

非本征法布里-珀罗干涉型传感器非周期信号的相位解调方法

张树桓^{1,2}, 江毅^{1,2*}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081

摘要 提出了一种恢复非本征法布里-珀罗干涉型(EFPI)传感器非周期动态信号的三波长正交相位补偿方法。利用三个干涉信号消除直流分量的影响,并通过相位补偿算法产生两个正交信号,用于解调出待测信号。在实验中对 EFPI 传感器加载一个非周期动态信号,使用三种不同的激光干涉测量技术对实验数据进行信号解调。结果表明,所提方法具有较高的解调精度,适用于高温环境下腔长变化的场合和非周期动态信号的测量。

关键词 光通信; 光纤传感器; 非本征法布里-珀罗干涉仪; 非周期信号; 相位解调

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0906002

Phase Demodulation Method for Non-Periodic Signal in Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensor

Zhang Shuhuan^{1,2}, Jiang Yi^{1,2*}

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China

Abstract A three-wavelength quadrature phase compensation method for recovering non-periodic dynamic signals in an extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI) sensor is proposed. The influence of the direct-current component is eliminated by using three interferometric signals, and two orthogonal signals are generated by the phase compensation algorithm to demodulate the signals to be tested. In the experiment, an aperiodic dynamic signal is loaded on the EFPI sensor, and three laser interferometric methods are used to demodulate the experimental data. The results show that the proposed method has higher demodulation accuracy, and is suitable for the high temperature environment with cavity length change and the measurement of non-periodic dynamic signals.

Key words optical communications; fiber optical sensors; extrinsic Fabry-Perot interferometer; non-periodic signals; phase demodulation

1 引言

光纤非本征法布里-珀罗干涉型(EFPI)传感器^[1-3]具有耐高温、灵敏度高、抗电磁干扰、体积小和测量距离远等优点,在航空航天、发动机工业和芯片制造等领域中具有极大的应用前景。EFPI 传感器

可用于测量各种物理量,其对振动、声音等动态信号^[4-5]的测量尤为重要。目前,已经提出了多种解调方法来执行动态信号的解调,解调方法包括主动解调和被动解调。其中:相位生成载波(PGC)等主动解调方案^[6]受限于系统的有源部分,解调频率有限;被动解调方案以其解调频率上限高、精度高和系统

收稿日期: 2021-11-02; 修回日期: 2021-11-17; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(U20B2057,61775020)

通信作者: *bitjy@bit.edu.cn

简洁等优势得到了广泛的应用。常见的被动解调技术包括正交工作点直接测量法^[7]、双波长被动解调法^[8]和基于 3×3 耦合器的对称解调法^[9]等。

在 EFPI 传感器的动态信号解调技术中,双波长正交解调方法^[10-11]是一种比较常见且实用的信号解调技术,具有频率响应快、灵敏度高和动态范围大等优点。利用两束不同波长的激光获得一对正交信号,再通过反正切算法^[12]来提取被测动态信号。该解调技术的关键是保证两路干涉信号的相位差为 $\pi/2$ 。因此,要求传感器腔长与光源波长必须严格匹配,进而该技术只能对特定腔长的 EFPI 传感器进行解调。为克服这一限制,Jiang 等^[13]提出了一种相位补偿方法,两个相位差偏离 $\pi/2$ 的干涉信号可无失真地恢复动态信号。这样,基于该技术的解调器可对任意腔长的 EFPI 传感器进行解调。另外,在实际应用中只有先消除干涉条纹的直流分量,才能进一步地进行相位测量。同时,只有当相位调制大于 2π 时,干涉信号幅度的中间值才是信号的直流分量,此时才能通过滤波^[14]或者直流平移方法获取直流量。

