

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306271

基于 F-P 标准具非线性波长校准的 FBG 传感系统解调方法*

陆行知^{1,2} 董明利^{1,2} 张旭^{1,2,3} 何彦霖^{1,2}

(1. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192;
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. 天津大学 天津 300072)

摘要:针对光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)解调系统在变温环境下由于波长漂移引起的解调精度不足问题,提出了一种基于法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)标准具非线性波长漂移校准的 FBG 传感系统解调方法。研究建立了引入 F-P 标准具的 FBG 解调系统,设计了基于 F-P 标准具非线性误差补偿的波长校准流程,搭建了 FBG 解调系统在航空航天实际应用环境中的模拟实验系统,并在恒温及变温环境下进行了实验测试。实验结果表明,本文所提出方法在恒温及变温环境下的传感系统解调稳定性在 ± 0.6 pm 及 ± 1.1 pm 以内,且在变温环境下传感系统解调的波长漂移量从 20.3 pm 减小到 0.7 pm。验证了解调方法的精度和稳定性,为航空航天等领域的结构健康监测提供了参考。

关键词: FBG 解调; F-P 标准具; 非线性误差补偿; 波长校准

中图分类号: TN253 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4030

Demodulation method of FBG sensing system based on F-P standard with nonlinear wavelength calibration

Lu Xingzhi^{1,2} Dong Mingli^{1,2} Zhang Xu^{1,2,3} He Yanlin^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Laboratory of Optical Fiber Sensing & Systems, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 3. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problem of deficient demodulation precision in fiber Bragg grating (FBG) demodulation system caused by wavelength drift in a variable temperature environment, a grating method for FBG sensing system based on Fabry-Perot (F-P) standard for nonlinear wavelength drift calibration was proposed. In this paper, the FBG demodulation system based on the F-P standard is established, the wavelength calibration process based on the nonlinear error compensation of the F-P standard is designed, and the simulation experiment system of the FBG demodulation system in the practical application environment of aerospace is built, and the experimental tests are carried out in the constant temperature and variable temperature environment. The experimental results show that the demodulation stability of the sensor system is within ± 0.6 pm and ± 1.1 pm under constant temperature and variable temperature, and the wavelength drift of the sensor system demodulation decreases from 20.3 pm to 0.7 pm under variable temperature. The accuracy and stability of the method are verified, which provides a reference for structural health monitoring in aerospace and other fields.

Keywords: FBG demodulation; F-P etalons; nonlinear error compensation; wavelength calibration

0 引言

随着可调谐激光器技术的发展和进步,波长可调谐激光器越来越多地应用到光纤光栅传感解调系统当

中^[1-2]。基于 MG-Y 激光器的光纤光栅解调系统,具有体积小,功耗低,解调精度高的特点^[3],可以实现复杂工况下多点多物理量的实时监测,因此广泛应用于结构健康监测^[4]、航空航天^[5]、生物医疗^[6]、海洋工程^[7]等不同领域。然而,当该 FBG 解调系统^[8]处于航空航天等变温环

境时,工作温度发生变化会对系统输出光的功率、波长等参数产生影响^[9]。当温度过高时,激光器甚至会因工作介质失效而损坏。因此,解决变温环境对光纤光栅解调系统造成的输出波长漂移问题至关重要。

针对 FBG 解调系统波长漂移问题,有很多学者做了相关校准方法的研究。目前,常用的波长校准方法主要有参考 FBG 法^[10]、气体吸收腔法、参考 F-P 标准具法等。王鹏等^[11]通过引入另一个参考光栅模块实现波长校准,结构简单、解调速度快。但是波长参考点数量较少,在 C 波段波长范围解调精度不高。俞琳等^[12]使用气体吸收腔法,利用乙炔气室对温度、压力不敏感的特性,能够实现稳定的波长校准,然而使用气体吸收腔法价格昂贵,且实现寻峰比较困难。参考 F-P 标准具法在光纤光栅解调过程中提供多个等频率间隔参考点,精度较高且价格便宜,应用更为普遍。但是当 F-P 标准具处于较大变温环境时,自身会产生微小的波长漂移。张登攀等^[13]使用 F-P 标准具对光纤光栅解调系统进行校准,然而并未考虑 F-P 标准具受温度产生波长漂移的影响。江俊峰等^[14]使用 F-P 标准具和氰化氢气室结合的解调方法,利用两光谱双峰交错将波长锁定到气室的相邻吸收线实现波长校准。但是光纤光栅解调系统输出波长偏移量大于 ± 10 pm,该误差仍然无法满足航空航天结构健康监测应用。Li 等^[15]提出 F-P 温控标准具校准的解调方法,然而该标准具只能保证在 ± 0.01 °C 的变化范围内波长认为是定值。鞠婉秋^[16]借助 F-P 标准具和乙炔气室进行光纤光栅系统解调,改善了 F-P 标准具自身受温度影响造成的漂移,但是乙炔气室波长覆盖范围小,且占用更多空间。

