

非本征法珀干涉传感器的双参量同时传感研究

王俊杰^{1,2} 唐凯^{1,2} 王付印^{1,2} 谢杰辉² 胡正良^{1,2}

¹国防科技大学海洋科学与工程研究院, 湖南长沙 410073

²国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 光纤传感器对静态绝对量和动态相对量同时测量在很多场合都有应用需求,这就要求传感系统兼具大动态范围和高精度的特点。采用基于快速光谱获取的白光非本征法珀干涉(EFPI)传感系统,可满足静态信号大动态范围和绝对测量需求,同时可快速响应动态信号。将 zoom-FFT 算法用于传感器的腔长解调,提高了信号的解调精度,实验测得精度达 4 nm。由于 zoom-FFT 法运算量小,在算法上可满足动态测量对解调速度的需求。在 0~30 cm 深度内对传感器进行了标定,传感器对静压力的响应具有较好的线性特性,计算得到液位分辨率为 0.13 mm。利用液位信号和声信号频率的差别,实现了单传感器对液位深度和声信号的同时测量,验证了此系统在对静态绝对量和动态相对量同时传感方面具有应用潜力。

关键词 光纤传感;非本征法珀干涉传感器;zoom-FFT 算法;双参量传感

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.070604

Study on Dual-Parameter Simultaneous Sensing of Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensor

Wang Junjie^{1,2} Tang Kai^{1,2} Wang Fuyin^{1,2} Xie Jiehui² Hu Zhengliang^{1,2}

¹Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha, Hunan 410073, China

²College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha, Hunan 410073, China

Abstract There is a demand for simultaneous measurement of static absolute signal and dynamic relative signal with optical fiber sensor in many situations, which requires the sensing system has both large dynamic range and high accuracy. White light extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI) sensor system based on fast light spectrum acquisition is utilized to meet the requirement of large dynamic range and absolute measurement, which can also response dynamic signal rapidly. Zoom-FFT algorithm is applied in cavity length demodulation of sensors to improve the demodulation accuracy, and the experiment shows that the accuracy reaches 4 nm. Zoom-FFT algorithm can satisfy the demand for demodulation speed of dynamic measurement because of its low computation cost. The experiment is conducted to calibrate the sensor in liquid level between 0~30 cm, which shows that the response of the sensor has a desirable linearity to the static pressure, and the liquid level resolution reaches 0.13 mm. One sensor is able to measure liquid level depth and sound simultaneously with the difference between the frequencies of them at the same time. And the proposed system is proved to possess the potential application in simultaneously absolute measurement of static signal and relative measurement of dynamic signal.

Key words optical fiber sensing; extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor; zoom-FFT algorithm; dual-parameter sensing

OCIS codes 040.1880; 200.4560; 310.6845

1 引言

白光非本征法珀干涉(EFPI)传感器因具有体积小、抗电磁干扰、可实现绝对测量等优点而被广泛研究^[1-2]。

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-02; 网络出版日期: 2015-06-17

作者简介: 王俊杰(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: njueewang@163.com

导师简介: 胡正良(1975—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感、光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zheng_liang_hu@163.com(通信联系人)

随着 EFPI 传感器工艺技术研究成熟^[3],多种 EFPI 传感器已投入实用。传统 EFPI 传感器采用光谱仪(OSA)对干涉光谱进行扫描^[4-5]。受 OSA 扫描速度的限制,EFPI 传感器只能对静态或准静态的信号进行测量,主要用于压力^[4]、应力^[6]、温度^[6]等准静态信号传感的领域。近年来随着光子器件及电子技术的进步,快速光谱获取技术得到了长足发展,这为 EFPI 传感器用于动态信号测量提供了设备支撑。而白光干涉系统具有大动态范围的腔长绝对测量的特点,利用静态信号与动态信号之间频率的区别,可在单个传感器上实现对静态绝对量和动态相对量的同时测量。

静态信号动态范围大但频率低,而动态信号动态范围小但频率高,如果同时对这两种信号进行传感,对应的解调算法需要具有运算速度快、解调精度高、动态范围大的特点。目前,基于光谱探测的解调方法主要有条纹计数法^[7]、谱峰跟踪法^[8]、最小均方差算法^[9]、互相关算法^[10]、傅里叶变换法^[11-12]等。其中,条纹计数法和谱峰跟踪法的解调精度受限于光谱探测的波长分辨率;互相关算法和最小均方差算法解调精度高,但动态范围有限、计算量大;傅里叶变换法动态范围大、运算速度快,但解调精度不高。