为克服双波长解调方案的局限性,Jia 等^[15]提出了一种基于三波长的正交解调方法。该方法借鉴双波长解调原理,增加了一路干涉信号,通过三路干涉信号的相位关系直接消除了干涉条纹直流的影响,实现了对任意相位调制的 EFPI 传感器的信号解调。此外,基于双波长的相位补偿方法也可被应用于三波长正交解调方案中,此时三波长正交解调方案能够解调任意腔长的 EFPI 传感器。然而,在实际应用中,只有当所施加的动态信号具有周期性

时,上述解调方案才能准确地从 EFPI 传感器中提取被测信号。当施加的动态信号具有非周期性时,上述解调方案会在解调结果中引入很大的误差,这在应用中是不可接受的。

本文提出了一种用于在 EFPI 传感器中解调非周期性动态信号的三波长正交相位补偿方法。在该解调方法中,先通过选择三个特定的激光波长引入三路干涉信号,并使其中两个信号与第三个信号对称。然后,通过三个干涉信号之间的相位关系直接消除干涉条纹的直流量,并通过相位补偿方法重新产生两路正交信号。最后,利用反正切算法和相位展开获取干涉仪初始相位的相对变化量。本文的研究重点是对光纤 EFPI 传感器加载的非周期信号进行较高精度的解调。通过实验验证了所提方法的可行性,并与另外两种激光干涉测量方法进行了比较,结果表明,所提方法的解调精度高于其他两种方法。

2 测量原理

为验证所提方法的可行性,搭建的三波长解调系统如图 1 所示。三路干涉信号由三个不同波长的分布式反馈激光二极管(DFB-LD)激光器产生,其波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为 1540.557, 1549.315, 1558.173 nm。三束激光通过光纤耦合器和环形器入射到 EFPI 传感器中,携带有动态信号的反射光通过环形器入射到波分复用器(WDM)中,再分为三路干涉输出信号。利用光电二极管(PD)将光信号转换成电信号后,通过模数转换器(ADC)对数据进行实时采集,最后利用软件进行信号解调。

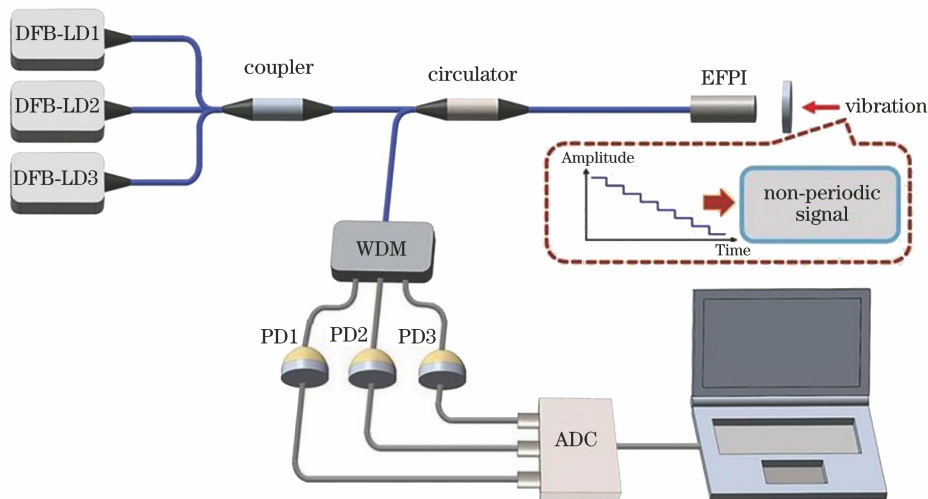


图 1 三波长相位补偿解调系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of three wavelength phase compensation demodulation system

EFPI 传感器可以看作是一种低精细度的双光束干涉仪^[16],其输出的三路干涉信号可以表示为

$$f_i = A + B \cos\left(\frac{4n\pi}{\lambda_i} L_t\right), \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

式中: A 为干涉条纹的直流分量; B 为干涉谱的对比度; λ_i ($i = 1, 2, 3$) 为光源波长; n 为 EFPI 腔的介质折射率 ($n = 1$); L_t 为随调制信号变化的腔长。

