

光纤光栅位移传感器实时监测解调系统

尹建璟, 许雪梅, 丁一鹏

中南大学物理与电子学院, 湖南 长沙 410083

摘要 为建立稳定的光纤光栅传感器波长解调系统, 利用可调谐法布里-珀罗滤波器的窄带滤波特性实现对宽带光源的线性扫描, 采用放在恒温箱的高精度参考光栅标定法布里-珀罗标准具的方法, 提供多个间隔相同、幅值平稳的波长参考点。将采集到的原始数据序列采用改进的小波阈值去噪算法(使用新的阈值函数和阈值)进行平滑滤波处理, 通过高斯拟合算法的核心思想得到粗峰值序列, 再进行二次处理, 去掉无效峰, 修正部分峰的位置, 搭建了光纤光栅位移传感器的实时监测解调系统, 与螺旋测微仪相比精度稳定在 0.25 mm 左右。

关键词 光纤光学; 可调谐法布里-珀罗滤波器; 法布里-珀罗标准具; 小波阈值去噪; 高斯拟合算法

中图分类号 TP253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.010601

Real-Time Monitoring and Demodulation System of Fiber Bragg Grating Displacement Sensor

Yin Jianjing, Xu Xuemei, Ding Yipeng

School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China

Abstract In order to establish a stable fiber grating sensor wavelength demodulation system, we use narrow band filter characteristic of tunable Fabry-Perot filter to make a linear scan of broadband light source, and use a high-precision reference grating placed in a thermostat to calibrate Fabry-Perot etalon, and to provide multiple wavelength reference points with the same interval and stable amplitude. The original data sequence is modified by the improved wavelet threshold denoising algorithm(using a new threshold function and a new threshold). We gain raw peak sequence by the core idea of the Gaussian fitting algorithm, and then do the secondary treatment, remove some invalid peaks, modify location of part peaks, and build a fiber grating displacement sensor real-time monitoring and demodulation system. Compared with spiral micrometer, accuracy of this system is about 0.25 mm.

Key words fiber optics; tunable Fabry-Perot filter; Fabry-Perot etalon; wavelet threshold denoising; Gaussian fitting algorithm

OCIS codes 060.3735; 060.2300; 060.2370; 050.2230; 060.4230

1 引言

电学类传感器因有零点漂移、易被腐蚀和受电磁干扰严重等缺陷而无法较好地应用于某些恶劣环境中。光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有无零点漂移、灵敏度高、抗环境干扰能力强和可长期监测等优势, 弥补了电类传感器的不足, 被广泛用于恶劣环境

中温度、压力、应力、震动和位移等物理量的测量。例如光纤光栅位移传感器^[1]是一种能够长期测量大型结构之间相对位移的传感器, 在水坝、桥梁、工业与民用建筑等结构的裂缝或接缝开合度的测量中有较大应用前景。FBG的中心波长会随待测物理量的变化而变化, 因此只要能检测到其中心波长的改变量, 就能得到待测物理量的改变情况。FBG的中

收稿日期: 2017-07-06; 收到修改稿日期: 2017-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(61502538, 61071025)、湖南省自然科学基金(2015JJ3157)

作者简介: 尹建璟(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感技术方面的研究。E-mail: 2695788663@qq.com

导师简介: 许雪梅(1971—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光信号处理方面的研究。

E-mail: xuxuemei999@126.com(通信联系人)

心波长检测技术有非平衡马赫-曾德尔(M-Z)干涉法、匹配光栅法、边缘滤波器法、可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器法等。

F-P 滤波器以体积小、响应速度快、信噪比和分辨率高、稳定性好等特性^[2],被广泛应用于 FBG 传感器的波长解调方案中^[3],其基本原理是 F-P 滤波器的驱动电压和其透射峰的波长基本呈线性变化,当透射光强达到最大时,根据此时的驱动电压即可反推出入射光波长,但由于其压电陶瓷(PZT)元件具有非线性和迟滞性,并存在一定的温度漂移^[4-5],因此其驱动电压和透射波长并不能用简单严格的线性关系表达,需要实时校准波长和电压的关系。常用的方法有 3 种:1) 引入 1 个 FBG 作为波长参考^[6],其缺点是提供的校准波长参考点太少;2) 采用气体吸收谱线参考法^[7],可以提供多个吸收谱线的波长参考点,但整个吸收谱线覆盖光波长范围较窄,谱线并非均匀分布,且各个峰的幅值强度差别较大,波长校正的算法复杂^[7];3) 引入 1 个固定的参考 F-P 标准具^[8-9],提供间隔均匀、强度相同,且覆盖光波长范围宽的多条参考波长线,但是谱线容易受到温度漂移的影响。