针对以上解调算法的不足,提出将 zoom-FFT 法用于 EFPI 传感器的腔长解调。zoom-FFT 法基于松弛算法,在快速傅里叶变换(FFT)算法的基础上以极小的运算代价大幅度提高解调精度^[13],因此可满足 EFPI 传感器用于双参量同时传感的要求。本文测试了 zoom-FFT 法在腔长解调中的精度,并将 EFPI 传感系统用于液位和声信号同时传感,实现了单传感器对静态绝对量和动态相对量的同时测量。

2 白光 EFPI 传感系统结构及信号解调原理

2.1 白光 EFPI 传感系统结构

白光 EFPI 传感系统结构如图 1 所示。其中,高速布拉格光栅分析仪(FBGA),主要由宽带光源超辐射发光二极管(SLED)和线阵列光谱分析仪组成。光谱分析仪光谱采集频率最高达 5000 Hz。

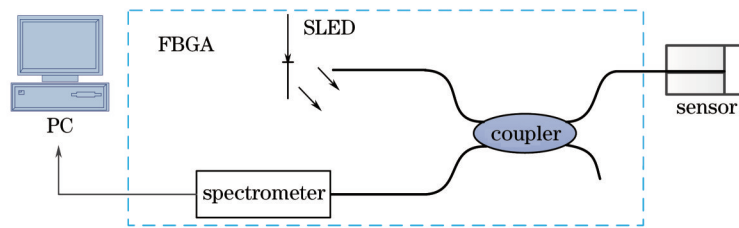


图 1 EFPI 传感器光谱采集系统示意图

Fig.1 Schematic of EFPI sensor spectrum acquisition system

SLED 的光谱不平坦, SLED 照明 EFPI 传感器就会将该光源谱型叠加到 EFPI 干涉光谱上,这对后续处理是不利的。用光谱分析仪探测得到的 SLED 光谱,如图 2 所示。按图 1 的实验系统测量得到的 EFPI 反射光谱如图 3 所示,可以看出,干涉光谱的包络与光源的谱型相似。对于低精细度的 EFPI 传感器,其干涉信号随波长呈正弦变化,而包络主要由光源引入。干涉光谱可以表示为

$$I(\lambda_i, t_k) = A(\lambda_i, t_k) + \cos\left[\frac{4\pi d(t_k)}{\lambda_i} + \varphi_0(t_k)\right] I_E(\lambda_i, t_k) + N(\lambda_i, t_k), \quad (1)$$

式中 λ_i 为等间距采样的波长, $A(\lambda_i, t_k)$ 、 $I_E(\lambda_i, t_k)$ 、 $N(\lambda_i, t_k)$ 分别为 t_k 时刻干涉光谱的直流量、光谱包络和光源

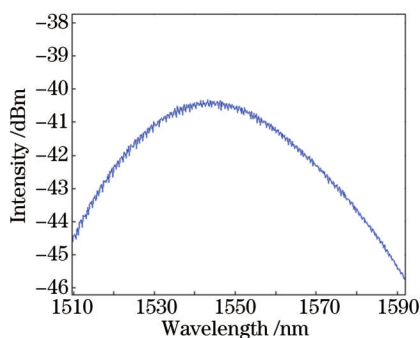


图 2 SLED 光谱

Fig.2 SLED spectrum

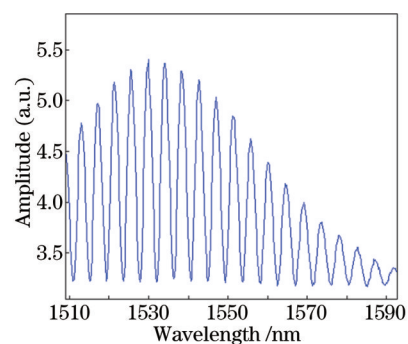


图 3 传感器干涉光谱

Fig.3 Interference spectrum of the sensor

的强度噪声, $\varphi_0(t_k)$ 为干涉光谱的初相位, $d(t_k)$ 为 t_k 时刻的腔长对应的传感信息。

2.2 信号解调

(1)式包含了腔长信息 $d(t_k)$, 但由于干涉光谱中含有包络和噪声, 这将降低解调精度。为此需要先对光谱进行去包络和降噪处理, 再通过算法解调。

2.2.1 光谱预处理

光源的强度噪声、环境的扰动以及探测系统的电路噪声最终都会叠加到干涉光谱上, 这将会造成解调精度下降, 因此对光谱进行降噪是必要的。离散小波滤波器(DWT)^[14]在低频时具有高频率分辨率, 高频时具有高时间分辨率, 在滤除信号的干扰、噪声上有独特的优势。因此使用 DWT 对光谱进行滤波, 去掉信号的低频分量和高频分量。得到的干涉光谱表达式为

$$I(\lambda_i, t_k) = \cos\left[\frac{4\pi d(t_k)}{\lambda_i} + \varphi_0(t_k)\right] I_E(\lambda_i, t_k). \quad (2)$$

