

doi:10.3788/gzxb20164506.0606003

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

汪金辉, 许雪梅, 丁家峰, 丁一鹏, 尹林子

(中南大学 物理与电子学院, 长沙 410083)

摘要:为了消除由法布里-珀罗标准具的干涉峰偏移引起的光纤布喇格光栅波长解调误差,采用多参考光栅进行法布里-珀罗标准具波长校准,搭建了相应的光纤布喇格光栅解调平台.将待解调光栅、法布里-珀罗标准具和多个参考光栅分别接入采样通道,用多个参考光栅对法布里-珀罗标准具进行波长校准,得到准确度较高的标准具干涉峰波长,再以此波长计算待测光栅波长,降低了校准误差.实验结果表明,利用该方法搭建的光纤布喇格光栅解调系统校准的重复性误差小于 1.6 pm,波长解调误差低于 1.8 pm.

关键词:光纤布喇格光栅传感;光纤布喇格光栅解调;多光栅校准;法布里-珀罗标准具;法布里-珀罗滤波器

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)06-0606003-6

Fiber Bragg Grating Demodulation System Based on Fiber Fabry-Perot Etalon and Multi-gratings Calibrated

WANG Jin-hui, XU Xue-mei, DING Jia-feng, DING Yi-peng, YIN Lin-zi
(Central South University, School of Physics and Electronics, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to eliminate the fiber Bragg grating demodulation error caused by the interference peak shifting of Fabry-Perot etalon, a method was proposed that multi-gratings were utilized to calibrate the wavelength of Fabry-Perot etalon, and a demodulation platform was established. Sampling channels were respectively connected with sensor gratings, Fabry-Perot etalon and reference gratings, and interference peak wavelengths with high precision were calibrated using multi-reference-gratings. Then wavelengths of sensor gratings were calculated using these wavelengths, and calibration error was reduced. The experiment demonstrates that the repeatability error of the fiber Bragg grating demodulation system is less than 1.6 pm, and the wavelength demodulated error is under than 1.8 pm.

Key words: Fiber Bragg grating sensor; Fiber Bragg grating demodulation; Multi-gratings establish; Fabry-Perotetalon; Fabry-Perot filter

OCIS Codes: 060.3735; 060.2300; 060.2370; 050.2230; 060.4230

0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有传统电学传感器无法比拟的优点^[1],如抗电磁干扰,易于远距离传感和分布式复用传感,结构简单、小巧,准确度高,被广泛应用于温度^[2]、应力^[3]、压

力^[4]、振动^[5]等物理参量的测量. FBG 是一种波长编码型调制元件^[6],其透射或反射频谱为高斯型的窄带光. 当外界环境变化时,FBG 的中心波长会随之改变. 因此,只要精确解调出光纤光栅波长的变化,即可获得对应外界物理量的变化情况.

光纤光栅解调方法主要有滤波法^[7]和干涉法^[8]两

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61071025,61502538)和湖南省自然科学基金(No. 2015JJ3157)资助

第一作者:汪金辉(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email:jhuiwang@outlook.com

导师(通讯作者):许雪梅(1971-),女,副教授,博士,主要研究方向为光电子学及其应用. Email:xuxuemei999@126.com

收稿日期:2015-12-02;录用日期:2015-63-15

<http://www.photon.ac.cn>

种,其中法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)滤波器法^[9-10]的解调范围广、准确度高,易于实现.常用的法布里-珀罗滤波器法主要利用了F-P滤波器的驱动电压与透射波长是线性变化这一特性,当透射波长与入射波长一致时,透射光强达到最大值.但是由于F-P滤波器中的压电陶瓷(Piezoelectric Ceramic, PZT)元件具有非线性性和迟滞性^[11],其电压与透射波长往往不具有较好的线性特性,并且PZT的温漂可能导致同一驱动电压具有不同透射波长.通常采用的解决方案是利用F-P标准具进行波长校准^[12],但是F-P标准具干涉峰的位置与半宽高度易受温度影响,自由光谱范围(Free Spectrum Range, FSR)会有一定误差,因此随着波长变化,校准误差将会增加,从而降低解调系统的准确度.

本文提出了一种基于F-P标准具和多个参考光栅的波长解调系统.该系统使用多个参考光栅作为一个单独通道来校准F-P标准具,得到准确度较高的标准具波长,从而提高了波长解调系统的准确度.