根据式(1),假设 EFPI 传感器的初始腔长固定,通过选择特定波长的激光光源获得三路干涉信号,并使其中两路干涉信号关于第三路信号对称,即 f_1 与 f_2 之间的相位差应等于 f_2 与 f_3 之间的相位差,相应的表达式为

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_3 - \varphi_2 = \delta, \quad (2)$$

式中: φ_1 为第一路干涉信号的相位; φ_2 为第二路干涉信号的相位; φ_3 为第三路干涉信号的相位; δ 是干涉信号之间的相位差。由式(1)、(2)可得

$$\delta = 4n\pi L_t \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2}, \quad (3)$$

可以发现,相位差的大小由激光波长 λ_i 和传感器的腔长 L_t 决定。当激光波长确定时,调整腔长可以让干涉信号之间的相位差 δ 大于 2π 。若固定相位为 $\varphi_t = 4n\pi L_t / \lambda_2$,则有

$$\begin{cases} f_1 = A + B \cos(\varphi_t - \delta) \\ f_2 = A + B \cos \varphi_t \\ f_3 = A + B \cos(\varphi_t + \delta) \end{cases}. \quad (4)$$

由式(1)、(2)可知, λ_3 由 λ_1, λ_2 的取值决定,其表达式为

$$\lambda_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (5)$$

在确定第三个激光波长后,进一步调整 EFPI 传感器的初始腔长,可使得三路干涉信号的相位差为 $\delta = \pi/2$,此时

$$\begin{cases} f_1 = A + B \cos\left(\varphi_t - \frac{\pi}{2}\right) \\ f_2 = A + B \cos \varphi_t \\ f_3 = A + B \cos\left(\varphi_t + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}. \quad (6)$$

当初始腔长因环境温度波动或腔长确定时的测量误差而改变时,相位差 δ 可能不等于 $\pi/2$ 。因此,在实际应用中很难保证干涉信号之间完全正交。设 θ 为偏离 $\pi/2$ 的相位误差。将其代入式(6)可得到三路不完全正交的干涉信号,相应表达式为

$$\begin{cases} f_1 = A + B \sin(\varphi_t - \theta) \\ f_2 = A + B \cos \varphi_t \\ f_3 = A - B \sin(\varphi_t + \theta) \end{cases}, \quad (7)$$

通过三路干涉信号的相位关系消除直流分量 A ,其中两路干涉信号 F_1 与 F_2 的表达式为

$$\begin{cases} F_1 = \frac{f_1 - f_3}{2} = B \cos \theta \sin \varphi_t \\ F_2 = f_2 - \frac{f_1 - f_3}{2} = B(1 + \sin \theta) \cos \varphi_t \end{cases}, \quad (8)$$

其中,相位误差 θ 可以表示为

$$\theta = \delta - \frac{\pi}{2} = 4n\pi L_t \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} - \frac{\pi}{2}, \quad (9)$$

式中: $L_t = L_0$ 。传感器的初始腔长 L_0 与三激光波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 均为已知量,由式(9)可以计算出 θ ,代入式(8)可获得两路正交信号,相应的表达式为

$$\begin{cases} I_1 = \frac{F_1}{\cos \theta} = B \sin \varphi_t \\ I_2 = \frac{F_2}{1 + \sin \theta} = B \cos \varphi_t \end{cases}, \quad (10)$$

通过反正切算法和相位展开来求解相位 φ_t ,其表达式为

$$\varphi_t = \arctan \frac{I_1}{I_2}, \quad (11)$$

最终可获取传感器的腔长变化 L_t ,其表达式为

$$L_t = \frac{\lambda_2}{4n\pi} \varphi_t. \quad (12)$$

在应用过程中,EFPI 传感器的腔长很容易受到外部环境的干扰而发生变化,进而导致三路干涉信号的正交相位关系出现偏差。为定量分析相位偏差引起的解调误差,采用所提相位补偿方法模拟了 EFPI 传感器腔长变化时的解调误差。

