

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108365

# 基于改进 EMD 方法的 FBG 传感网络光谱基线校正研究\*

吕 峥<sup>1,2</sup>, 庄 炜<sup>1,2,3,4</sup>, 吴 越<sup>1,2,3,4</sup>, 张 旭<sup>1,2</sup>, 祝连庆<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100016; 2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统  
北京实验室 北京 100016; 3. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192;  
4. 北京市光电测试技术重点实验室 北京 100192)

**摘要:**针对光纤布拉格光栅(FBG)传感网络中,由于环境条件导致的光谱信号基线漂移问题,本文提出一种基于改进经验模态分解(EMD)的光谱信号校正方法。用该方法对仿真数据处理,处理后光谱可通过设置阈值划分出各 FBG 反射峰区,验证了改进 EMD 方法的可行性。通过实验采集在光纤通路损耗及端面反射影响下、产生基线漂移情况的 FBG 传感网络光谱信号,并使用改进 EMD 法、小波软阈值法和惩罚最小二乘法进行实时的光谱校正处理,运用高斯非线性拟合法计算正常和校正后光谱的各 FBG 中心波长。结果显示,运用改进 EMD 法校正后计算的各 FBG 中心波长,传感信号存活率分别提高 48.9% 和 61.6%, 平均偏差和偏差标准差最小,分别为 4.33、6.28 和 6.01、6.58 pm。该方法校正后的光谱信号能为物理量检测提供可靠信息。

**关键词:** FBG 传感网络; 光谱信号校正; 改进 EMD 方法; 阈值

**中图分类号:** TH74 TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Research on spectral baseline correction of FBG sensor network based on the improved EMD method

Lyu Zheng<sup>1,2</sup>, Zhuang Wei<sup>1,2,3,4</sup>, Wu Yue<sup>1,2,3,4</sup>, Zhang Xu<sup>1,2</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Instrument and Opto Electronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China;  
2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016,  
China; 3. School of Instrument and Opto Electronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University,  
Beijing 100192, China; 4. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The baseline of the fiber Bragg grating (FBG) sensor network spectrum signal drifts, which is caused by the environmental conditions. To address this issue, this study proposes a spectrum baseline correction method based on the improved empirical mode decomposition (EMD). When this method is used to process simulation data, the spectrum after processing can be divided into the reflection peak regions of each FBG by setting the threshold value. The feasibility of the improved EMD method is verified. The spectral signals of the FBG sensor network with baseline drift under the influence of optical fiber path loss and end reflection are collected by experiments. The improved EMD method, the wavelet soft threshold method and the penalty least square method are used to achieve the real-time correction of the spectrum. The Gaussian nonlinear fitting method calculates the center wavelength of each FBG of the normal and corrected spectra. Results show that the survival rates of the sensing signal are increased by 48.9% and 61.6%, with the average deviation and deviation of each FBG center wavelength calculated after the use of the improved EMD method. The standard deviation values are the smallest, which are 4.33, 6.28 and 6.01, 6.58 pm. The spectral signal corrected by this method could provide reliable information for physical quantity detection.

**Keywords:** FBG sensor network; spectrum signal correction; improved EMD method; threshold

收稿日期: 2021-08-04 Received Date: 2021-08-04

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51535002)、高等学校学科创新引智计划(D17021)、北京信息科技大学师资补充与支持计划(5029011103)项目资助

## 0 引 言

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感技术是一种新型传感技术,它可以实现温度、应变和加速度等多种物理量的测量。与传统传感器相比,它具有灵敏度高、抗电磁干扰、复用性强等优点。实际应用中,采用波分复用原理构建 FBG 分布式传感网络,以实现复杂工况下多点多物理量的实时监测<sup>[1-3]</sup>,从而广泛应用于结构健康监测监测<sup>[4]</sup>、航空航天<sup>[5-6]</sup>、生物医疗<sup>[7-8]</sup>、海洋工程<sup>[9]</sup>等不同领域。

FBG 传感网络是通过阈值划分出各反射峰区后,运用计算、拟合等方法获取各峰对应的中心波长,根据中心波长偏移量与待测物理量之间的关系,间接计算出待测量变化,从而实现检测目的<sup>[10-11]</sup>。但是由于环境条件影响,传感网络中会出现光纤的通路损耗以及光纤端面反射等问题,导致 FBG 信号产生基线漂移现象,从而无法通过阈值划分各反射峰区,妨碍中心波长的计算,影响物理量检测的准确性。因此在计算各 FBG 中心波长前对光谱进行基线校正至关重要。