对于航空航天结构健康监测等实际工程应用,目前校准方法的解调精度、解调范围、解调条件等某一特性或多个特性无法完全适用于复杂环境监测需求。所以针对光纤光栅解调系统在变温环境下波长漂移的问题,本文提出了一种基于 F-P 标准具非线性波长校准的解调方法。通过在 FBG 解调系统中引入 F-P 标准具,利用三次样条插值以及多项式函数补偿方法,对解调系统的误差进行了补偿,并通过建立实验测试系统对本文所提出方法进行了验证。该方法提高了变温环境下光纤光栅解调精度且解调结构简单,适用于航空航天结构健康监测领域。

1 光纤光栅解调系统设计

基于 F-P 标准具非线性波长校准的光纤光栅解调系统结构如图 1 所示,由主控及通信部分、激光器控制部分、光路部分、光电检测部分组成。解调系统具体工作流程:首先由 SOPC 芯片控制 DA 芯片输出五路恒流源,实

现 MG-Y 激光器的驱动控制。MG-Y 激光器按照“波长-电流”查找表进行间隔扫描^[17],输出 1 525~1 565 nm 波长、步进 20 pm,共 2 001 组脉冲激光。光信号通过耦合器分别传入光纤布拉格光栅传感器和 F-P 标准具,并传回含有物理变化量信息的光信号。光信号通过光电二极管转化为模拟电信号,再经由 AD 芯片传回 FPGA 做数据处理。主控芯片对回传数据进行解析,并通过寻峰算法计算出中心波长。

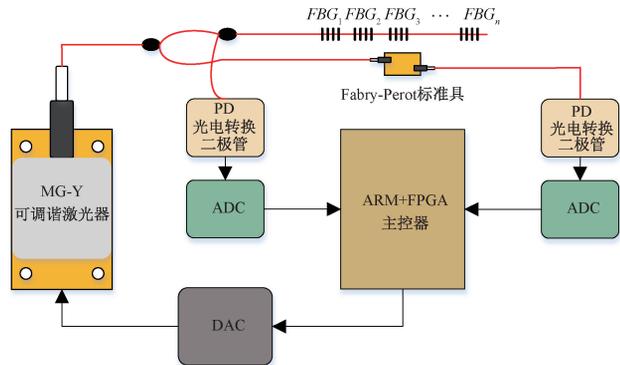


图 1 基于 F-P 标准具非线性波长校准的光纤光栅解调系统结构

Fig. 1 Structure of FBG demodulation system based on F-P Etalons nonlinear error compensation

2 基于 F-P 标准具非线性波长校准的解调方法

F-P 标准具是一种高精度光学仪器,器件结构如图 2 所示。在变温环境下使用光纤光栅解调仪对 F-P 标准具进行光谱采集时,各波长参考点所对应的中心波长的偏移主要是由于光纤光栅解调仪随温度变化所产生的波长漂移^[18]。但是当环境温度出现较大范围变化时,F-P 标准具的波长参考点会产生微小的漂移^[19],所以还需对 F-P 标准具处于变温环境下自身产生的波长漂移进行补偿。所以,对基于 MG-Y 激光器的光纤光栅解调系统的波长校准分为 FBG 解调仪波长线性误差的校准和由 F-P 标准具引入的非线性误差的校准两个部分。

