

# 环境变温下光纤布拉格光栅解调中滤波器 扫描波动抑制研究

江俊峰 闫金玲 王 双\* 刘 琨 刘铁根 臧传军 谢仁伟 何 盼 楚奇梁 潘玉恒

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 光纤传感研究所, 天津 300072

**摘要** 针对可调谐光纤法布里-珀罗滤波器(FFP-TF)在环境温度变化过程中扫频非线性曲线的随机波动增大,引起光纤布拉格光栅(FBG)传感系统解调不稳定的现象,提出了基于光纤迈克尔逊干涉仪的一种稳定解调性能的方法,通过辅助干涉仪实现了对法布里-珀罗标准具光波长间隔的细分,编制了局部光频细分解调算法。利用搭建的光谱周期为9.53 GHz的辅助干涉仪进行了变温解调实验研究,结果表明,以往未引入光纤辅助干涉仪的波长解调值波动的最大幅度为 $\pm 28.5$  pm,标准差为 8.6 pm;引入辅助干涉仪的波长解调值波动的最大幅度为 $\pm 3.5$  pm,标准差为 1.4 pm,有效提高了变温过程中的光纤光栅传感解调波长稳定性。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 辅助干涉仪; 变温; 光纤布拉格光栅; 非线性

**中图分类号** O433.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1206001

## Suppression of Sweeping Fluctuation of Filter in Fiber Bragg Grating Demodulation Under Temperature Changing Environment

Jiang Junfeng Yan Jinling Wang Shuang Liu Kun Liu Tiegen Zang Chuanjun  
Xie Renwei He Pan Chu Qiliang Pan Yuheng

*Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of the Ministry of Education, Institute of Optical Fiber Sensing, School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

**Abstract** For the random fluctuation of nonlinearity curve of fiber Fabry-Perot tunable filter (FFP-TF) increasing in temperature changing environment, which results in the instability of fiber Bragg grating (FBG) demodulation system, a novel method based on auxiliary optical fiber Michelson interferometer (AFMI) to stabilize demodulation performance is proposed. The optical frequency subdivision in wavelength interval of Fabry-Perot etalon is achieved, and the demodulation algorithm by local optical frequency subdivision is compiled. Under temperature changing environment, we investigate amplitude of fluctuation by an AFMI, whose spectral interval is 9.53 GHz. The experiment shows that the amplitude of fluctuation is  $\pm 28.5$  pm without AFMI, and standard deviation is 8.6 pm. However, the amplitude of fluctuation is  $\pm 3.5$  pm with AFMI, and standard deviation is 1.4 pm. The wavelength demodulation stability of fiber Bragg grating in temperature-variable situation is effectively improved.

**Key words** fiber optics; fiber optic sensors; auxiliary interferometer; temperature variation; fiber Bragg grating; nonlinearity

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 300.6420

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种光纤传感器件,具有体积小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、波长选择性

**收稿日期:** 2016-05-09; **收到修改稿日期:** 2016-07-02

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(61227011,61378043,61475114,61505139)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200)、深圳市科技创新委员会课题(JCYJ20120831153904083)、中国空间技术研究院 CAST 创新基金

**作者简介:** 江俊峰(1977—),男,博士,教授,主要从事光纤传感、光电检测和光纤偏振技术等方面的研究。

E-mail: jiangjfjxu@tju.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: sarahwang@tju.edu.cn