先根据式(5)选择一组激光波长。然后,根据式(1)、(6)确定三路干涉信号处于正交状态下的传感器腔长大小。当 EFPI 传感器的腔长为 $102.1983 \mu\text{m}$ 时,三路干涉信号保持两两正交。在实际应用中,利用白光干涉(WLI)测量技术^[17]获取传感器的腔长信息,其初始腔长偏离约为 $5.6903 \mu\text{m}$,即 EFPI 的初始腔长为 $107.8886 \mu\text{m}$ 。利用三波长正交相位补偿方法分析该腔长下 EFPI 传感器的解调误差。当腔长变化范围为 $92.1983 \sim 112.1983 \mu\text{m}$ 时,解调误差如图 2 所示。可以看出,当传感器腔长偏离初始腔长($107.8886 \mu\text{m}$)时,解调误差逐渐增大,即初始腔长($107.8886 \mu\text{m}$)处的解调误差最小。因此,从理论上证明了所提相位补偿技术可以对其他腔长的 EFPI 传感器进行解调。

3 实验结果与讨论

通过从 EFPI 传感器中提取非周期动态信号的

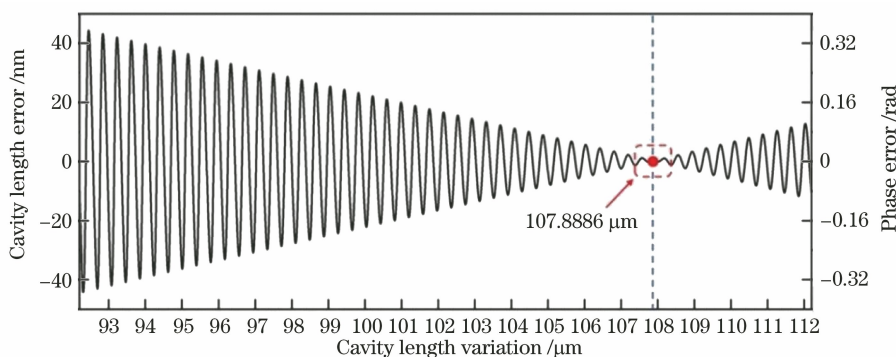


图 2 EFPI 传感器腔长在 92.1983~112.1983 μm 范围内变化时的理论解调误差

Fig. 2 Theoretical demodulation error when cavity length of EFPI sensor varies in the range of 92.1983–112.1983 μm

实验,验证了所提方法的可行性与准确性。EFPI 传感器的初始腔长为 107.8886 μm,外部施加的非周期动态信号为阶梯式变化的压力信号,范围为 100~140 kPa,阶梯间隔为 5 kPa。由 ADC 采集的