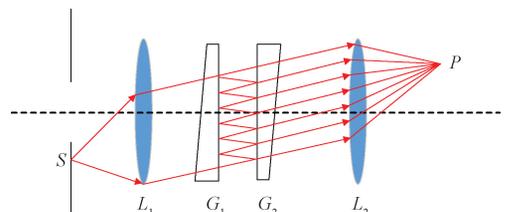


图 2 F-P 标准具内部结构

Fig. 2 Internal structure of F-P Etalons tool

为了实现以上两部分波长的校准,设计了基于 F-P 标准具非线性波长校准的解调方法,具体校准流程如图 3 所示。首先对 F-P 标准具标定波长值进行温度三次样条插值,通过解调系统实时采集与 FBG 传感器处于相同环境的 F-P 标准具光谱数据。通过 F-P 标准具的标定值和实时测量值两者的差值可以得到解调系统实时波长漂移量,实现对 FBG 解调系统波长温度线性误差的补偿。然后采用多项式函数对 F-P 标准具非线性误差进行曲线拟合,拟合曲线即为由 F-P 标准具自身受温度影响产生的漂移量。最后两部分偏差量对实时 FBG 波长值进行补偿,实现解调波长的校准。

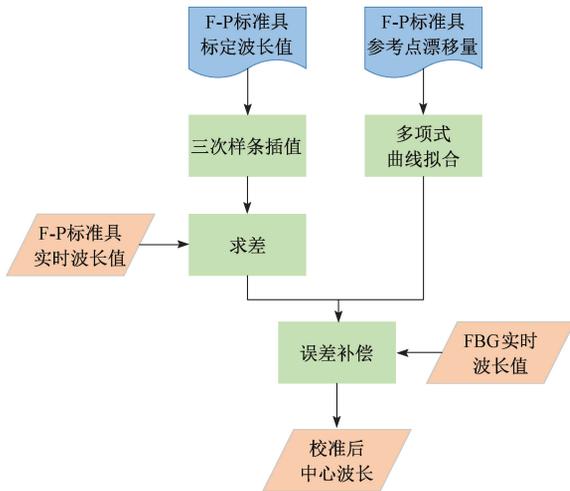


图 3 基于 F-P 标准具的波长校准方法流程

Fig. 3 Flow chart of wavelength calibration method based on F-P Etalons

由于 FBG 解调系统所处太空环境温度温差大、变化快,故模拟温度范围 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一步进作为波长参考间隔。根据采集数据特性,需要对 F-P 标准具的“温度-波长漂移”关系数据进行插值处理。三次样条插值稳定性好,在节点处连续,并且曲线更光滑,符合光纤光栅解调光谱曲线特征^[20]。因此,本文对经过标定的 F-P 标准具波长值的温度进行三次样条插值处理。具体公式如下:

$$\lambda_K(T) \begin{cases} a_{11}T^3 + a_{12}T^2 + a_{13}T + a_{14} (T_1 \leq T \leq T_2) \\ \vdots \\ a_{n1}T^3 + a_{n2}T^2 + a_{n3}T + a_{n4} (T_n \leq T \leq T_{n+1}) \\ \vdots \\ a_{51}T^3 + a_{52}T^2 + a_{53}T + a_{54} (T_5 \leq T \leq T_6) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_1 \sim T_6$ 是 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 6 个温度点; $a_{n1} \sim a_{n4}$ 为第 $n \sim n+1$ 温度区间三次样条插值的系数, $n=1,2,\dots,5$; T 为实时温度; λ_K 为经过三次样条插值后

对应温度下的 F-P 标准具标定输出波长。

FBG 解调系统温度波长的线性误差 $\Delta\lambda_p$,可以由 F-P 标准具的实际测量值 λ_R 和标定值 λ_K 求出,公式为:

$$\Delta\lambda_p = \lambda_R - \lambda_K \quad (2)$$

F-P 标准具引入的波长温度非线性误差是由于环境温度变化,导致 F-P 标准具波长参考点产生了微小的非线性漂移。这种非线性漂移对波长的解调精度有的一定影响,所以本文使用多项式函数对各波长参考点非线性漂移量进行曲线拟合^[21]。F-P 标准具在不同温度下波长漂移量服从下列分布:

$$\Delta\lambda_T = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + \dots \quad (3)$$