好、易复用等优点,广泛应用于土木工程、电力石油、医疗等领域<sup>[1-5]</sup>,并在航天航空、核工业等行业有广阔的应用前景<sup>[6-8]</sup>。可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波法是应用较广的高精度宽量程 FBG 解调方法<sup>[9-10]</sup>。可调谐光纤法布里-珀罗滤波器(FFP-TF)通过压电陶瓷(PZT)的逆压电效应能够实现宽范围的波长扫描,但 PZT 的迟滞、蠕变和非线性等特性使 FFP-TF 的透射波长与 PZT 的驱动信号控制电压的关系曲线不能保持很好的线性和重复性,影响了解调精度。为了校正可调谐滤波器的非线性效应,研究人员提出了多种方法,可在光源波段的大范围内动态地对可调谐滤波器的真实中心波长进行标定,主要有 FBG 参考光栅法<sup>[11-12]</sup>、F-P 标准具法<sup>[13]</sup>、乙炔( $C_2H_2$ )气体吸收谱线参考法<sup>[14]</sup>、复合波长参考法<sup>[15]</sup>等。其中 FBG 参考光栅法提供的波长参考点少,对滤波器的标定比较粗略,且要求参考 FBG 的中心波长稳定,否则易受环境温度影响;F-P 标准具法可在与光源波段匹配的范围内引入间隔均匀的多个波长参考点,在稳态环境温度下能较好地可对可调谐滤波器的真实中心波长进行标定,但在不同稳态温度下 F-P 标准具的中心波长仍有差异。乙炔气体参考法能提供对温度不敏感的波长参考点,但覆盖范围较窄且非均匀分布,峰值提取难度也较大。复合波长参考法则使用 F-P 标准具对滤波器进行标定,并使用温度稳定的气体参考波长对 F-P 标准具的中心波长作进一步的校正,实现了不同稳态或准稳态环境温度下的绝对波长解调,但尚未对变温过程中 FFP-TF 波长扫描非线性曲线随机波动的增大引起的解调值波动进行研究。

PZT 除易受温度影响而使滤波器的中心波长发生漂移外<sup>[16]</sup>,当环境温度较快变化时,PZT 还会使滤波器波长扫描非线性曲线的随机波动增大,尤其在中高速扫描的场合,采用 F-P 标准具和乙炔气体也难以避免波长解调结果出现大幅度波动,导致测量精度大幅降低。而在航空航天领域复杂多变的应用中,环境温度变化剧烈且温度变化范围宽,因此变温过程中对可调谐滤波器波长扫描非线性曲线的随机波动进行研究和抑制非常重要。为了实现在环境温度较快变化时的稳定解调,本文在 F-P 标准具和乙炔气体复合波长参考法<sup>[15]</sup>的基础上,提出通过引入辅助的光纤迈克耳孙干涉仪,在 F-P 标准具相邻干涉谱线之间进行光频细分的方法,有效抑制可调谐滤波器波长扫描非线性曲线随机波动的增大引起的解调结果波动,在起始温度  $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、终止温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$  以及起始温度  $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 、终止温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$  的环境变温过程中,波长解调值波动小于  $\pm 3.5\text{ pm}$ ,稳定性比以往提高 6.5 倍以上。

## 2 基本原理

图 1 为引入辅助光纤迈克耳孙干涉仪的 FBG 传感解调系统。其中,放大自发辐射(ASE)光源、FFP-TF、掺铒光纤放大器(EDFA)构成扫描光源模块,由驱动电路产生锯齿波控制 FFP-TF 实现波长调谐;光纤分路器、光纤环形器阵列、FBG 阵列、光电探测器(PD)阵列构成传感模块;F-P 标准具提供等光频率间隔的波长参考谱线,并通过陷波滤波器滤掉一个峰,便于获得各谱线和相对波长参考值的对应关系; $C_2H_2$  气室提供一条谱线用于获得绝对参考波长;光纤迈克耳孙干涉仪用于光频细分,在 F-P 标准具相邻谱线之间插

