

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

王 鹏 赵 洪 刘 杰 陈俊岐 韩 旭

哈尔滨理工大学工程电介质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 为减小可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器驱动元件的温度漂移及非线性导致的光纤布拉格光栅(FBG)波长解调误差,在分析比较串联型和并联型两种校正方案基础上,提出了一种改进型串联实时校准方法。设计了具备高热稳定性且内部温度分布均匀的参考光栅模块,通过实时测量紧贴参考光栅埋入的高精度热电阻温度值及事先标定的4支参考光栅波长与热电阻温度值对应关系,获取4个精确波长参考点,在每次扫描时实时校准可调谐F-P滤波器透射波长与驱动电压函数关系。实验结果表明采用改进的动态实时校准方法解调FBG波长的最大误差为 ± 3 pm。与通过直接读取驱动电压确定FBG中心波长的方法相比,解调精度提高了6倍;与已报道的串联校正方法相比,解调精度提高了3倍。

关键词 光纤光学; 动态实时校准方法; 参考光栅模块; 可调谐法布里-珀罗滤波器

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0806006

Dynamic Real-Time Calibration Method for Fiber Bragg Grating Wavelength Demodulation System Based on Tunable Fabry-Perot Filter

Wang Peng Zhao Hong Liu Jie Chen Junqi Han Xu

Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract In order to reduce measurement errors of fiber Bragg grating (FBG) wavelengths resulted from the driving element of tunable Fabry-Perot (F-P) filter, which has the characteristics of temperature drift and nonlinearity, an improved dynamic real-time calibration approach is proposed after analyzing and comparing two kinds of real-time correction systems respectively with series and parallel structures. Then the real-time correction system with improved concatenation structure is investigated. The reference grating module with good thermal stability is designed to guarantee that wavelengths of four reference FBGs in the module keep constant for a long time. An accurate resistance temperature detector (RTD) is integrated into the model and clung to the reference FBGs. Before measurement, the correlation between the wavelengths of four reference FBGs and temperatures measured by RTD is calibrated. By reference points provided by referenced FBGs, the function between transmission wavelength and driving voltage of tunable F-P filter is adjusted in real time during every scanning period. The experimental results demonstrate that the maximum error is ± 3 pm using the improved dynamic real-time calibration method to demodulate wavelengths of FBGs. Compared with the method to determine center wavelengths by direct acquiring driving voltages, the accuracy is enhanced 6 times. Compared with the reported method using series structure, the accuracy raises 3 times.

Key words fiber optics; dynamic real-time calibration method; reference grating module; tunable F-P filter

OCIS codes 060.3735; 120.2230; 120.4640

收稿日期: 2015-03-30; 收到修改稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家973计划(2012CB723308)

作者简介: 王 鹏(1979—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感与解调技术方面的研究。E-mail: wpkumpeng@hrbust.edu.cn

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)实用化的关键在于对FBG的波长信息进行解调^[1-6]。可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器(TFPF)解调法^[7-9]是目前应用较多的解调方法之一,但F-P腔的温度漂移特性^[10-12]及其驱动元件固有的非线性很大程度上影响了解调系统的波长检测精度。校准技术能够在一定程度上减小由于上述原因造成的影响。目前,已报道的校准技术可以分为两类:串联校准技术和并联校准技术。

2005年,李莹等^[13]提出一种串联校正方案,采用一支波长恒定的FBG作为波长参考元件,对传感FBG与参考FBG对应波长驱动电压方程进行差值运算,减掉可调谐F-P滤波器初始腔长,消除了温度导致的可调谐F-P滤波器的腔长漂移对传感FBG的波长检测的影响。但这种方法没有考虑可调谐F-P滤波器的透射波长与驱动电压的非线性,因此解调精度不高。同年陈长勇等^[14]提出了另一种串联校正方案,将可调谐F-P滤波器的透射波长与驱动电压间的关系表示为三次多项式。这种校正方法考虑了可调谐F-P滤波器波长调谐的非线性,但是波长-驱动电压方程的三次多项式系数是通过实验事先标定的。实际上,可调谐F-P滤波器每次扫描的透射波长-驱动电压曲线都不相同。而且由于只有一个参考点,每次扫描时,只对初始波长进行校正,因此该方法对波长-驱动电压拟合曲线的校正并不是实时的。为进一步提高测量精度,需增加参考FBG的数量,而参考FBG与传感FBG在同一条光路上,这会占用传感FBG的光谱资源,相应减少了解调系统的可测量点数,所以在实际应用中要平衡测量点数与精度的关系。

