

doi:10.3788/gzxb20184706.0606001

基于光学相关的光纤法布里-珀罗传感器解调仪

陈珂, 郭珉, 王泽霖, 刘博文, 周新磊, 于清旭

(大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要:针对当前光纤法布里-珀罗(F-P)传感器解调仪存在的结构复杂和成本较高等问题,提出一种基于光学相关原理的新型解调方案.采用平板玻璃作为光学互相关器,利用平板玻璃与F-P腔的互相关关系解调出光纤F-P传感器的腔长.建立仿真模型对解调光路进行优化设计,搭建了结构简单的单模光纤F-P传感器解调仪,该仪器仅由宽谱光源、平板玻璃、线阵 CCD、柱面镜和单模光纤搭建而成.实验结果表明,腔长解调分辨率达到 0.72 nm.该解调仪在光纤测井、液位测量和结构健康监测等领域中的温度、压力和位移测量中有着广泛的应用前景.

关键词:光纤传感;光学相关;光纤法布里-珀罗干涉仪;平板玻璃;线阵电荷耦合元件

中图分类号:TP212.6

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0606001-6

Optical Correlation Based Demodulator for Fiber-optic Fabry-Perot Sensor

CHEN Ke, GUO Min, WANG Ze-lin, LIU Bo-wen, ZHOU Xin-lei, YU Qing-xu

(School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In view of the complicated structure and high cost of the ever reported fiber-optic Fabry-Perot (F-P) sensing demodulator, a new demodulation scheme based on optical correlation is presented in this paper. A glass wafer is used as an optical cross-correlator. The cavity length of the F-P sensor is demodulated by the cross-correlation relationship between the glass wafer and the F-P cavity. To optimize the optical path, the single-mode fiber-optic F-P sensing demodulator with a simple structure has been constructed by establishing a simulation model. The demodulator consists of a broadband light source with the center wavelength of 850 nm, a glass wafer, a linear CCD, a cylindrical mirror and a single-mode fiber. Experimental results show that the resolution of the demodulated cavity length is achieved to be 0.72 nm. The proposed demodulator has broad prospects in the fields of well logging, liquid level monitoring and structural health monitoring for temperature, pressure and displacement measurements.

Key words: Fiber-optic sensing; Optical correlation; Fiber-optic Fabry-Perot interferometer; Glass wafer; Linear charge-coupled device

OCIS Codes: 060.2370;120.2230;060.2300

0 引言

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器以其体积小、耐高温、抗电磁干扰和测量精度高等诸多优点^[1-2],在油田测井^[3]、液位测量^[4]和结构健康监测^[5]等领域具有重要的应用价值.当待测参量变化引起F-P传感器的腔长发生改变时,产生的干涉谱也会随之变化^[6].目前,光纤F-P传感器腔长解调法主要有强度解调法、光谱域白光干涉解调法和相关解调法^[7].

强度解调法原理简单,但解调精度不高,且易受光源功率波动和光路损耗变化等因素影响^[8].光谱域白

基金项目:国家自然科学基金(No.51277021)和辽宁省博士科研启动基金(No.201601040)资助

第一作者:陈珂(1988—),男,博士,讲师,主要研究方向为光纤传感和激光光谱.Email:chenke@dlut.edu.cn

通讯作者:于清旭(1955—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感和激光光谱.Email:yuqx@dlut.edu.cn

收稿日期:2018-01-11; **录用日期:**2018-03-08

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

光干涉解调法采用高性能光纤光谱仪,对光谱进行去包络、滤波和光谱域-光频域变换后,通过双峰解调法、快速傅里叶变换法和互相关解调法等相位解调技术,可实现对腔长的高精度测量,但该解调系统成本较高^[9].传统的非扫描式相关解调法利用光楔作为光学互相关器,经 F-P 腔调制后的光束照射到光楔上,透射光被图像传感器接收.当光楔上某点的厚度和 F-P 腔长相等时,光学相关度最高,光电探测器接收到的光强最大,通过分析图像传感器探测的图像中最大光强处对应的光楔厚度即可解调出 F-P 腔长^[10-12].该方案解决了扫描式相关解调系统长期工作稳定性不高的问题,并简化了光纤 F-P 传感器解调系统的结构,但解调精度受限于光楔的表面平整度,较高的精度要求极大地增加了系统的制作难度.2017 年,Anbo Wang 小组首次提出基于平板玻璃的光纤 F-P 传感器解调方案^[13],并设计了结构简单的光纤 F-P 温度传感系统,该系统采用多模光纤,可以耦合更多的光源能量,提高测量信噪比,但模间干涉效应降低了相关图像的对比度,且采用的面阵 CCD 成本较高,信号处理较复杂.

本文提出了一种基于光学相关原理的单模光纤 F-P 传感器解调方案,采用平板玻璃作为光学互相关器.解调系统仅由单模光纤、平板玻璃和线阵 CCD 构成,极大地简化了光纤法布里-珀罗传感器解调仪的结构.

1 解调原理

光学相关解调的结构如图 1(a)所示,从光纤 F-P 传感器返回的低细度干涉光从光纤端面出射,高斯发散光斜入射到平板玻璃上,当分别被上下表面反射的两束光照射在线阵 CCD 上同一点,且光程差等于 2 倍 F-P 腔长时相关度最高,CCD 接收到的光强最大.F-P 传感器腔长变化引起相关度发生变化,线阵 CCD 上光强分布的极大值位置也随之移动.

