确定方法为: $var\{spec_{Q_{ref}-1}(\lambda)\} \geq \zeta$ 且 $var\{spec_{Q_{ref}}(\lambda)\} < \zeta$, 其中 $var\{spec_i(\lambda)\}$ 为 $spec_i(\lambda)$ 的方差, ζ 为给定阈值。

Step 3: 将滤波器输出进行重构,得到优化后的光谱。除去“反射光谱阶” Q_{ref} 对应的 IMF, 其余 IMF 只包含高频噪声等干扰成分而不含反射峰成分,因此直接舍弃。将“反射光谱阶” Q_{ref} 对应 IMF 的 Chebyshev 滤波器输出进行重构,即得到原始光谱中的反射峰成分,即优化后的级联光栅反射光谱。

$$\overline{spec}(\lambda) = \sum_{i=Q_{ref}}^{M+1} spec_i(\lambda) \quad (4)$$

3 EMD-CF 算法的实验验证

通过实验验证 EMD-CF 算法在微振动信号测量中的有效性。根据图 1(b) 所示的结构示意图制作传感器,其中振子质量为 2.5 g, 光纤型号为 Corning SMF-28。LPFG 由功率为 2.2 W 的 CO_2 激光器 (Synrad J48-1) 通过逐点扫描法刻写,周期为 520 μm , 谐振波长 $\lambda_2 = 1548.6 nm$, $\lambda_1 = 1550.8 nm$, $\lambda_0 = 1552.8 nm$, $\lambda_1' = 1554.8 nm$ 。FBG 使用 KrF 准分子激光器 (Coherent BraggStar, 248 nm) 通过相位掩膜技术进行刻写。传感器原始反射光谱如图 4 所示,通过反射峰和噪声幅值可以看出,原始光谱反射峰幅值较弱,并存在明显高频噪声成分,噪声信号较强。

使用 EMD-CF 算法对原始光谱进行优化处理。首先将原始光谱通过 EMD 分解得到 imf1~imf8 和余量 res., 如图 5(a) 所示。之后,从余量开始,对每一阶 IMF 进行低通滤波。结合光谱频率特征,预设参数如下: $\omega_1 = 32.6 kHz$, $P = 3.6$, $\zeta = 0.06$ 。最终确定“反射

