

# 激光与光电子学进展

## 基于小波降噪的光纤布拉格光栅波长 高精度解调算法

韩超, 胡宾鑫\*, 朱峰, 宋广东, 张华, 高煜

齐鲁工业大学 (山东省科学院) 激光研究所, 山东 济南 250300

**摘要** 针对传统波长解调算法在光纤布拉格光栅 (FBG) 在线监测系统检测精度不高、效率低的问题, 提出了一种基于小波降噪的 FBG 波长高精度解调算法。首先, 对小波降噪方法处理的光谱波形进行快速运算, 得到新函数。然后, 获得新函数对应的中心波长。最后, 搭建了一套基于垂直腔面发射激光器的 FBG 变压器绕组温度在线监测系统, 采用小波降噪算法对波长进行解调并间接得到温度数据。实验结果表明, 相比直接寻峰、多项式拟合、高斯拟合算法, 小波降噪算法具有速度快、稳定性好等优点, 在 70~90 °C 测量范围内, 测温精度达到  $\pm 0.04$  °C, 波长解调的最大标准差小于 1.67 pm, 且该算法的运行效率高于常用的高斯拟合算法, 可用于工业现场环境 FBG 的高精度实时在线监测系统。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 波长解调; 小波降噪; 卷积积分; 寻峰算法

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0506004

### High-Precision Wavelength Demodulation Algorithm of Fiber Bragg Grating Based on Wavelet Denoising

Han Chao, Hu Binxin\*, Zhu Feng, Song Guangdong, Zhang Hua, Gao Yu

Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan, Shandong 250300, China

**Abstract** This study proposes a high-precision wavelength demodulation algorithm of fiber Bragg grating (FBG) based on wavelet denoising to overcome the shortcomings of traditional wavelength demodulation algorithms in the online monitoring system of FBG, such as low detection accuracy and effectiveness. First, we perform rapid calculations on the spectral waveforms that are processed using the wavelet noise reduction method to generate a new function. Then, we obtain the center wavelength for the new function. Finally, a set of FBG transformer winding temperature online monitoring system based on a vertical-cavity surface-emitting laser is constructed; the wavelet noise reduction technique is used to demodulate the wavelength and indirectly acquire temperature data. The experiments show that the wavelet denoising technique outperforms the finding peaks directly, polynomial fitting, and Gaussian fitting algorithms in terms of speed and stability. In the temperature range of 70~90 °C, the temperature measurement accuracy can reach  $\pm 0.04$  °C. The wavelength demodulation's highest standard deviation is less than 1.67 pm. Further, the operational efficiency of the algorithm is greater than that of the commonly used Gaussian fitting algorithm. Therefore, the algorithm may be used in the FBG's high-precision real-time online monitoring system in the industrial environment.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; wavelength demodulation; wavelet denoising; convolution integral; peak finding algorithm

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-20; 录用日期: 2021-05-28

基金项目: 山东省自然科学基金博士基金 (ZR2019BEE019)、山东省科学院青年博士基金 (2020QN005)、山东省深部冲击地压灾害评估工程实验室开放项目 (LMYK-2021-010)

通信作者: \*bxhu@qlu.edu.cn

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有无源、本质安全、抗电磁干扰能力强、精度高、稳定性好、防雷击、防腐蚀等显著优点,被广泛应用于桥梁、大坝、建筑、隧道、轮船、飞机、火车及复合结构的长期健康监测中<sup>[1-10]</sup>。FBG传感器主要通过波长漂移进行测量,而波长漂移对应的是反射谱中心波长的位置变化,因此,光谱中心波长的快速准确解调对实现FBG监测系统高精度测量具有重要意义<sup>[11]</sup>。

目前,FBG监测系统常用的解调算法有直接寻峰算法、质心算法、高斯拟合算法、一般多项式拟合算法、高斯多项式拟合算法、遗传算法和蚁群算法等<sup>[12-14]</sup>。直接寻峰算法对光谱曲线的形状和光滑程度要求较高,当光谱中含有大量噪声时,该算法的准确度较低。一般多项式拟合算法和高斯多项式拟合算法的精确度较高,但这两种算法过分依赖于观测数据,如果峰值不在观测点内,会导致较大的寻峰误差<sup>[15-16]</sup>。遗传算法和蚁群算法的准确度较高,但计算量大、求解时间长,不利于FBG传感器的快速解调。高斯拟合算法的解调精度较高,在工程测量中得到了广泛应用<sup>[17-18]</sup>,但光谱不对称时该算法的误差较大。