目前常用基线校正方法为小波阈值法。方勇华等<sup>[12]</sup>将光谱信号低频段的小波系数置 0、对高频段小波系数设置相应阈值,以实现基线校正。江虹等<sup>[13]</sup>和邵向鑫等<sup>[14]</sup>通过改进阈值函数,减小其与真实小波系数间的误差,提高阈值函数的连续性,达到了更好的基线校正效果。但小波变换是一种基函数固定的表示方法,当实测不同的光谱信号时必须重新选择小波基函数才能更好的校正光谱基线,因此在工程应用中效果较差<sup>[15]</sup>。

其他的基线校正法还有频域分析法<sup>[16]</sup>、形态学滤波法<sup>[17]</sup>、曲线拟合法<sup>[18-19]</sup>等。频域分析法是对光谱信号进行傅里叶变换后,设计合适滤波器处理的方法。这种方法参数设计复杂,且会造成光谱的二次畸变;形态学滤波法主要用于心电信号中基线漂移的校正,它具有算法简单,实时性好,校正效果明显的优点,但结构元长度选取不当时会导致波形损失;曲线拟合法是通过采样点及函数公式,拟合出光谱信号的基线后进行去除,但是拟合函数的选取不当,会导致拟合时易发生欠拟合或过拟合现象<sup>[19]</sup>。

针对 FBG 传感网络光谱信号特点,本文提出了一种基于改进经验模态分解的光谱基线校正方法,在 EMD 方法自适应性特点的基础上,改变了分解计算的方式,减少了迭代次数,有效的去除了光谱信号基线漂移,便于各 FBG 中心波长计算,并为实时物理量检测提供了准确可靠的信息。

## 1 基于改进经验模态分解的信号校正原理

### 1.1 经验模态分解原理

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD),是由 Huang 等<sup>[20]</sup>提出的一种新型自适应信号时频处理方法。它无需预先设定基函数,仅依据数据或信号自身的时域特性来进行信号的分解,故其在分析线性、非线性等信号的分解应用上都有较强的自适应性,适用于各个工程领域。

为使信号达到平稳化,需将其分解为有限个本征模函数(intrinsic mode function, IMF),分解出的各 IMF 分量包含了原始信号的局部特征信号。假设对信号  $y(t)$  进行 EMD 分解,首先提取  $y(t)$  所有的局部极大值点和局部极小值点,并通过三次样条插值的方法分别对极大值点序列和极小值点序列拟合,获得极大值包络线  $y_{\text{MAX}}(t)$  和极小值包络线  $y_{\text{MIN}}(t)$ ,则极值包络线  $y_{\text{M}}(t)$  可以表示为:

$$y_{\text{M}}(t) = \frac{y_{\text{MAX}}(t) + y_{\text{MIN}}(t)}{2} \quad (1)$$

用  $y(t)$  减去极值包络线,获得新信号  $y_1(t)$ 。根据两个筛选条件:1) 经过分解后得到的剩余信号极值点数量与过零点的数量相差  $\leq 1$ ;2) 经过插值方式拟合的极值包络线均值为 0,判断  $y_1(t)$  是否符合 IMF 分量形式。若不符合,则将  $y_1(t)$  作为原始信号数据,重复分解步骤直至  $y_1(t)$  符合 IMF 分量形式。此时,另  $\text{IMF}_1 = y_1(t)$ ,记为第 1 层 IMF 分量。将剩余信号  $r_1(t) = y(t) - \text{IMF}_1$  作为待分解信号重复上述步骤,直至剩余信号  $r_n(t)$  为单调信号,此时 EMD 分解结束。原始信号  $y(t)$  可由各阶 IMF 分量及剩余信号  $r_n(t)$  表示,如式(2)所示。

$$y(t) = \sum_{i=1}^n y_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

### 1.2 基于改进 EMD 分解的光谱信号校正方法

光谱信号可视为以波长为自变量,光强度值为因变量的信号函数  $S(\lambda)$ ,其上包络线通常由 FBG 反射谱峰值确定。对信号  $S(\lambda)$  进行 EMD 分解,各 FBG 的反射峰值会趋于平稳,从而影响中心波长计算的准确性。

本文在 EMD 分解的基础上,根据 FBG 网络反射谱信号的特点,对 EMD 分解进行了改进,改进后分解步骤如下:

