

引用格式: WANG Jing, ZHANG Zihao, YU Xinyu, et al. Phase Compensation Algorithm of Wavelet Transform for Fabry-Perot Interference Signals[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0706003

王晶,张子豪,余鑫宇,等.法布里-珀罗干涉信号的小波变换相位补偿算法[J].光子学报,2021,50(7):0706003

法布里-珀罗干涉信号的小波变换相位补偿算法

王晶^{1,2},张子豪¹,余鑫宇^{1,2},范典¹,周次明¹

(1 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

(2 武汉理工大学 信息工程学院, 武汉 430070)

摘 要:为了高精度提取光纤法布里-珀罗干涉信号的腔长信息,结合小波变换的多尺度细分功能,通过小波脊线精确提取干涉光谱每点的相位信息,并采用谱峰信息进行相位补偿,提高腔长解调精度。仿真结果表明,该算法的解调误差理论上可达 ± 0.060 nm。实验结果表明,该算法的腔长解调分辨率相较于最小二乘相位校正法提高了 1 倍,分辨率可达 0.514 nm,加速度传感器实验解调的分辨率达到 0.9 mg,在法布里-珀罗传感器动静参数高精度测量中具有一定的应用前景。

关键词:法布里-珀罗;干涉信号;腔长解调;小波变换;相位补偿;加速度传感器

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215007.0706003

Phase Compensation Algorithm of Wavelet Transform for Fabry-Perot Interference Signals

WANG Jing^{1,2}, ZHANG Zihao¹, YU Xinyu^{1,2}, FAN Dian¹, ZHOU Ciming¹

(1 National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2 School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To extract the cavity length information of optical fiber Fabry-Perot interference signal with high precision, combined with the multi-scale subdivision function of wavelet transform, the phase information of each point of the interference spectrum is accurately extracted through the wavelet ridge, and the phase compensation is carried out by using peak information, which improves the accuracy of cavity length demodulation. Simulation results show that the demodulation error of the algorithm can reach ± 0.06 nm in theory. The experimental results show that the cavity length demodulation resolution of the algorithm is doubled compared with that of the least square phase correction method and the resolution can reach 0.514 nm. The demodulation resolution of the acceleration sensor experiment is up to 0.9 mg. The algorithm has a certain application prospect in the high precision measurement of dynamic and static parameters of Fabry-Perot sensor.

Key words: Fabry-Perot; Interference signal; Cavity length interrogation; Wavelet transform; Phase compensation; Acceleration sensor

OCIS Codes: 060.2370; 060.2380; 070.4790; 120.2230

0 引言

法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)传感器应用广泛,具有体积小、测量精度高、抗电磁辐射、适用于远程

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61775173, 61975157, 52071245)

第一作者:王晶(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤法布里-珀罗传感器解调。Email: 915623210@qq.com

导师(通讯作者):周次明(1973—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感。Email: zcm@whut.edu.cn

收稿日期:2020-12-29;录用日期:2021-02-26

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

信号处理等众多优点^[1]。F-P腔长会随温度^[2]、压力^[3]、加速度^[4]等物理因素的变化而变化,因此腔长的解调结果决定着传感器的精度和实用性。

在现有的解调方法中,相位解调^[5]一般结合宽带光源或者扫频光源,利用全光谱来进行信号解调,因其获取的腔长信息精度高、不受信号强度波动影响而被广泛使用。其中,较为典型的是条纹计数法和傅里叶变换法(Fast Fourier Transform, FFT)。条纹计数法通过提取干涉光谱的波峰或波谷波长实现解调,但是对波长读取精度要求较高,解调误差在微米量级^[6]。傅里叶变换法是对采集到的光谱进行频谱变换来求解F-P腔长值,但是必须精确提取傅里叶谱的一阶谐波^[7]。雷小华等^[8]通过三次样条插值提高FFT频率分辨率,实现了0.06 μm以内的腔长误差。本课题组的尹嘉笛^[9]以FFT为基础,提出了Fibonacci和最小均方差联合算法,解调精度非常高,但是在解调范围过大时容易出现腔长跳变。HAN Ming等^[10]将附加相位考虑进拟合参数中,通过光谱曲线拟合算法实现了0.576 nm的腔长分辨率,将腔长解调精度提高了两个数量级,凸显了附加相位在解调中的重要性,但是该算法对光谱信噪比以及稳定性要求较高,拟合计算量大,实际应用受到限制。本课题组的刘嘉静^[11]提出了基于最小二乘法对附加相位进行预校准的解调算法,实现了5.4 nm的腔长解调精度,并在高温等准静态测量中得到应用。