针对 F-P 滤波器压电陶瓷的驱动电压和透射波长的非严格线性关系,以及温度漂移造成的解调精度差等问题,基于可调谐 F-P 滤波器解调技术的原理、方法及其关键技术,同时综合考虑成本等多方面的因素,采用引入放置在恒温箱的高精

度参考 FBG,标定 F-P 标准具的某个峰的波长,根据 F-P 标准具的自由光谱特性可得到其余参考峰值波长,从而可进一步得到光纤传感器的波长偏移量,同时搭建了光纤光栅位移传感器实时监测解调系统平台,在数据处理中滤波算法采用改进的小波阈值去噪算法^[10-11],针对原始阈值函数和阈值的不足,使用新的阈值函数和阈值,改善了原始信号,比较多种寻峰算法(如质心法、倒数法、多项式拟合法和半峰法)的优劣^[12-14],最后采用指数修正高斯拟合算法^[15]对提取的峰值信号进行二次过滤处理,去除假峰,修正部分峰的位置等,较好地提高了波长解调的准确度。

2 数据采集处理

2.1 光纤光栅位移传感器解调系统

图 1 是光纤光栅位移传感器实时监测解调系统。系统中由放大自发辐射(ASE)宽带光源发出的宽带光,经过隔离器进入被锯齿波驱动的可调谐 F-P 滤波器(锯齿波每扫描 1 个周期,相当于透射光从宽带光源一侧扫描到另一侧),透射出来的窄带光通过光纤分束器将光路一分为二,一部分进入 F-P 标准具通道,另一部分通过光纤环形器进入参考 FBG 和位移传感器串联而成的 FBG 通道,F-P 标准具通道的透射谱和 FBG 通道的反射谱同时被双通道高速同步采集卡采集到计算机上进行数据处理。

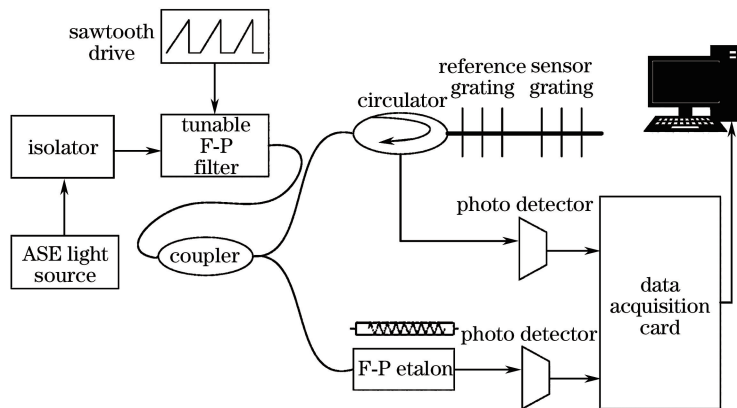


图 1 光纤光栅位移传感器解调系统

Fig. 1 FBG displacement sensor demodulation system

根据宽带光源的光谱范围 1525~1565 nm,F-P 滤波器的扫描电压范围必须使其投射波长范围涵盖该宽带光源的范围。通过实验寻找到 2 个极值电压 9.5 V(投射波长为 1565 nm)和 18.5 V(投射波长为 1525 nm),所以锯齿波的扫描电压只要覆盖 9.0~

18.0 V 即可。最终采用高性能的 16 位模数(AD)转换芯片 AD6541 进行模数转换,其转换建立时间为 1 μ s,满足系统要求。系统框架如图 2 所示。

整个锯齿波产生过程为数字信号处理器(型号为 DSPF2812)通过串行外接接口(SPI 接)每隔 5 μ s

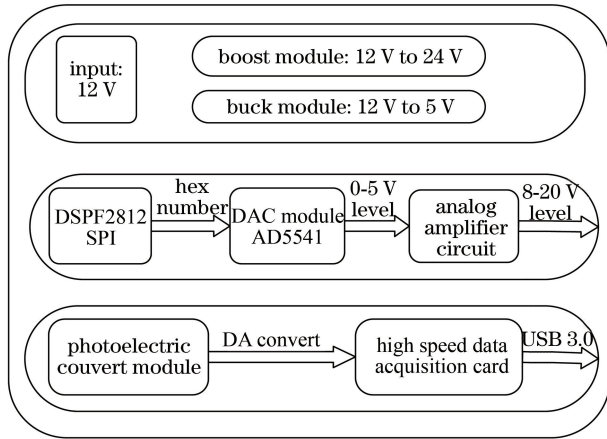


图2 锯齿波产生系统框架

Fig. 2 Generation system frame of sawtooth wave

送1个自加1的AD数值给数模转换(DAC)模块(型号为AD6541),通过数模(DA)转换产生对应的0~5 V线性电平,再通过模拟放大电路(1个比例运算放大器加1个加法器)将0~5 V电平搬迁到8~20 V,从而满足系统需求。理论上对应的F-P滤波器的扫描精度可以达到0.7 nm。