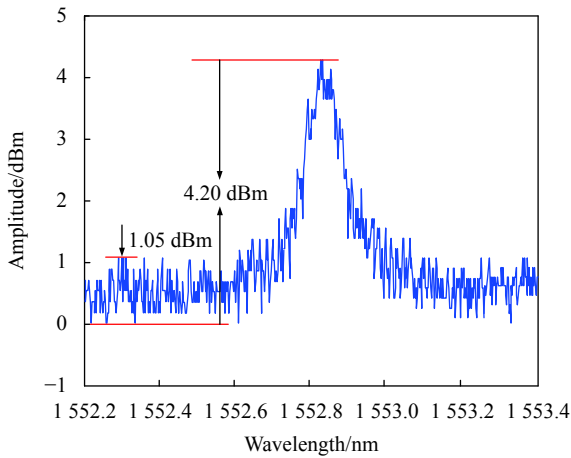


图 4 级联光栅传感器原始光谱

Fig.4 Original spectrum of cascaded-grating sensor

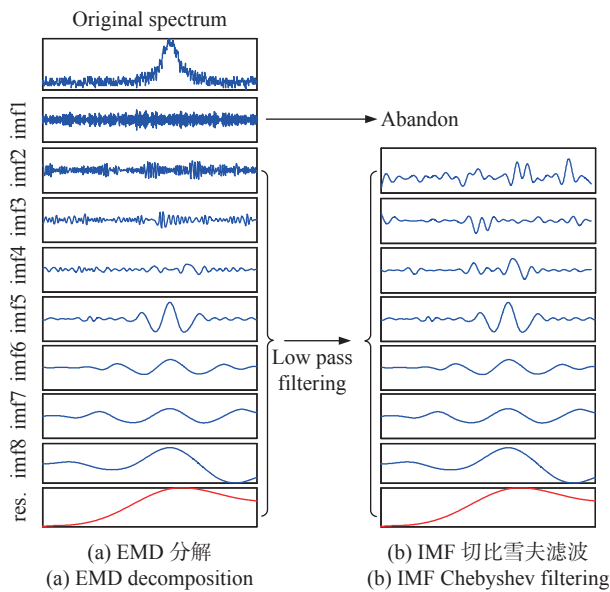


图 5 EMD-CF 算法实现

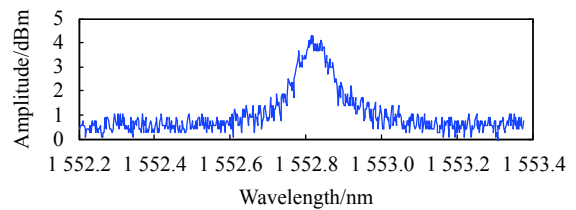
Fig.5 EMD-CF algorithm implementation

光谱阶” $Q_{ref} = 8$ ，因此将 $imf1$ 直接舍弃。低通滤波后的 $imf2 \sim imf8$ 和余量 $res.$ 如图 5(b) 所示。将滤波后的 $imf2 \sim imf8$ 和余量 $res.$ 进行重构，即得到优化后的传感器光谱。对算法执行时间进行研究，在实验所用计算机配置下 (CPU:3.20 GHz, RAM:16 GB)，每帧反射谱的算法处理时间为 1.2 ms，对应最大解调频率为 833 Hz。通过使用成熟的专用数字处理硬件，如 DSP 或 FPGA，可以进一步提高解调速度。

图 6(a) 和图 6(b) 分别为传感器原始光谱和 EMD-CF 算法优化后的光谱，从中可以看出，经过 EMD-CF 算法处理后，反射光谱中明显去除了高频干扰成分。

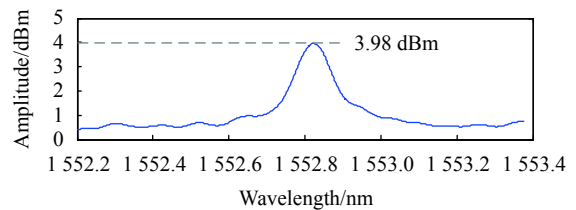
作为对照，实验中还引入了单独 EMD 和单独 Chebyshev 滤波的信号处理算法。在单独 EMD 算法中，光谱同样经过 EMD 分解得到 $imf1 \sim imf8$ 和余量 $res.$ ，之后将 $imf1 \sim imf2$ 直接舍弃，然后将 $imf3 \sim imf8$ 和余量 $res.$ 进行重构，所得到光谱如图 6(c) 所示。在单独 Chebyshev 滤波算法中，直接对原始光谱进行低通滤波，所得到光谱如图 6(d) 所示。对三种算法处理后的光谱进行直观对比，图 6(c) 和图 6(d) 中的光谱同样去除了高频干扰成分，不过仍存在较为明显的起伏波动。此外，图 6(c) 中光谱反射峰幅值为 3.54 dBm，明显低于另外两种算法处理后的光谱幅值。

根据图 1(a) 搭建微振动测量系统，对 EMD-CF 算



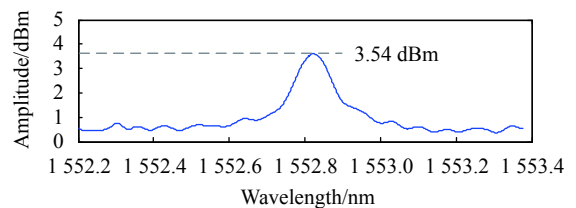
(a) 原始光谱

(a) Original spectrum



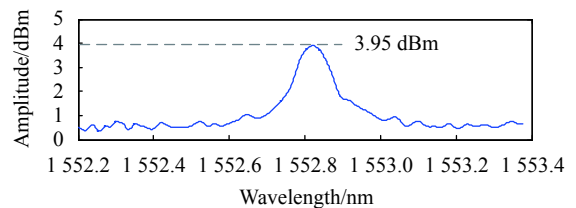
(b) EMD-CF 算法优化后的光谱

(b) Spectrum optimization by EMD-CF algorithm



(c) EMD 优化后的光谱

(c) Spectrum optimization by EMD



(d) 切比雪夫滤波优化后的光谱

(d) Spectrum optimization by Chebyshev filtering

图 6 不同算法优化后的级联光栅传感器光谱

Fig.6 Spectrum optimization of the cascaded grating sensor based on different algorithms