光源波长范围受限, 这相当于给光谱加上了矩形窗。光源的光谱强度不平坦, 传感系统的损耗在不同的波长也不同, 最终得到的反射光谱包络类似高斯分布, 如图 3 所示, 体现在光谱表达式即(2)式中的包络项 $I_E(\lambda_i, t_k)$ 上。光谱的中心波长会随温度变化, 在干涉谱上表现为高斯窗外形及位置的变化, 这将影响傅里叶变换谱, 导致解调精度的下降, 因此对光谱去包络是必要的。希尔伯特变换法(HT)^[15]过程简单, 在提取包络方面有着广泛的应用。经 HT 法去包络后的信号可以表示为

$$I(\lambda_i, t_k) = \cos\left[\frac{4\pi d(t_k)}{\lambda_i} + \varphi_0(t_k)\right] = \cos\left[2\pi \frac{2}{\lambda_i} d(t_k) + \varphi_0(t_k)\right]. \quad (3)$$

通过上面的两步流程, 得到了含腔长参量的类余弦表达式, 可通过 zoom-FFT 法解调出传感信号量 $d(t_k)$ 。

2.2.2 zoom-FFT 法进行腔长解调

由于干涉光谱是对波长的等间距采样, 而 λ_i 在相位项的分母上, 对(3)式直接做傅里叶变换会因啁啾效应导致频谱展宽。利用 λ 和光频 ν 成反比的特点, 可将 $1/\lambda$ 转换成 ν/c , 此时得到的相位与 ν 成正比。为了对 ν 进行均匀取样, 对光谱进行三次样条插值^[12], 得到的光谱表达式为

$$I(\nu_i, t_k) = \cos\left[2\pi \frac{2\nu_i}{c} d(t_k) + \varphi_0(t_k)\right], \quad (4)$$

式中的相位与光频成正比, 此时可以对光谱做离散傅里叶变换

$$\mathcal{F}(m, t_k) = \sum_{n=0}^{N-1} I(n, t_k) \exp(-j2\pi nm/N), \quad m = 1, 2, \dots, N-1, \quad (5)$$

式中 $\mathcal{F}(m, t_k)$ 为离散傅里叶频谱, $I(n, t_k)$ 为光谱在光频域上的离散序列, m 为频谱的离散序列, N 为采样长度。

设 $\mathcal{F}(m, t_k)$ 的峰值位置为 m_1 , 则可得到腔长 $d(t_k)$ 的表达式^[12]为

$$d(t_k) = \frac{cm_1}{2N\delta\nu}. \quad (6)$$

由于 FFT 中 m_1 只能取整数, 因此可求得腔长分辨率为 $\delta d = 13.8 \mu\text{m}$ 。低分辨率限制了 EFPI 的应用, 而使用 zoom-FFT 法可进一步提高腔长分辨率。

用 zoom-FFT 法进行腔长解调, 可迅速逼近真实峰值, 而计算量却不会增加很多, 所以使用 zoom-FFT 法在离散傅里叶变换基础上提高腔长解调分辨率, 算法步骤^[13]如下:

- 1) 对一帧光谱进行 FFT 处理, 此时离散频谱序列的步长 $\Delta m = 1$ 。找到频谱峰值位置作为估值位置 $\hat{m}^{(0)}$, 则实际峰值位置 m_1 与估计位置 $\hat{m}^{(0)}$ 的距离最大为 $1/2$, 即真实峰值位置在 $[\hat{m}^{(0)} - 1/2, \hat{m}^{(0)} + 1/2]$ 区间内;
- 2) 将离散频谱序列的步长缩短至原长的 $1/2$, 即 $\Delta m = 1/2$;
- 3) 通过(5)式分别计算出 $\hat{m}^{(0)} - \Delta m$ 和 $\hat{m}^{(0)} + \Delta m$ 处的幅度, 此时(5)式中 m 不再只是整数;
- 4) 选出 $\hat{m}^{(0)} - \Delta m$ 、 $\hat{m}^{(0)}$ 和 $\hat{m}^{(0)} + \Delta m$ 三处中幅度最大的位置作为新估计位置 $\hat{m}^{(2)}$, 这样, 实际位置 m_1 与估计位置 $\hat{m}^{(2)}$ 的距离最大为 $1/4$;
- 5) 进行 M 次迭代后, 估计位置 $\hat{m}^{(M)}$ 与真实位置 m_1 的距离将缩小到 $1/2^M$ 。