1) 通过宽度为 4 个采样点的窗口遍历采集的原始光谱  $S(\lambda)$ ,根据式(3)判断并提取光谱中全部的极小值点及其对应的极小值;

$$\begin{aligned} S(\lambda_{i-2}) > S(\lambda_{i-1}) > S(\lambda_i) < S(\lambda_{i+1}) \\ \text{或 } S(\lambda_{i-1}) > S(\lambda_i) < S(\lambda_{i+1}) < S(\lambda_{i+2}) \end{aligned} \quad (3)$$

2) 对提取的全部极小值,运用三次样条插值获得极

小值包络线  $S_{\text{MIN}}(\lambda)$ ;

3) 用原始信号  $S(\lambda)$  减去极小值包络线  $S_{\text{MIN}}(\lambda)$  得到信号  $S'(\lambda)$ ;

4) 判断信号  $S'(\lambda)$  的极小值点数量是否  $\leq 1$ ;

5) 若不满足步骤 4) 条件, 则将  $S'(\lambda)$  代入上述步骤重复分解筛选; 若满足, 则输出  $S'(\lambda)$  为校正后光谱信号, 剩余信号  $r'(\lambda) = S(\lambda) - S'(\lambda)$  为光谱基线。

通过一次迭代筛选分离出基线, 减少了迭代次数, 拥有更快的处理速度。由于 FBG 光谱信号中包含噪声信号, 低强度时, 噪声信号的起伏会对极小值点的判断造成影响, 故步骤 1) 中通过宽度为 4 的窗口筛选极小值点。若窗口内数据符合式 (3) 形式, 则认为点  $i$  为一极小值点。

## 2 算法仿真

### 2.1 含基线的 FBG 网络光谱信号分析

图 1 所示为正常情况下和基线漂移情况下的 FBG 传感网络反射谱。正常光谱情况下, 通过设置寻峰阈值, 并以阈值以上的极大值点作为各 FBG 反射峰的估计中心点, 从而划分出各反射峰大致位置。根据估计中心前后的采样点数据, 使用典型的寻峰算法, 计算出各 FBG 的中心波长, 从而实现物理量的检测。

但是, 产生基线漂移时, 部分光谱大幅高于阈值强度, 使阈值以上的极大值点选取被噪声干扰, 位置划分不准确或无法进行划分, 从而影响中心波长计算的准确性或导致传感数据丢失。

基线校正的目的, 是将高于阈值强度的异常光谱纠

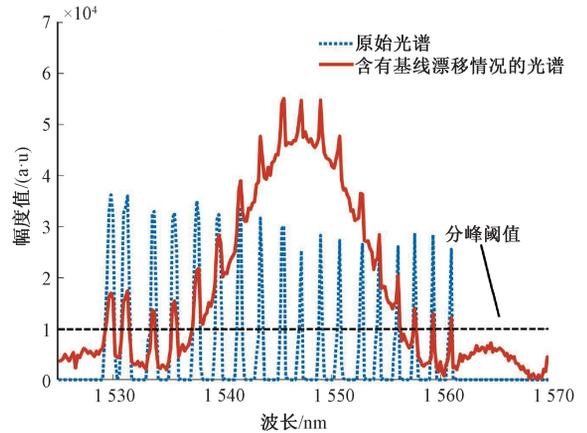


图 1 正常和基线漂移情况下 FBG 传感网络光谱

Fig. 1 FBG sensor network spectrum under normal and baseline drift conditions

正至原强度水平, 使其能通过设置强度阈值的方法实现划分峰区。处理过程需减小引入的额外误差, 保证校正后计算的中心波长与原正常光谱下计算的中心波长偏差最小, 从而不影响物理量检测的准确性。

### 2.2 算法仿真与结果分析

通过正常 FBG 传感网络光谱、光谱基线及高斯白噪声叠加生成仿真信号。基线是根据多项式根值与根数生成<sup>[12]</sup>, 函数式为  $y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$ 。FBG 数量为 19 个, 高斯白噪声标准差为 1 000。图 2 所示分别为四、五、六阶多项式基线叠加正常光谱和噪声生成的仿真信号。仿真信号由于基线干扰, 使阈值失效, 无法划分峰区, 需进行基线校正。

