

基于双可调谐激光器的光纤法布里-珀罗声振动传感解调系统研究

樊 茁 王 双* 刘铁根 刘 琨 何 盼 张天昊

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

摘要 为实现光纤法布里-珀罗(F-P)腔初始腔长和腔长变化量在宽范围条件下的声振动传感解调,提出了基于双可调谐激光器的正交相位提取方法。理论计算了保持相位正交的光纤F-P腔初始腔长范围。仿真和实验研究了初始腔长漂移对信号解调的影响,实验通过改变温度实现了初始腔长0~2.2 μm 的漂移,在此情况下对干涉强度法和正交相位提取法解调结果进行了对比分析,正交相位提取法解调信号幅值相对变化小于5.3%,其稳定性比干涉强度法解调信号幅值稳定性提高了12.4倍。利用波长调谐补偿实现了传感器初始腔长范围55~130 μm 的覆盖,解调信号幅值相对变化小于4.9%。

关键词 传感器; 光纤声振动传感; 光纤法布里-珀罗腔; 波长调谐; 相位解调

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.042801

Research of Optical Fiber Fabry-Perot Acoustic Vibration Sensing Demodulation System Based on Dual Tunable Lasers

Fan Zhuo Wang Shuang Liu Tiegeng Liu Kun He Pan Zhang Tianhao

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In order to realize the Fabry-Perot (F-P) acoustic vibration sensing demodulation working under wide range of optical fiber F-P initial cavity length and cavity length shift, a kind of quadrature phase extracting method based on dual tunable lasers is proposed. The range of initial cavity length which keeps quadrature phase is calculated theoretically. The influence of initial cavity length drift on signal demodulation is studied by theoretical simulation and experiment. Initial cavity length drift of 0~2.2 μm is achieved by changing temperature. In this case, interference intensity demodulation method and quadrature phase extracting method are compared and analyzed: relative change of demodulation signal amplitude by quadrature phase extracting method is less than 5.3%; the stability of demodulation signal amplitude by quadrature phase extracting method is 12.4 times as much as that by interference intensity demodulation method. Initial cavity length of 55~130 μm is realized by wavelength tuning compensation and relative change of demodulation signal amplitude is less than 4.9%.

Key words sensors; optical fiber acoustic vibration sensing; optical fiber Fabry-Perot cavity; wavelength tuning; phase demodulation

OCIS codes 280.4788; 060.2370; 050.2230; 060.5060; 140.3600

收稿日期: 2015-11-04; 收到修改稿日期: 2015-11-09; 网络出版日期: 2016-03-28

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(13JCYB-JC16200)、深圳市科技创新委员会(JCYJ20120831153904083)、中国空间技术研究院CAST创新基金项目、新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室开放课题基金(201403)、光电信息技术教育部重点实验室开放基金(2014KFKT021)

作者简介: 樊 茁(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤法布里-珀罗声振动传感方面的研究。

E-mail: fzyunling@163.com

导师简介: 江俊峰(1977—),男,博士,教授,博士生导师,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: sarahwang02166@gmail.com

1 引言

与传统电学声振动传感器相比,光纤法布里-珀罗(F-P)声振动传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、抗电磁干扰能力强和便于远距离遥测等优点,在航空航天、民用基础设施的安全监测等领域有很好的应用前景^[1-5]。光纤F-P声振动传感器传感的对象是快速变化的信号,因此解调速度是其被关注的重点。研究人员提出的方法主要包括基于光损耗型强度解调、干涉型强度解调和干涉型正交相位解调^[6-11]。光损耗型强度解调利用光纤与反射膜间距离变化导致的光损耗变换感知待测声信号,干涉型强度解调利用光干涉将光程变化信息变换成强度输出。上述两种方法的光电探测器直接输出信号即为待测信号,因此具有解调简单、响应速度快的优点,但是容易受到光源功率波动、光纤传输链路中的损耗变化以及偏离传感器正交工作点等因素的影响。尤其干涉型强度解调需要保持传感器工作在干涉传递函数的正交点,而实际应用环境中的温度等因素会使光纤F-P声振动传感器初始腔长发生漂移,导致偏离正交工作点并降低传感器的灵敏度和线性度,甚至导致信号严重畸变失真^[12]。为了解决上述问题,研究人员提出了多种干涉型正交相位解调,利用2个F-P腔构建2个正交的干涉信号,可以实现正交相位解调,但这类传感器的制作较为困难^[6-7]。利用2个波长的光干涉同样可以构建正交的2个干涉信号输出,如Fürstenau等^[8]提出采用宽带光源和2个可调谐干涉滤波器的解调结构,通过机械装置调节干涉滤波器的倾斜角度实现滤波波长的调谐,从而灵活地满足正交相位条件,但机械调整也带来稳定性差和体积较大的问题。Zhao等^[9]采用固定的密集波分复用器(WDM)代替可调谐干涉滤波器,从而方便采用商业化器件构成系统。Dahlem等^[10]采用光纤光栅作为光滤波器实现全光纤解调结构。Schmidt等^[11]采用3个波长构建3个依次正交的干涉信号,进一步提高解调信号稳定性。由于上述方法中输入光信号是从宽谱光源中通过光滤波器滤出得到,大量的光功率被浪费,又由于光纤F-P声振动传感器的反射率低,因此探测器接收到的光功率很低,难以满足长距离或光纤传输损耗大的场合。