1 光纤光栅波长解调系统

1.1 基于光纤 F-P 标准具的解调原理

传统的基于光纤F-P滤波器的解调方法是通过波形发生器产生驱动信号驱动F-P滤波器进行光谱扫描,出射的窄带光经耦合器后一路进入F-P标准具,另一路进入由传感光栅和参考光栅组成的FBG阵列,对两个通道的光谱数据进行同步采集,如图1,图中FBG的第一个峰为参考光栅,右侧四个峰为待测波长的传感光栅.

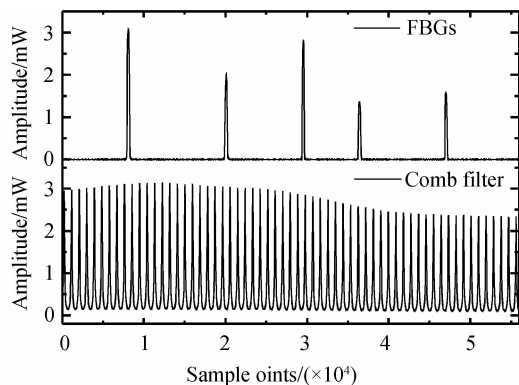


图1 F-P标准具和FBG阵列光谱波形
Fig. 1 Wavelength of F-P etalon and FBG array

F-P滤波器的波长与驱动电压之间呈线性关系,当使用锯齿波或三角波作为驱动信号时,波长可看作是随采样点的变化而线性变化.在图1中,参考光栅峰值点位于梳状滤波器两个峰值点之间,设两个峰值点对应的采样点的序号、波长和频率分别为 p_i, λ_i, f_i 和 $p_{i+1}, \lambda_{i+1}, f_{i+1}$,参考光栅对应的采样序号和波长为分别为 p_{ref}, λ_{ref} ,根据波长线性变化的特点可得

$$\frac{p_{ref} - p_i}{p_{i+1} - p_i} = \frac{\lambda_{ref} - \lambda_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} \quad (1)$$

由于梳状滤波器的每个峰值点之间的频率间隔为一个自由光谱范围(假设在图1中,随采样点数增加,波长也增加),则

$$f_{i+1} = f_i + F_{FSR} \quad (2)$$

式中 F_{FSR} 为自由光谱范围,由式(1)、(2)可得到 p_i 点的波长.记峰值点 p_i 在梳状滤波器的干涉峰中的序号为 k ,则第 n 个干涉峰的波长为

$$\lambda(n) = \frac{c}{\frac{c}{\lambda_i} - (n-k) \cdot F_{FSR}} \quad (3)$$

由式(3)可得到梳状滤波器所有峰值点的波长.计算待测FBG的波长可以用类似式(1)的线性比值法.

使用F-P标准具标定的方法可以有效减小因F-P滤波器的温度特性造成的波长误差,并且系统复杂度较低.由于检测准确度只与峰值点位置准确度有关,与检测到的信号幅度、驱动信号幅度无关,因此可以有效地避免由PZT的迟滞、非线性效应产生的误差.

1.2 多光栅标定 F-P 标准具方法

F-P标准具中每个干涉峰的波长值会随着温度有一定幅度的漂移,F-P标准具自由光谱范围也有一定的误差.由式(3)可知,若FSR有偏差,干涉峰离参考光栅越远,产生的误差将会越大.使用Luna Technologies公司所生产的PHOENIX 1400台式可调谐激光器平台,将参考光栅和梳状滤波器分别接入激光器,测得光谱数据.然后通过1.1节所述方法计算得到梳状滤波器每个干涉峰的波长,对比激光器直接测量得到的干涉峰波长,可得到干涉峰的波长误差,如图2,图中横坐标为波长,纵坐标为不同波长误差,3条垂直于横坐标的虚线对应3个参考光栅(分别为1522.729 nm, 1540.864 nm, 1555.968 nm).