式中: x 为 F-P 标准具环境温度, $\Delta\lambda_T$ 为高次多项式拟合的波长漂移量, A, B, C, D, \dots 为待定系数。

通过 FBG 解调仪波长温度线性误差 $\Delta\lambda_p$ 和由 F-P 标准具引入的波长温度非线性误差 $\Delta\lambda_T$ 对 FBG 实时解调波长值 λ_B 的补偿,FBG 最终解调波长 λ_{FBG} 修正为:

$$\lambda_{FBG} = \lambda_B + \Delta\lambda_p + \Delta\lambda_T \quad (4)$$

3 实验测试及结果分析

3.1 实验系统

本文实验系统装置如图 4 所示,实验测试平台主要由计算机、基于 MG-Y 可调谐激光器的光纤光栅解调仪、F-P 标准具和 FBG 传感器组成的光路结构等 3 个部分组成。本次实验使用的是透射式 F-P 标准具,工作波长范围 $1\ 525\sim 1\ 565\text{ nm}$ 。先由上位机中 LabVIEW 软件平台向光纤光栅解调系统的 ARM 主控芯片下发控制指令,驱动 MG-Y 激光器输出。光信号通过 F-P 标准具和 FBG 传感器等光路器件,返回光纤光栅解调仪并完成光谱解调。

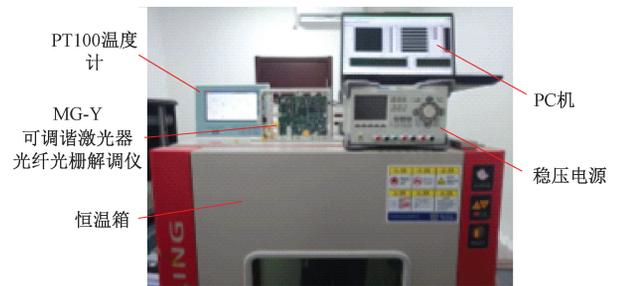


图 4 光纤光栅解调系统实验装置

Fig. 4 Experimental device of fiber Bragg grating demodulation system

3.2 实验测试及分析

本文所提出的波长校准方法是基于 F-P 标准具光纤光栅解调系统的,为了验证该校准方法的合理性,进行了一系列验证实验。实验测试波长工作范围在 $1\ 525\sim 1\ 565\text{ nm}$ ^[22],测试的温度调节范围为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

首先,对解调仪的温度稳定性进行测试。将解调仪及标准具置于环境温度为 25 °C 的稳定条件下,待温度稳定后对解调系统连续测试 3 h。1 525~1 565 nm 波长范围每间隔 8 nm 取一个波长参考点,共取 20 组数据进行数据分析。通过实验数据可知,在稳定温度环境下 3 h 内光纤光栅解调系统采集波长波动在±0.6 pm 以内,如图 5 所示。计算 3 h 内采集的波长标准差,其中波长点最大标准差为 0.42 pm。这可能是由于恒温箱在工作时温度并不是完全稳定,而是存在 ±0.1 °C 的波动。结果表明在 25 °C 恒定温度环境下,解调仪系统工作稳定性较好。

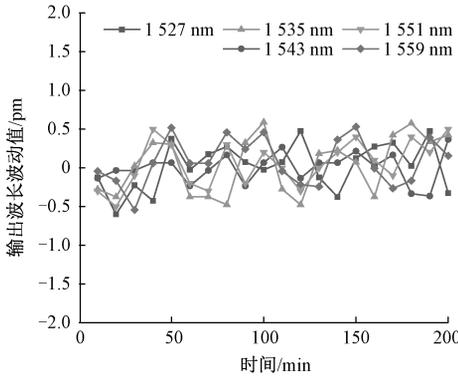


图 5 解调仪 25°C 温度下系统输出波长稳定性
Fig. 5 Demodulation instrument system output wavelength stability at 25°C

然后,确定引入 F-P 标准具补偿量与 FBG 传感器波长漂移量关系。如图 6 所示,显示了 FBG 传感器测量的解调仪在不同温度下相比于 25 °C 输出波长的漂移量,可以看出在同一温度下波长漂移量是在一定范围的。图 7 显示了对不同温度下的平均波长漂移量进行拟合呈线性关系。图 8 显示了以 F-P 标准具测量的解调仪在不同温度下相比于 25 °C 输出波长的漂移量。图 9 显示了对不同温度下的平均波长漂移量进行拟合也呈线性关系。如表 1 对比两组平均漂移量,F-P 标准具测出的波长漂移量与 FBG 传感器产生的漂移量相差小于±1 pm,两者漂移量基本是一致的。