zoom-FFT法的分辨率以指数形式增长,做 M 次积分运算可将分辨率在FFT基础上提高 2^M 倍。在实际应用中,zoom-FFT的精度不会随 M 无限增长,而是会受到信号的信噪比限制,本文中当 $M=16$ 时即达到精度上限。

综上所述,EFPI传感器进行传感的流程如图4所示。1为传感系统的硬件部分,用于获取EFPI传感器的干涉光谱。2~4为传感系统的软件处理部分:先用DWT法对干涉光谱进行滤波,并用HT法将干涉光谱去包络,然后用zoom-FFT法将信号从干涉光谱中恢复出来。在实际中,绝对量如压力等一般为静态或准静态变化量,而相对量如声压等一般为动态变化量,这两种信号在频率上易于区分。同时,绝对量一般变化范围大,相对量变化范围较小,而zoom-FFT法解调动态范围大、解调精度高的特点可同时满足这两种信号在解调上的要求。另外,系统在硬件上可对光谱进行高速采集,在算法上zoom-FFT法运算速度快,从而满足了动态信号对系统传感速度的要求,因此该系统可对动态绝对量和静态相对量同时解调处理。5为后处理部分,主要用于存储或呈现解调结果。

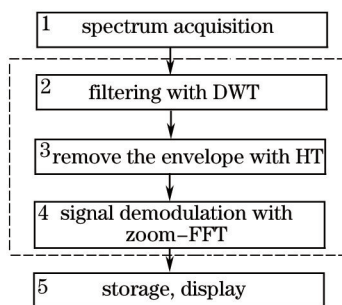


图4 EFPI传感器传感流程图

Fig.4 Flow diagram for sensing of EFPI sensor

3 实验和结果

对EFPI传感器做隔声隔振处理,用图1实验系统测试zoom-FFT法解调精度。FBGA采样频率为5000 Hz,测量时长为0.4 s。通过zoom-FFT法解调,得到的腔长分布如图5所示。用标准差作为精度的度量,计算可得zoom-FFT的精度达4 nm。相比于FFT法,zoom-FFT法的精度提高了3450倍。

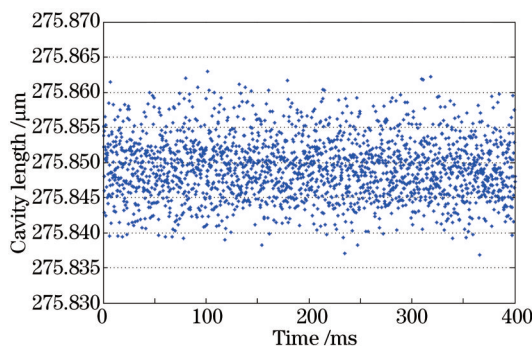


图5 zoom-FFT算法精度测试

Fig.5 Test for accuracy of zoom-FFT algorithm

通过将EFPI传感器放入一个可发射稳定声波的驻波管水声测试系统中,测试传感器对液位变化和声压的响应,测试系统原理图如图6所示。

1) 不发射声信号,将EFPI传感器固定在钢尺上,依次分别放置不同深度,从0~30 cm,每次变化2 cm,分别测试传感器腔长的变化,测试结果如图7所示,对测量出的结果进行曲线拟合,得到腔长 L (单位为 μm)随深度 H (单位为cm)变化的关系为

$$L = -0.31H + 275.77, \quad (7)$$

式中275.77为EFPI传感器完全未加压时的原始腔长,0.31表示深度每变化1 cm,腔长变化 $0.31 \mu\text{m}$ 。由于zoom-FFT法的解调精度为4 nm,根据(7)式可知,30 cm液位深度内分辨率达0.13 mm,根据压力 P 与液位