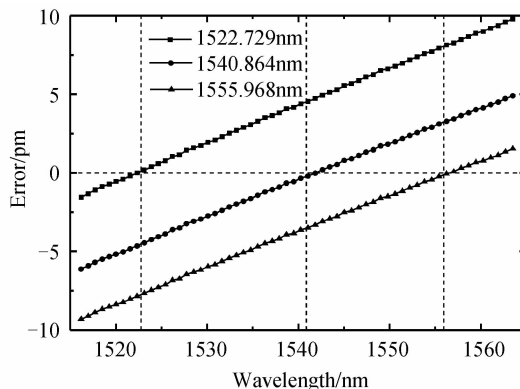


图2 参考FBG标定后的误差值
Fig. 2 Calibrated errors of 3 reference FBGs

由图2可知,误差随干涉峰波长变化大致呈线性变化,三个参考光栅校准误差的线性相关性都为99.98%.对于每个参考光栅来说,计算得到的峰值误差随干涉峰与参考光栅之间距离的增加而增大,即越远离参考光栅,计算所得到的波长误差越大,最大误差

达到 9.8 pm, 并且, 由同一个参考光栅校准的误差, 在干涉峰波长小于此光栅的波长时误差为负, 大于时误差为正. 由于传感光栅波长的计算依赖于梳状滤波器各个干涉峰波长值, 因此干涉峰波长误差会增加解调系统的误差.

为解决参考光栅校准的误差问题, 可针对误差是线性的这一特性, 对单个参考光栅的误差进行线性拟合, 并在结果中消除这一误差. 但是, 由不同参考光栅标准误差拟合的直线并非完全一致, 图 2 中三个光栅校准误差拟合直线的斜率和截距分别为: 0.002 38 和 -3.629 47, 0.002 32 和 -3.581 91, 0.002 28 和 -3.548 91. 考虑到由单个参考光栅校准时, 在该参考光栅波长附近的干涉峰校准出来的误差较小, 所以可采用多个参考光栅, 当待校准的干涉峰距离某一个参考光栅较近时, 就以该参考光栅校准的波长为准. 并且为了更好地适应不同参考光栅的线性特性, 可综合待校准干涉峰左右两个参考光栅的误差特性, 使用加权平均的方法更好地降低误差, 波长计算公式为

$$\lambda(n) = \omega(i, n) \cdot \lambda_i(n) + \omega(i+1, n) \cdot \lambda_{i+1}(n) \quad (4)$$

式中, $\lambda(n)$ 为第 n 个干涉峰的波长, 这个干涉峰位于第 i 和第 $i+1$ 个参考光栅之间, $\lambda_i(n)$ 和 $\lambda_{i+1}(n)$ 分别为使用第 i 和 $i+1$ 个参考光栅校准第 n 个干涉峰时得到的波长, $\omega(i)$ 和 $\omega(i+1)$ 分别为两个参考光栅在第 n 个干涉峰处的权值.

距离某一个参考光栅越近, 由该光栅计算出来的干涉峰波长越准确, 因此权值将以距离为变量, 距离越大, 权值越小, 计算方法为

$$\omega(p_i, p_{i+1}, p_n) = -\frac{p_n - p_i}{p_{i+1} - p_i} + 1 \quad (5)$$

式中, p_n 为第 n 个干涉峰的采样点序号.

式(4)、(5)给出的计算公式考虑到了不同参考光栅的误差, 能够有效地减小梳状滤波器的干涉峰的标定误差.

1.3 光纤光栅解调系统

根据 1.2 节提出的改进方法, 设计了如图 3 所示的解调系统框图. 系统中放大自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 宽带光源发出的光, 经隔离器进入 F-P 滤波器, 调谐后的窄带光经耦合器分为三路, 第一路经环形器进入 FBG 传感通道, 第二路经环形器进入 FBG 参考通道, 第三路直接进入梳状滤波器标定通道. 三个通道的光经光电检测器采集送入微处理器. F-P 滤波器的驱动信号由微处理器控制, 发出的三角波信号经驱动电路转换、放大产生 0~18 V 的控制电压, 扫描 F-P 滤波器的一个自由光谱范围. 实验中使用的宽带光源的光谱范围是 1 510~1 560 nm, F-P 滤波器的自由光谱范围是 100 nm. 对解调系统进行组装, 然后在实验室环境下进行调试分析. 设计的光纤

光栅解调系统整体实物图如图 4.