表 1 FBG 传感器和 F-P 标准具不同温度下波长平均漂移量
Table 1 The FBG sensor and the F-P standard have the mean wavelength drift at different temperatures

| 温度/°C | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
|---------------------|-----------|-----------|----------|----------|---------|---------|
| FBG 传感器平均 漂移量/pm | -14.261 7 | -9.697 1 | -5.354 8 | -2.535 6 | 2.142 5 | 5.121 0 |
| F-P 标准具平均 漂移量/pm | -13.097 5 | -10.448 3 | -6.318 3 | -2.068 2 | 2.980 0 | 5.568 4 |

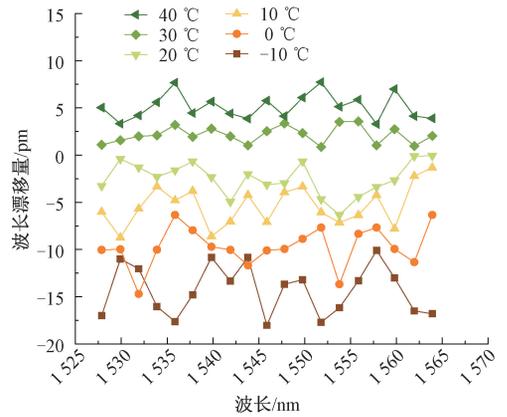


图 6 通过 FBG 测量的解调仪在不同温度下相比于 25 °C 输出波长的漂移量散点图
Fig. 6 Drift scatterplot of demodulation instrument measured by FBG at different temperatures compared to output wavelength at 25°C

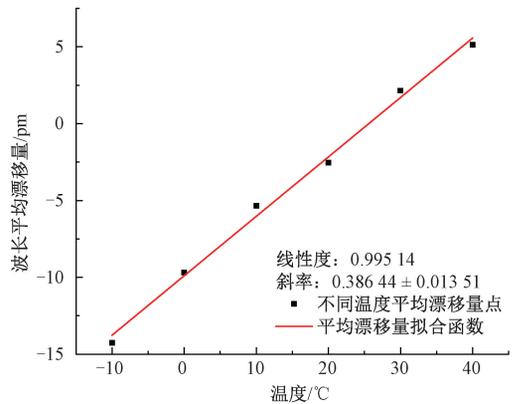


图 7 通过 FBG 测量的解调仪在不同温度下波长平均漂移量线性拟合图
Fig. 7 Linear fitting of the mean wavelength drift of the demodulation instrument measured by FBG at different temperatures

其次,通过实验平台测试 F-P 标准具在变温环境下的非线性漂移特性。如图 10 所示,由于引入 F-P 标准具而造成的波长漂移是呈非线性的。在 -10 °C ~ 40 °C 范围内,相对 25 °C 参考点波长值最大漂移约 2 pm。且各波长参考点在不同温度下波长漂移变化都是非线性的,所以可以使用多项式函数对各波长参考点非线性漂移量进行曲线拟合实现误差的校准。

采用 F-P 标准具 10 个波长参考点的波长漂移曲线进行拟合,分别求出不同温度下所有参考点的漂移量平均值并作为拟合数据,然后确定多项式函数阶次以及 A, B, C, D, … 进而得到拟合方程。本文分别对 2~6 阶多项式函数进行拟合,通过不同阶次多项式拟合效果对比发

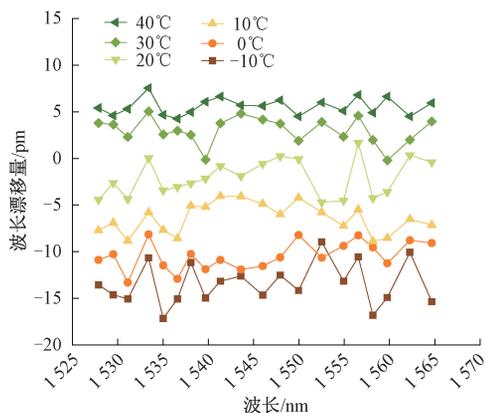


图 8 通过 F-P 标准具测量解调仪在不同温度下波长漂移散点图

Fig. 8 Wavelength drift scatter diagram of demodulator measured by F-P etalon at different temperatures