在航天结构健康监测中,需要面临真空冷黑环境,其特点是冷冻温度和宽的温度变化范围^[9]。宽温工作范围将使光纤F-P声振动传感器产生较大的光纤F-P腔长漂移,而传输光纤在冷冻温度环境布设时,冷冻收缩导致的微弯可能会引起较大的光路损耗^[13]。此外空间辐照也将引起光纤传输损耗增大,单模光纤在辐照总剂量为8.5 Mrads时,衰减可达到50 dB/km^[14]。为适应航天监测要求,本课题组进行了基于双激光器的波长可调谐正交相位解调研究。通过采用2个分布反馈式(DFB)激光器提供窄线宽的双激光波长,构建了2路正交干涉信号,使用具有高输出功率的单色光可有效保证信号强度,而利用温控对DFB激光器进行波长调谐,实现了具有宽范围的光纤F-P腔初始腔长和腔长变化的传感解调性能。在初始腔长范围为55~130 μm 的情况下,通过双波长调谐使解调信号幅值相对变化小于4.9%;在2个激光器波长均固定时,光纤F-P声振动传感器在20 $^{\circ}\text{C}$ ~70 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围下,解调信号幅值相对变化小于5.3%。

2 基于双可调谐激光器的光纤F-P声振动传感解调系统

图1为基于双可调谐激光器的光纤F-P声振动传感解调系统结构图。2个可调谐DFB激光器构成系统双波长光源,波分复用器、光纤耦合器和光电探测器构成光纤F-P声振动传感通道,数据采集卡及计算机为系统的数据采集、处理模块。光纤F-P声振动传感器结构如图2所示,其通过固定在金属套圈上的超薄聚合物膜片感受声振动信号,光纤固定在D型毛细管中,光纤端面 and 聚合物膜片构成光纤F-P腔,D型毛细管

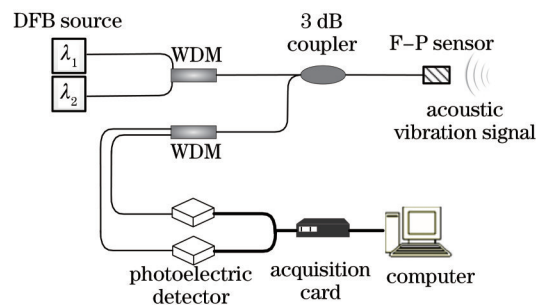


图1 基于双可调谐激光器的光纤F-P声振动传感解调系统

Fig.1 Optical fiber F-P acoustic vibration sensing demodulation system based on dual tunable lasers

与外部套管之间构成通路,用以平衡微腔内外压强^[3]。2个具有不同波长的DFB激光器输出的激光通过波分复用器合束到单根光纤中,经3 dB耦合器入射到光纤F-P声振动传感器产生干涉,由于2个反射面的反射率均非常小,可近似成双光束干涉。通过温控驱动调节光源波长,可使2个波长产生的2路干涉信号正交。通过波分复用器分离出2个波长下的光信号,并经光电探测器转换为电信号,然后由数据采集卡对2路干涉信号进行采集并传输到计算机中进行相位计算。