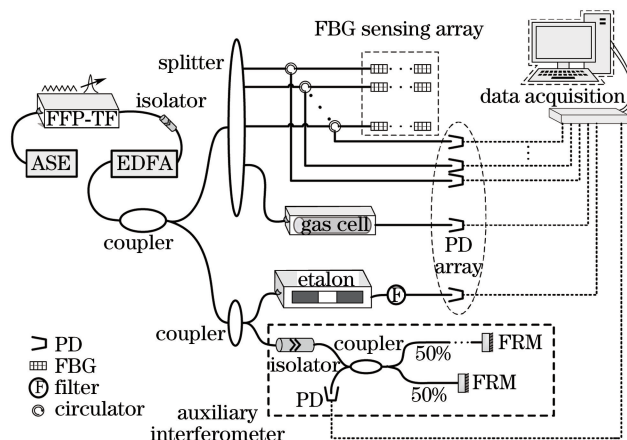


图 1 引入辅助干涉仪的 FBG 传感解调系统

Fig. 1 FBG demodulation system using auxiliary interferometer

入一定周期的干涉谱,通过提取相位点实现光频率细分,与 F-P 标准具共同作为 FBG 传感信号解调的相对波长参考依据,从而实现适用于航空航天等环境温度变化较快场合的高稳定性光纤光栅解调系统。

### 2.1 光纤迈克耳孙干涉仪辅助参考的光频细分原理及稳定性分析

光纤迈克耳孙辅助干涉仪由一个 3 dB 耦合器和两个光纤法拉第旋光镜(FRM)组成,反射光在耦合器中形成双光束干涉,并被光电探测器接收,干涉信号的光强与光纤迈克耳孙干涉仪两臂光程差的关系为

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[ 1 + K \cos \left( \frac{2\pi f}{c} \cdot 2nL \right) \right], \quad (1)$$

式中  $I_0$  为干涉仪输入光强,  $K$  为干涉条纹可见度,  $f$  为波长扫描的瞬时中心光频率,  $c$  为真空中光速,  $n$  为纤芯有效折射率,  $L$  为两臂几何长度差。由(1)式可得干涉谱的光谱极大值频率间隔为

$$f_{\text{interval}} = |f_m - f_{m+1}| = \frac{c}{2nL}, \quad (2)$$

式中  $m$  和  $m+1$  代表干涉谱相邻两个干涉级次,当  $nL$  很大时,可以获得比 F-P 标准具更密的频率间隔。图 2 为干涉仪引入辅助光频率参考的示意图。光谱数据通过对可调谐滤波器扫描过程的等时间间隔采样得到,从图中可以看出引入辅助干涉仪可提供多个附加光频率参考点,用于在环境变温过程中配合 F-P 标准具对可调谐滤波器的非线性曲线进行实时标定。

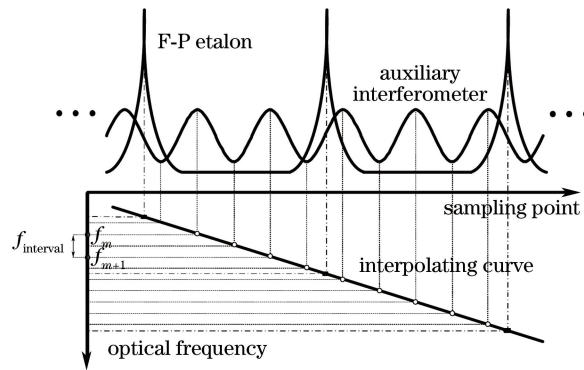


图 2 干涉仪辅助光频率参考示意图

Fig. 2 Diagram of auxiliary optical frequency reference introduced by interferometer

干涉谱光谱极大值的频率间隔  $f_{\text{interval}}$  随光程差的增大而减小,即光程差增大时干涉条纹的周期个数增加。条纹可见度  $K$  由扫描光源光谱谱宽  $\Delta f$  和两臂光程差  $\delta$  决定,在一定的光源光谱谱宽下  $K$  随  $\delta$  的增大而降低,两臂光程差  $\delta$  存在允许最大值,即相干长度

$$\delta_{\text{max}} = \frac{c}{\Delta f}. \quad (3)$$

因此,在选择所引入辅助干涉仪的两臂几何长度差  $L$  时,需综合考虑光程差对干涉条纹个数和条纹可见度的相互制约关系,在系统采样率允许范围内,应尽量增加条纹个数以提供更多附加光频率参考,同时需保证较好的条纹可见度,以降低信号处理复杂度。