并联型校正系统的参考FBG和传感FBG不在一条光路上,因此并联型校正方案可在不占用传感FBG光谱的前提下,提供更多参考点,能更有效地修正可调谐F-P滤波器透射波长与其驱动电压的函数关系。2008年,金永兴等^[15]提出增加一个参考通道的校准方法,该方法虽然能够提高波长检测精度,但是系统中加入了恒温装置,恒温设备价格昂贵,且体积较大,不便于工程应用。也有人采用热标准具^[16-17]来替代恒温模块。热标准具有较高的可靠性,在要求高精度测量的情况下得到了广泛的应用,但是热标准具的引入会大大增加系统的成本。

本文采用三次多项式表示可调谐F-P滤波器透射波长与驱动电压间的函数关系,并设计了结构简单、价格低廉的参考光栅模块替代恒温装置或热标准具,通过测量参考光栅温度获取准确参考波长值,在每次扫描过程中实时校准可调谐F-P滤波器透射波长-驱动电压函数,在较低成本的前提下,提高了基于可调谐F-P滤波器的FBG解调系统的波长检测精度。

2 改进型串联动态实时校准系统

改进型串联动态实时校准系统如图1所示。宽带光源发出的光首先到达可调谐F-P滤波器,可调谐F-P滤波器在三角波电压驱动下进行周期性扫描,满足可调谐F-P滤波器峰值透射条件的光波被透射出来,经耦合器后到达非测量环境中的参考光栅阵列和测量环境中的传感光栅阵列。各个FBG串联在同一根光纤上,中心波长均不相同,且动态范围互不重叠。可调谐F-P滤波器的扫描范围可覆盖各个FBG中心波长及其最大动态变化范围。满足各个FBG布拉格方程的光波依次被反射回来,经光电探测器(PD)转化为电压信

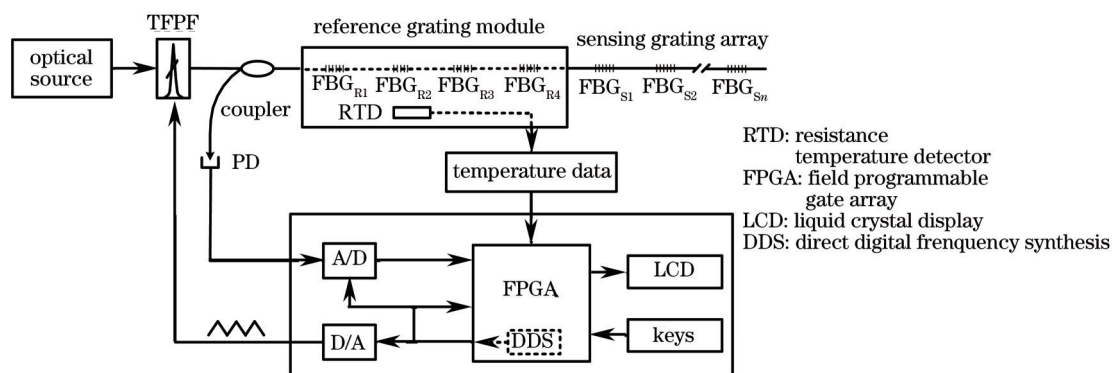


图1 改进型的串联动态实时校准系统

Fig.1 Dynamic real-time calibration system with the improved series structure

号,放大后经 A/D 转换成数字信号进行处理。PD 输出信号的采集、三角波信号发生器及控制单元都由信号处理单元控制,利用同步时钟控制可以使 F-P 驱动电压与 PD 输出信号采集同步变化,由信号处理单元获取的波长信息被传送到上位机做下一步处理。