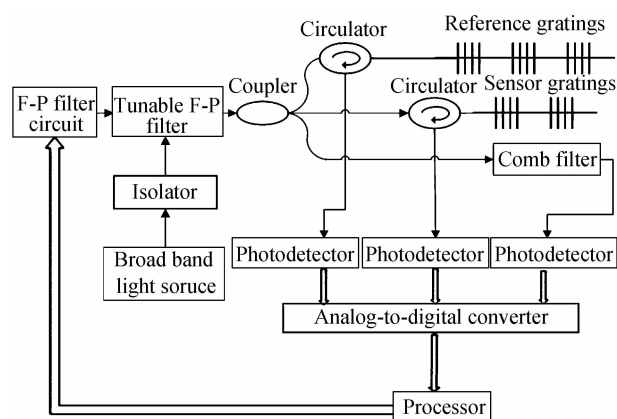


图 3 光纤光栅解调系统框图

Fig. 3 Diagram of FBG demodulation system

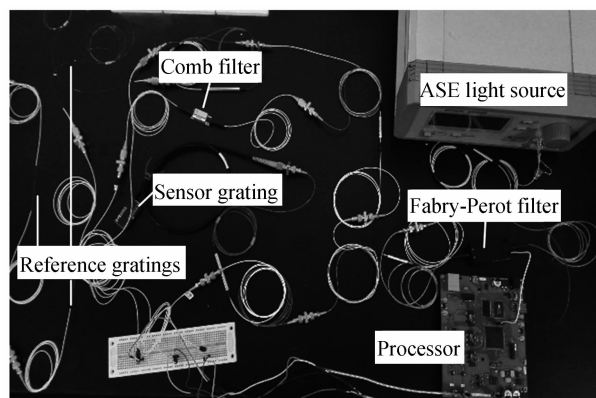


图 4 光纤光栅解调平台实物图

Fig. 4 Photo of FBG demodulation system

2 实验结果

2.1 激光器平台的 F-P 标准具波长校准实验

首先采用 PHOENIX 1400 台式可调谐激光器平台进行多参考光栅标定 F-P 标准具干涉峰的实验, 激光器的光谱范围是 1 515~1 565 nm. 利用激光器同时扫描 F-P 标准具通道和 FBG 参考通道, 采样频率设置为 876 kHz. 然后对采样后的数据进行峰值处理, 得到两个通道的峰值点位置, 根据参考光栅的波长对 F-P 标准具进行标定.

图 5 为通过 3 个参考光栅校准产生的误差和校正之后的误差对比, 由于最左边和最右边的部分只有一个参考光栅的边界, 因此直接使用的是最左边和最右边两个参考光栅校准之后的波长值. 3 个参考光栅波长分别为 1 522.730 nm、1 540.864 nm、1 555.597 nm, 使用每个参考光栅校准的最大误差分别是 9.8 pm、6.1 pm、9.3 pm, 使用本文方法校准之后的波长误差最大是 1.5 pm. 去掉最左边和最右边两个边界之后, 波长校准误差的最大值是 0.3 pm. 图 6 为使用了 5 个参考光栅的梳状滤波器波长校准误差和使用本文方法校准误差, 5 个参考光栅波长分别为 1 522.728 nm、