近年来小波变换已成为信号分析的常用工具,能对信号进行局部自动分析,使它满足不同频率信号在不同环境下的分析需求。传统实小波变换可以进行信号的幅值和频率计算,复小波的提出使得小波变换可以提取信号的相位信息^[12]。ZHONG Jingang^[13]从理论上证明了小波变换脊可以用来提取光谱条纹图的相位。通过复小波的尺度因子和位移因子来确定小波变换的脊,精确提取信号每点的相位,减少了数据的计算过程,拓展了小波变换的应用范围。ZHANG Baolin^[14]首次将小波变换用于F-P传感器的腔长解调,在FFT算法预估腔长的基础上通过小波脊获取了小波相位,其在获取腔长时将光谱附加相位值视为常数,通过腔长与相位的线性拟合实现了9.49 nm的腔长分辨率。在动态测量时,腔长的变化使光纤端面的耦合产生额外相移,导致光谱附加相位发生变化,以上两个算法均忽略了这个误差,因此需要采用一些方法进行附加相位补偿^[15]。

本文将小波变换应用于F-P传感器的解调,提出了一种F-P干涉信号的小波变换相位补偿算法,通过小波变换提取光谱各点的相位信息得到估计腔长,然后根据谱峰信息计算光谱的附加相位直接进行相位补偿,实现了F-P腔长的高精度解调,避免由于附加相位变化导致的腔长解调误差。

1 算法原理

光纤F-P传感器的基本工作原理为入射光通过单模光纤进入F-P腔,在两端面处进行多次反射以及透射,部分反射光由于具有相位差而产生干涉现象,称为多光束干涉^[16]。实际应用中F-P腔两个端面的反射率较小,因此可以视为双光束干涉。来自低相干光源的光经F-P腔反射后,被光谱仪所接收,得到的干涉信号可表示为

$$I(k) = A(k) + B(k)\cos(2nk \cdot L + \phi_0) \quad (1)$$

式中, L 为F-P腔长, $k = 2\pi/\lambda$ 表示光谱波数, A 是背景光信号, B 是由腔长和光纤末端耦合系数所决定的常数, n 为折射率, ϕ_0 是由光束反射和传播引起的附加相位。干涉光谱的相位为

$$\varphi(k) = 2nk \cdot L + \phi_0 \quad (2)$$

从式(2)可以看出腔长信息与光谱相位直接相关,因此,首先要获取的是干涉信号的相位信息。小波变换已经成为信号分析和计算的理想工具,根据信号的小波脊线可以提取出光谱条纹图的相位。采用Morlet复小波为小波基函数,Morlet复小波在空间域和时域都有良好的局部特性,根据小波变换计算原理,可以得到小波系数为

$$W(a, b) = \frac{1}{2} \sqrt{a} B \exp \left\{ - \left\{ \pi F_c \sqrt{F_b} \left[\frac{\varphi'(b)a}{2\pi F_c} - 1 \right] \right\}^2 \right\} \exp [j\varphi(b)] \quad (3)$$

式中, a 是尺度因子,由信号频率决定, b 是平移因子,表示沿时间轴平移的量, F_c 是小波的中心频率, F_b 是小波的带宽, $\varphi(b)$ 是干涉信号的相位。