三路干涉信号 f_1 、 f_2 和 f_3 如图 3(a)所示。利用所提方法对采集的实验数据进行处理,获得的传感器腔长变化(ΔL)信息如图 3(b)所示。

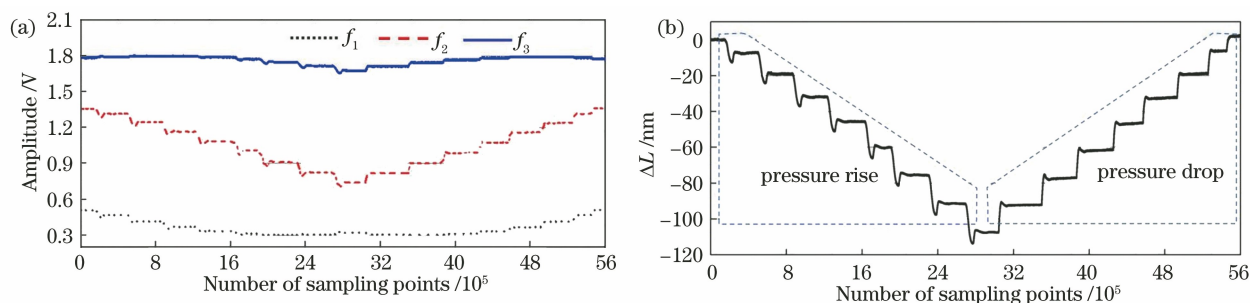


图 3 腔长为 107.8886 μm 的 EFPI 传感器在非周期动态信号下的实验结果。(a)三路干涉信号;(b)解调输出信号

Fig. 3 Experimental results of EFPI sensor with cavity length of 107.8886 μm under aperiodic dynamic signal.

(a) Three interferometric signals; (b) demodulated output signal

随着外部压力的增加,EFPI 传感器的腔长逐渐减小,当压力从 100 kPa 增加到 140 kPa 时,腔长变化约为 107.300 nm。之后,随着外界压力的减小,EFPI 传感器的腔长逐渐增大,当压力从 140 kPa 减小到 100 kPa 时,腔长的变化约为 109.634 nm。实验结果表明,压力上升时的腔长变化量与压力下降时的腔长变化量基本一致。升压与降压过程中传感器腔长的具体情况如表 1 所示。

表 1 不同压力下传感器腔长的变化

Table 1 Variation of cavity length under different pressures

Pressure rise / kPa	ΔL / nm	Pressure drop / kPa	ΔL / nm
100 to 105	7.23	140 to 135	15.23
105 to 110	11.72	135 to 130	15.15
110 to 115	12.78	130 to 125	15.36
115 to 120	13.81	125 to 120	14.90
120 to 125	14.54	120 to 115	14.29
125 to 130	15.36	115 to 110	13.43
130 to 135	15.91	110 to 105	12.74
135 to 140	15.95	105 to 100	8.54

为验证所提的相位补偿方法解调非周期动态信号的准确性。对比分析了相位补偿前后的解调误差,如图 4 和图 5 所示。利用 WLI 测量技术获取腔长信息,并将此测量结果作为参考标准^[17]。其中,带圆圈的曲线和带三角的曲线分别为相位补偿前和相位补偿后获得的解调结果。从图 4 中可以看出,在 100 kPa 升压至 140 kPa 的过程中,相位补偿前后解调误差分别为 21.07% 和 7.46%。结果表明,相位补偿后的解调结果更接近 WLI 测量技术的解调结果,即解调精度得到显著提高。

同理,从图 5 中可以看出,在 140 kPa 降压至 100 kPa 的过程中,相位补偿前后解调误差分别为 19.36% 和 7.68%。结果表明,相位补偿后的解调结果更接近 WLI 解调测量技术的结果,即解调精度得到显著提高。因此,证明了三波长正交相位补偿方法能够从 EFPI 传感器中更为准确地提取非周期动态信号。

以上提到的 WLI 测量技术是一种用于提取

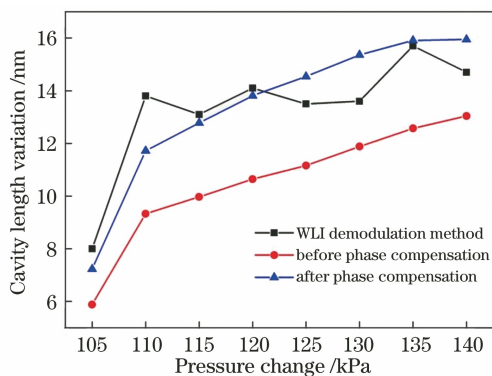


图 4 升压过程中相位补偿前后的解调结果

Fig. 4 Demodulation results before and after phase compensation during pressure rise