考虑到可调谐 F-P 滤波器的温度漂移特性及非线性,采用三次多项式表示其透射波长与驱动电压的函数关系:

$$\lambda = p_1 U^3 + p_2 U^2 + p_3 U + \lambda_0, \quad (1)$$

式中 λ 表示可调谐 F-P 滤波器的透射波长, U 表示可调谐 F-P 滤波器的驱动电压, λ_0 表示可调谐 F-P 滤波器的初始透射波长, p_1 、 p_2 、 p_3 均为常系数。参考光栅模块采用 4 个 FBG,通过实时读取参考 FBG 温度,并根据事先标定好的参考 FBG 波长与温度的关系得到其波长的精确值。假设一次扫描中 4 个参考 FBG 的精确波长值分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 ,对应时刻 F-P 驱动电压值分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 ,代入(1)式可得

$$\begin{cases} \lambda_1 = p_1 U_1^3 + p_2 U_1^2 + p_3 U_1 + \lambda_0 \\ \lambda_2 = p_1 U_2^3 + p_2 U_2^2 + p_3 U_2 + \lambda_0 \\ \lambda_3 = p_1 U_3^3 + p_2 U_3^2 + p_3 U_3 + \lambda_0 \\ \lambda_4 = p_1 U_4^3 + p_2 U_4^2 + p_3 U_4 + \lambda_0 \end{cases} \quad (2)$$

解方程组(2)式可得到系数 p_1 、 p_2 、 p_3 、 λ_0 ,代入(1)式中,可以得到该时刻实时校准后的透射波长-驱动电压函数关系。然后只需检测 PD 输出信号峰值发生时刻对应的三角波驱动电压值,根据校准后的函数关系式,就可得到各个传感 FBG 的中心波长,从而实现解调目的。

3 参考光栅模块设计

3.1 结构设计

参考光栅模块的主体结构由两块铜板(80 mm×40 mm×5 mm)组成,两块铜板经磨平、抛光后,分上下两层叠放,如图 2 所示。选用 4 个 FBG 作为参考光栅,均用细铜管(内径 0.6 mm,外径 1.8 mm)以有余长无应力形式封装,保证每个 FBG 均位于各自细铜管的中心位置,之后依次串联熔接,封装示意图如图 3 所示。下层铜板中心位置加工一圆角矩形截面的长槽(80 mm×7.2 mm×1.8 mm),圆角半径与细铜管半径相同(0.9 mm)。将 4 支内含 FBG 的细铜管依次并排码放在下层铜板中的槽内。将一高精度 PT100 热电阻及其引线(带聚四氟乙烯绝缘保护)置于上层铜板加工好的槽中,确保热电阻位于 FBG 的正上方。铜板所有加工均采用线切割工艺加工,细铜管、热电阻及其引线都与铜板基体紧密接触。两块铜板外用环氧树脂包覆。参考光栅模块制作所用材料成本总计不到 500 元人民币,仅为市场所售热稳定标准具价格的 1/20。

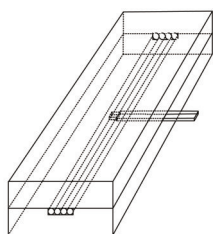


图2 参考光栅模块结构图

Fig.2 Structure of reference FBGs module

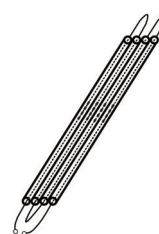


图3 参考光栅封装示意图

Fig.3 Package of reference FBGs

由于铜是热的良导体,且导热均匀,则可认为 4 个 FBG 具有相同温度。由于参考光栅模块和 FBG 解调系统的其余部分常被置于监控室内,而室温一般变化不大;此外,铜块具有一定的体积,且铜块外有环氧树脂隔热层,即便室内温度出现缓慢变化,参考光栅模块内的 FBG 的温度也基本不会受到影响。这就保证了 4 个参考 FBG 在较长时间范围内波长恒定。当温度变化较大时,高精度的热电阻可实时测量 FBG 温度值,选用 A 级精度的 PT100 热电阻,测温精度为 0.15 °C,根据事先标定好的 4 个 FBG 的波长与热电阻测得温度关系,可确定各个 FBG 的准确中心波长,用于实时校正可调谐 F-P 滤波器驱动电压和透射波长函数关系。

3.2 参考光栅中心波长选取

参考光栅的选取应保证 4 个 FBG 的中心波长均匀地分布在光源光谱范围的各个区间,这样用 4 个参考

FBG 中心波长及对应驱动电压拟合出的透射波长-驱动电压曲线才能覆盖可调谐 F-P 滤波器的有效电压调谐区间,校正后的透射波长-驱动电压函数才能更准确地解调各个传感光栅的中心波长。

参考 FBG 会占用传感 FBG 的波长资源,故传感 FBG 定制时应避开参考 FBG 占用的波长值。由于波长解调仪通常被放置于监控室内,而室温变化范围一般不超过 20 °C。如果为参考 FBG 预留出环境温度变化导致的波长漂移区间,3 dB 带宽也不会超过 0.2 nm。较高质量的 FBG 的 3 dB 带宽要小于 0.2 nm。可计算出 1 个参考 FBG 需占用 0.4 nm 的波长范围,4 个参考 FBG 共计占用 1.6 nm,只占光源可用波长资源(40 nm)的 4%,这对于传感 FBG 的测量点数并没有大的影响。