平移因子 b 与光谱波数 k 是一一对应的。根据模极大值得到干涉信号的小波脊线,在每一个位置 b 上,

找出与之对应的模极大值,即 $|W(a, b)|$ 的极大值,极大值处对应的 a 便是最佳尺度因子,这些极大值的连线被称为小波脊线。

对 $|W(a, b)|$ 在 a 上求导,可以得到模极大值处对应的最佳尺度因子 a_m ,那么干涉信号在小波脊上的小波系数可表示为

$$W(a_m, b) = \frac{1}{2} \sqrt{a_m} B \exp \left\{ - \left\{ \pi F_c \sqrt{F_b} \left[\frac{\pi F_b F_c + \sqrt{(\pi F_b F_c)^2 + F_b}}{2\pi F_b F_c} - 1 \right] \right\}^2 \right\} \exp [j\varphi(b)] \quad (4)$$

由式(4)可以得出,干涉信号的相位为

$$\hat{\varphi}(b) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[W(a_m, b)]}{\text{Re}[W(a_m, b)]} \right\} \quad (5)$$

将附加相位视为常数时,由式(2)可以看出相位和光谱波数之间呈线性关系。由于式(5)进行了反正切运算,那么得到的相位会被限制在 $[-\pi, \pi]$ 之间,所以对 $\hat{\varphi}$ 进行相位解包裹后的相位与实际干涉信号的相位有一定差值,但是解包裹后的相位与波数之间依然存在线性关系。因此可以通过相位与光谱波数的线性拟合得到斜率,从而得到初步的传感器腔长估计值 \hat{L} ,但是此时估计的腔长值精度没有达到纳米量级,这是因为光谱的附加相位中也包含腔长信息。为了进一步提高解调精度,有必要对光谱的附加相位进行分析。实际上在测量时传感器结构的物理变化导致F-P腔两端面并非完全平行,光纤端面的光耦合会使干涉光谱的附加相位产生 $\Delta\phi$ 的相位误差, $\Delta\phi$ 与腔长的变化有一定关系^[17]。可以通过附加相位 $\phi = \phi_0 + \Delta\phi$ 的求解来实现光谱相位的补偿,为了减少计算量,保证算法的解调速度,采用光谱的波峰信息来求解附加相位。

在干涉光谱的各个峰值处,光谱相位 $\hat{\varphi}$ 的值是 2π 的整数倍,根据式(1)进行变换可得

$$2[k_m]_{N \times 1} L + \phi[I]_{N \times 1} = 2\pi([m]_{N \times 1} + m_0[I]_{N \times 1}) \quad (6)$$

式中, k_m 表示峰值处波数, N 表示峰值个数, $m([m]_{N \times 1} = [0, 1, 2, \dots, N]^T)$ 和 m_0 (起始峰值的条纹顺序)表示各个峰值的条纹顺序。将式(6)进行变形得

$$2[k_m]_{N \times 1} L - 2\pi[m]_{N \times 1} = (2\pi m_0 - \phi)[I]_{N \times 1} \quad (7)$$

对式(7)等式两边取平均,将根据小波变换求解得到的腔长估计值 \hat{L} 代入 L ,等式左边均为已知量,然后根据式(8)得到附加相位的值,即

$$\hat{\phi} = 2\pi \text{floor} \left[\frac{2\pi m_0 - \phi}{2\pi} \right] - (2\pi m_0 - \phi) \quad (8)$$

通过附加相位值 $\hat{\phi}$ 对小波变换求得的相位进行补偿,采用中心波数 \bar{k} 作为参考点得到精确的腔长解调结果为

$$L = \frac{2\bar{k} \cdot \hat{L} + \phi_0 + \Delta\phi}{2\bar{k}} = \frac{2\bar{k} \cdot \hat{L} + \hat{\phi}}{2\bar{k}} \quad (9)$$

2 仿真分析

为了验证提出的算法在光纤F-P传感器解调中的效果,首先进行理论仿真。依据F-P传感器原理建立干涉光谱模型,设定光谱波长范围为1 520.45~1 570.97 nm,采样点数共512点,腔长变化区间为500~502 μm ,步长为5 nm,采用该算法进行解调。将解调结果与设定值相减获得理想情况下解调误差,如图1所示。当腔长从500 μm 增大到502 μm 时,算法的解调误差为 ± 0.06 nm,解调误差的标准差为0.02 nm,可见提出的算法在理论上能实现高于纳米量级的解调精度。