2.2 小波阈值去噪

光电探测器转换FBG反射谱信号存在大量噪声信号,而小波变换因具有低熵性、多分辨率、去相关性、选基灵活性等特性,在去噪方面得到了广泛应用,优于常见的均值滤波和中值滤波等算法。

设 $s(t)$ 为采集到的原始信号, $n(t)$ 为服从

$N(0, \sigma^2)$ 的高斯白噪声(σ 为标准差),将高斯白噪声加到原始信号,得到含有噪声的信号 $f(t)$,可表示为 $f(t) = s(t) + n(t)$,对 $f(t)$ 作离散小波变换

$$\omega_f(j, k) = \omega_s(j, k) + \omega_n(j, k), j = 0, 1, \dots, J; k = 0, 1, \dots, K, \quad (1)$$

式中 $\omega_s(j, k)$ 和 $\omega_n(j, k)$ 分别为原始信号和噪声信号在第 j 层上的小波系数, J 表示小波变换最大分解层, K 表示信号长度。

由(1)式可知,原始信号能量大多表现在有限的小波系数上,且幅值大;噪声能量主要体现在全部小波域内,且幅值小。所以选择1个恰当的阈值,对小波系数作量化处理,再对量化后的系数进行重构,即可得到去除噪声的信号,流程如图3所示。

常见的传统阈值函数包括硬阈值函数和软阈值函数,分别为

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k}, & |\omega_{j,k}| \geq \gamma \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \gamma \end{cases}, \quad (2)$$

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(\omega_{j,k})(|\omega_{j,k}| - \gamma), & |\omega_{j,k}| \geq \gamma \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \gamma \end{cases}. \quad (3)$$

(2)式为硬阈值函数,(3)式为软阈值函数,硬阈值函数在 $\pm\gamma$ 处具有不连续性,导致重构信号在不连续点附近震荡;软阈值函数虽有较好的连续性,但是待估计的小波系数与带噪的小波系数存在恒定偏差,也会给重构信号带来误差。

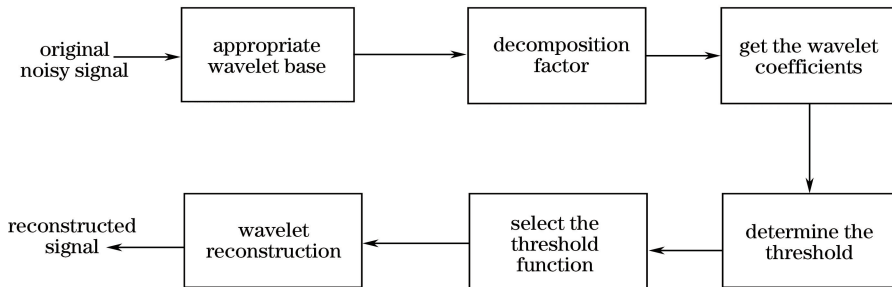


图3 小波阈值去噪流程图

Fig. 3 Flow chart of wavelet threshold denoising

因此,在文献[9-10]的研究基础上,有必要重新构造1个新的阈值函数,其特点是在阈值点处连续,

且当 $\omega_{j,k}$ 增大时, $\hat{\omega}_{j,k}$ 趋近于 $\omega_{j,k}$ 。因此,最终使用新的阈值函数为

$$\hat{\omega}_{j,k} = \begin{cases} \text{sign}(\omega_{j,k}) [|\omega_{j,k}| - \gamma \cdot \exp(\gamma - |\omega_{j,k}|)], & |\omega_{j,k}| \geq \gamma \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \gamma \end{cases}. \quad (4)$$

由(4)式可知,当 $|\omega_{j,k}| = \gamma$ 、 $\hat{\omega}_{j,k} = 0$ 时,该函数在该点是连续的,从而解决了硬阈值函数的不连续性;当 $|\omega_{j,k}| \rightarrow \infty$ 时, $\hat{\omega}_{j,k} \rightarrow |\omega_{j,k}|$,说明 $\hat{\omega}_{j,k} =$

$|\omega_{j,k}|$ 是该函数的渐近线,从而解决了软阈值函数存在恒定偏差的问题,所以该阈值函数理论上也可以提高去噪的稳定性。

阈值的选取常采用 $\gamma = \sigma \sqrt{2 \lg K}^{[10]}$, 式中 σ 代表噪声的均方根误差。一旦信号给定, 阈值变为确定值, 文献[9-10]中研究结果表明, 随着分解尺度的增加, 噪声的小波系数逐渐减小。因此使用新的阈值 $\gamma = \sigma \sqrt{2 \lg K} / \exp j$, j 代表分解的