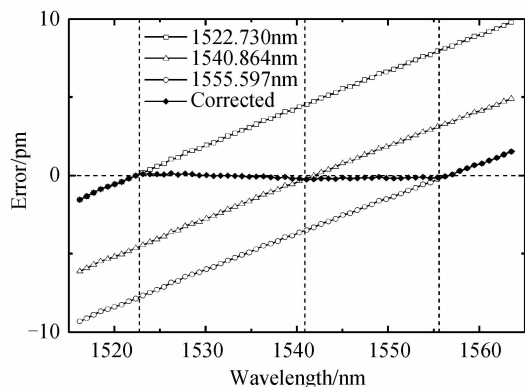


图 5 3 个参考 FBG 标定的梳状滤波器波长误差
Fig. 5 Calibrated errors of 3 reference FBGs

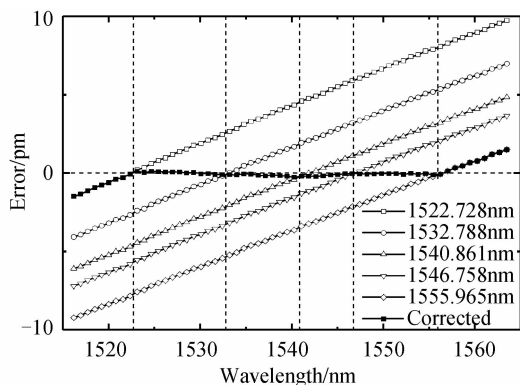


图 6 5 个参考 FBG 标定的梳状滤波器波长误差
Fig. 6 Calibrated errors of 5 reference FBGs

1 532.788 nm、 1 540.861 nm、 1 546.758 nm、 1 555.965 nm, 5 个参考光栅校准的最大误差分别是 9.7 pm、7.0 pm、6.1 pm、7.2 pm、9.2 pm, 使用本文方法校准后的波长误差最大值是 1.5 pm. 去掉边界之后, 波长校准误差的最大值是 0.3 pm. 实验数据表明, 当使用改进的干涉峰校准方法后, 校准误差显著降低.

2.2 解调系统的 F-P 标准具波长校准实验

利用 1.3 节所描述的解调系统对 F-P 标准具进行波长校准, 使用波长范围为 1527~1564nm 的 ASE 宽带光源. 参考通道接入了 4 个 FBG, 并放在 25℃ 恒温环境中保证波长恒定. 驱动 F-P 滤波器对梳状滤波器和参考通道进行扫描, 滤波器的驱动信号频率为 10Hz. 对滤波器进行连续 5 次扫描, 可以得到 5 次采样数据, 参考 FBG 对 F-P 标准具进行校准, 将 5 次采样校准后的平均值作为 F-P 标准具各个干涉峰的标准值, 可得到 5 次校准的误差. 每隔 1 h 做一次数据测量, 连续测量 4 次, 结果如图 7. 图 7(a)~(d) 分别表示 4 次测量, 每幅图中的 1~5 分别表示每次测量中 5 次扫描的序号. 从图中可以看出, 每次使用参考光栅进行波长校准后的误差变化规律基本一致, 4 次测量中, 最大误差分别为 1.6 pm、1.6 pm、1.4 pm、1.5 pm, 证明 F-P 标准具干涉峰的波长校准具有较低的误差和较好的重复性.