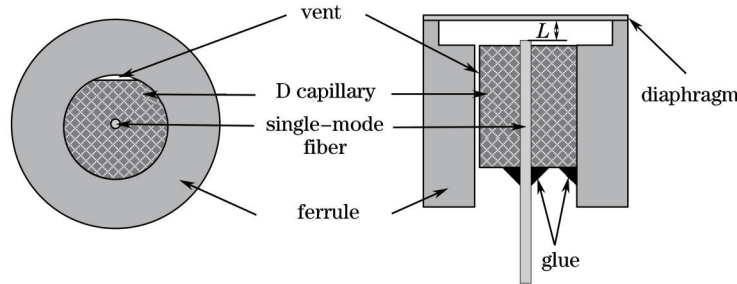


图2 光纤F-P声振动传感器

Fig.2 Configuration of optical fiber F-P acoustic vibration sensor

2.1 光纤F-P腔长的正交相位提取

假定光纤F-P声振动传感器F-P腔的初始腔长为 L_0 ,为得到2路正交的干涉信号,需选择光源的波长 λ_1 、 λ_2 使对应干涉信号的相位 φ_1 、 φ_2 满足

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 4\pi \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} L_0 = n\pi + \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

式中 $n=0,1,2,3,\dots$ 。由于干涉可近似为双光束干涉,则满足理想正交的双波长2路干涉信号分别为 $f_1 = A + B \cos \varphi(t)$ 、 $f_2 = A + B \sin \varphi(t)$,其中 A 为干涉常数项, B 为干涉项的振幅, $\varphi(t)$ 为受声振动信号调制的相位信息, $\varphi(t) = 2kL(t)$, $k = 2\pi/\lambda_1$, $L(t)$ 为受声振动信号调制的光纤F-P腔腔长。

提取2路干涉信号的交流项并归一化得到 $g_1 = \cos \varphi(t)$ 、 $g_2 = \sin \varphi(t)$,则相位信息 $\varphi(t)$ 为

$$\varphi(t) = \int_0^t [g_1' g_2' - g_1 g_2'] dt. \quad (2)$$

正交相位提取直接解调出的相位信息与光纤F-P腔变化呈线性比例关系,避免了传统强度解调法中在非线性区域的信号存在的畸变失真问题,使允许的腔长变化量增大,从而提高了测量的动态范围。

2.2 保持相位正交的光纤F-P腔中初始腔长的选取

满足(1)式的一系列双波长组合均可构建2路正交信号,由于 $n=0$ 时,对应的双波长组合获得的相位正交性受腔长变化影响最小,因此选择为实际应用的波长组合。图3为固定 $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$,光纤F-P腔初始腔长在 $5 \sim 300 \mu\text{m}$ 下满足正交条件的 λ_1 ,如图所示,当光纤F-P腔初始腔长 L_0 小于 $17 \mu\text{m}$ 时, λ_1 随 L_0 的增加迅速增大,即 λ_1 对腔长变化敏感,容易偏离相位正交条件;当 L_0 大于 $55 \mu\text{m}$ 时, λ_1 随 L_0 的变化率小于 0.1 , λ_1 对腔长变化不敏感,易保持相位正交条件。故为获得稳定的相位正交条件,应使光纤F-P腔初始腔长 $L_0 \geq 55 \mu\text{m}$ 。

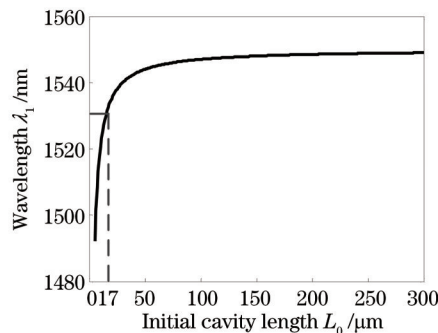


图3 波长 λ_2 固定时,波长 λ_1 随初始腔长变化的理论计算曲线

Fig.3 Theoretical calculation curve of wavelength λ_1 with initial cavity length variation when wavelength λ_2 is fixed