层数, “满足随着 j 的增大, γ (阈值) 逐渐减小” 的规律。

通过以上分析, 使用新的阈值函数和阈值, 同时采用 Sym8 小波基, 分解层次到第 5 层时数据源的去噪平滑效果达到最好, 如图 4 所示。

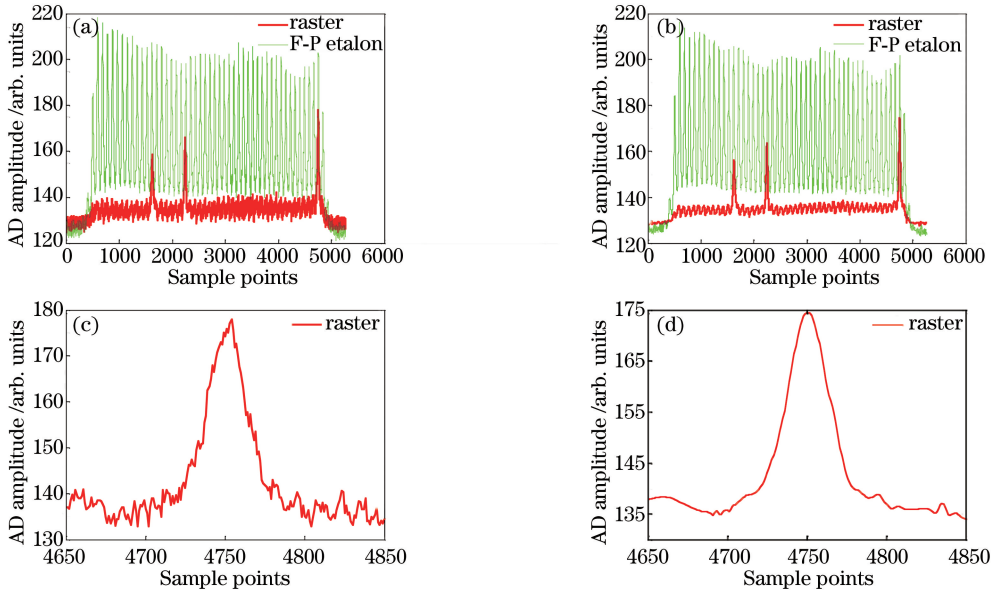


图 4 小波阈值去噪效果。(a)原始信号;(b)小波阈值去噪处理信号;

(c)某个光栅通道某个峰值点未处理前的局部放大;(d)峰值点经过去噪后的放大

Fig. 4 Effects of wavelet threshold denoising. (a) Original signal; (b) wavelet threshold denoising signal;

(c) partial magnification of some peak point in a grating channel for original signal;

(d) partial magnification of the peak point for denoising signal

2.3 高斯拟合寻峰算法

对比文献[11-13]中质心法、倒数法、多项式拟合、半峰法和高斯拟合等多种算法的分析结果可知, 高斯拟合效果最好, 但需要进行大量的数据运算。结合本系统并非大规模的分布式系统, 普通的计算机也满足数据的大量运算, 因此采用高斯拟合作为寻峰算法的基本原理。

高斯曲线模型与传感采样得到的 FBG 反射光谱信号整体相似, 可表示为

$$G(\lambda) = G_0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_s}{\Delta \lambda} \right)^2 \right], \quad (5)$$

式中 G_0 为反射谱光功率的峰值, λ_s 为反射谱光功率达到峰值时所对应的波长值, $\Delta \lambda$ 为反射谱的 3 dB 带宽值。将(5)式两边取对数, 即可得到中心波长值点。这种方法具有较好的抗噪性能, 是一种相对稳定的拟合办法。

本系统首先对源数据进行小波阈值平滑去噪, 然后采用高斯拟合算法进行峰值粗提取, 得到的峰值序列如图 5、6 所示, 通过二次处理, 去掉无效峰,

修正部分峰的位置, 即可精准找到峰值下标, 提高波长解调的精度。

图 5(a)为比较标准的峰值形状, 理想的 F-P 标准具和光纤光栅的通道中反射谱呈标准的高斯模型, 但由于实际的各种噪声、随机点错误等无法避免的原因, 很少能产生如图 4 比较标准的峰值形状, 因此有必要对高斯拟合寻峰算法得到的峰值序列进行二次处理。

图 5(b)为 F-P 标准具通道中反射谱某个峰的特征, 本文称为均双峰值波形, 在该峰上寻到 2 个峰值点位置, 且这 2 个峰幅度差的绝对值较小(小于设定阈值), 则合并这 2 个峰值点, 用其中间值作为新峰值点位置。