针对上述问题,本文提出了一种基于小波降噪的FBG波长高精度解调算法。首先,用小波去噪算法处理采集到的光谱波形;然后,对降噪后的光谱

波形进行乘积倒数运算和卷积运算,得到一个新函数;最后,求解该函数大于0时的最小自变量,以定位中心波长。搭建了一套基于垂直腔面发射激光器(VCSEL)的FBG变压器绕组温度在线监测系统,采用小波降噪算法对波长进行解调并间接得到温度数据。实验结果表明,该算法可以实现FBG传感器的快速高精度解调。

## 2 算法原理

### 2.1 FBG反射光谱的图像特征

采用对称高斯函数建立FBG的光谱理论模型,该模型的反射谱强度可表示为

$$I(\lambda) = A \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta \lambda_B} \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中, $\lambda_B$ 为FBG的中心波长, $\Delta \lambda_B$ 为3 dB带宽, $A$ 为反射谱的幅值, $\lambda$ 为FBG的波长。FBG的反射光谱波形具有窄带宽、高反射率、两侧陡峭的特点,如图1所示。可以发现,实测反射光谱与标准高斯理论模型的区别较大,底部噪声较多,光谱两侧的图像扭曲,顶部扁平且有局部波动。FBG的反射光谱是纤芯内折射率调制的合成结果,容易受制造工艺、环境温度、应变等因素的影响,在实际应用过程中,光路连接器和探测器等设备本身的非线性及延迟也会导致反射光谱变形<sup>[19]</sup>。含有大量噪声的FBG传感器实际反射光谱,会严重影响系统的解调精度,因此,对反射光谱进行降噪处理是寻峰的首要工作。

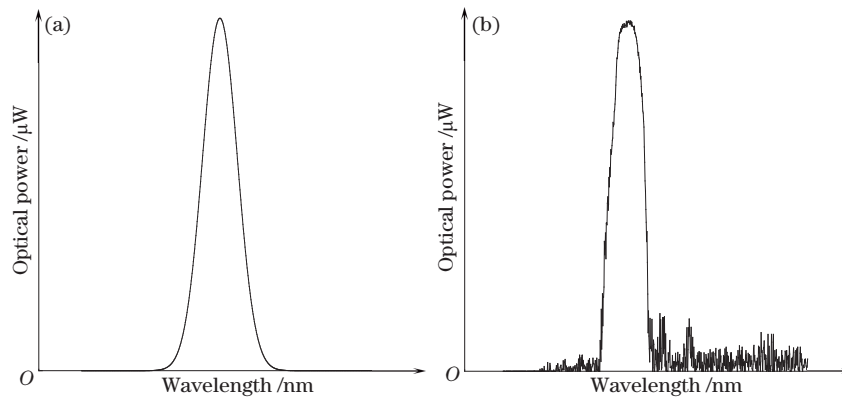


图1 FBG反射光谱的高斯拟合模型和实际波形。(a)高斯拟合模型;(b)实际波形

Fig. 1 Gaussian fitting model and actual waveform of the FBG reflection spectrum. (a) Gaussian fitting model; (b) actual waveform

### 2.2 小波降噪处理

小波变换具有良好的局部时频特征刻画能力和多分辨分析能力,广泛应用于信号的降噪处理中<sup>[20]</sup>。小波函数可表示为

$$\psi_{(a,b)}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi \left( \frac{x-b}{a} \right), \quad (2)$$