光纤 F-P 腔初始腔长的选取还受到干涉信号质量的限制,因为随着腔长的增加,反射并耦合回光纤的光信号不断减弱,使干涉条纹对比度和幅值下降。这里对实际使用的光纤 F-P 声振动传感器的干涉特性进行了计算,图 4 为归一化后的干涉条纹对比度 K 和干涉信号幅值随初始腔长 L_0 的变化曲线。当 L_0 为 $72 \mu\text{m}$ 时, K 为最大,当 L_0 在 $25\sim 133 \mu\text{m}$ 范围, K 衰减小于 2%;由图 4(b)可知,当 $L_0 \leq 133 \mu\text{m}$ 时干涉信号幅值衰减小于 37%。

因此,为得到良好的原始干涉信号质量,保证后续解调效果,综合考虑选择光纤 F-P 声振动传感器的初始腔长 $55 \mu\text{m} \leq L_0 \leq 133 \mu\text{m}$ 作为系统的工作初始腔长。

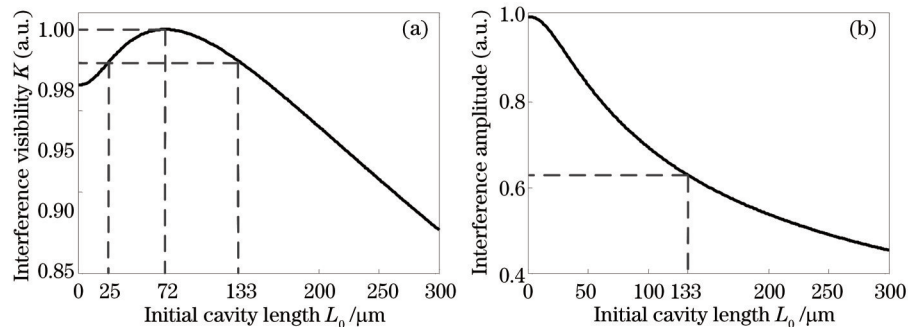


图 4 (a) 归一化干涉条纹对比度 K 和(b) 归一化干涉信号幅值随初始腔长 L_0 变化的理论计算曲线

Fig.4 Theoretical calculation curves of (a) normalized interference visibility K and (b) normalized interference amplitude with initial cavity length L_0 variation

2.3 光纤 F-P 声振动传感器初始腔长漂移的影响和波长调谐补偿

在实际应用中由于环境温度变化等因素影响,光纤 F-P 腔初始腔长会产生漂移,使得选定的 2 个波长产生的 2 路干涉信号不再保持相位正交,即产生正交相位的偏离,从而影响解调结果。图 5(a)是初始腔长在 $55 \mu\text{m} \leq L_0 \leq 130 \mu\text{m}$ 时正交相位偏离角度随初始腔长漂移的变化曲线。随着初始腔长的增加,正交相位偏离变化斜率逐渐减小,初始腔长 $L_0 = 55 \mu\text{m}$ 时的正交相位偏离变化斜率为 $0.03 \text{ rad}/\mu\text{m}$,初始腔长 $L_0 = 130 \mu\text{m}$ 时的正交相位偏离变化斜率为 $0.01 \text{ rad}/\mu\text{m}$ 。图 5(b)为对应图 5(a)中由于正交相位偏离引起的解调信号衰减率,对于 $55 \mu\text{m} \leq L_0 \leq 130 \mu\text{m}$ 范围内的初始腔长,当初始腔长漂移 $|\Delta L| \leq 11 \mu\text{m}$ 时,解调信号衰减较小,均小于 5%。

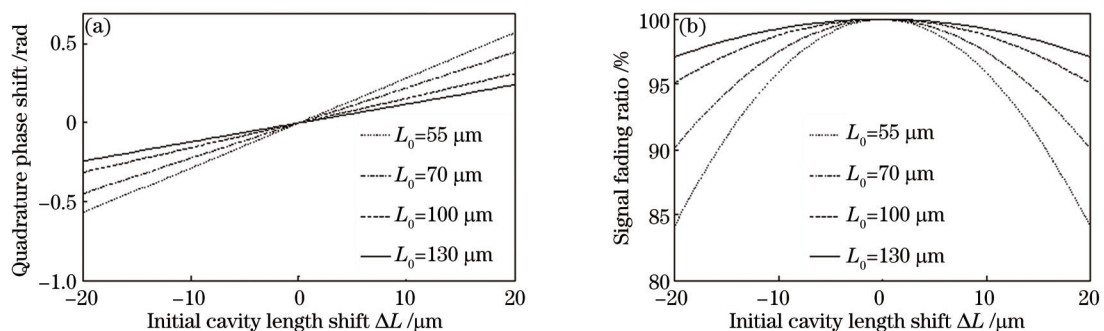


图 5 (a) 正交相位偏离角度和(b)信号衰减率随初始腔长漂移量变化仿真曲线

Fig.5 Simulation curves of (a) quadrature phase shift and (b) signal fading ratio with initial cavity length shift variation