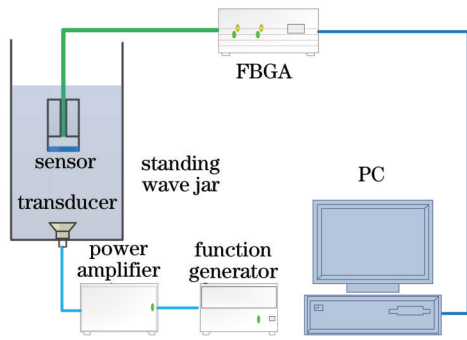


图6 双参量同时传感实验系统图

Fig.6 Schematic of dual-parameter simultaneous sensing experiment

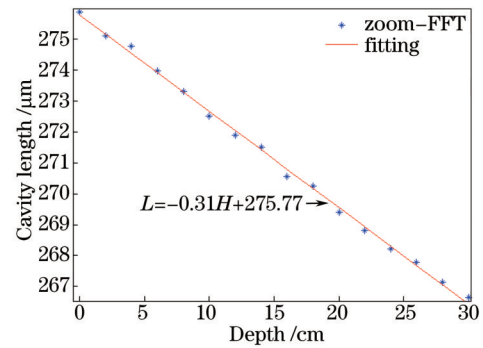


图7 液位标定曲线

Fig.7 Calibration curve of liquid level

深度 h 的关系 $P = \rho gh$ 得 zoom-FFT 法可分辨出 1.3 Pa 的压力变化。

2) 在驻波管内发射声信号,利用 EFPI 传感器同时进行液位和声压测量。用换能器产生 100 Hz 声信号,同时使 EFPI 传感器在水中缓慢下降,探测时间约 1.5 s,在探测过程中,液位信号和声信号将共同作用于 EFPI 传感器。对干涉光谱进行解调,得到的信号如图 8(a)所示,整体上腔长在缩短,这是由于深度增加引起的;信号细节如插图所示,正弦波形由声信号引起。液位深度和声波两种信号频率差距较大,可通过小波滤波器来分离两种信号。图 8(b)为低频液位信号,通过标定曲线来确定 EFPI 传感器深度,可以看出在探测时间内传感器从 9 cm 下降到了 22 cm。图 8(c)为高频声信号,声信号幅值被包络调制,原因可能为:1) 在传感器下降过程中经历的声波场不同位置振幅不同;2) 由于传感器固定在钢尺上,钢尺的移动引起了水面波动。对高频声信号进行简单的去包络后做傅里叶变换,得到频谱图如图 8(d)所示,100 Hz 处的信号即为声信号,由于传感器在声波场中的移动等原因产生了二次谐波,在功率谱上比基频信号低了约 20 dB。

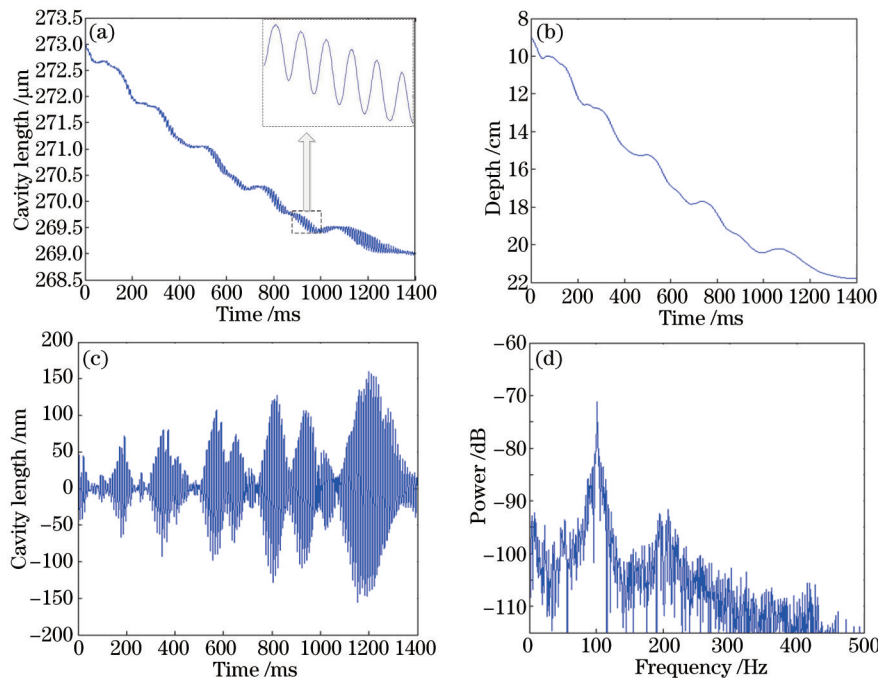


图8 解调结果。(a) EFPI 传感器输出信号;(b) 液位深度信号;(c) 声信号;(d) 声信号功率谱

Fig.8 Demodulation results. (a) Output signal of EFPI sensor; (b) depth signal; (c) sound signal; (d) power spectrum of sound