图 6(a)为 F-P 标准具通道中反射谱某个峰的特征, 本文称为偏双峰值波形, 在该峰上同样寻到 2 个峰值点位置, 但这 2 个峰的幅度差的绝对值较大(大于设定阈值), 因此剔除幅度较小的点, 只保留幅度较大峰值点。

图 6(b)为 F-P 标准具通道某个峰的特征, 本文

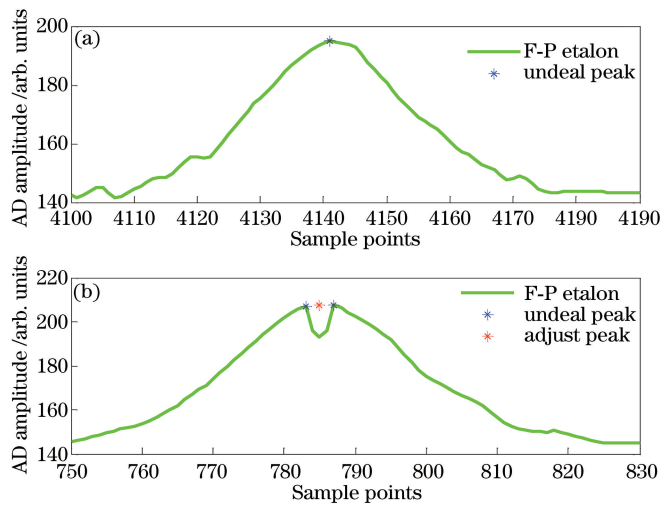


图 5 理想峰型和双峰型。(a)理想峰型;(b)双峰型

Fig. 5 Ideal peak shape and double peak shape. (a) Ideal peak shape; (b) double peak shape

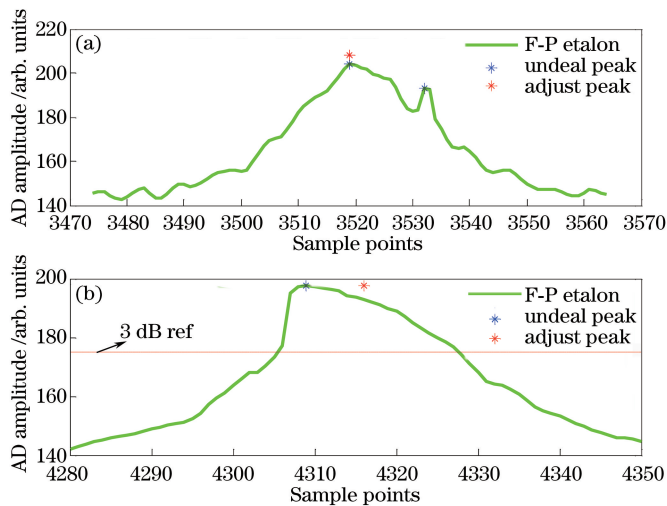


图 6 无效峰型和左偏峰型。(a)无效峰型;(b)左偏峰型

Fig. 6 Invalid peak shape and left peakshape. (a) Invalid peak shape; (d) left peak shape

称为左偏峰值波形,其具有明显的非对称特征,与标准的高斯模型相比,峰顶位置偏向左边,如图 7 所示。设 w_L 和 w_R 分别为左峰半宽和右峰半宽, $w_L = w_R$ 时为标准高斯曲线,当 $w_L \neq w_R$ 时为非对称高斯曲线,参照文献[15]中提出的指数修正高斯拟合寻峰算法的思想,对左偏的峰值点进行线性调整,使其更符合实际峰值点位置,设该峰的 3 dB 带宽相

交的 2 点分别为 x_1 和 x_2 ,调整修改后的有效峰值点为 $(x_1 + x_2)/2$ 。

最终通过高斯拟合寻峰算法初步得到峰值序列点,然后再对峰值序列点进行二次去除无效峰,修正部分峰值点位置,可以得到比较精确的峰值位置,效果如图 8 所示。

经过该寻峰处理,获得峰值点的序号及位置,对

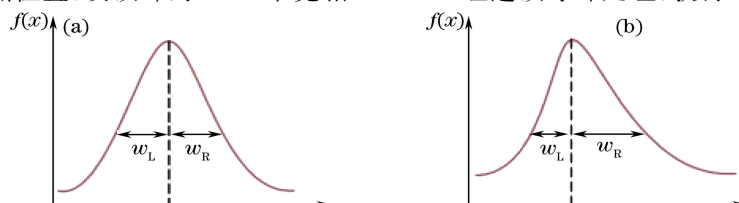


图 7 高斯模型示意图。(a)标准高斯曲线;(b)非对称高斯曲线

Fig. 7 Schematic diagrams of Gaussian models. (a) Standard Gaussian curve; (b) asymmetric Gaussian curve