当接入的光纤 F-P 声振动传感器的初始腔长值本身存在较大的离散时,则必须通过调谐激光波长补偿正交相位的偏离。对于条纹对比度最大时的传感器初始腔长 $L_0 = 72 \mu\text{m}$,保持正交相位的 2 个远程通讯标准化(ITU-T)波长可以选择为 $\lambda_1 = 1546.02 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1550.12 \text{ nm}$ 。当 2 个激光器波长调谐范围均为 $\pm 1 \text{ nm}$ 时,则可保持正交相位的初始腔长分布如图 6 所示,从图中可以看出,此时覆盖初始腔长范围达到 $49\sim 143 \mu\text{m}$ 。

3 实验结果及分析

搭建的实验系统如图 1 所示,2 个 DFB 激光器的中心波长分别为 $\lambda_1 = 1546.02 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1550.12 \text{ nm}$,波长

调谐范围为 ± 1 nm, 输出功率为 10 mW。使用信号发生器输出频率 1 kHz 的正弦信号驱动扬声器作为声振动信号源。

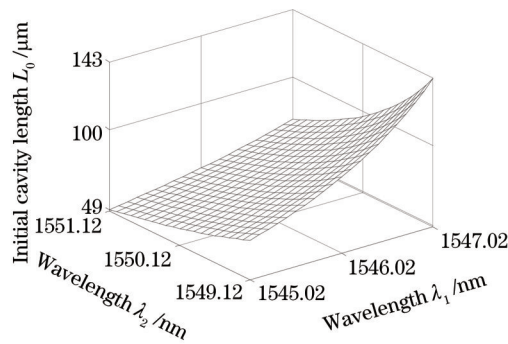


图6 波长调谐时保持正交相位的初始腔长

Fig.6 Initial cavity lengths keeping quadrature phase when tuning wavelengths

3.1 光纤 F-P 声振动传感器初始腔长漂移对信号解调影响的实验研究

通过改变温度使光纤 F-P 声振动传感器初始腔长产生漂移, 研究解调系统受初始腔长漂移的影响。自制的光纤 F-P 声振动传感器初始腔长 $L_0 = 72 \mu\text{m}$, 光纤 F-P 声振动传感器置于温控装置中, 温度变化范围为 $20 \sim 70^\circ\text{C}$, 温度变化间隔为 5°C 。图 7 为温度引起的光纤 F-P 声振动传感器初始腔长漂移示意图, 其中图 7(a) 为光纤 F-P 声振动传感器在 20°C 和 70°C 下的反射光谱曲线, 图 7(b) 为光纤 F-P 腔的腔长随温度的变化曲线。可见腔长随着温度升高逐渐增大, 70°C 时的腔长相比 20°C 时的腔长增加了 $2.2 \mu\text{m}$ 。由于用于传感器固定的环氧树脂胶的热膨胀系数在不同温度下有所不同, 故传感器腔长随温度变化呈非线性趋势^[15]。

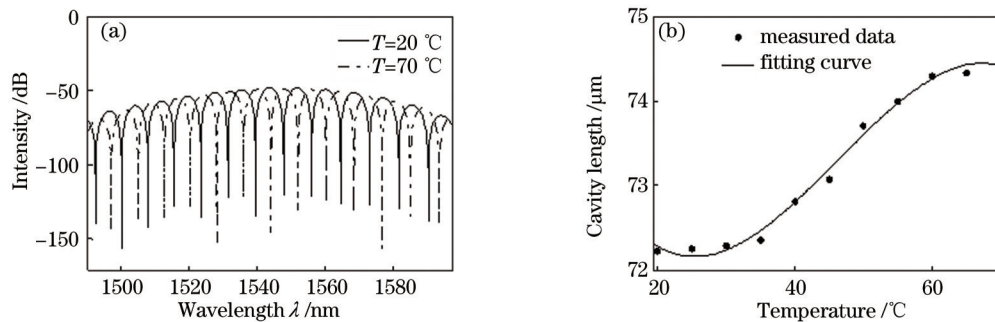


图7 (a) 传感器在 20°C 和 70°C 下的反射光谱曲线; (b) 传感器在不同温度下的腔长曲线

Fig.7 (a) Reflection spectra of sensor with temperatures at 20°C and 70°C ; (b) cavity length as a function of temperature