采用光纤可调谐滤波器的 3 dB 带宽为 1.6 GHz,相干长度为 187.5 mm。为保证较好的条纹可见度,同时考虑对信号采样率的要求,通过控制两臂臂长差  $L$  为 10.8 mm,获得了室温下光谱极大值的频率间隔  $f_{\text{interval}}$  为 9.53 GHz 的干涉信号谱。由于光纤热光效应和热膨胀效应,温度变化会影响两臂光程差,进而引起干涉条纹的移动,也引起条纹可见度  $K$  和光谱极大值的频率间隔  $f_{\text{interval}}$  的变化。当温度变化  $\Delta T$  时,引起的附加光程差为  $2n(\alpha + \xi/n)L\Delta T$ ,采用典型的光纤热膨胀系数  $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  和光纤热光系数  $\xi = 0.68 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,可得到附加光程差变化系数为  $7.6 \text{ } \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。在  $-50 \sim 80 \text{ } ^\circ\text{C}$  的变温环境下,干涉仪的附加光程差变化  $\Delta\delta$  为  $21.3 \text{ } \mu\text{m}$ ,检测到的信号谱条纹可见度的变化可忽略,光谱极大值的频率间隔  $f_{\text{interval}}$  变化  $0.007 \text{ GHz}$ ,同时引起在 C 波段( $191.6 \sim 196.5 \text{ THz}$ ) 范围内干涉级次变化范围为  $13.6 \sim 14.0$ ,表现为信号谱相对平移  $13.6 \sim 14$  个周期。由于信号谱的条纹可见度变化可忽略,光谱极大值的频率间隔变化也很小,在光频细分时引入的细分点数量基本不变,算法在处理时比较方便。

## 2.2 基于辅助干涉仪的局部光频细分调算法

将 F-P 标准具给定的  $n$  个波长值序列映射到光频率空间,接着对 F-P 标准具透射谱线寻峰得到峰值采样点,再将峰值采样点与光频率序列对应,获得光源谱宽范围内的一级光频率参考。基于一级光频率参考点序列,将整个光源谱范围划分为多个区域  $E_i (i=1,2,3,\dots,n-1)$ ,每个区域的起点和终点分别为 F-P 标准具的两个相邻峰值点  $(\chi_{is}, f_{is})$ 、 $(\chi_{ie}, f_{ie})$ ,如图 3 所示。通过对 FBG 传感器反射谱线寻峰可以将其定位到特定的分区内,在该区域内通过提取辅助干涉仪信号极值,引入附加光频率参考点,实现局部光频细分。

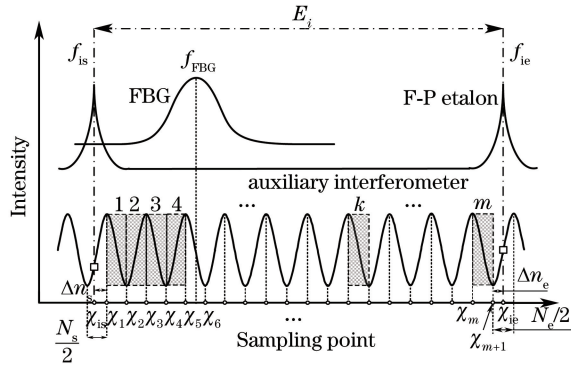


图 3 辅助光频率参考提取方法

Fig. 3 Extracting solution for auxiliary optical frequency reference

将辅助干涉信号谱线去基线,使用质心法将分区内干涉信号的峰谷位置确定,作为次级光频率参考的采样点序列  $(\chi_1, \dots, \chi_{m+1})$ ,同时通过峰谷点个数得到完整半周期的个数  $m$ ,靠近分区起点和终点的非完整半周期个数通过计算其在所处半周期中所占百分比确定,最终得到分区内干涉信号的半周期数为

$$n_{T/2} = \frac{\Delta n_s}{N_s/2} + \frac{\Delta n_e}{N_e/2} + m, \quad (4)$$

式中  $\Delta n_s$  为分区内第一个峰(谷)值点与分区起点  $\chi_{is}$  的采样点间距,  $N_s/2$  为  $\chi_{is}$  所处的干涉半周期采样点个数,  $\Delta n_e$  为分区内最后一个峰(谷)值点与分区终点  $\chi_{ie}$  的采样点间距,  $N_e/2$  为  $\chi_{ie}$  所处的干涉半周期采样点个数。从而得到次级光频率参考的光频率值为