式中, $a$ 为缩放参数,反映了特定基函数的宽度; $b$ 为平移参数,指定沿 $x$ 轴平移的位置。常用的小波降噪

方法有小波分解与重构、阈值降噪、模极大值降噪、平移不变量降噪以及相关降噪等。其中,小波阈值降噪法的适用范围广,降噪效果好,且能很好地保留信号的原始特征,因此,采用小波阈值降噪法对光谱波形进行降噪处理。软阈值降噪法能滤除波形的高频噪声,解决峰值检测过程中旁瓣对峰值检测的影响。当小波系数的绝对值小于给定阈值时,使函数值为0;大于阈值时,用函数值减去阈值,可表示为

$$\omega_i = \begin{cases} [\text{sgn}(\omega)](|\omega| - t), & \omega \geq t \\ 0, & \omega < t \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $\omega_i$  为施加阈值后的小波系数,  $t$  为阈值,  $\omega$  为小波系数。采用小波阈值降噪法进行降噪处理的关键是选取合适的阈值。相关系数可描述两个随机变量之间的线性关系,其大小是刻画两个随机变量线性相关程度的一种度量,取值范围为  $[-1, 1]$ <sup>[21]</sup>。若相关系数为0,表明两个随机变量之间不存在线性关系;若不为0,则存在线性关系。为了选取合适的阈值,避免阈值过大导致波形失真,用3 dB带宽的光谱波形作为降噪基准波形。将阈值从4增大至104,并计算对应的相关系数,部分结果如表1和图2所示。可以发现,阈值为44和64时的相关系数分别为0.9483和0.9484,虽然相关系数增加了0.0001,但阈值却增加了20,容易导致光谱波形失真,因此,选取的小波降噪阈值为44,光谱的原始波形与小波阈值降噪后的波形如图3所示。

表1 小波降噪阈值与相关系数

Table 1 Wavelet denoising threshold and correlation coefficient

Threshold	4	20	24	34	44	54	64	74
Correlation coefficient	0.9465	0.9469	0.9473	0.9475	0.9483	0.9483	0.9484	0.9484

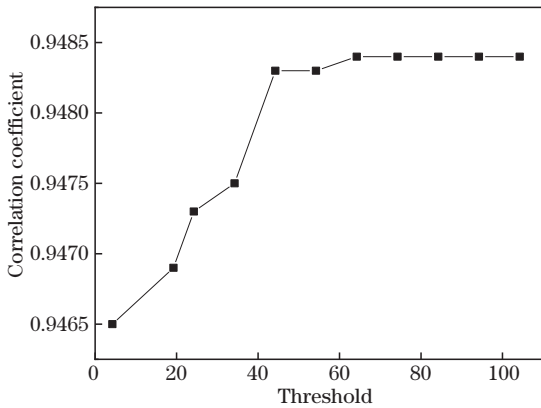


图2 阈值和相关系数的对应关系

Fig. 2 Correspondence between threshold and correlation coefficient

### 2.3 算法的实现

基于小波降噪的FBG波长解调算法的实现步骤:1)采集FBG传感器的反射光谱波形;2)用小波阈值降噪法处理反射光谱波形,得到的波形函数为  $f_1(x)$ ;3)对  $f_1(x)$  进行乘积倒数运算,得到  $f_2(x) = 1/[f_1(x) \cdot \pi]$ ;4)对  $f_1(x)$  和  $f_2(x)$  进行卷积运算,得到  $f(x) = f_1(x) * f_2(x)$ ;5)提取  $f(x)$  大于0的所有自变量  $x$ ;6)所有  $x$  中的最小值即为所求的中心波长。小波阈值降噪算法的实现流程如图4所示。

实验中采集FBG传感器的反射光谱波形时,设备容易受制造工艺、环境温度、应变等因素的影响,波形内含有大量噪声。采用小波默认阈值对光谱

波形进行降噪处理虽能提高解调精度,但其顶部仍存在大量噪声;增大阈值能使光谱波形变得更光滑,进一步滤除光谱顶部的噪声。对滤波降噪后的波形  $f_1(x)$  与  $\pi$  进行乘积倒数运算,得到波形  $f_2(x) = 1/[f_1(x) \cdot \pi]$ 。将  $f_1(x)$  与  $f_2(x)$  进行卷积,得到  $f(x) = f_1(x) * f_2(x)$ ,  $f(x)$  的波形如图5所示。可以发现,  $f(x)$  图像第一部分的函数值均为0,在中心波长处出现了第一个大于0的点,从而得到该函数对应的  $x$  值(光谱波形的中心波长)。