图 8 为系统解调结果, 选取 1 个通道的信号进行干涉强度解调, 与正交相位提取法进行对比。2 种解调方法均选取 20°C 下各自的解调结果作为归一化参考点。图 8(a) 为干涉强度法解调结果, 温度变化引起的初始腔长漂移使干涉强度解调法解调信号幅值发生明显变化, 甚至波形失真。图 8(b) 为正交相位提取法解调

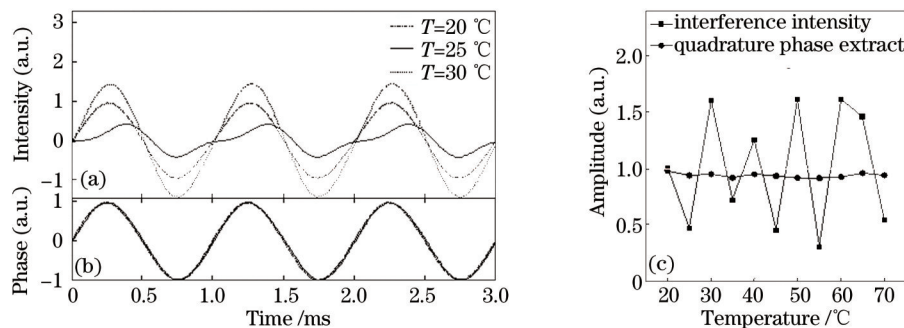


图8 (a) 干涉强度法解调结果; (b) 正交相位提取法解调结果; (c) 2 种方法在不同温度下解调信号幅值

Fig.8 (a) Demodulation results by interference intensity method; (b) demodulation results by quadrature phase extracting method; (c) demodulation signal amplitudes under different temperatures by two methods

结果,其解调信号幅值稳定,且波形恢复完好无失真现象。图8(c)为2种方法在不同温度下解调信号幅值对比图,采用干涉强度法的信号解调幅值相对变化达到71.0%,采用正交相位提取法的信号解调幅值相对变化仅为5.3%,信号解调幅值稳定性提高了12.4倍,有效减少了初始腔长漂移引起的幅值波动。

3.2 波长调谐补偿的初始腔长适应性实验研究

为进一步研究双波长正交可调谐相位提取方法对应的光纤F-P声振动传感器腔长适应范围,制作了初始腔长分别为55、70、100、130 μm 的光纤F-P声振动传感器。图9(a)和图9(b)分别为波长调谐前后的正弦信号还原结果图。在波长调节前,初始腔长为55、70、100、130 μm 的4个传感器对应的解调信号幅值分别为0.073、0.088、0.047、0.028 rad,这是由于相位正交偏离较大使解调信号发生衰减的现象。根据图6对激光器的波长进行调谐,解调信号幅值增大,分别为0.093、0.095、0.101、0.096 rad,解调幅值相对变化为4.9%,有效克服了光纤F-P声振动传感器的初始腔长值离散引起的解调信号衰减问题,验证了 ± 1 nm的激光器波长调谐可覆盖55~130 μm 初始腔长范围。

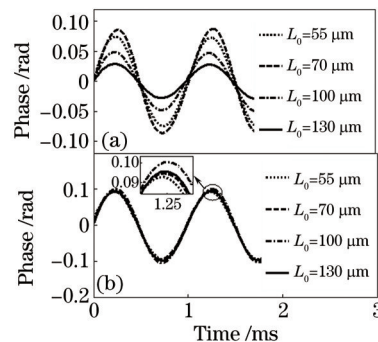


图9 (a)波长调谐前和(b)波长调谐后不同初始腔长下的解调结果

Fig.9 Demodulation results under different initial cavity lengths (a) before wavelength and (b) after wavelength are tuned