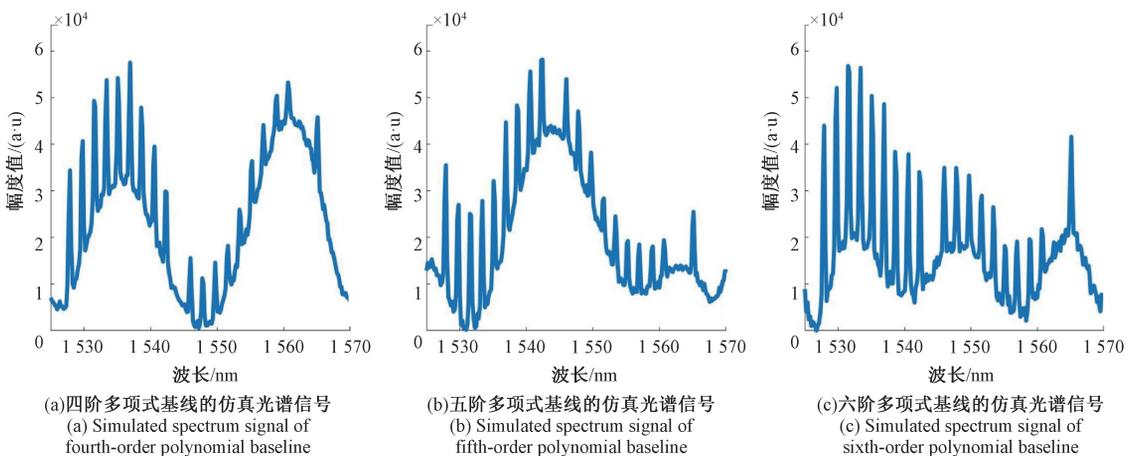


图 2 四、五、六阶多项式基线的仿真光谱信号

Fig. 2 Simulated spectrum signal of fourth, fifth and sixth-order polynomial baseline

运用改进 EMD 方法对仿真光谱信号进行基线校正处理, 结果如图 3 所示。从结果可以看出, 将阈值强度设定为 5 000, 即可划分出全部 19 个 FBG 反射峰区, 表明改

进的 EMD 方法能够有效处理仿真 FBG 光谱信号, 基线漂移情况得到校正, 从而提高了 FBG 传感网络采集信号的有效性。

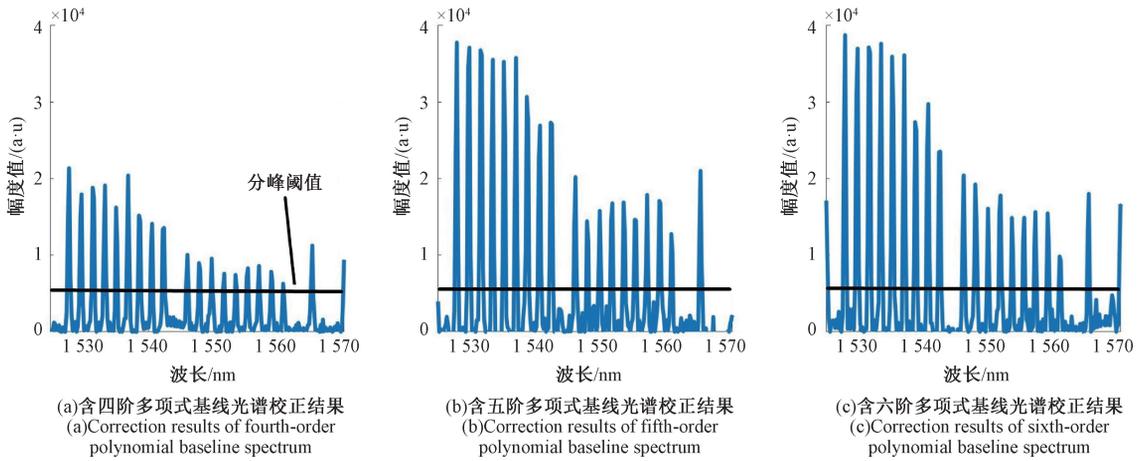


图 3 改进 EMD 法对校正仿真光谱结果

Fig. 3 Correction results of simulated spectra using the improved EMD method

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验平台搭建

搭建实验系统。光源为 ASE 型,主频段为 C 波段,功率为 1 mW。线阵光电探测器选用 Ibsen 公司 256 pixel 的线阵光电探测光谱采集模块,其由 256 个光敏元探测器组成。宽谱光通过光纤经由耦合器进入 FBG 传感网络,到达 FBG,反射回不同波长的光至耦合器,由线阵光电探测器接收。通过 A/D 转换,得到 256 个采样点的强