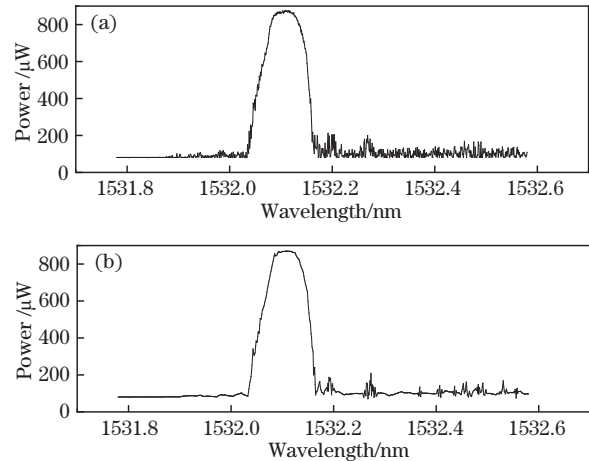


图3 原始波形与降噪后的波形。(a)原始波形; (b)降噪后的波形

Fig. 3 Original waveform and the waveform after noise reduction. (a) Original waveform; (b) waveform after noise reduction

波形进行降噪处理虽能提高解调精度,但其顶部仍存在大量噪声;增大阈值能使光谱波形变得更光滑,进一步滤除光谱顶部的噪声。对滤波降噪后的波形  $f_1(x)$  与  $\pi$  进行乘积倒数运算,得到波形  $f_2(x) = 1/[f_1(x) \cdot \pi]$ 。将  $f_1(x)$  与  $f_2(x)$  进行卷积,得到  $f(x) = f_1(x) * f_2(x)$ ,  $f(x)$  的波形如图5所示。可以发现,  $f(x)$  图像第一部分的函数值均为0,在中心波长处出现了第一个大于0的点,从而得到该函数对应的  $x$  值(光谱波形的中心波长)。

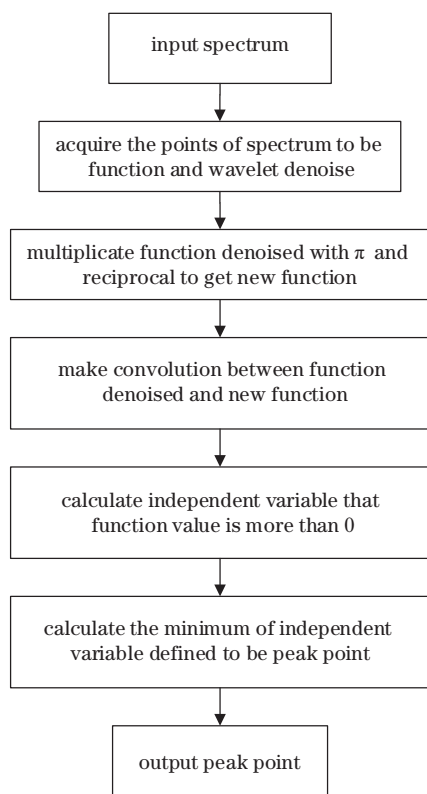


图 4 基于小波降噪的 FBG 波长解调算法流程

Fig. 4 Flow chart of FBG wavelength demodulation algorithm based on wavelet denoising

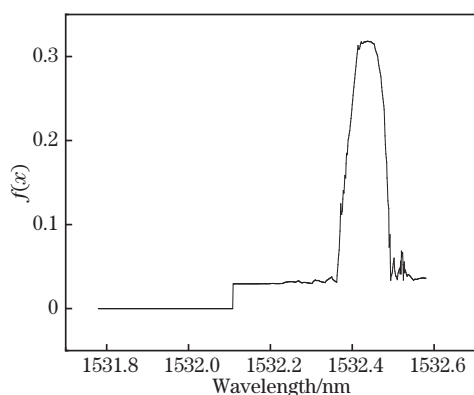


图 5 函数  $f(x)$  的波形图

Fig. 5 Waveform diagram of function  $f(x)$

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 实验系统

电力变压器是输电系统中最重要的设备之一,而温度是影响绝缘性能的主要因素<sup>[22]</sup>。变压器一般浸泡在变压器油中运行,且工作环境的温度较高。FBG 传感技术适用于高温高压的油气环境,可实时监控变压器的温度。电力变压器有三相(A相、B相和C相),每一相均包括一个高压(HV)绕组和