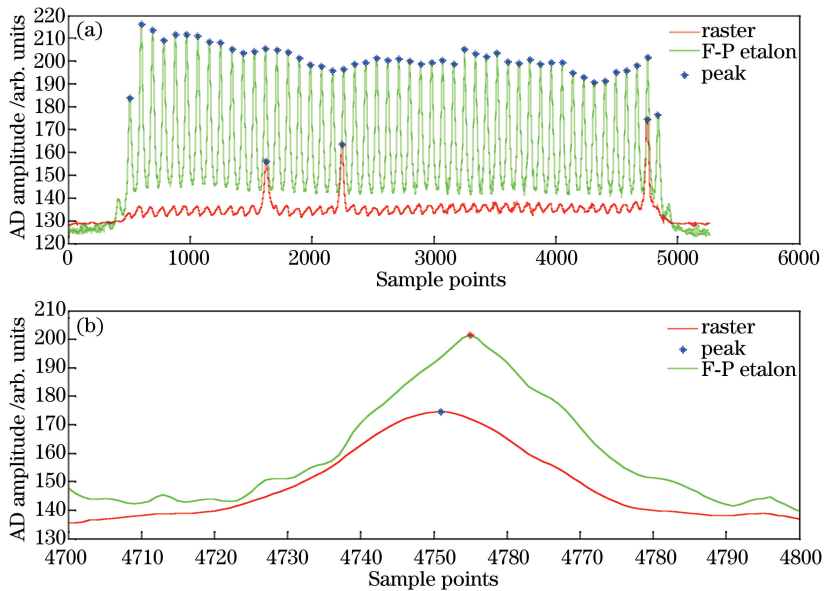


图8 高斯拟合寻峰算法效果。

(a)整体经过高斯拟合和二次处理以后得到的峰值点位置;(b)其中某个峰的局部放大图

Fig. 8 Effects of Gaussian fitting algorithm. (a) Total peak points after Gaussian fitting and the second processing;

(b) partial magnification of some peak point

于FBG传感通道的信号,其峰值点可表示为 $\{p_0, p_1, \dots, p_N\}$,其中 N 表示光栅通道中光纤光栅的数目, p_0 表示参考光栅的位置信息,并且参考光栅的波长是已知的,记为 λ_{p_0} 。F-P标准具通道中的峰值点信息记为 $\{d_0, d_1, \dots, d_M\}$,其中 M 表示光栅通道中峰值点数量。通过对比分析光栅通道和F-P标准具通道的峰值点位置,假设参考光栅峰值点位于F-P标准具的某2个峰 d_k 和 d_{k+1} 之间,这2个峰的波长记为 λ_{d_k} 和 $\lambda_{d_{k+1}}$ 。由于F-P标准具的峰值点波长是未知的,所以需要利用参考光栅对F-P标准具进行校准。在F-P标准具的光谱波形中,每个峰值点之间可近似看作波长随采样点线性变化,由此可得

$$\frac{p_0 - d_k}{d_{k+1} - d_k} = \frac{\lambda_{p_0} - \lambda_{d_k}}{\lambda_{d_{k+1}} - \lambda_{d_k}}, \quad (6)$$

F-P标准具中2个峰之间间隔1个自由光谱范围,对标准具可用频率间隔来表示自由光谱范围,即

$$f_{k+1} = f_k - F_{\text{FSR}}, \quad (7)$$

频率 f 与波长 λ 之间满足 $\lambda = c/f$,其中 c 为真空中的光速。联立(6)式、(7)式可得F-P标准具中序号为 k 的峰值点波长 λ_{d_k} 。再根据(7)式可得F-P标准具任意1个峰值点波长:

$$\lambda_{d_n} = \frac{c}{c/\lambda_{d_k} - (n - k) \times F_{\text{FSR}}}. \quad (8)$$

对光栅通道中待测光栅 p_i ,波长记为 λ_{p_i} ,假设其位于F-P标准具中 d_l 和 d_{l+1} 、波长为 λ_{d_l} 和 $\lambda_{d_{l+1}}$

的2个峰值之间,同样根据波长近似线性变化的关系可得

$$\frac{p_i - d_l}{d_{l+1} - d_l} = \frac{\lambda_{p_i} - \lambda_{d_l}}{\lambda_{d_{l+1}} - \lambda_{d_l}}. \quad (9)$$