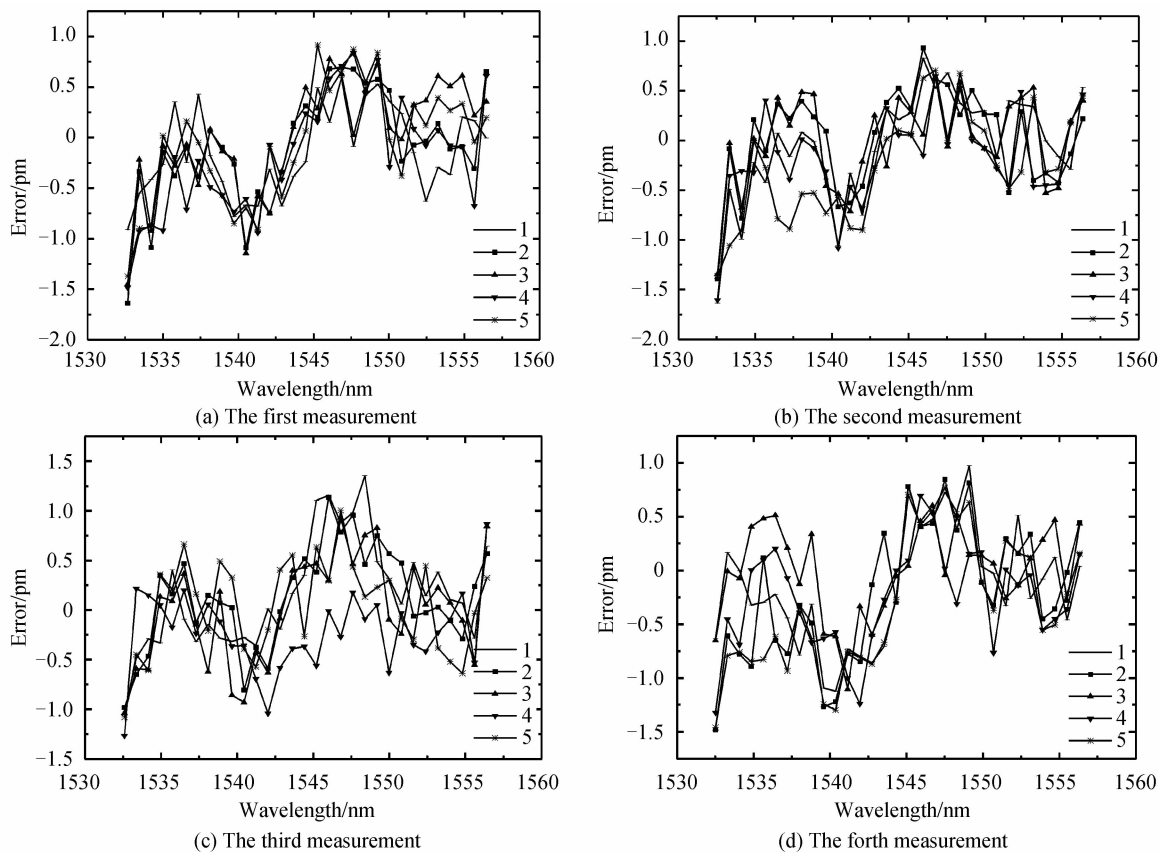


图 7 解调系统的测量误差
Fig. 7 Measured errors of demodulation system

2.3 解调系统的波长解调

使用1.3节所述系统,对给定光纤布喇格光栅传感器进行波长解调实验.首先进行重复性实验,将光纤布喇格光栅温度传感器放置于恒温箱中,每隔3℃并稳定10 min、20 min、30 min后测量3次数据,温度由20℃升至50℃.间隔24 h后,重复上述实验.在每组实验中,先对读取同一温度的3次数据取平均,再对温度曲线进行2次拟合,将所得拟合后的数据作为标准值,每次读取后的数据减去标准值得到测量误差,如图8.由图可知,两组测量的最大误差分别是1.8 pm、1.7 pm.

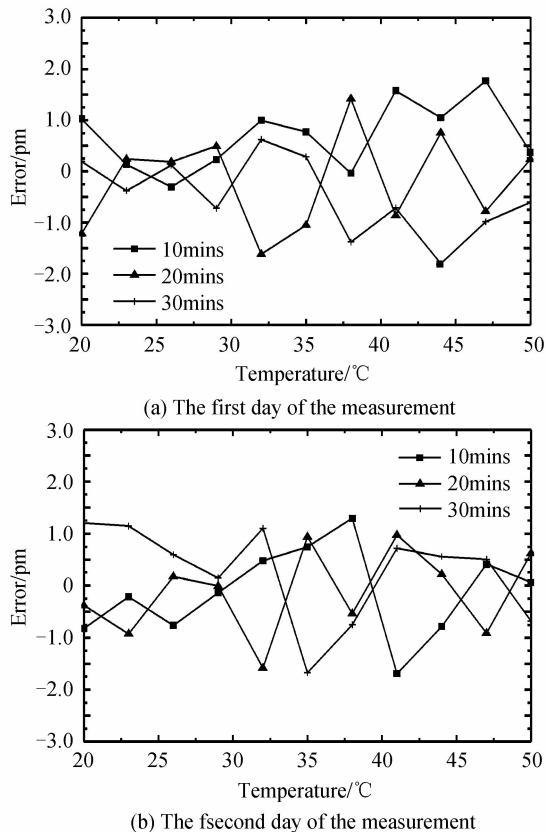


图8 重复性实验测量误差
Fig. 8 Errors of repetitive experiments

对解调系统进行稳定性测试,选择3个标准光栅,并将其放在温度为25℃的环境中,以保证标准光栅波长不受温度影响.先进行5次测量,记录每个光栅的平均波长,取波长平均值作为每个参考光栅的标准值,得到的波长分别为1 535.035 nm、1 542.358 nm、1 550.687 nm.每隔5 min记录一次数据,一共记录48组数据,将测得的波长数据减去其标准值得到解调误差,如图9.三个光栅在测量过程中的最大误差分别为1.4 pm、1.7 pm、1.8 pm,具有较好的测量准确度.