一个低压(LV)绕组。除了铁芯和变压器的外壳,其余 6 个高、低压侧绕组都安装了 FBG 温度监测系统。图 6 为基于 VCSEL 的 FBG 解调系统的原理框图。其中, DCA 为数模转换器。VCSEL 发出的光进入环形器并到达 FBG 传感器,反射光通过光电探测器(PD)转换为电流,再经对数放大器(LA)转换成电压进入模数转换器(ADC)。通过温度控制器将 VCSEL 的温度稳定在 25 °C,可编程电流源(PCS)为激光器提供锯齿波调制电流(2~10 mA),调谐频率可达 1 kHz。微控制器(MCU)控制 ADC 采集光谱数据,并通过以太网接口发送到计算机进行波长解调和数据处理。

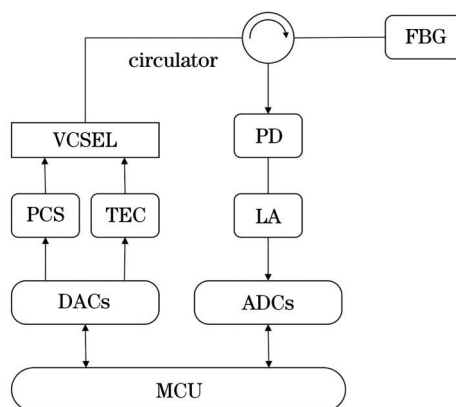


图 6 基于 VCSEL 的 FBG 解调系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the FBG demodulation system based on VCSEL

#### 3.2 实验过程

在恒温水箱内进行了 FBG 波长与温度的对照实验,用高精度温度传感器 Pt100 测量水箱的温度,用型号为 testo 735-1 的温度测量仪显示温度。在 9.5~78.2 °C 温度范围内调节水箱温度,每个温度都对应一个 FBG 的波长,结果如图 7 所示。可以发

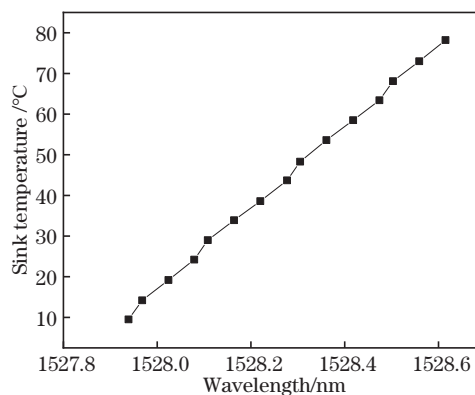


图 7 波长与温度的拟合结果

Fig. 7 Fitting results of wavelength and temperature

现,温度和波长的函数关系为一次函数,即波长随温度的增大而增大,方差 $R^2$ 为0.9988。用最小二乘法进行线性拟合,得到波长与温度的关系为

$$T = 100.337945\lambda - 153299.536910, \quad (4)$$

式中, $T$ 为温度, $\lambda$ 为FBG的中心波长。

采用直接寻峰、多项式拟合、高斯拟合和小波降噪等算法分别对运行中变压器绕组的温度进行解调,四种算法对三个高压侧绕组与三个低压侧绕组的温度测量结果如图8所示。可以发现,在70~90℃温度范围内,直接寻峰算法监测到的温度最

高,与标定温度的误差也最大;且直接寻峰算法测得的温度波动比较明显,受光谱波形顶端噪声的影响较大。多项式拟合算法测得的精度相对于直接寻峰算法有明显改善,但拟合精度不高,因此测量温度与标定温度的误差较大。用高斯拟合算法对光谱曲线进行拟合,其测量结果明显优于直接寻峰算法和多项式拟合算法,温度精度达到 $\pm 0.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。小波降噪算法解调后的温度精度达到 $\pm 0.04\text{ }^\circ\text{C}$ ,优于高斯拟合算法。