度值,从而获取光谱信号曲线。

#### 3.2 算法稳定性实验

保持环境温度为 25℃ 恒定,在 FBG 传感网络不受外力干扰情况下,采集存在光纤通路损耗问题和端面反射问题的 FBG 传感网络光谱信号,采集的信号如图 4 所示。图中虚线为原始正常光谱;实线为实验采集的异常光谱。图 4(a)为实验 1 的光纤通路损耗问题传感网络光谱图,由 15 个应变封装的 FBG 串接而成;图 4(b)为实验 2 的光纤端面反射问题传感网络光谱图,由 18 个温度封装的 FBG 串接而成。

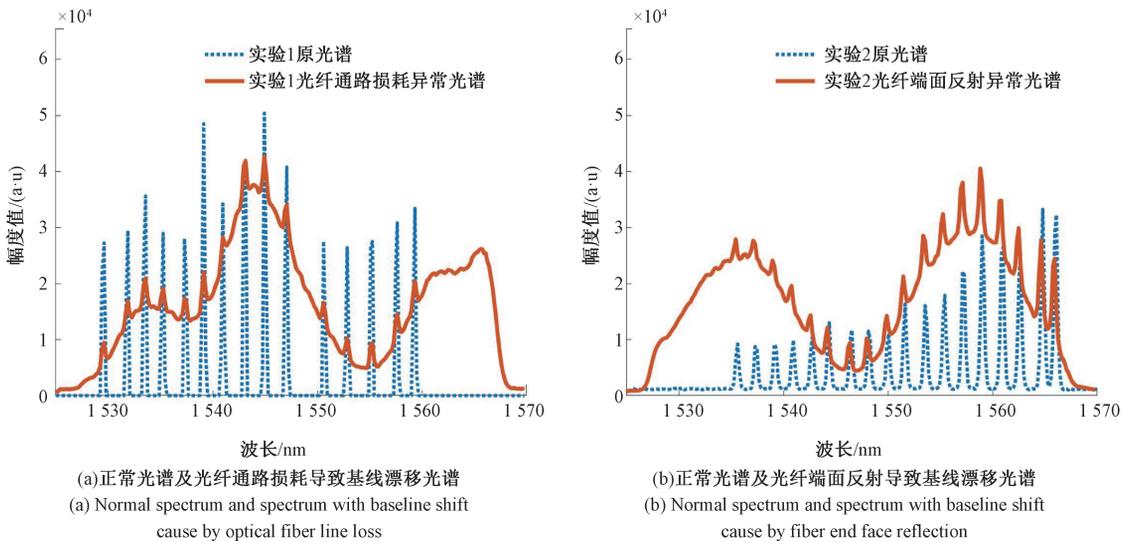


图 4 原始 FBG 光谱及实验采集的光谱

Fig. 4 Original FBG spectrum and spectra collected in the experiment

从图 4 中可以看出,实验采集的两种光谱信号均产生了基线漂移现象,导致无法划分出相应峰区,影响中心

波长的计算及物理量的监测,故需对其进行信号校正。

实验系统的采样频率设定为 100 Hz,分别对两个传

感网络进行连续 1 h 的异常光谱采集,两次测试分别有 360 000 帧光谱数据。通过使用改进 EMD 算法对采集到的异常光谱信号进行实时的基线校正处理,并计算校正前后每帧光谱中 FBG 传感信号的存活率。然后记录每分钟存活率的标准差,以验证算法的稳定性。传感信号的存活率越高,能够反映基线校正的有效性,传感信号的存活率由式(4)计算。

$$\text{信号存活率} = \frac{\text{FBG 有效信号数量}}{\text{总 FBG 传感信号数量}} \times 100\% \quad (4)$$

信号的有效性通过阈值对光谱分割后,能否获得有效的波峰采样点来进行判定,即阈值是否处于峰值点与底噪之间。根据光谱强度大小,将两次实验中异常光谱的分峰阈值分别设定为 12 000 和 15 000;校正后的分峰阈值设定为 5 000。由于两次实验中 FBG 数量确定,故可以计算出 1 h 采集的总 FBG 传感信号数量分别为:  $360\,000 \times 15 = 5\,400\,000$  个和  $360\,000 \times 18 = 6\,480\,000$  个。校正前后的信号存活率由表 1 所示。从表 1 中可以看出,经 EMD 校正光谱基线后,FBG 传感信号存活率分别提高了 48.9% 和 61.6%,大大提高了传感信号的存活率。