$$\begin{cases} f_1 = f_{is} + \frac{f_{ie} - f_{is}}{n_{T/2}} \cdot \frac{\Delta n_s}{N_s/2} \\ f_k = f_{k-1} + \frac{f_{ie} - f_{is}}{n_{T/2}}, \quad 2 \leq k \leq m. \\ f_{m+1} = f_{ie} - \frac{f_{ie} - f_{is}}{n_{T/2}} \cdot \frac{\Delta n_e}{N_e/2} \end{cases} \quad (5)$$

由 F-P 标准具提供的一级光频率参考和由辅助干涉仪提供的次级光频率参考通过样条插值建立分区内采样点与光频率的函数关系。基于 F-P 标准具和辅助干涉仪的采样点-光频率函数计算得到 FBG 传感器的峰值光频率  $f_{FBG}$ 。通过光频率和波长的关系得到 FBG 传感器的峰值波长  $\lambda_f$ ,作为相对波长解调结果。同理,通过对  $C_2H_2$  气体参考谱线寻峰定位到特定的分区,用上述方法得到参考谱线的峰值波长  $\lambda_g$ 。最终将 FBG 传感器的真实波长表示为<sup>[15]</sup>

$$\lambda_{FBG} = \lambda_f - \eta(\lambda_g - \lambda_r), \quad (6)$$

式中  $\eta$  为气体对波长的校正量系数,  $\lambda_r$  为气体参考谱线真实波长。

## 3 实验分析和验证

按图 1 搭建实验系统,采用 C 波段光功率为 10 mW,带宽为 40 nm 的 ASE 光源,经过光衰减器衰减满足可调谐滤波器的入口光功率要求。可调谐滤波器的自由光谱范围为 11579 GHz (92.2 nm),3 dB 带宽为 1.6 GHz (12.7 pm),使用 200 Hz 锯齿波驱动光纤可调谐滤波器,扫描光经 EDFA 放大,经过 20:80 的光纤耦合器分成两部分。80% 的光经过  $1 \times 8$  的光纤分路器,其中 7 路经过环形器进入 FBG 传感与探测链路;剩



余 1 路进入  $C_2H_2$  气室,探测器接收其透射光。20% 的光经 3 dB 耦合器分为两路,一路进入 F-P 标准具,探测器接收其透射光;另一路进入光纤迈克耳孙辅助干涉仪,探测器接收其干涉光。标准具的自由光谱范围为 100.02 GHz,  $-5\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$  范围内的热稳定性小于等于  $\pm 0.731\text{ GHz}$  ( $\pm 5.8\text{ pm}$ )。光纤迈克耳孙辅助干涉仪的两臂几何长度差为 10.8 mm,光谱极大值的频率间隔为 9.53 GHz。

实验中将光学系统部分的可调谐滤波器、光纤迈克耳孙辅助干涉仪、F-P 标准具、 $C_2H_2$  气室置于温控箱中,温控箱用于提供变温环境条件。图 4(a)~(d) 为变温过程中扫描行程下采集到的三种参考信号以及传感信号的测试数据,其中辅助干涉仪干涉谱和气室透射谱已去基线。图 4(e) 为其中一只 FBG 传感器所处分区的各通道局部信号叠加,可以看出辅助干涉仪在 F-P 标准具相邻两个谱线确定的分区中引入大于 20 个附加光频率参考点。