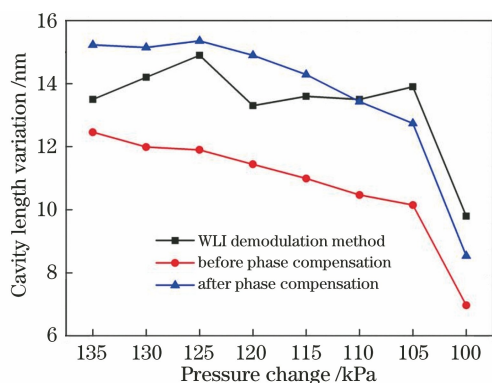


图 5 降压过程中相位补偿前后的解调结果

Fig. 5 Demodulation results before and after phase compensation during pressure drop

EFPI 传感器腔长信息的绝对测量技术,受限于测量原理其解调速度难以满足动态信号测量的需求。然而,基于不同原理的激光干涉测量技术为解调动态信号提供了可能,其可用来提取传感器腔长的变化量,属于相对测量的范畴。为进一步验证所提方法的优越性,采用另外两种基于三波长的激光干涉测量方法对实验数据进行分析^[18-19],解调结果如图 6 所示。从图 6(b)中可以明显看出,在升压与降压过程中:三波长对称解调方法的解调误差

变化幅度大,超出了允许范围;三波长正交解调方法与所提的相位补偿方法的解调误差相对平稳,均在允许范围内。

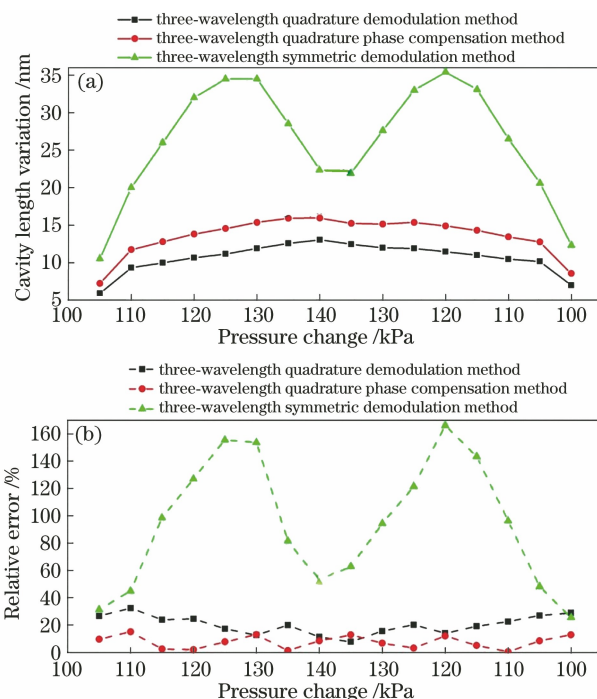


图 6 三种激光干涉解调方法解调精度的比较。

(a) 腔长变化; (b) 相对误差

Fig. 6 Comparison of demodulation accuracies of three laser interferometric demodulation methods.

(a) Cavity length variation; (b) relative error

此外,列举了三种不同解调方案的限制条件和平均相对误差,如表 2 所示。三波长对称解调方法的解调精度不可接受,平均解调误差为 93.94%。三波长正交解调法要求三路干涉信号保持良好的正交性,其平均解调误差为 20.21%。所提方法的最大解调误差为 15.07%,其平均解调误差仅为 7.57%。对于非周期动态信号的测量,三波长正交相位补偿方法相较前两种方法具有更高的解调精度和更好的应用前景。

表 2 三种解调方案的比较

Table 2 Comparison of three demodulation schemes

Demodulation method	Restrictive condition	Relative error / %
Three-wavelength symmetric demodulation method ^[18]	Demodulation accuracy is unacceptable	93.94
Three-wavelength quadrature demodulation method ^[19]	Three interferometric signals are orthogonal	20.21
Three-wavelength quadrature phase compensation method	Initial cavity length is obtained before measurement	7.57