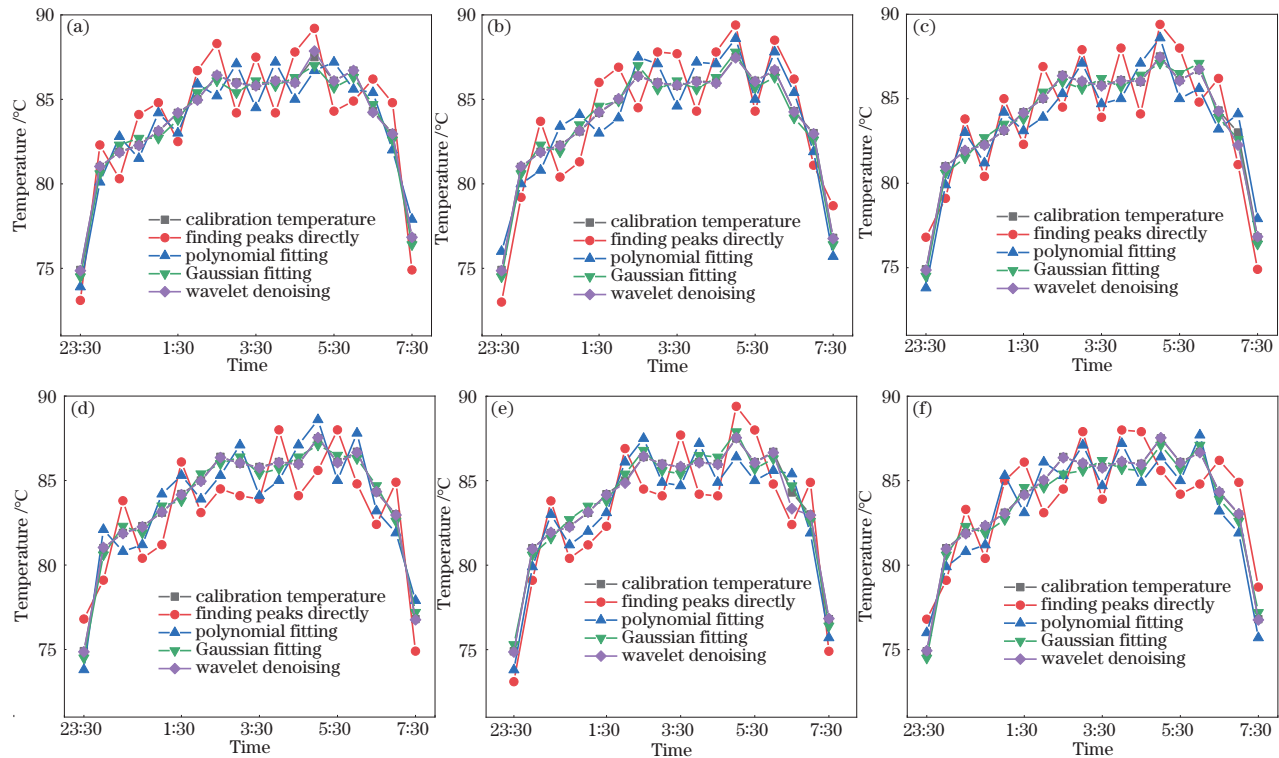


图8 变压器各相的温度。(a) A相的LV侧绕组温度;(b) A相的HV侧绕组温度;(c) B相的LV侧绕组温度;(d) B相的HV侧绕组温度;(e) C相的LV侧绕组温度;(f) C相的HV侧绕组温度

Fig. 8 Temperature of each phase of the transformer. (a) LV winding of A phase; (b) HV winding of A phase; (c) LV winding of B phase; (d) HV winding of B phase; (e) LV winding of C phase; (f) HV winding of C phase

### 3.3 实验结果与分析

为进一步验证本算法的解调精度,将变压器三相高、低压侧绕组的标定温度分别与直接寻峰、多项式拟合、高斯拟合和小波降噪算法监测的温度进行对比,并通过(4)式将温度转换成波长,得到不同算法的波长解调标准差,如图9所示。可以发现,直接寻峰、多项式拟合、高斯拟合和小波降噪算法的波长解调最大标准差分别为18.6 pm、10.96 pm、5.35 pm和1.67 pm,小波降噪算法对波长解调的标准差最小,且测量稳定性较好。为验证不同解调算