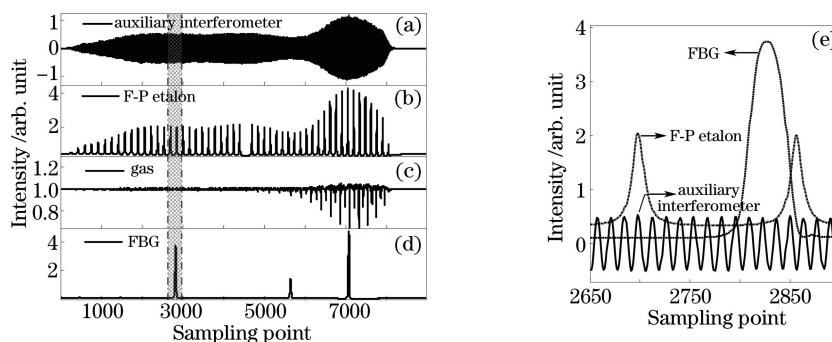


图 4 各通道测试数据。(a) 辅助干涉仪; (b) F-P 标准具; (c)  $C_2H_2$  气室; (d) FBG; (e) 局部信号叠加  
Fig. 4 Test data per channel. (a) Auxiliary interferometer; (b) F-P etalon; (c)  $C_2H_2$  gas cell; (d) FBG; (e) superposition of local signals

图 5 为对光纤可调谐滤波器使用 F-P 标准具以及增加光纤迈克耳孙辅助干涉仪后得到的采样点-光频率标定曲线,从图中可以看出,利用光纤迈克尔辅助干涉仪引入的附加光频率参考能够反映出波长扫描行程中可调谐滤波器扫描非线性曲线更为真实的细节,这些细节在只使用 F-P 标准具得到的非线性曲线中难以体现。

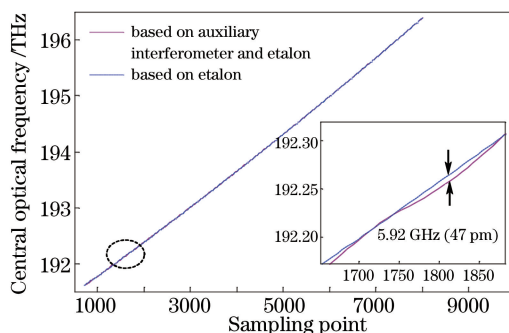


图 5 变温环境采样点-光频率标定曲线比较

Fig. 5 Comparison of sampling point-central optical frequency calibration curve in temperature changing environment

将中心波长分别为 1531.633, 1540.327, 1555.143 nm(对应编号分别为 1、2、3)的 FBG 温度传感器置于恒温浴槽中保温在  $30\text{ }^\circ\text{C}$ 。恒温浴槽温度稳定性为  $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ , 传感器温度灵敏度为  $10.2\text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 因此浴槽温度波动引起的传感器波长变化为  $\pm 1\text{ pm}$ 。实验使用两种方法进行 FBG 波长解调对比研究: 方法一采用传统的 F-P 标准具波长参考方法进行 FBG 传感器的相对波长解调, 并使用气室波长校正量对相对波长值作校正; 方法二采用提出的基于光纤迈克耳孙辅助干涉仪和 F-P 标准具的局部附加光频参考法对 FBG 传感器进行相对波长解调, 同样使用气室波长校正量作校正。将温控箱的起始温度设置为  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , 终止温度设为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 记录 50 min 内的实验数据, 图 6(a)~(c) 为使用两种方法得到的三支传感器的波长解调结果, 图 6(d) 为环境温度变化曲线, 温度从 90% 降至 10% 用时 27.7 min, 变温的平均速率为  $1.2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。可以看出, 由两种方法得到的各传感器的波长解调值都在其真值附近波动, 提出的局部附加光频参考法具有明显的波动抑

制效果。再将温控箱的起始温度设置为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，终止温度设为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，记录35 min内的实验数据，图7(a)~(c)为此过程中三支传感器波长解调结果，图7(d)表明，温度从10%升至90%只用时14.6 min，平均变温速率为 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。可以看出该方法同样能够有效抑制波动。表1为两个变温过程中三支传感器的波长解调结果变化范围、最大测量误差和标准差。使用传统方法求得的解调值非线性波动为 $\pm 28.5\text{ }\mu\text{m}$ ，标准差为 $8.6\text{ }\mu\text{m}$ ，而使用本文提出的局部附加光频参考法可将波动抑制在 $\pm 3.5\text{ }\mu\text{m}$ 以内，相对传统方法提高6.5倍，标准差低于 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ ，减少为传统方法的17%，可见基于光纤迈克耳孙辅助干涉仪的局部附加光频参考法具有良好的变温解调稳定性。