4 结 论

针对在航天结构健康监测中真空冷黑环境使光纤F-P腔长漂移增大和光路损耗增大的问题,研究了基于双激光器的波长可调谐正交相位解调系统。通过采用DFB激光器作为具有高输出功率的单色光源,保证了干涉信号强度。理论计算了保持相位正交的光纤F-P腔初始腔长范围,分析了初始腔长漂移对相位提取的影响,以及波长调谐补偿对传感器初始腔长较大离散的适应性。通过改变光纤F-P声振动传感器环境温度进行了不同初始腔长漂移量下干涉强度法解调和正交相位提取法解调对比实验,在初始腔长漂移量2.2 μm 范围,基于双激光器的正交相位提取法的解调幅值相对变化仅为5.3%,比干涉强度法解调信号幅值提高了12.4倍;在初始腔长为55、70、100、130 μm 的情况下,解调信号幅值相对变化小于4.9%,验证了 ± 1 nm的激光器波长调谐对55~130 μm 初始腔长范围的覆盖。实现了光纤F-P腔初始腔长和腔长变化量在宽范围条件下的声振动传感解调。

参 考 文 献

- 1 Wang Wenyuan, Wen Jianxiang, Pang Fufei, *et al.*. All single-mode fiber Fabry-Pérot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005001.
王文轶, 文建湘, 庞拂飞, 等. 飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005001.
- 2 Zhao Peng, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.*. Fiber optic acoustic vibration sensor for the monitoring of water sublimator [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0106003.
赵 鹏, 刘铁根, 江俊峰, 等. 用于水升华器监测的光纤声振动传感器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0106003.
- 3 Leng J S, Asundi A. Non-destructive evaluation of smart materials by using extrinsic Fabry-Pérot interferometric and fiber Bragg grating sensors[J]. NDT & E International, 2002, 35(4): 273-276.
- 4 Zhang Weichao, Zhao Hong, Chu Xiong. Partical discharge acoustic emission sensor design based on extrinsic fiber Fabry-Pérot interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406002.

- 张伟超, 赵 洪, 楚 雄. 基于非本征光纤法布里-珀罗干涉仪的局放声发射传感器设计[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406002.
- 5 Zhu Jiali, Wang Ming, Cai Dongyan, *et al.*. A fiber Fabry-Perot micro pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0428002.
- 朱佳利, 王 鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里-珀罗微压传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0428002.
- 6 Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, *et al.*. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors [J]. Opt Lett, 1991, 16(4): 273-275.
- 7 Santos J L, Jackson D A. Passive demodulation of miniature fiber-optic-based interferometric sensors using a time-multiplexing technique[J]. Opt Lett, 1991, 16(15): 1210-1212.
- 8 Fürstenau N, Schmidt M. Interferometer vibration sensor with two-wavelength passive quadrature readout[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1998, 47(1): 143-147.
- 9 Zhao J, Shi Y, Shan N, *et al.*. Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement [J]. Opt Laser Technol, 2008, 40(6): 874-880.
- 10 Dahlem M, Santos J L, Ferreira L A, *et al.*. Passive interrogation of low-finesse Fabry-Pérot cavities using fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2001, 13(9): 990-992.
- 11 Schmidt M, Fürstenau N. Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer sensors with three-wavelength digital phase demodulation[J]. Opt Lett, 1999, 24(9): 599-601.
- 12 Li Chuncheng, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. A novel Fabry-Perot micro-displacement sensor based on intensity demodulation method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0628001.
- 李春成, 王 鸣, 夏 巍, 等. 基于 F-P 腔强度解调的微位移传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628001.
- 13 Jiang J, Song L, Liu T, *et al.*. Performance characterization of fiber Bragg grating thermal response in space vacuum thermal environment[J]. Rev Sci Instrum, 2013, 84(12): 123107.
- 14 Ott M N. Radiation effects data on commercially available optical fiber: Database summary[C]. Nuclear and Space Radiation Effects Conference, 2002: 24-31.
- 15 He Yuxin, Zhang Li, Yao Dahu, *et al.*. Effect of thermoplastic on the coefficient of thermal expansion of epoxy resin[J]. New Chemical Materials, 2012, 40(3): 117-120.
- 赫玉欣, 张 丽, 姚大虎, 等. 热塑性塑料对环氧树脂热膨胀系数的影响研究[J]. 化工新型材料, 2012, 40(3): 117-120.

栏目编辑: 王晓琰