根据两个实验中每分钟记录的信号存活率,计算 1 h 采集传感信号存活率的标准差,计算结果分别为

表 1 基线校正前后传感信号存活率

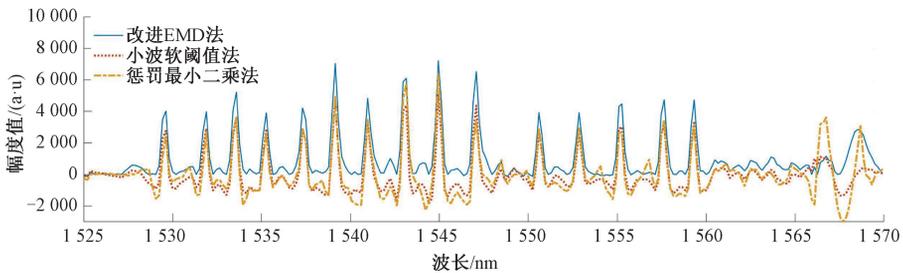
Table 1 Survival rate of sensor signal before and after baseline correction %

传感信号存活率	基线校正前	基线校正后
实验 1	46.7	95.6
实验 2	33.3	94.9

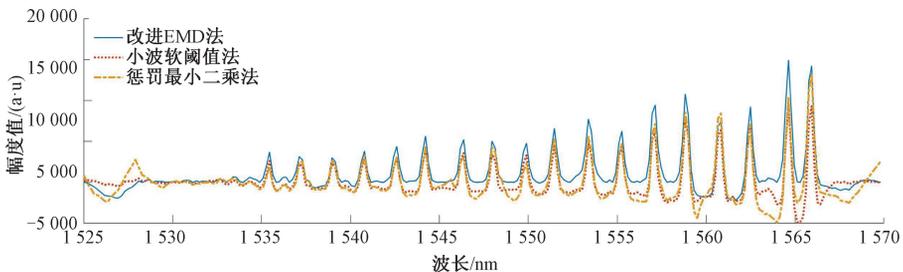
0.43% 和 0.52%,说明使用本文提出的改进 EMD 算法进行实时基线校正时稳定性较好,经较长时间的实验测试,算法波动仍处于较低水平。

### 3.3 不同基线校正方法的效果对比

分别使用改进 EMD 法、惩罚最小二乘法以及小波软阈值法对实验采集的光谱进行基线校正。校正后光谱对比如图 5 所示。从图中可以看出,3 种方法都能对实验采集 FBG 反射光谱的基线进行校正。通过对比,经改进 EMD 法处理后光谱信号底噪较为平稳,保留的各 FBG 反射峰强度较高,易于阈值的选取和峰值区间的划分;小波软阈值法的整体光谱波动最大,且由于在光纤通路损耗实验光谱 1 565 nm 至 1 570 nm 之间,以及光纤端面反射实验光谱 1 525 nm 至 1 530 nm 之间部分噪声过高,出现无法通过设定阈值方式避免的“假峰”现象,会造成传感信号的误识别。



(a) 3种方法对光纤通路损耗导致基线漂移光谱校正结果  
(a) Correction results of the baseline drift spectrum caused by the fiber line loss under three methods



(b) 3种方法对光纤端面反射导致基线漂移光谱校正结果  
(b) Correction results of the baseline drift spectrum caused by the fiber end face reflection under three methods

图 5 3 种方法对实验采集光谱的基线校正结果对比图

Fig. 5 Comparison chart of baseline correction results using three methods on the collected spectra in the experiment

对图 5(a) 中 3 种方法处理后光谱设定阈值强度为 3 000、1 500 和 1 500;图 5(b) 中 3 种方法处理后光谱设定阈值强度为 1 800、1 200 和 1 200。根据阈值对光谱进