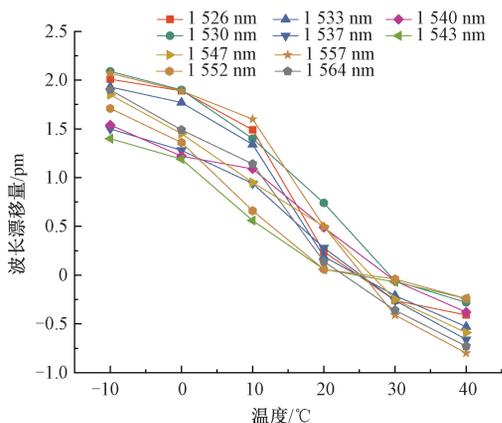


图 10 F-P 标准具受温度影响产生的非线性漂移量图
Fig. 10 Picture of nonlinear drift quantity of F-P Etalons produced by temperature

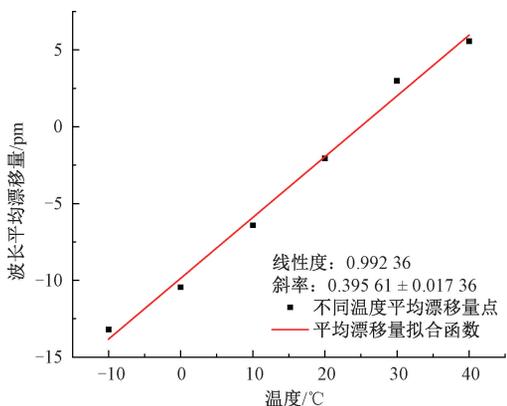


图 9 通过 F-P 标准具测量的解调仪在不同温度下波长平均漂移量线性拟合图

Fig. 9 Linear fitting diagram of average wavelength drift of demodulator measured by F-P Etalons at different temperatures

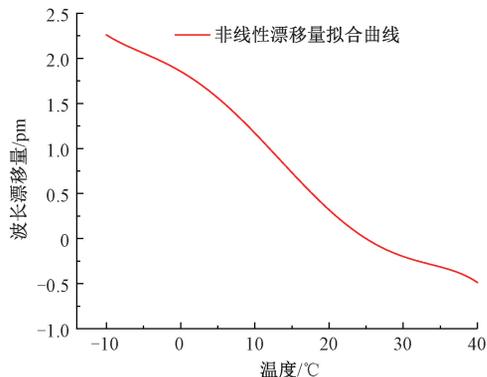


图 11 5 阶多项式函数拟合的 F-P 标准具非线性漂移量曲线

Fig. 11 F-P Etalons nonlinear drift curve fitted by 5-order polynomial function

现采用 5 阶多项式函数拟合时,残差平方和为 5.808 34 相对较小, R^2 值 0.915 09 曲线拟合相关度较高,如表 2 所示。当函数阶次超过 5 阶后,拟合会出现龙格现象。故本文采用 5 阶多项式函数拟合 F-P 标准具在不同温度下波长漂移量,拟合后曲线如图 11 所示,并得到拟合方程:

$$\lambda_T = 1.855 - 0.048 13x - 0.001 97x^2 - 0.000 055x^3 + 0.000 005 75x^4 - 0.000 000 083x^5 \quad (5)$$

表 2 各阶多项式函数拟合效果

Table 2 Fitting effect of polynomial functions of each order

| 阶次 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 残差平方和 | 6.772 82 | 5.863 82 | 5.847 31 | 5.808 34 | 5.795 79 |
| R^2 值 | 0.900 99 | 0.914 28 | 0.914 52 | 0.915 09 | 0.915 28 |

最后,为了验证波长校准方法的有效性,模拟航空航天实际应用环境的实验系统,在变温环境下选定随机温度进行实验测试。将 FBG 传感器、标准具和解调仪置于恒温箱中,实验过程取 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-6\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $16\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 8 个温度节点作为温度测试点,恒温箱在 $-10\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度区间内变温时在以上温度值进行 60 min 的控温。然后采集解调光谱数据,并通过寻峰算法计算中心波长。