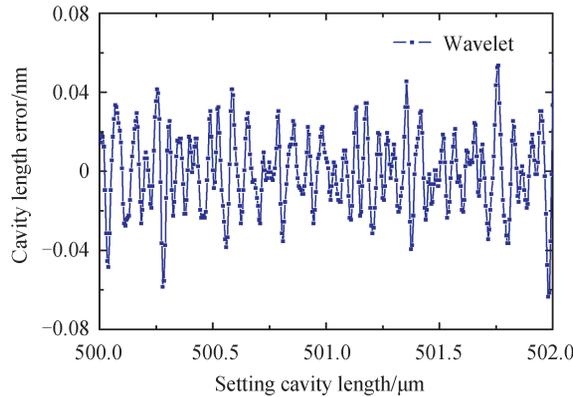


图1 理想情况下算法解调误差

Fig.1 Algorithm demodulation error under ideal conditions

3 实验验证

为了验证该算法在实际测量中的适用性,利用悬臂梁式F-P加速度传感器对算法进行实验验证。实验系统由放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)光源、耦合器、F-P传感器、光谱仪、振动台、信号发生器、标准加速度计、示波器以及计算机组成,如图2所示,其中用标准加速度计进行标定对比。波长范围为1 520~1 575 nm的宽带光源发出的光经过耦合器到达传感器,干涉光谱由光谱仪接收,信号离散点为512点,然后输入到计算机进行解调及显示。

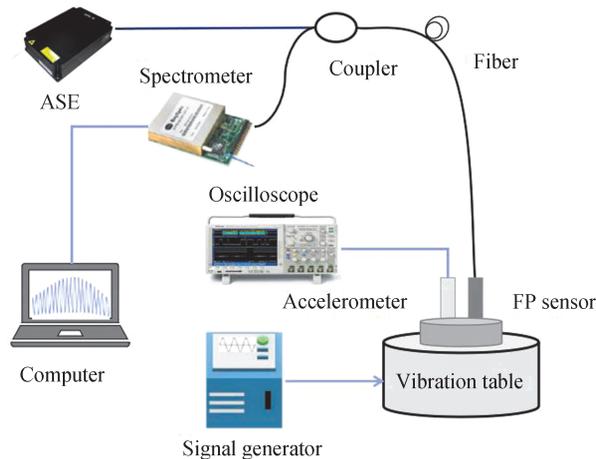


图2 振动实验系统

Fig.2 Vibration test system

该传感器的加速度与传感器腔长的关系满足

$$L - L_0 = \frac{5ml^3}{4Ebh^3} a \quad (10)$$

式中, E 、 b 、 h 、 m 、 l 由传感器的结构所决定,均为常数,可以看出腔长变化量与加速度成正比,腔长实时值 L 和腔长初始值 L_0 的解调精度直接影响加速度测量精度,因此,通过加速度传感器进行验证,最能考验所提解调算法的动静态性能。

首先测试解调算法的腔长分辨率。传感器在静止状态时,以2 kHz采样频率测量腔长值。为了对比,采用F-P解调中常用的最小二乘相位校正算法^[12]和本文提出的算法分别进行解调,结果如图3。解调腔长分辨率用标准差的两倍表示时,最小二乘相位校正方法解调腔长的标准差为0.715 nm,分辨率为1.43 nm;小波变换相位补偿方法解调腔长的标准差为0.257 nm,分辨率为0.514 nm,表明本文算法分辨率相比最小二乘相位校正算法提高了1倍。