法的运行效率,在Windows 10 64位,AMD Ryzen 5系统,Matlab R2018b运行环境下,用直接寻峰、多项式拟合、高斯拟合、小波降噪算法对FBG变压器绕组温度监测系统采集的1000个光谱波形数据进行解调分析,四种算法的平均运行时间如表2所示。可以发现,直接寻峰算法的运行时间最短,平均运行时间为3.0 ms,多项式拟合算法的平均运行时间为46.8 ms,高斯拟合算法的平均运行时间为176.0 ms,小波降噪算法的平均运行时间为80.6 ms。这表明小波降噪算法在检测精度最优的情况下,运行效率

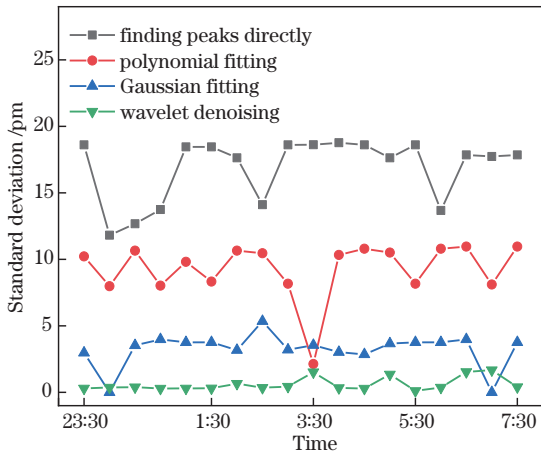


图 9 不同算法的波长解调标准差

Fig. 9 Wavelength demodulation standard deviation of different algorithms

表 2 不同算法的平均运行时间

Table 2 Average running time of different algorithms

	unit: ms			
Transformer winding	Finding peaks directly	Polynomial fitting	Gaussian fitting	Wavelet denoising
HV winding of A phase	2.5	45	165	78
LV winding of A phase	3.2	48	183	80
HV winding of B phase	3.0	47	178	85
LV winding of B phase	3.5	50	201	87
HV winding of C phase	2.8	46	170	79
LV winding of C phase	2.6	45	160	75
Average running time	3.0	46.8	176.0	80.6

相比常用的高斯拟合算法有较大提升,可适用于工业现场环境FBG的高精度实时在线监测系统。

## 4 结 论

FBG 传感器已经广泛应用于矿山、桥梁、大坝、隧道的健康监测以及航空航天、土木工程和医学工程等领域,基于该传感器搭建的解调系统在温度测量、应变检测和振动监测等领域占有重要地位。针对传统波长解调算法在FBG在线监测系统中检测精度不高、效率低的问题,提出了一种基于小波降噪的FBG波长高精度解调算法。首先,介绍了算法

的原理和实现方法;然后,搭建了一套FBG变压器绕组温度在线监测系统;最后,采用小波降噪算法对波长进行解调,间接得到温度数据,并与直接寻峰、多项式拟合、高斯拟合算法进行对比分析。实验结果表明,在70~90℃测量范围内,小波降噪算法的测温精度可达到±0.04℃,波长解调的最大标准差优于1.67pm,且其运行效率远高于常用的高斯拟合算法,为工业现场环境FBG的高精度实时在线监测提供了一种新思路。

## 参 考 文 献

- [1] Zhu W X, Shen Q X, Qin H Y. Monitoring of prestress and bond stress of self-sensing FBG steel strand[J]. Measurement, 2021, 177: 109246.
- [2] Zeng B, Zheng Y, Yu J, et al. Deformation calculation method based on FBG technology and conjugate beam theory and its application in landslide monitoring[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 63: 102487.
- [3] Fan Q G, Jia Z A, Feng D Q, et al. Highly sensitive FBG pressure sensor based on square diaphragm[J]. Optik, 2021, 225: 165559.
- [4] Qin H Y, Lin Y, Jiang Y, et al. Application of fiber Bragg grating sensor in cable force monitoring of cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 51-55.  
覃荷瑛, 林勇, 姜涌, 等. 光纤光栅传感器在斜拉桥索力监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 51-55.
- [5] Wang M, Sun Z H, Zhang L, et al. Research of FBG vibration system used for border security[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(7): 708-712.  
王蒙, 孙志慧, 张琳, 等. 基于FBG震动传感器的边境安防系统研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(7): 708-712.
- [6] Hu B X, Jin G X, Liu T Y, et al. A precision fiber Bragg grating interrogation system using long-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(4): 351-358.
- [7] Qin J Q, Yin J H, Zhu Z H, et al. Development and application of new FBG mini tension link transducers for monitoring dynamic response of a flexible barrier under impact loads[J]. Measurement, 2020, 153: 107409.
- [8] Li Y, Wang H P, Cai W B, et al. Stability monitoring of surrounding rock mass on a forked tunnel using both strain gauges and FBG sensors[J]. Measurement, 2020, 153: 107449.