按照 F-P 标准具非线性误差补偿波长漂移校准方法,对 FBG 的解调波长进行校准得到中心波长。 $-10\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 变温环境下波长最大漂移可达到 20.3 pm,如图 12 所示。FBG 解调波长在补偿后的漂移量偏差与补偿前相比,补偿后的波长漂移量有明显降低。当温度环境为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,校准后的偏差相对校准前减少 5.345 5 pm;当温度环境为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 时,校准后的偏差相对

校准前减少 19.628 7 μm 。可以得出结论,通过该校准方法补偿后波长漂移量控制在 $\pm 1.1 \mu\text{m}$ 以内。

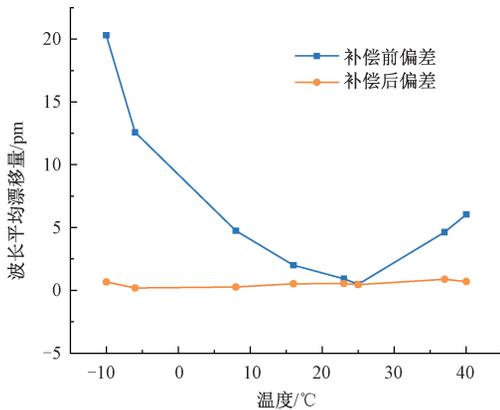


图 12 不同温度下补偿前后波长漂移量曲线

Fig. 12 Curves of wavelength drift before and after compensation at different temperatures

4 结 论

本文针对 FBG 解调系统在变温环境下由于波长漂移引起的解调精度不足问题,提出并研究了基于 F-P 标准具非线性波长校准的解调方法。在 FBG 解调系统的光路部分引入 F-P 标准具,实现了 FBG 和 F-P 标准具光谱的实时解调。利用三次样条插值处理的 F-P 标准具波长参考点,补偿了对 FBG 解调系统的线性误差,且通过引入多项式函数补偿了 F-P 标准具的非线性误差。建立了 FBG 解调实验测试系统,结果表明本文所提出方法在恒温及变温环境下的传感系统解调稳定性分别在 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 及 $\pm 1.1 \mu\text{m}$ 以内,且在变温环境下传感系统解调的波长漂移量从 20.3 μm 减小到 0.7 μm 。所提出的基于 F-P 标准具非线性波长校准的 FBG 传感系统解调方法可用于空间站、卫星、探测器等结构的监测,为航空航天等领域的结构健康监测提供了参考。

参考文献

[1] 赵佳生,夏谄民,李乔力,等. 低成本可调谐半导体激光器研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 260-278.
ZHAO J SH, XIA Y M, LI Q L, et al. Research progress in low-cost tunable semiconductor lasers [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 42(17): 260-278.

[2] ORR P, NIEWCZAS P, BOOTH C, et al. An optically-interrogated rogowski coil for passive, multiplexable current measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(6): 2053-2054.

[3] 刘佳,祝连庆,何薇,等. 基于 MG-Y 型可调谐半导体

光源的光纤光栅解调系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 87-96.

LIU J, ZHU L Q, HE W, et al. Research on optical interrogation system based on MG-Y tunable diode laser[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 87-96.

[4] LEUNG C K Y, WAN K T, INAUDU D, et al. Optical fiber sensors for civil engineering applications [J]. Materials and Structures, 2015, 48(4): 871-906.

[5] 巴德欣,董永康. 分布式光纤传感技术及其在航空航天领域的应用展望[J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 730-738.

BA D X, DONG Y K. Distributed optical fiber sensor and its potential applications in health monitoring of aerospace structures[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 730-738.

[6] 于昌新,何彦霖,何超江,等. 用于微创手术探针的光纤力传感器设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(20): 2421-2429.

YU CH X, HE Y L, HE CH J, et al. Design of fiber force sensors for surgical probes [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(20): 2421-2429.

[7] 张文涛,黄稳柱,李芳. 高精度光纤光栅传感技术及其在地球物理勘探,地震观测和海洋领域中的应用[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 94-108.

ZHANG W T, HUANG W ZH, LI F. High-resolution fiber Bragg grating sensor and its applications of geophysical exploration, seismic observation and marine engineering [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 94-108.

[8] HEININGER H. Longitudinal cavity mode referenced spline tuning for widely tunable MG-Y branch semiconductor laser [J]. Radioengineering, 2014, 23(1): 496-503.