3.3 参考光栅温度场仿真

为研究当室温波动时,参考光栅模块的温度分布情况,用 FLUENT 进行了热场仿真和分析。仿真时设定室温及参考光栅模块初始温度为 25 °C,参考光栅模块各组成部分尺寸如前文所述,环氧树脂包覆层厚度为 2 mm,其他参数如表 1 所示。

表 1 参考光栅模块温度场仿真设定参数表

Table 1 Parameters set in temperature field simulation of reference FBGs module

Material	Air	Epoxy resin	Copper
Convective heat transfer coefficient $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	20	—	—
Density $[(\text{kg}/\text{m}^3)]$	—	105.00	8978.0
Specific heat capacity $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	—	796.00	381.0
Thermal conductivity $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	—	0.16	387.6

图 4 给出了当室温降低到 20 °C 时,1800 s 内参考光栅模块整体温度变化情况。可以看出,当室温降低 5 °C 时,在 1800 s 内参考光栅模块温度维持 25 °C 恒定。在第 1800 s 时,参考光栅模块温度场分布二维截面如图 5 所示。图 5 显示参考光栅模块温度分布均匀,铜块及铜管温度均为 25 °C。当室温升高 5 °C 时,可以得到同样的结论。图 6 给出了当室温升高到 30 °C 时,1800 s 内参考光栅模块整体温度变化趋势,在第 1800 s 时,参考光栅模块温度场分布二维截面如图 7 所示。

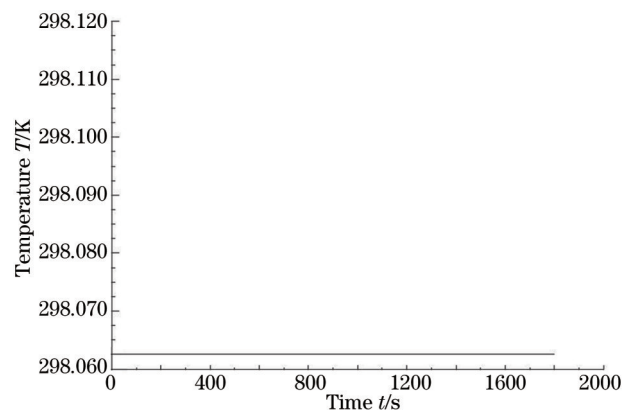


图 4 室温降低到 20 °C 时参考光栅模块温度变化趋势

Fig.4 Temperature tendency of reference FBGs module when indoor temperature drops to 20 °C

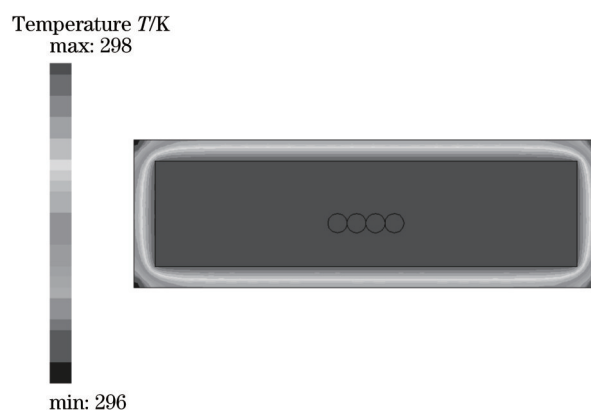


图 5 $T=20\text{ }^\circ\text{C}, t=1800\text{ s}$ 时参考光栅模块温度分布

Fig.5 Temperature distribution of reference FBG module when $T=20\text{ }^\circ\text{C}, t=1800\text{ s}$

上述仿真结果表明当室温降低或升高 5 °C 时,1800 s 内参考光栅模块的温度几乎保持不变,温度最大变化量仅为 0.1 °C,对参考 FBG 的影响完全可以忽略。主要原因在于:参考 FBG 所在铜块外有 2 mm 厚的环氧树脂隔热层,环氧树脂导热系数很小,即使仿真时设定空气对流换热系数达到 20 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,参考光栅模块内外换热仍非常缓慢。参考 FBG 的中心波长能在较长的一段时间内保持恒定,因此在可调谐 F-P 滤波器单次扫描过程中,可认为参考光栅的波长不变,且在较长时间内参考 FBG 的波长可认为恒定。