- [9] Jiang S F, Qiao Z H, Li N L, et al. Structural health monitoring system based on FBG sensing technique for Chinese ancient timber buildings[J]. *Sensors*, 2019, 20(1): E110.
- [10] Xu G Q, Xiong D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317.  
徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
- [11] Shang Q F, Lin B H. The comparison and analysis of typical peak-detection algorithms in fiber Bragg grating sensor system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2010, 47(2): 1-4.  
尚秋峰, 林炳花. 光纤 Bragg 光栅传感系统典型寻峰算法的比较分析[J]. *电测与仪表*, 2010, 47(2): 1-4.
- [12] Yu Y L, Wang X W, Wang H. Analysis of peak-detection algorithms in fiber Bragg grating by different sampling methods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1274-1278.  
余有龙, 王雪微, 王浩. 不同采样方式下光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法的分析[J]. *光子学报*, 2012, 41(11): 1274-1278.
- [13] Janzen F C, Martelli C, Mezzadri F. Peak detection algorithm for fiber Bragg grating sensors[C]//Latin America Optics and Photonics Conference, November 10-13, 2012, Sao Sebastiao, Brazil. Washington, D.C.: OSA, 2012: LM2A.8.
- [14] Li M, Sheng Y. Study on application of Gaussian fitting algorithm to building model of spectral analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2352-2355.  
李敏, 盛毅. 高斯拟合算法在光谱建模中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10): 2352-2355.
- [15] Chen Y, Wang K, Liu H L, et al. Processing FBG sensing signals with three-point peak-detection algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2751-2756.  
陈勇, 王坤, 刘焕淋, 等. 三点寻峰算法处理光纤布拉格光栅传感信号[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2751-2756.
- [16] Li Y Q, Xie Y, Yao G Z. Comparison of peak searching algorithms for wavelength demodulation in fiber Bragg grating sensors[C]//2010 2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science, December 25-26, 2010, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [17] Sadhukhan D, Mitra M. R-peak detection algorithm for ECG using double difference and RR interval processing[J]. *Procedia Technology*, 2012, 4: 873-877.
- [18] Zhang W, Zhao L. Node localization method for wireless sensor network based on weighted-centroid-algorithm[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2020, 42(5): 545-548.  
张维, 赵亮. 基于加权质心算法的无线网络节点定位方法[J]. *沈阳工业大学学报*, 2020, 42(5): 545-548.
- [19] Wang Q N, Yang Y H. A FBG spectrum peak detection technique based on Steger image algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0810004.  
王巧妮, 杨远洪. 基于 Steger 图像算法的光纤布拉格光栅寻峰技术[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0810004.
- [20] Liu X J, Wang J Q, Zhou Y H, et al. Wavelet methods and applications in nonlinear mechanics problems[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2017, 38(4): 287-311.  
刘小靖, 王加群, 周又和, 等. 小波方法及其非线性力学问题应用分析[J]. *固体力学学报*, 2017, 38(4): 287-311.
- [21] Li X M, Jiang W H. Research on linear correlation and dependence measure[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2006, 36(12): 188-192.  
李秀敏, 江卫华. 相关系数与相关性度量[J]. *数学的实践与认识*, 2006, 36(12): 188-192.
- [22] Picanço A F, Martinez M L B, Rosa P C. Bragg system for temperature monitoring in distribution transformers[J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(1): 77-83.