[9] YOO S, LEE J K, KIM K. Suppression of thermal wavelength drift in widely tunable DS-DBR laser for fast channel-to-channel switching[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30406-30417.

[10] 文丰,张岩,贾兴中. 基于 F-P 可调谐滤波器的光纤光栅解调系统设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 38-43.

WEN F, ZHANG Y, JIA X ZH. Design of fiber grating demodulation system based on F-P tunable filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(9): 38-43.

[11] 王鹏,赵洪,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(8): 85-92.

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(8):85-92.
- [12] 俞琳, 刘铁根, 刘琨, 等. 基于多波段混合气体吸收谱线的波长标定方法研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(6):1146-1151.
YU L, LIU T G, LIU H, et al. Investigation of wavelength calibrating method based on multiband mixed gas absorption lines[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(6):1146-1151.
- [13] 张登攀, 王璿, 王永杰, 等. 基于 FBGA 光纤光栅解调系统的实时校准方法[J]. *激光与红外*, 2015, 45(7):825-829.
ZHANG D P, WANG J, WANG Y J, et al. Real-time calibration technique of fiber Bragg grating demodulation system based on FBGA[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(7):825-829.
- [14] 江俊峰, 臧传军, 王双, 等. 变温环境 FBG 解调仪复合多波长参考稳定方法研究[J]. *光电子·激光*, 2018, 29(6):575-581.
JIANG J F, ZANG CH J, WANG SH, et al. Investigation of composite multi-wavelength reference stabilization method for FBG demodulator in unsteady temperature environment[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2018, 29(6):575-581.
- [15] LI C, WANG Y J, LI F. Highly stable FBG wavelength demodulation system based on F-P etalon with temperature control module[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 2(1):238-242.
- [16] 鞠婉秋. 基于气室的光纤光栅反射谱高精度解调方法研究[D]. 保定:华北电力大学, 2022.
JU W Q. Research on high precision demodulation method of fiber Bragg grating reflection spectrum based on gas cell[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [17] 任帅, 庄炜, 董明利, 等. 调制光栅 Y 分支激光器波长连续调谐方法[J]. *光子学报*, 2022, 51(6):323-331.
REN SH, ZHUANG W, DONG M L, et al. Quasi-continuous wavelength tuning method of modulated grating Y-branch laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(6):323-331.
- [18] 刘源胤, 吴重庆, 刘岚岚, 等. 基于 F-P 腔干涉的光学温度传感器研究[J]. *激光杂志*, 2019, 40(8):1-4.
LIU Y Y, WU CH Q, LIU L L, et al. Research on optical temperature sensor based on Fabry-Perot cavity interference[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(8):1-4.
- [19] 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.
YAO G ZH, LI Y Q. Impact of F-P etalon temperature characteristics on FBG wavelength demodulation accuracy[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3):542-546.
- [20] 贺红林, 许佳豪, 周战洪, 等. 压阻式压力传感器温度误差的插值补偿方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(12):1-7.
HE H L, XU J H, ZHOU ZH H, et al. Research on interpolation compensation method for temperature error of piezoresistive pressure sensor[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(12):1-7.
- [21] 李宁, 王东, 王宇, 等. 曲线拟合算法对光纤光栅传感解调性能的影响研究[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(5):711-714.
LI N, WANG D, WANG Y, et al. Research on influence of curve fitting algorithm on demodulation performance of fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(5):711-714.
- [22] 白建胜, 张丕状, 戚俊成, 等. DFB 半导体激光器电流波长调谐线性度分析与校准[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(8):168-174.
BAI J SH, ZHANG P ZH, QI J CH, et al. Analysis and calibration of current wavelength tuning linearity of DFB semiconductor laser[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(8):168-174.

作者简介



陆行知, 2018 年于西安邮电大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与光电器件。
E-mail: lxz950515@163.com

Lu Xingzhi received his B. Sc. degree from Xi'an University of Posts and Telecommunications in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology. His main research interests include optical fiber sensing and optoelectronic devices.



董明利(通信作者), 2009 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光电与视觉测量、光纤传感与器件。
E-mail: dongml@bistu.edu.cn

Dong Mingli (Corresponding author) received Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2009. Now she is a professor in Beijing Information Technology University. Her main research interests include photoelectric and vision measurement, fiber sensing and devices.