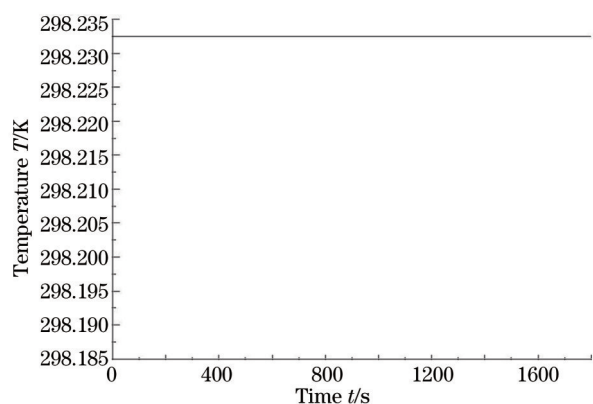


图6 室温升高到30 °C时参考光栅模块温度变化趋势
Fig.6 Temperature tendency of reference FBG module when indoor temperature rises to 30 °C

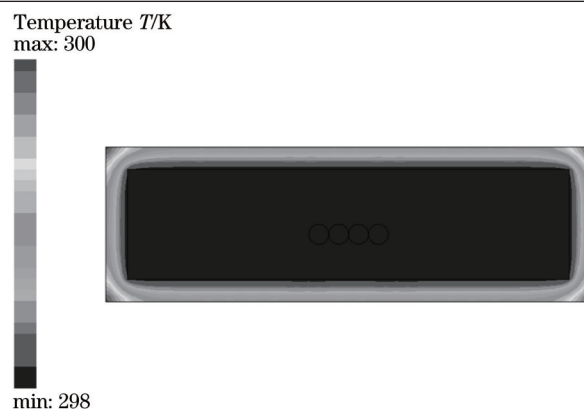


图7 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}, t=1800\text{ s}$ 时参考光栅模块温度分布
Fig.7 Temperature distribution of reference FBG module when $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}, t=1800\text{ s}$

进一步假定当室温骤变,由25 °C升高到40 °C时,1800 s内参考光栅模块整体温度变化如图8所示,在第1800 s时,参考光栅模块二维截面温度场分布如图9所示。从图中可以看到,由于参考光栅模块内外温差过大(15 °C),同时仿真设定的空气对流换热系数又较大,铜块温度开始缓慢上升,但600 s内温度只升高了7.4 K,平均每秒只升高0.012 °C,可认为在可调谐F-P滤波器单次扫描过程中参考FBG温度不变。600 s后内部温度变化非常缓慢,在较长时间内维持在33 °C。图9反映出铜块整体温度分布均匀,因此4个参考光栅处温度与正上方热电阻温度相同。由预先标定的4个参考FBG的波长-温度关系可得到F-P每次扫描时参考FBG的准确波长值。

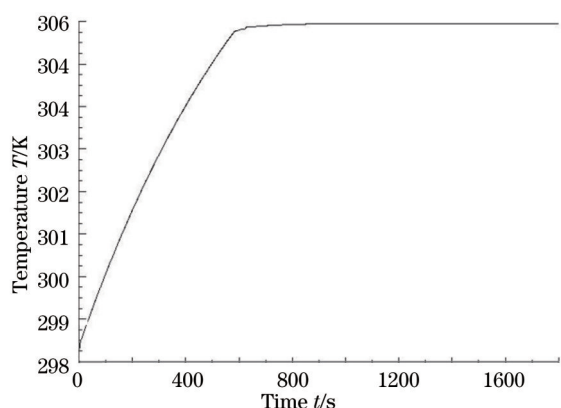


图8 温度升高到40 °C时参考光栅模块温度变化趋势
Fig.8 Temperature variation of reference FBG module when temperature rises to 40 °C