4 结 论

采用 zoom-FFT 算法实现了 EFPI 传感器腔长的高精度快速解调,以及静态绝对量和动态相对量的同时输出。实验测得 zoom-FFT 法的精度可达 4 nm,对应液位深度分辨率为 0.13 mm,压力分辨率为 1.3 Pa。对 EFPI 传感器进行了 0~30 cm 范围内的液位标定,在测试范围内腔长变化与液位深度具有较好的线性关

系。在水声驻波管中用 EFPI 传感器对液位深度与声信号进行同时传感,解调系统能同时测量出静水压和声压的大小,测试结果验证了 zoom-FFT 法具有运算速度快、解调精度高、动态范围大的特点,以及单 EFPI 传感器对静态绝对量和动态相对量进行双参量同时传感的能力。此研究成果在需要双参量同时测量的场合,如拖曳水听器阵列中的深度和水声信号的同时测量,复杂环境下的温度与声信号的同时测量,桥梁结构中应变与振动的同时测量等具有潜在的应用价值。

参考文献

- 1 A Wang, H Xiao, R G May, *et al.*. Optical fiber sensors for harsh environment[C]. International Society for Optical and Photonics, 2000: 2-6.
- 2 K A Murphy, M F Gunther, R G May, *et al.*. EFPI sensor manufacturing and applications[C]. SPIE, 1996, 2721: 476-482.
- 3 F Wang, Z Shao, J Xie, *et al.*. Extrinsic Fabry-Pérot underwater Acoustic sensor based on micromachined center-embossed diaphragm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(23): 4628-4636.
- 4 Ni Xiaoqi, Wang Ming, Chen Xuxing, *et al.*. Quasi-distributed measurement of optical fiber MEMS Fabry-Perot pressure sensors[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2009, 9(4): 82-86.
倪小琦, 王 鸣, 陈绪兴, 等. 光纤 MEMS 法布里-珀罗压力传感器的准分布式测量[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2009, 9(4): 82-86.
- 5 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Zhou Changxue, *et al.*. Frequency-multiplexed fiber-optic Fizeau strain sensor system based on optical amplification[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(7): 2221-2225.
江 建, 饶云江, 周昌学, 等. 基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器频分复用系统[J]. 物理学报, 2004, 53(7): 2221-2225.
- 6 Q Cai, J Jiang, W Ding. A fiber optic EFPI high temperature sensor[J]. Optical Technique, 2012, 38(1): 36-39.
- 7 V Bhatia, M B Sen, K A Murphy, *et al.*. Wavelength-tracked white light interferometry for highly sensitive strain and temperature measurement[J]. Electronics Letters, 1996, 32(3): 247-248.
- 8 B Qi, G R Pickrell, J C Xu, *et al.*. Novel data processing techniques for dispersive white light interferometer[J]. Opt Eng, 2003, 42(11): 3165-3171.
- 9 X Zhou, Q Yu. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement[J]. Sensors Journal, IEEE, 2011, 11(7): 1602-1606.
- 10 Z Jing, Q Yu. White light optical fiber EFPI sensor based on cross-correlation signal processing method[C]. Proc 6th Int Symp Test and Measurement, 2005, 4: 3509.
- 11 Zhang Peng, Zhu Yong, Chen Weimin. A 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调原理研究[J]. 光子学报, 2004, 33(12): 1449-1452.
- 12 Xie Jiehui, Wang Fuyin, Hu Zhengliang, *et al.*. Demodulation of white-light interferometry based on variable sampling length Fourier transform[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s106009.
谢杰辉, 王付印, 胡正良, 等. 基于变采样长度傅里叶变换的白光干涉仪解调[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s106009.
- 13 Z Liu, J Li. Implementation of the RELAX algorithm[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 657-664.
- 14 A Rathod, S Mishra, S Ghildiyal, *et al.*. Transform domain methods for performance enhancement of EFPI sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 189(15): 1-7.
- 15 K G Larkin. Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry[J]. J Opt Soc Am A, 1996, 13(4): 832-843.

栏目编辑: 苏 岑