行峰区划分,获取各 FBG 的峰值估计中心点,用高斯非线性拟合法进行寻峰计算,求得两个实验的各 FBG 中心波长,与正常光谱下计算的中心波长对比。

根据各 FBG 的中心波长计算结果,求出中心波长偏差、偏差平均值和偏差的标准差。3 种方法校正对两个实

验采集光谱校正后计算的中心波长偏差结果对比如图 6 所示;平均偏差和偏差的标准差计算结果如表 2 所示。

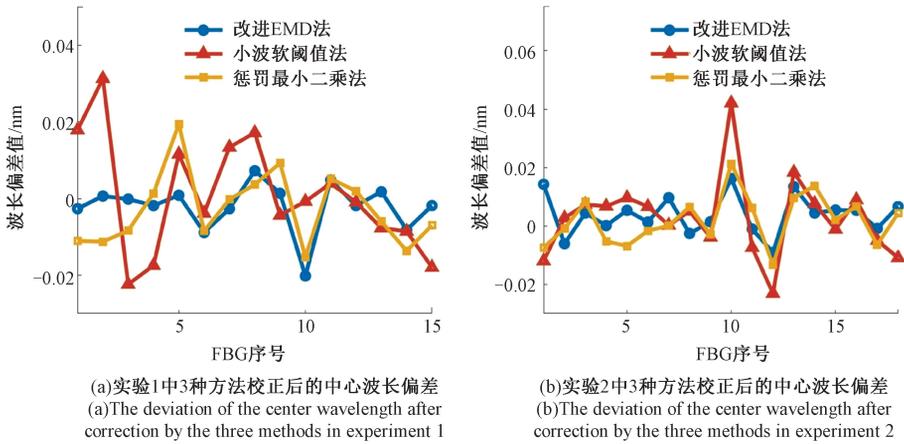


图 6 3 种方法基线校正后寻峰结果与实际中心波长偏差对比

Fig. 6 Comparison of deviation between peak finding results after baseline correction of three methods and actual center wavelength

表 2 中心波长平均偏差值和偏差的标准差

Table 2 Mean deviation value and deviation standard of wavelength deviation pm

校正方法	中心波长 平均偏差	中心波长平均 偏差的标准差
改进 EMD 方法	4.33	6.28
惩罚最小二乘法	8.12	9.27
小波软阈值法	11.92	14.61

校正方法	中心波长 平均偏差	中心波长平均 偏差的标准差
改进 EMD 方法	6.01	6.58
惩罚最小二乘法	6.87	8.31
小波软阈值法	9.93	13.43

从图 6 和表 2 中可以看出,实验采集的两个光谱运用小波软阈值法校正后,FBG 中心波长的平均偏差最大,分别为 11.92 和 9.93 pm;惩罚最小二乘法的平均偏差次之,分别为 8.12 和 6.87 pm;运用改进 EMD 法的平均偏差最小,分别为 4.33 和 6.01 pm,说明其在处理中引入的额外误差最小,从而基线校正后与原始正常光谱信号计算的 FBG 中心波长最为接近。同时,该方法校正后计算的中心波长偏差的标准差也在 3 种方法中最小,分别为 6.28 和 6.58 pm,表明其整体偏差波动最小,各 FBG 偏差均处于较低水平,处理效果优于小波软阈值法和惩罚最小二乘法。

## 4 结 论

本文针对 FBG 传感网络光谱基线漂移的问题,提出了一种基于 EMD 分解的改进方法,对筛选过程的计算方式改进,优化了迭代次数,使计算速率提高。通过迭代去除由极小值点序列经三次样条插值得到的 FBG 光谱下包络线,实现了信号的基线校正。实验证明,与常用的小波软阈值法和惩罚最小二乘法的校正效果相比,改进 EMD 方法校正后的光谱,通过寻峰计算,各 FBG 中心波长与原始波长的平均偏差值最小,基线校正效果最好,从而保证了物理量检测的较高准确性,为恶劣环境中辅助 FBG 传感网络峰区位置划分以及峰值信号的提取提供了一种有效手段,具有一定的实际应用价值。

## 参考文献

[ 1 ] 庞丹丹. 新型光纤光栅传感技术研究[D]. 济南:山东大学,2014.  
PANG D D. Investigation on the novel fiber bragg grating sensing technology [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.

[ 2 ] LU J Y, WANG B F, LIANG D K. Wavelet packet energy characterization of low velocity impacts and load localization by optical fiber Bragg grating sensor technique[J]. Applied Optics, 2013, 52 ( 11 ): 2346-2352.