法进行实验验证。使用信号发生器和压电换能器 (PZT) 作为微振动信号的激励源。将传感器和 PZT 分别放置于厚度为 5 mm 的铝板上, 二者间隔 150 mm。信号发生器输出的正弦激励信号幅值为 ± 8 mV, 频率为 500 Hz, 如图 7(a) 所示。图 7(b)、图 7(c) 和图 7(d) 分别为使用 EMD-CF 算法、单独 EMD 算法和单独 Chebyshev 滤波算法处理后得到的微振动信号, 三者纵坐值相同, 以图 7(b) 为基准进行了归一化处理。从中可以看出, EMD-CF 算法可以较好地还原激励源发出的微振动信号, 其测量精度为 0.128, 另外两种算法的精度分别为 0.288 和 0.240。因此, 相比另外两种算法, 论文所提出的 EMD-CF 算法精度分别提高了 125.0% 和 87.5%。此外, 图 7(c) 中的微振动信号幅值较小, 这与图 6(c) 中反射光谱优化后幅值降低的结果

一致, 主要是因为使用单独 EMD 算法处理时, 光谱反射峰幅值被弱化, 因此导致微振动信号幅值变小。

4 结 论

基于级联光栅的微振动传感器在精密机电设备微振动测量中具有重要应用价值。然而, 当前级联光栅微振动传感器存在光谱成分复杂、信噪比差、测量精度低等问题。文中结合 EMD 和 Chebyshev 滤波技术, 提出了一种 EMD-CF 光谱优化算法。通过对原始光谱 EMD 分解得到的 IMF 进行自适应 Chebyshev 滤波, 提取了光谱中的反射峰成分, 进而实现了原始光谱的优化处理。通过 PZT 提供幅值 ± 8 mV、频率 500 Hz 的标准正弦微振动信号进行了验证实验。结果显示, 所提出的 EMD-CF 算法可以较好地还原微振动信号, 相比传统方法, 测量精度提高 87.5% 以上。此外, 该算法具有自适应性强、频率成分提取精度高等特点, 在复杂微弱信号优化方面具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] Komatsu K, Uchida H. Micro vibration in spacecraft [J]. *Mechanical Engineering Reviews*, 2014, 1(2): SE0010.
- [2] Su Li, Zhang Xiaotong, Lv Paitong, et al. Research on a fiber grating low frequency vibration sensor with large range and high sensitivity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200340. (in Chinese)
- [3] Wang Ning, Tian Wenhao, Zhang Haosheng, et al. Optical fiber Fabry-Perot humidity sensor by graphene quantum dots [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 0906003. (in Chinese)
- [4] An Jianchang, Jiang Junfeng, Xu Zhongyuan, et al. Design of composite intrusion detection system based on optical fiber sensor and infrared video [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190446. (in Chinese)
- [5] Yu Z, Dahir A, Dai H, et al. Distributed optical fiber vibration sensors based on unbalanced michelson interferometer and PGC demodulation [J]. *Journal of Optics*, 2021, 50(1): 1-6.
- [6] Liu Xin, Wang Yu, Zhang Jianguo, et al. Pulse-modulated Mach-Zehnder interferometer for vibration location-ScienceDirect [J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 27-32.
- [7] Du Bin, Xu Xizhen, He Jun, et al. In-fiber collimator-based Fabry-Perot interferometer with enhanced vibration sensitivity [J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 435.
- [8] Zhang Jijun, Wu Zutang, Pan Guofeng, et al. Design of optical