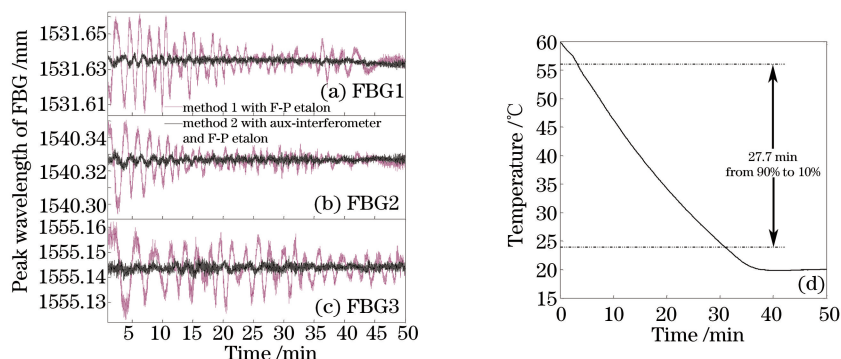


图6 起始温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、终止温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变温环境下基于辅助干涉仪的局部附加光频参考法和基于F-P标准具波长参考法的FBG解调结果。(a) FBG1；(b) FBG2；(c) FBG3；(d) 环境变温曲线

Fig. 6 Wavelength of FBG demodulated by partial optic-frequency reference based on auxiliary interferometer and by wavelength reference based on etalon when temperature varies from  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

(a) FBG1；(b) FBG2；(c) FBG3；(d) environmental temperature changing curve

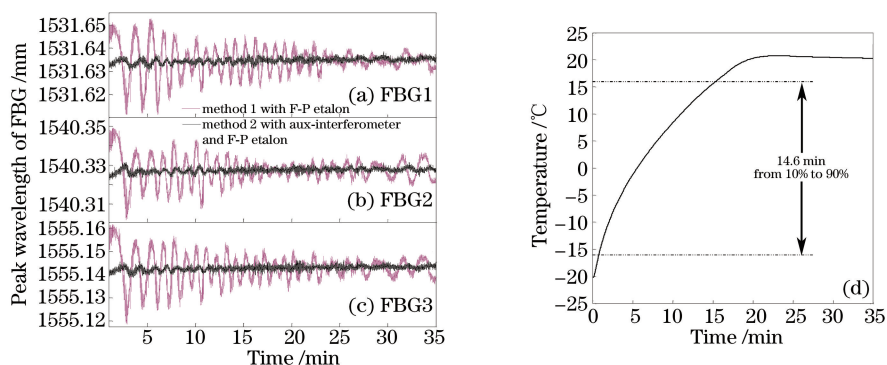


图7 起始温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，终止温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的变温环境下基于辅助干涉仪的局部附加光频参考法和基于F-P标准具波长参考法的FBG解调结果。(a) FBG1；(b) FBG2；(c) FBG3；(d) 环境变温曲线

Fig. 7 Wavelength of FBG demodulated by partial optic-frequency reference based on auxiliary interferometer and by wavelength reference based on etalon when temperature varies from  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

(a) FBG1；(b) FBG2；(c) FBG3；(d) environmental temperature changing curve

表1 两种方法的FBG波长解调结果和误差

Table 1 FBG wavelength demodulation results and errors of two methods

	FBG1		FBG2		FBG3	
	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2	Method 1	Method 2
Wavelength	1531.605—	1531.632—	1540.294—	1540.324—	1555.118—	1555.141—
variation range /nm	1531.662	1531.639	1540.350	1540.331	1555.163	1555.147
Maximum measurement error (MME) / $\mu\text{m}$	$\pm 28.5$	$\pm 3.5$	$\pm 28.2$	$\pm 3.5$	$\pm 22.5$	$\pm 3.0$
Standard deviation (SD) / $\mu\text{m}$	8.6	1.4	7.1	1.2	6.4	1.1