[ 3 ] 田石柱,温科,王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的

- 钢梁损伤定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 80-85.
- TIAN SH ZH, WEN K, WANG D P. Study on damage location of steel beam based on long-gage fiber grating sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 80-85.
- [4] LEUNG C K Y, WAN K T, INAUDI D, et al. Optical fiber sensors for civil engineering applications [J]. Materials and Structures, 2015, 48(4): 871-906.
- [5] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681-1692.
- LIU T G, WANG SH, JIANG J F, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [6] 曲道明, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感及重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 144-151.
- QU D M, SUN G K, LI H, et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for morphing wing flexible skin shape [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 144-151.
- [7] TOSI D, SCHENA E, MOLARDI C, et al. Fiber optic sensors for sub-centimeter spatially resolved measurements: Review and biomedical applications[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 43: 6-19.
- [8] 高东, 孟凡勇, 宋言明, 等. 植入光纤光栅的软体驱动器形状传感研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 155-163.
- GAO D, MENG F Y, SONG Y M, et al. Research on the shape sensing of embedded fiber Bragg grating for soft actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 155-163.
- [9] 王璿, 王永杰, 张登攀. 面向海洋应用的光纤光栅温度传感器研究进展[J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 515-522.
- WANG J, WANG Y J, ZHANG D P. Research progress of fiber Bragg grating temperature sensors for ocean application[J]. Laser and Infrared, 2019, 49(5): 515-522.
- [10] RICCHIUTI A L, BARRERA D, NONAKA K, et al. Temperature gradient sensor based on a long-fiber Bragg grating and time-frequency analysis[J]. Optics Letters, 2014, 39(19): 5729-5731.
- [11] REN L, JIA Z G, HO M S C, et al. Application of fiber Bragg grating based strain sensor in pipeline vortex-induced vibration measurement [J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(9): 1714-1720.
- [12] 方勇华, 孔超, 兰天鸽, 等. 应用小波变换实现光谱的噪声去除和基线校正[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1088-1092.
- FANG Y H, KONG CH, LAN T G, et al. Denoising and baseline correction of spectrum by wavelet transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 1088-1092.
- [13] 江虹, 苏阳. 一种改进的小波阈值函数去噪方法[J]. 激光与红外, 2016, 46(10): 119-122.
- JIANG H, SU Y. Denoising method based on improved wavelet threshold function[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(10): 119-122.
- [14] 邵向鑫, 王有朋, 张笑鸣, 等. 用于光纤传感的可调半软阈值小波去噪算法[J]. 激光与红外, 2020, 50(9): 1120-1125.
- SHAO X X, WANG Y P, ZHANG X M, et al. An adjustable semi-soft threshold wavelet denoising algorithm for optical fiber sensing[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(9): 1120-1125.
- [15] 朱超, 鲁昌华, 杨凯, 等. 基于自适应稀疏表示的光谱去噪和基线校正[J]. 微型机与应用, 2013, 32(9): 54-56, 59.
- ZHU CH, LU CH H, YANG K, et al. Research on spectral pretreatment based on adaptive sparse representation[J]. Information Technology and Network Security, 2013, 32(9): 54-56, 59.
- [16] HUANG J, SHI T L, GONG B, et al. Fitting an optical fiber background with a weighted savitzky-golay smoothing filter for raman spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2018, 72(11): 1632-1644.
- [17] 徐万松, 陈天武. 基于形态学消除心电信号基线漂移方法的研究[J]. 中国医学工程, 2019, 27(9): 8-12.
- XU W S, CHEN T W. ECG baseline drift elimination based on morphology[J]. China Medical Engineering, 2019, 27(9): 8-12.
- [18] GONZÁLEZ-VIDAL J J, PÉREZ-PUEYO R, SONEIRA

M J. Automatic morphology-based cubic p-spline fitting methodology for smoothing and baseline-removal of Raman spectra [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2017, 48(6): 878-883.

- [19] 刘龙, 范贤光, 康哲铭, 等. 基于自适应加窗 spline 曲线拟合的拉曼光谱去基线方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(1): 111-115.

LIU L, FAN X G, KANG ZH M, et al. Baseline correction algorithm for raman spectroscopy based on adaptive window spline fitting [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(1): 111-115.

- [20] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.

## 作者简介



吕峥, 2019 年于北京工业大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与光电器件。

E-mail: lvzheng@bistu.edu.cn

**Lyu Zheng** received his B. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2019. He is currently a master student in the School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include optical fiber sensing and optoelectronic devices.



祝连庆(通信作者), 分别在 1982 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail: lqzhu\_bistu@sina.com

**Zhu Lianqing** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1982 and 1989, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes fiber sensing technology, fiber laser, and opto-electrical precision measurement technology.