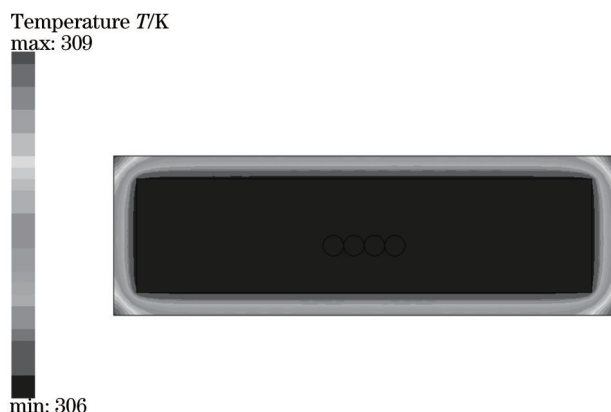


图9 $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}, t=1800\text{ s}$ 时参考光栅模块二维截面温度分布
Fig.9 Bidimensional temperature distribution of reference FBG module section when $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}, t=1800\text{ s}$

实验表明,当参考光栅模块内外温差不超过7 °C时,参考FBG埋置处温度可在3 h内基本维持恒定。如果增加环氧树脂包覆层的厚度,则参考光栅模块温度能在更长的时间内保持恒定。实际应用中,即便在比较寒冷(如室内最低气温-20 °C)和比较炎热的地区(如室内最高气温+40 °C),短时间内室温变化也较缓慢,通过高精度的热电阻测得参考光栅的温度,及其波长温度对应关系,也可实时获取参考FBG的准确波长值。所用PT100热电阻测温范围为-50 °C~+200 °C,几乎可以满足所有正常室温环境。

4 实验结果与讨论

4.1 实验系统主要器件

光源选用的是C波段的放大自发辐射(ASE)宽带光源,型号为ASE-C-D-G-13-FC/APC。根据解调系统需要,选用Micron Optics公司生产的型号为TF07HY的可调谐F-P滤波器,该光纤F-P可调谐滤波器采用无透镜光纤结构,具有很高的精细度和透射率,以及较低的插入损耗。鉴于ASE光源的光谱范围为1526~1566 nm,实验中选用的4个参考FBG的中心波长分别为1528.916、1540.964、1548.956、1560.908 nm。图10所示光谱图中,

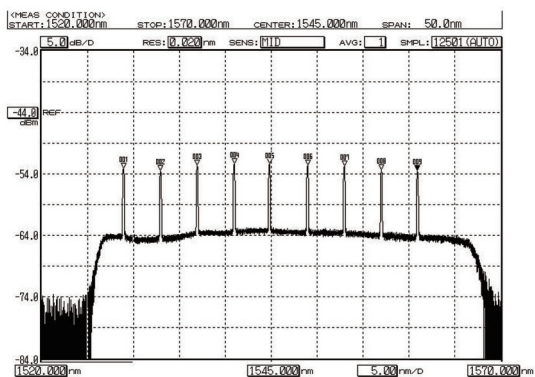


图 10 参考光栅和传感光栅的光谱图

Fig.10 Spectrum of reference FBGs and sensing FBGs

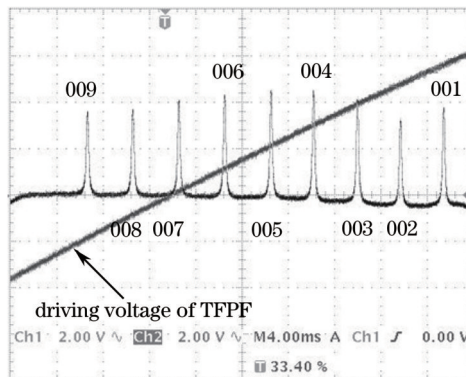


图 11 可调谐 F-P 滤波器驱动电压与 PD 输出信号

Fig.11 Driving voltage of TFPF and output signals of PD

标号为 001、004、006、009 的 FBG 为参考 FBG, 标号为 002、003、005、007、008 的 FBG 为传感 FBG。

4.2 结果与分析

解调实验中, 设定可调谐 F-P 滤波器驱动电压的扫描频率为 10 Hz, 幅值为 12 V。一次扫描中, 可调谐 F-P 滤波器的驱动电压、PD 同步输出的参考光栅及传感光栅信号如图 11 所示。

实验中使用的 4 个参考 FBG 的波长与温度间均有良好的线性关系, 波长温度灵敏度均为 13.675 pm/°C。通过高精度的热电阻测温模块可实时测量参考光栅的当前温度, 进而实时获得参考光栅的中心波长。由图 11 所示各个 FBG 与各个峰值的对应关系, 由同步数据采集系统测得 PD 输出最大光强时刻的驱动电压。每次扫描中, 将 4 个参考 FBG 的中心波长及对应驱动电压代入方程组(2)式解得系数 λ_0 、 p_1 、 p_2 、 p_3 , 再代入(1)式, 得到该次扫描时可调谐 F-P 滤波器驱动电压和透射波长的关系式。