从(8)式、(9)式即可得到光栅通道其他待测光栅的波长,从而根据其波长改变量和物理量灵敏度的对应关系得到其传感物理量的变化量。

3 位移传感器动态显示实验结果

实际搭建的光纤光栅位移传感器的硬件解调系统如图9所示,图10是位移动态波形显示的上位机应用(实验过程是用手将位移传感器的一端缓慢拉伸至最大量程,然后松手使其恢复到初始状态,从而得到该波形显示)。

光纤光栅位移传感器的最大量程为30 mm,选择0~25 mm量程,测量精度为0.01 mm的螺旋测微仪作为对比数据。位移传感器厂商提供的位移的具体计算公式为

$$X = [(\lambda_2 - \lambda_{20}) - (\lambda_1 - \lambda_{10})] / \eta, \quad (10)$$

式中 λ_1 为波长较短的光栅(记为光栅1)的动态测量值, λ_2 为波长较长的光栅的动态测量值, λ_{10} 是光栅1的静态(0位移时)值, λ_{20} 是光栅2的静态(0位移时)值, η 为传感器的灵敏度,本文为227 pm/mm,是采用螺旋测微仪测得的作为对比的数据,该传感器测量所得结果与螺旋测微仪测量结

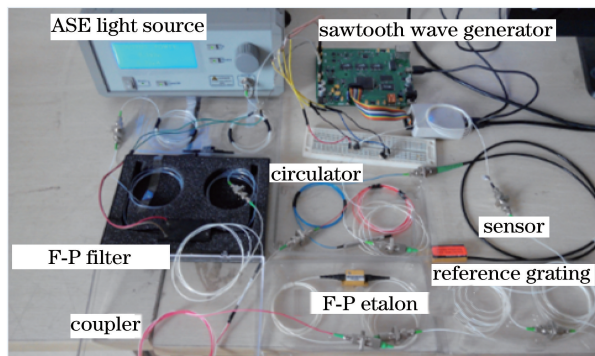


图9 光纤光栅解调平台实物图

Fig. 9 Photo of FBG demodulation platform

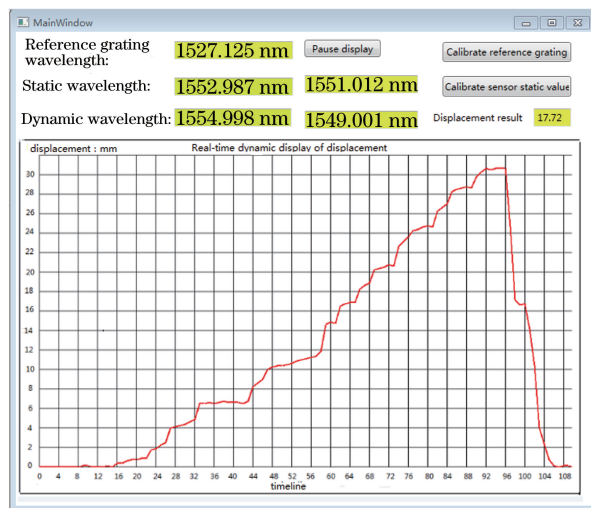


图10 位移传感器波形显示上位机

Fig. 10 Displacement sensor waveform display

果的误差值 $E = X - \bar{X}$ 。

实验中缓慢将位移传感器从初始状态拉大到最大量程,选取其中部分数据点与螺旋测微仪所测得数据作对比得到表1,从表1中前8组数据可知,该系统的稳定位移测量误差与螺旋测微仪相比精度可控制到0.25 mm左右。

表1 测量结果

Table 1 Measurement results

Sample	λ_2 /nm	λ_1 /nm	X /mm	\bar{X} /mm	E /mm
1	1552.987	1551.012	0	0	0
2	1553.380	1550.620	3.46	3.27	0.19
3	1553.722	1550.276	6.48	6.23	0.25
4	1554.291	1549.707	11.49	11.36	0.13
5	1554.767	1549.232	15.68	15.42	0.26
6	1554.998	1549.001	17.72	17.50	0.22
7	1555.323	1548.676	20.58	20.32	0.26
8	1553.828	1548.171	25.03	24.72	0.31
9	1556.258	1547.741	28.82		
10	1556.511	1547.488	31.05		