4 结 论

提出了一种用于解调 EFPI 传感器中非周期动

态信号的三波长正交相位补偿方法。通过三个干涉信号消除直流分量的影响,并利用相位补偿算法产生两个正交信号,以解调被测的动态信号。实验中

成功地解调了 EFPI 传感器中的非周期动态信号。同时,采用另外两种不同的激光干涉解调方法对实验数据进行误差分析。最终结果表明,所提方法具有更高的解调精度,适用于高温环境下腔长变化的场合和非周期动态信号的测量。

参 考 文 献

- [1] 江毅, 张树桓. 光纤激光干涉测量技术在 EFPI 传感器信号解调中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306017.
Jiang Y, Zhang S H. Research progress on fiber optical laser interferometry in signal demodulation of EFPI sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306017.
- [2] 夏振杰, 刘强, 李昂, 等. 基于膜片式 EFPI 光纤麦克风的声源定位系统[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0910002.
Xia Z J, Liu Q, Li A, et al. Sound source localization system based on diaphragm-type EFPI optical fiber microphones[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0910002.
- [3] Samartkit P, Pullteap S, Seat H C. Validation of fiber optic-based Fabry-Perot interferometer for simultaneous heart rate and pulse pressure measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 6195-6201.
- [4] Fan H B, Zhang L, Gao S, et al. Ultrasound sensing based on an in-fiber dual-cavity Fabry-Perot interferometer[J]. Optics Letters, 2019, 44(15): 3606-3609.
- [5] Hayber S E, Tabaru T E, Keser S, et al. A simple, high sensitive fiber optic microphone based on cellulose triacetate diaphragm [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5650-5655.
- [6] Chen F F, Jiang Y. Fiber optic magnetic field sensor based on the TbDyFe rod[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(8): 085106.
- [7] Wang Y P, Ni X Q, Wang M, et al. Demodulation of an optical fiber MEMS pressure sensor based on single bandpass microwave photonic filter[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 644-653.
- [8] Pinto A M R, Frazão O, Santos J L, et al. Interrogation of a suspended-core Fabry-Perot temperature sensor through a dual wavelength Raman fiber laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(21): 3149-3155.
- [9] Chen F F, Jiang Y, Jiang L. 3×3 coupler based interferometric magnetic field sensor using a TbDyFe rod[J]. Applied Optics, 2015, 54(8): 2085-2090.
- [10] Liu Q, Jing Z G, Li A, et al. Common-path dual-wavelength quadrature phase demodulation of EFPI sensors using a broadly tunable MG-Y laser [J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27873-27881.
- [11] Liao H, Lu P, Liu L, et al. Phase demodulation of short-cavity Fabry-Perot interferometric acoustic sensors with two wavelengths [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 7102207.
- [12] Chang T, Cui H L, Yu M, et al. Phase compensation scheme for fiber-optic interferometric vibration demodulation [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(22): 7448-7454.
- [13] Jiang Y, Tang C J, Guo G R. Phase compensation in the fiber optical quadrature passive demodulation scheme [J]. The Review of Scientific Instruments, 2010, 81(4): 046108.
- [14] Jia J S, Jiang Y, Cui Y. Phase demodulator for the measurement of extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors with arbitrary initial cavity length [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7): 3621-3626.
- [15] Jia J S, Jiang Y, Gao H C, et al. Three-wavelength passive demodulation technique for the interrogation of EFPI sensors with arbitrary cavity length [J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8890-8899.
- [16] Liu Q, Peng W. Fast interrogation of dynamic low-finesse Fabry-Perot interferometers: a review [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63: 2279-2291.
- [17] Jiang Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 75-77.
- [18] Jia J S, Jiang Y, Huang J B, et al. Symmetrical demodulation method for the phase recovery of extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. Optics Express, 2020, 28(7): 9149-9156.
- [19] Liu Q, Jing Z G, Liu Y Y, et al. Quadrature phase-stabilized three-wavelength interrogation of a fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor [J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5402-5405.