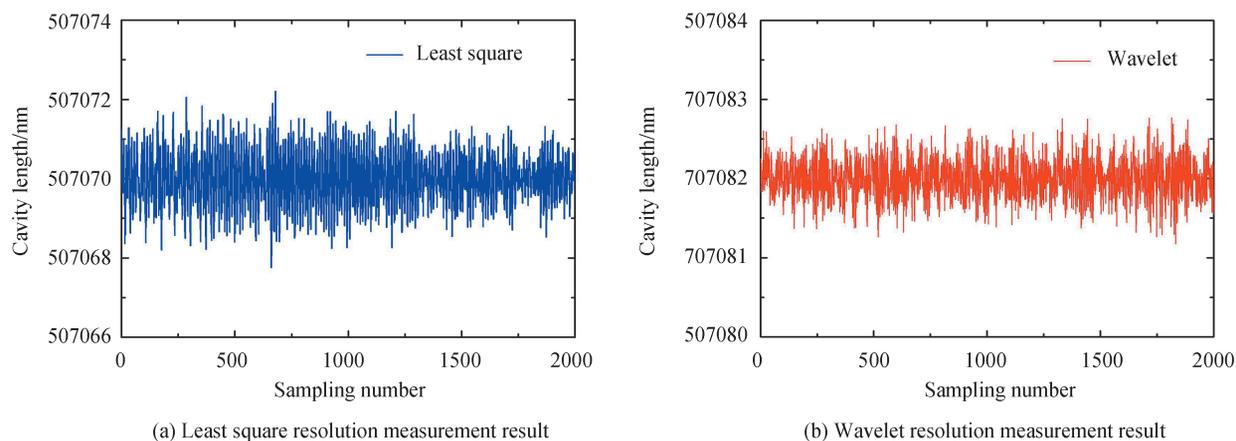
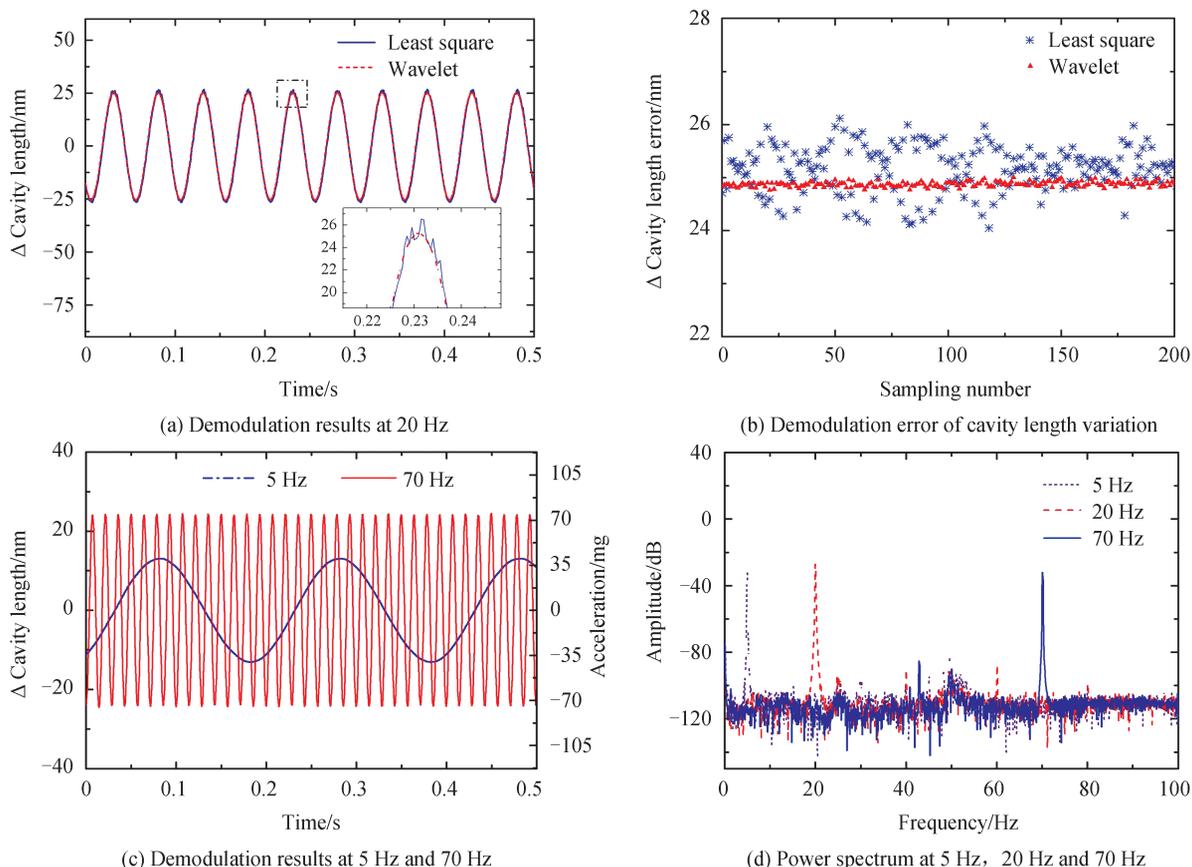
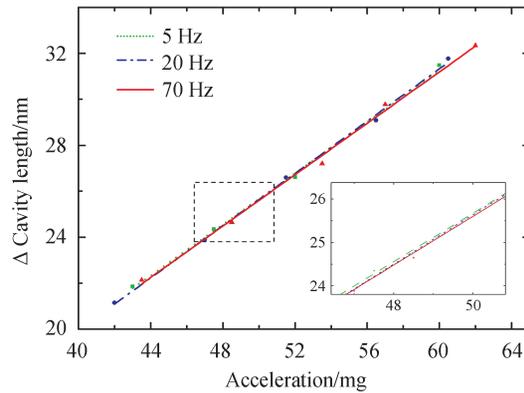