4 结 论

本文采用 F-P 标准具和放置在恒温箱的高精

度参考光栅校准 F-P 滤波器,设计搭建了测量光纤布拉格光栅位移传感器的波长解调系统,原始数据序列先通过改进的小波阈值去噪算法(使用新的阈值函数和阈值)进行平滑滤波处理,改善原始信号,然后采用高斯拟合算法的核心思想得到粗峰值序列,再进行二次处理,去掉无效峰,修正部分峰的位置,保证提取的峰值序列可靠准确,最后对实际的光纤光栅位移传感器进行实验,使用螺旋测微仪进行对比,二者测量的绝对误差相对稳定在0.25 mm左右,在工业与民用建筑等结构上裂缝或接缝开合度的长期监测中有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Tian X D, Zhang H X, Liu W Y, *et al.* Temperature compensated optical fiber grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2016, 39 (3): 576-580.
田晓丹, 张会新, 刘文怡, 等. 温度补偿型光纤光栅位移传感器 [J]. 电子器件, 2016, 39(3): 576-580.
- [2] Ma Y, Wang C, Yang Y, *et al.* High resolution and wide scale fiber Bragg grating sensor [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50(2): 107-111.
- [3] Yang G, Xu G L, Tu G J, *et al.* High precision fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on spectrum segmentation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0405001.
杨刚, 许国良, 涂郭结, 等. 基于频谱分区的高精度光纤光栅波长解调系统 [J]. 中国激光, 2015, 42 (4): 0405001.
- [4] Ribeiro B D A, Werneck M M, Silva-Neto J L D. Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(4): 1259-1264.
- [5] Sheng W J, Zhang H, Yang N, *et al.* Investigation on thermo-induced nonlinearity of fiber Fabry-Perot filter by using optical fiber sensing system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 042301.
盛文娟, 张慧, 杨宁, 等. 基于光纤光栅传感系统的光纤法布里-珀罗滤波器热致非线性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 042301.
- [6] Wang P, Zhao H, Liu J, *et al.* Dynamic real-time calibration method for fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on tunable Fabry-Perot filter [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806006.
王鹏, 赵虹, 刘杰, 等. 基于可调谐 F-P 滤波器的 FBG 波长解调系统的动态实时校准方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806006.

- [7] Wang J H, Xu X M, Ding J F, *et al.* Fiber Bragg grating demodulation system based on fiber Fabry-Perot etalon and multi-gratings calibrated [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(6): 0606003.
汪金辉, 许雪梅, 丁家峰, 等. 基于法布里-珀罗标准具和多光栅校准的光纤布喇格光栅波长解调系统 [J]. *光子学报*, 2016, 45(6): 0606003.
- [8] Liang X, Liu T G, Liu K, *et al.* Method of real-time calibration for tunable optical filter nonlinearity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(6): 1445-1449.
梁霄, 刘铁根, 刘琨, 等. 一种可调谐光滤波器非线性实时标定方法研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1445-1449.
- [9] Jiang J F, He P, Liu T G, *et al.* Research of temperature-stable fiber Bragg grating sensing demodulation based on composite wavelength references [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1006005.
江俊峰, 何盼, 刘铁根, 等. 基于复合波长参考的温度稳定光纤光栅传感解调研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1006005.
- [10] Jiang H, Su Y, Li J, *et al.* An improved method of wavelet threshold de-noising applied to FBG demodulation [J]. *Study on Optical Communications*, 2016(2): 40-43.
江虹, 苏阳, 李进, 等. 一种小波阈值去噪在FBG解调中的改进方法 [J]. *光通信研究*, 2016(2): 40-43.
- [11] Cao J J, Hu L L, Zhao R. Improved threshold de-noising method of fiber Bragg grating sensor signal based on wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(4): 521-525.
曹京京, 胡辽林, 赵瑞. 一种改进小波阈值函数的光纤光栅传感信号去噪方法 [J]. *传感技术学报*, 2015, 28(4): 521-525.
- [12] Chen Z J, Bai J, Wu Z T, *et al.* Optimization and comparison of the peak-detection algorithms for the reflection spectrum of fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 1112001.
陈志军, 白剑, 吴祖堂, 等. 光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法优化及比较 [J]. *光子学报*, 2017, 44(11): 1112001.
- [13] Hu Z W, Pang C X, Cheng F Y, *et al.* Application of Gaussian-LM algorithm in fiber Bragg grating reflection spectrum peak search [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 013001.
胡正文, 庞成鑫, 程冯宇, 等. Gaussian-LM算法在光纤布拉格光栅反射光谱寻峰中的应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 013001.
- [14] Hu Y, Mo W Q, Chai D H. Peak detection algorithm analysis in FBG demodulation system based on Fabry-Perot filter [J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 38(12): 17-20.
胡颖, 莫文琴, 柴大虎. 基于F-P滤波器的光纤光栅解调中寻峰算法分析 [J]. *光通信技术*, 2014, 38(12): 17-20.
- [15] Chen Y, Yang X, Liu H L, *et al.* Processing FBG sensing signals with exponent modified Gaussian curve fitting peak detection method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1526-1531.
陈勇, 杨雪, 刘焕淋, 等. 指数修正高斯拟合寻峰算法处理FBG传感信号 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5): 1526-1531.