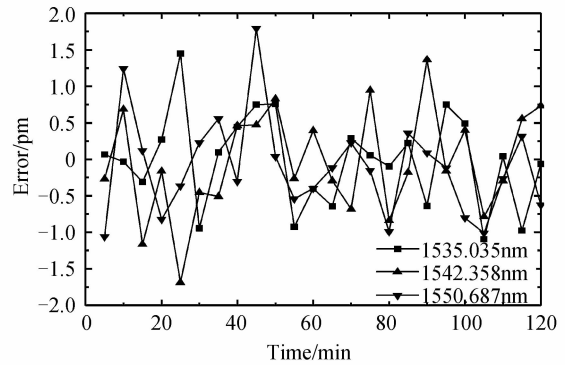


图9 波长解调的误差
Fig. 9 Errors of wavelength demodulation

3 结论

本文采用F-P滤波器扫描法,设计了一种具有较高测量准确度的光纤光栅解调系统.该系统使用F-P标准具进行波长校准,同时单独使用了一个包含多个标准光栅的参考通道以提高F-P标准具干涉峰校准的准确性,消除了温度等因素导致的F-P标准具和F-P滤波器的波长漂移.使用可调谐激光器对F-P标准具干涉峰进行波长校准测试,其误差最大为0.3 pm.利用该方法搭建的光纤光栅解调系统干涉峰校准的重复性误差小于1.6 pm,波长解调的重复性误差低于1.8 pm,稳定性误差低于1.8 pm.该光纤光栅解调系统测量准确度高、稳定性好,可广泛应用于温度、压力、振动、电场等参量的测量中.

参考文献

- [1] WANG C, YAO J P. Ultrafast and ultrahigh-resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(19): 2927-2933.
- [2] YI Z, DONG X P. Demodulation of the FBG temperature sensor with the tunable twin-core fiber[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, **53**(1): 81-84.
- [3] ZHANG L, LIU Y M, GAO X L, *et al.* High temperature strain sensor based on a fiber Bragg grating and rhombus metal structure[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(28): 109-112.
- [4] PENG H, ZHOU B H, WANG H, *et al.* A new method for resolving the influence of circular birefringence in FBG weak pressure sensor[J]. *Measurement*, 2014, **58**: 280-285.
- [5] JIANG S C. Study of three-component FBG vibration sensor for simultaneous measurement of vibration, temperature, and verticality[J]. *Journal of Sensors*, 2015, **2015**: 382865.
- [6] LI Yong-qian, YAO Guo-zhen, YANG Zhi. A high precision fiber Bragg grating wavelength demodulation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1405-1411.
李永倩, 姚国珍, 杨志. 一种高精度光纤光栅波长解调系统[J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1405-1411.

- [7] ZHU Zhu, LIANG Da-kai, SUN Hong-bing. Double-edged filter wavelength demodulation system for fiber Bragg gratings based on long period fiber grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(3): 115-121.
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喇格光栅解调系统[J]. *中国激光*, 2013, **40**(3): 115-121.
- [8] YU You-long, 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): 43-47.
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): 43-47.
- [9] MA Y, WANG C, YANG Y, *et al.* High resolution and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **50**: 107-111.
- [10] WANG Peng, ZHAO Hong, LIU Jie, *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): 77-84.
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, **35**(8): 77-84.
- [11] DE A R B, WERNECK M M, DA SN J L. Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(4): 1259-1264.
- [12] LI Zheng-yin, ZHOU Zu-de, TONG Xing-lin, *et al.* Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 52-57.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 52-57.
- [13] LI Z Y, XU Z Q. Research of high-speed FBG demodulation system for distributed dynamic monitoring of mechanical equipment [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, **5**: 107073.
- [14] ZHANG Jian-fei, ZHUANG Xu-ye, WANG Wei-min, *et al.* Structure design and analysis of a new type MEMs Fabry-Perot filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 160-166.
张建飞, 庄须叶, 汪为民, 等. 一种新型微机电系统法布里-珀罗滤波器的设计与分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 160-166.
- [15] QIAO Xue-guang, WANG Yu, FU Hai-wei, *et al.* High-accuracy real time calibration of tunable Fabry-Perot filter on large range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 852-855.
乔学光, 王瑜, 傅海威, 等. 可调谐法布里-珀罗滤波器的高准确度大范围实时定标[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 852-855.