图3 腔长分辨率对比实验结果
Fig.3 Contrast experiment result of cavity length resolution

调谐振动台频率为 20 Hz,采用腔长约为 507.082 μm 的加速度传感器进行振动实验,分别采用最小二乘相位校正方法和小波变换相位补偿方法进行腔长解调,解调结果如图 4(a)所示,可以看到腔长的变化范围约是 $\pm 24.8 \text{ nm}$,最小二乘相位校正算法在波峰处有较多毛刺以及波动,在读取解调结果时难以得到腔长准确值,相比之下小波变换相位补偿方法的解调信号平滑且没有波动,精度较高。读取两种解调信号的峰值,获得振动的最大腔长变化量,对比结果如图 4(b)所示,在固定驱动信号的条件下,对比两种算法解调结果的振幅,最小二乘相位校正法的最大误差为 2 nm,小波变换相位补偿法的最大误差为 0.238 nm,误差值降低了一个数量级,说明了小波变换相位补偿算法在解调精度上更具优势,更有利于获得准确信号。

由于光谱分析仪采样频率的限制,高频信号解调结果会产生较大程度的失真,因此采用基于小波变换的相位补偿算法重点对 100 Hz 以内的低频振动信号进行测试实验,驱动信号频率分别设为 5 Hz、20 Hz 以及 70 Hz,解调结果的时域信号图如图 4(a)、(c)所示,解调信号完整且无失真,频域图如图 4(d)所示,解调结果





(e) Calibration experiment at 5 Hz, 20 Hz and 70 Hz

图4 振动测量实验结果

Fig. 4 Vibration measurement experiment result

的频率与设定驱动信号的频率一致。为了验证传感器腔长的变化量与加速度之间的正比例关系,在5 Hz、20 Hz、70 Hz振动信号的驱动下分别进行了加速度-腔长变化量标定实验,通过信号发生器固定振动台的输出振动频率,改变输出加速度,记录解调腔长变化量,如图4(e)所示。将振动台所施加的加速度与传感器腔长最大变化量做线性拟合,可以得到对应的灵敏度分别为0.557 nm/mg、0.568 nm/mg和0.559 nm/mg,误差不超过2%,说明解调算法具有良好的可重复性。

实验结果表明无论在静态或是动态环境下,该算法均能正确解调出传感器的腔长变化,并且高精度获得振动频率和加速度。因此,该算法在光纤F-P传感器的腔长解调中具有高分辨率的优点。

4 结论

本文提出了一种法布里-珀罗干涉信号的小波变换相位补偿算法,可实现对光纤F-P传感器腔长的高精度解调。该算法根据小波变换的多尺度细分功能提取干涉光谱相位得到较为精确的腔长估计值,通过谱峰信息求得由腔长变化而产生的相位误差,实现腔长的相位补偿,得到高精度的腔长解调结果。在静态测试环境下,该算法可实现0.514 nm的腔长分辨率,相较于最小二乘相位校正法提高了1倍;在振动测试环境下,解调信号的振幅最大误差为0.238 nm,在5~100 Hz内对加速度传感器的灵敏度进行重复性测量,解调误差不超过2%,证明了该算法的稳定性及可靠性。从实验结果可以看出,该算法对于法布里-珀罗传感器的高精度动静态参数解调具有参考价值。