## 4 结 论

针对航空航天等应用中需在温度变化较快的环境下实现 FBG 稳定解调的要求,提出了基于光纤迈克耳孙辅助干涉仪的方法来抑制变温过程中可调谐滤波器非线性曲线随机波动增大引起的解调结果波动,通过 F-P 标准具波长间隔进行光频率细分,编制局部光频细分解调的算法,对 FBG 的相对波长移动进行了解调,再利用 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气室绝对波长参考谱线进行了波长校正。搭建了两臂几何差为 10.8 mm,干涉光谱极大值的频率间隔为 9.53 GHz (76.2 pm)的光纤迈克耳孙辅助干涉仪,可在自由光谱范围为 100.02 GHz 的 F-P 标准具相邻谱线之间引入多于 20 个附加光频率参考点,通过实验验证了基于光纤迈克耳孙辅助干涉仪的方法对非线性曲线随机波动增大引起解调值波动的抑制效果。实验结果表明,在起始温度 60 °C、终止温度 20 °C 以及起始温度 -20 °C、终止温度 20 °C 的环境变温过程中,使用 F-P 标准具和 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气室的解调波长波动幅度为 ±28.5 pm,标准差 8.6 pm;当增加辅助干涉仪进行光频细分解调时,解调波长波动幅度小于 ±3.5 pm,标准差 1.4 pm,因此变温环境中将解调波长波动幅度稳定性提高 6.5 倍,标准差减小为传统方法的 17%,对可调谐滤波器波长扫描非线性曲线随机波动增大引起的解调值波动取得良好的抑制效果,有效提高了解调结果稳定性。

## 参 考 文 献

- Schubel P J, Crossley R J, Boateng E K G, *et al.* Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades[J]. *Renewable Energy*, 2013, 51: 113-123.
- 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.
- Bai W, Yang M H, Dai J X, *et al.* Novel polyimide coated fiber Bragg grating sensing network for relative humidity measurements[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3230-3237.
- Roriz P, Carvalho L, Frazão O, *et al.* From conventional sensors to fibre optic sensors for strain and force measurements in biomechanics applications: A review[J]. *Journal of Biomechanics*, 2014, 47(6): 1251-1261.
- Christopher K Y, Leung C K Y, Wan K T, *et al.* Review: optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(4): 871-906.
- Chan H M, Parker A R, Piazza A, *et al.* Fiber-optic sensing system: Overview, development and deployment in flight at NASA[C]. *IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference*, 2015: 71-73.
- Gupta N, Augustin M J, Sathya S, *et al.* Structural health monitoring of composite aircraft structures using fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of the Indian Institute of Science*, 2013, 93(4): 735-750.
- Gusarov A, Hoeffgen S K. Radiation effects on fiber gratings[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2013, 60(3): 2037-2053.
- Yang Gang, Xu Guoliang, Tu Guojie, *et al.* High precision fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on spectrum segmentation[J]. *Chinese J 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.
- Li Zhengying, Zhou Zude, Tong Xinglin, *et al.* Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306007.  
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): 0306007.
- Liu K, Jing W C, Peng G D, *et al.* Investigation of PZT driven tunable optical filter nonlinearity using FBG optical fiber sensing system[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(12): 3286-3290.
- 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): 0806006.  
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): 0806006.
- Liang Xiao, Liu Tiegeng, Liu Kun, *et al.* Method of real-time calibration for tunable optical filter nonlinearity[J]. *Chinese J 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.
- Qiao Xueguang, Wang Yu, Fu Haiwei, *et al.* High-accuracy real time calibration of tunable Fabry-Pérot filter on large range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 852-855.  
乔学光, 王 谕, 傅海威, 等. 可调谐法布里-珀罗滤波器的高精度大范围实时定标[J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 852-

855.

- 15 Jiang Junfeng, He Pan, Liu Tiegen, *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.
- 16 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.