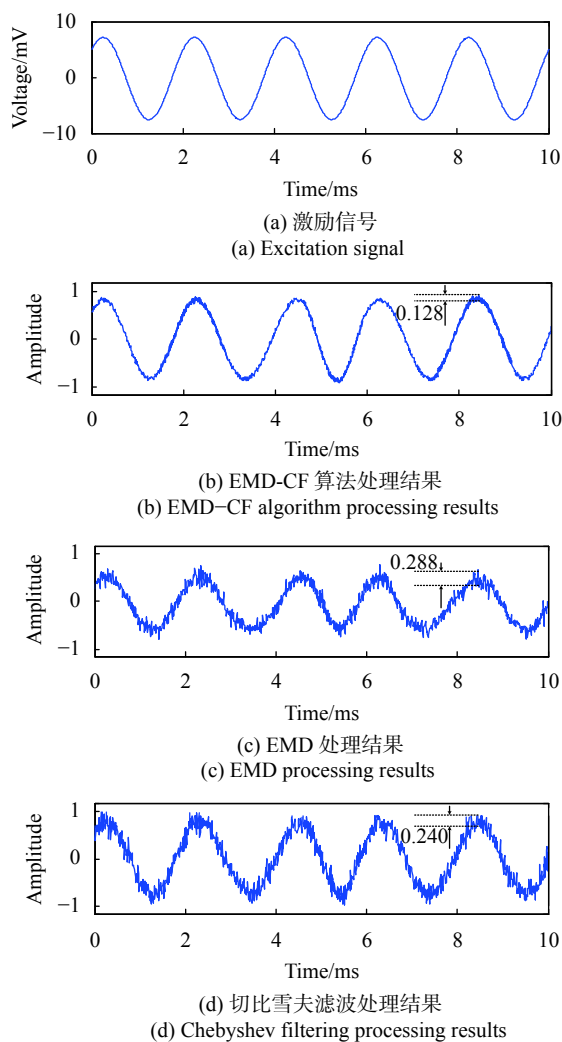


图 7 正弦微振动信号解调结果

Fig.7 Demodulation results of sinusoidal micro-vibration signal

- fiber grating-based high-precision and low-frequency vibration sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(1): 0128001. (in Chinese)
- [9] Rasouli S, Shahmohammadi M. Portable and long-range displacement and vibration sensor that chases moving moiré fringes using the three-point intensity detection method [J]. *OSA Continuum*, 2018, 1(3): 1012-1025.
- [10] Linze N, Tihon P, Verlinden O, et al. Development of a multi-point polarization-based vibration sensor [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5606-5624.
- [11] Villatoro J, Antonio-lopez E, Schulzgen A, et al. Miniature multicore optical fiber vibration sensor [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 2022-2025.
- [12] Yi Li, Wang Xiaozhen, Bao Xiaoyi. Sensitive acoustic vibration sensor using single-mode fiber tapers [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(13): 1873-1878.
- [13] Zhang Wen, Liu Xiaolong, He Wei, et al. Study on dual-parameter fiber sensor based on LPFG cascaded with FBG structure [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 302-309. (in Chinese)
- [14] Tanaka S, Tsukida O, Takeuchi M, et al. Highly sensitive operation of intensity-based fiber-optic vibration sensor using cascaded long period fiber grating[C]//23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9157: 91571H.
- [15] Schulze G, Jirasek A, Yu M, et al. Investigation of selected baseline removal techniques as candidates for automated implementation [J]. *Applied Spectroscopy*, 2005, 59(5): 545-574.
- [16] Zhang L, Ling T H, Yu B, et al. Intensive interferences processing for GPR signal based on the wavelet transform and F-K filtering – ScienceDirect [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, 10: 104273.
- [17] Je Ramírez, Paredes J, Cardinale Y. Improvements to the robust transform based on the weighted median operator algorithm [J]. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2020, 349: 81-102.
- [18] Salehi R, Lestari R. Predicting the performance of a desulfurizing bio-filter using an artificial neural network (ANN) model [J]. *Environmental Engineering Research*, 2020, 26(6): 1-6.
- [19] Liu Xiangfeng, Huang Genghua, Zhang Zhijie, et al. Noise reduction based on empirical mode decomposition for spaceborne full waveforms on GaoFen-7 laser altimetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200261. (in Chinese)
- [20] Zeng Yanan, Lu Junsheng, Chang Xinyu, et al. Method to suppress noises in digital image-plane holographic microscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0524003. (in Chinese)