参考文献

- [1] WANG Anbo. Optical fiber Fabry-Perot interferometry[C]. SPIE, 2014, 9083(2):90-98.
- [2] DING Wenhui, JIANG Yi, GAO Ran, et al. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(5):055001.
- [3] DOMINGUES M F, RODRIGUEZ C A, MARTINS J, et al. Cost-effective optical fiber pressure sensor based on intrinsic Fabry-Perot interferometric micro-cavities [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 42:56-62.
- [4] YANG Yang, WANG Enyu, CHEN Ke, et al. Fiber-optic Fabry-Perot sensor for simultaneous measurement of tilt angle and vibration acceleration[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 19(6):2162-2169.
- [5] YANG Yang, MA Fengxiang, CHEN Ke, et al. High-speed and high-resolution low-coherence interferometric demodulation without phase jumps[J]. Sensors Journal, 2020, 20(20):12225-12231.
- [6] WANG Shuang, LIU Tiegeng, JIANG Junfeng, et al. Zero-fringe demodulation method based on location-dependent birefringence dispersion in polarized low-coherence interferometry[J]. Optics Letters, 2014, 39(7):1827-1830.
- [7] ZHANG Peng, ZHU Yong, CHEN Weimin. Study on Fourier transformation demodulating theory of the gap of optical fiber Fabry-Perot sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(12):1449-1452.
章鹏, 朱永, 陈伟民. 光纤法布里-珀罗传感器腔长的傅里叶变换解原理研究[J]. 光子学报, 2004, 33(12):1449-1452.
- [8] LEI Xiaohua, CHEN Weimin, ZHANG Peng, et al. Demodulation method based on Fourier transform with cubic spline interpolation for optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. Acta Photonica Sincia, 2008, 37(4): 705-708.
雷小华, 陈伟民, 章鹏, 等. 基于三次样条插值的光纤F-P传感器傅里叶变换解调研究[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 705-708.

- [9] YIN Jiadi, ZHOU Ciming, OU Yiwen, et al. Combined algorithm of Fibonacci-MMSE for optical fiber Fabry-Perot sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(9): 0906002.
尹嘉笛,周次明,欧艺文,等. 光纤 Fabry-Perot 传感器的 Fibonacci-MMSE 联合解调算法[J]. *光子学报*, 2015, 44(9): 0906002.
- [10] HAN Ming, ZHANG Yan, SHEN Fabin, et al. Signal-processing algorithm for white-light optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(15):1736-1738.
- [11] LIU Jiajing, TU Ziwei, ZHOU Ciming, et al. Algorithm of phase correction based on least square estimation for optical fiber Fabry-Perot sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0906004.
刘嘉静,涂子维,周次明,等. 基于最小二乘法的光纤法布里-珀罗传感器相位校正解调算法[J]. *光子学报*, 2019, 48(9): 0906004.
- [12] WATKINS L R. Review of fringe pattern phase recovery using the 1-D and 2-D continuous wavelet transforms[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(8):1015 - 1022.
- [13] ZHONG Jingang, WENG Jiawen. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19):2560-2562.
- [14] ZHANG Baolin, HU Pan, GUO Qian, et al. Wavelet phase extracting demodulation algorithm based on scale factor for optical fiber Fabry-Perot sensing.[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26):29506.
- [15] YU Zhihao, WANG Anbo. Fast white light interferometry demodulation algorithm for low-finesse Fabry - Pérot sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(8):817-820.
- [16] FU Dongying, LIU Xiujuan, SHANG Jianyu, et al. A simple, highly sensitive fiber sensor for simultaneous measurement of pressure and temperature[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(13):747-750.
- [17] MA Cheng, WANG Anbo. Multimode excitation-induced phase shifts in intrinsic Fabry-Perot interferometric fiber sensor spectra[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(25):4836-4845.