某两次扫描中经参考光栅实时校正后的可调谐 F-P 滤波器的透射波长-驱动电压函数关系曲线如图 12 所示。由图可见, 不同的扫描过程, 可调谐 F-P 滤波器的透射波长-驱动电压函数并不相同, 因此每个扫描过程动态地对可调谐 F-P 滤波器的透射波长-驱动电压曲线进行实时校正也是十分必要的。

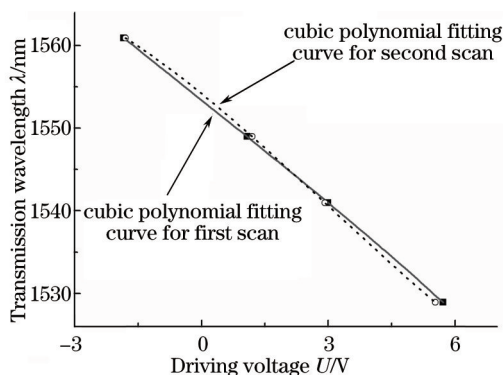


图 12 校正后的透射波长-驱动电压曲线

Fig.12 Corrective curves between transmission wavelength and driving voltage

表 2 运用改进型串联校准方法测量的测量的实验结果及误差

Table 2 Experiment results and errors using the calibration method with improved series structure

Sequence number of FBGs	Experimental results derived from spectrograph /nm	First experimental result /nm	Second experimental result /nm
2	1532.960	1532.958	1532.961
3	1536.936	1536.935	1536.936
5	1544.796	1544.795	1544.797
7	1552.948	1552.948	1552.947
8	1556.972	1556.975	1552.973

通过实时校正后的波长-电压曲线来解调 5 支传感 FBG 的中心波长, 实验结果如表 2 所示。采用直接读

取电压的方法来确定传感FBG中心波长方法测得实验结果如表3所示,已报道的串联校正方法测得传感FBG中心波长如表4所示。与通过直接读取驱动电压确定中心波长的方法对比,改进的串联实时校准系统解调精度提高了6倍;与已报道的串联校正方法相比,解调精度提高了3倍。

表3 运用直接读取电压法测量的实验结果及误差

Table 3 Experiment results and errors using the method determining wavelength by reading driving voltage directly

Sequence number of FBGs	First experimental result /nm	Second experimental result /nm
2	1532.978	1532.976
3	1536.951	1536.950
5	1544.812	1544.808
7	1553.936	1552.933
8	1556.958	1556.954

表4 运用已报道的串联校正方法测量的实验结果及误差

Table 4 Experiment results and errors using the reported correcting method with series structure

Sequence number of FBGs	First experimental result /nm	Second experimental result /nm
2	1532.982	1532.908
3	1536.956	1536.983
5	1544.835	1544.852
7	1552.977	1553.003
8	1557.024	1556.635

5 结 论

为提高基于可调谐F-P滤波器的FBG波长解调系统的检测精度,在分析比较现有校正方案的基础上,提出了一种改进型的动态实时校准方法。

1) 设计了具备高热稳定性且温度场分布均匀的参考光栅模块。可以保证嵌入其中的参考光栅的波长在较长时间内保持恒定。仿真结果表明当参考光栅模块内外温差不超过7℃时,参考光栅埋置处温度可在3h内基本维持恒定。若室内温度发生剧烈变化,通过紧贴参考光栅埋置的热电阻可实时测得参考光栅埋置处温度值,通过波长温度映射关系获取参考光栅精确波长值。

2) 设计了改进型的串联校准系统,将可调谐F-P滤波器透射波长和驱动电压表示为三次多项式函数。每个扫描过程,应用实时获得的4支参考光栅的准确波长值拟合得到透射波长-驱动电压多项式系数,应用校准后的可调谐F-P滤波器的透射波长-驱动电压函数动态校正传感光栅波长值。

3) 应用设计系统进行的多点FBG波长解调实验结果表明,采用改进的动态实时校准方法解调最大误差为 ± 3 pm。与通过直接读取驱动电压确定FBG中心波长和已报道的串联校正方法相比,解调精度分别提高了6倍和3倍。

参 考 文 献

- 1 Wang Qiaoni, Yang Yuanhong. 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.
- 2 Yu Youlong, Tan Ling, Li Qian, *et al.*. Influence of thermal effect caused by piezoelectric transducer on interferometric demodulation for fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0506005.
余有龙, 谭玲, 李茜, 等. 压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0506005.
- 3 Yong Chen, Lijuan Chen, Huanlin Liu, *et al.*. Research on FBG sensor signal wavelength demodulation based on improved wavelet transform[J]. Optik, 2013, 124(21): 14802-14804.
- 4 Ma Weichao, Chen Shaohua, Zhao Kun, *et al.*. Phase-shifted fiber Bragg grating strain sensor demodulated by edge filter[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905004.
马伟超, 陈少华, 赵昆, 等. 边缘滤波法解调的相移光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905004.

- 5 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Sun Jingtao, et al. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg gratings sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.
王拥军, 刘永超, 孙靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 6 Zhu Zhu, Liang Dakai, Sun Hongbing. Double-edged filter wavelength demodulation system for fiber Bragg gratings based on long period fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305001.
朱 珠, 梁大开, 孙红兵. 基于双长周期光纤光栅边缘滤波的光纤布拉格光栅解调系统[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305001.
- 7 Wenzhu Huang, Wentao Zhang, Tengkun Zhen, et al. A cross-correlation method in wavelet domain for demodulation of FBG-FP static-strain sensor[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 34(5): 1597-1600.
- 8 Haotao Chen, Youcheng Liang. Analysis of tunable asymmetric fiber F-P cavity for fiber strain sensor edge-filter demodulation[J]. Photonic Sensor, 2014, 4(4): 338-343.
- 9 Li Jinming, Ma Youchun, Yan Shubin, et al. High precision and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system based on tunable filter[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905002.
李锦明, 马游春, 闫树斌, 等. 基于可调谐滤波器的高精度宽量程光栅传感解调系统[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905002.
- 10 Qin Chuan, Zhao Jianlin, Jiang Biqiang, et al. Inhibiting temperature drift of fiber Fabry-Perot tunable filter for interrogating fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(4): 664-667.
秦 川, 赵建林, 姜碧强, 等. 用于FBG解调的光纤F-P可调滤波器温漂抑制[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(4): 664-667.
- 11 Yao Guozhen, Li Yongqian. Impact of F-P etalon temperature characteristics on FBG wavelength demodulation accuracy[J]. Journal of Appl Opt, 2014, 35(3): 542-546.
姚国珍, 李永倩. F-P标准具温度特性对光纤光栅波长解调精度的影响[J]. 应用光学, 2014, 35(3): 542-546.
- 12 Zhao Ziwen, Wang Weiyu, Zhang Min, et al. A new temperature compensation method by optimizing the structure of extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 090605.
赵子文, 王为宇, 张 敏, 等. 通过改进非本征法布里-珀罗干涉型传感器结构实现温度补偿的新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 090605.
- 13 Li Ying, Zhang Shulian. A novel fiber Bragg grating sensor interrogation system utilizing a tunable Fabry-Perot filter[J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 237-240.
李 莹, 张书练. 基于可调谐F-P滤波器的光纤光栅解调系统[J]. 激光技术, 2005, 29(3): 237-240.
- 14 Chen Changyong, Qiao Xueguang, Wang Xiaofeng, et al. Demodulation system for fiber Bragg grating sensors based on a real-time calibration technique[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 825-828.
陈长勇, 乔学光, 王小凤, 等. 基于实时校准技术的光纤光栅解调系统[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 825-828.
- 15 Jin Yongxing, Liu Tao, Fang Tao, et al. Demodulation system for fiber Bragg grating sensors based on a real-time calibration technique [J]. Optical Communication Technology, 2008, (2): 14-16.
金永兴, 刘 涛, 方 涛, 等. 基于F-P滤波器光纤光栅解调系统[J]. 光通信技术, 2008, (2): 14-16.
- 16 Yu Xiaoyu, Liu Yan. Research on real-time correction technology of FBG demodulation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(1): 113-116.
于效宇, 刘 艳. FBG解调实时校正技术研究[J]. 半导体光电, 2012, 33(1): 113-116.
- 17 Lu Jing, Rao Yunjiang, Ran Zengling. A FBG sensor system for dynamic strain measurement based on F-P etalon and Music algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(4): 93-96.
卢 婧, 饶云江, 冉曾令. 基于F-P标准具及Music算法的FBG动态应变传感系统[J]. 光电工程, 2010, 37(4): 93-96.

栏目编辑: 王晓琰