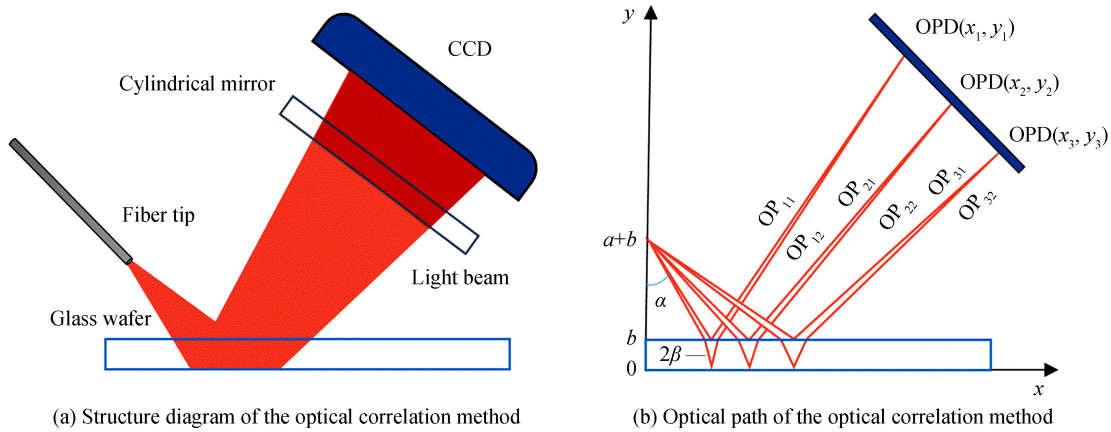


图 1 光学相关解调示意图
Fig.1 Schematic diagram of the optical correlation demodulation

光学相关解调的光路如图 1(b)所示,光纤出射端与平板玻璃的夹角为 45° ,光纤端面与平板玻璃上表面垂直距离为 a ,平板玻璃厚度为 b ,折射率为 n ,CCD 的长度为 L .经平板玻璃上表面反射,入射到 CCD 表面 (x, y) 点的光束为 $OP_1(x, y)$,经平板玻璃下表面反射,同样入射到 CCD 表面 (x, y) 点的光束为 $OP_2(x, y)$.光程分别为

$$OP_1(x, y) = \sqrt{x^2 + (y - b + a)^2} \quad (1)$$

$$OP_2(x, y) = \frac{a}{\cos\alpha} + \frac{y - b}{\cos\alpha} + \frac{2bn}{\cos\beta} \quad (2)$$

式中, α 和 β 分别是光束在平板玻璃外侧和内侧与法线的夹角.根据斯涅耳定律^[14]

$$\sin\alpha = n \sin\beta \quad (3)$$

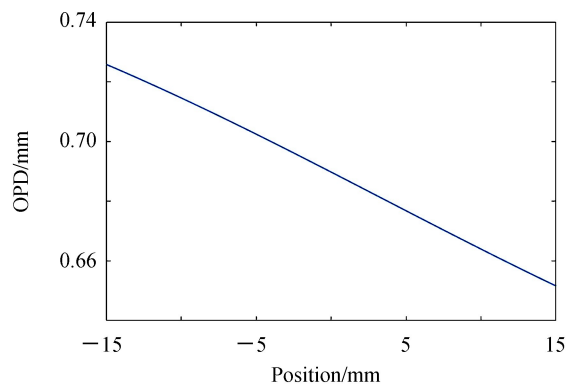


图 2 线阵 CCD 表面不同位置处光程差的仿真结果
Fig.2 Simulation results of optical path difference at different positions of a linear array CCD surface

根据图 1 中的几何关系

$$a \tan \alpha + 2b \tan \beta + (y - b) \tan \alpha = x \quad (4)$$

CCD 上 (x, y) 处的光程差为

$$OPD(x, y) = OP_2(x, y) - OP_1(x, y) \quad (5)$$

根据式(1)~(5)即可计算出 CCD 表面的光程差空间分布,计算结果如图 2 所示.其中: $a=0.5 \text{ mm}$, $b=250 \mu\text{m}$, $L=30 \text{ mm}$, $n=1.5$,光纤端面与平板玻璃表面的夹角为 45° ,宽谱 LED 光源的中心波长为 850 nm .从图 2 可以看出,光电探测器表面不同位置对应的光程差呈近似线性关系.

2 解调仪设计

2.1 系统光路

基于光学相关的单模光纤 F-P 传感器解调仪的结构如图 3 所示.中心波长为 850 nm 的 LED 发射的宽谱光经 1×2 单模光纤耦合器入射到非本征 F-P 腔,F-P 腔由光纤端面和位置可调反射镜之间的空气隙构成.F-P 腔反射光再经过耦合器后,从光纤端面发射的高斯空间发散光以 45° 角入射到厚度为 $250 \mu\text{m}$ 的平板玻璃.解调仪中光纤出射端面与平板玻璃间垂直距离 0.5 mm ,入射到平板玻璃上的光斑直径小于 $100 \mu\text{m}$,因此有效反射面积较小,表面轻微不平整对测量结果的影响较小.有效像素为 3 648 的线阵 CCD 对平板玻璃的反射光进行成像,为提高信噪比,在 CCD 前面安装柱面镜对光束进行会聚,增加 CCD 光敏区域的信号光强度.信号处理电路采集 CCD 信号并传输到计算机后,进行去包络、滤波和寻峰计算,并最终解调出 F-P 腔长值.

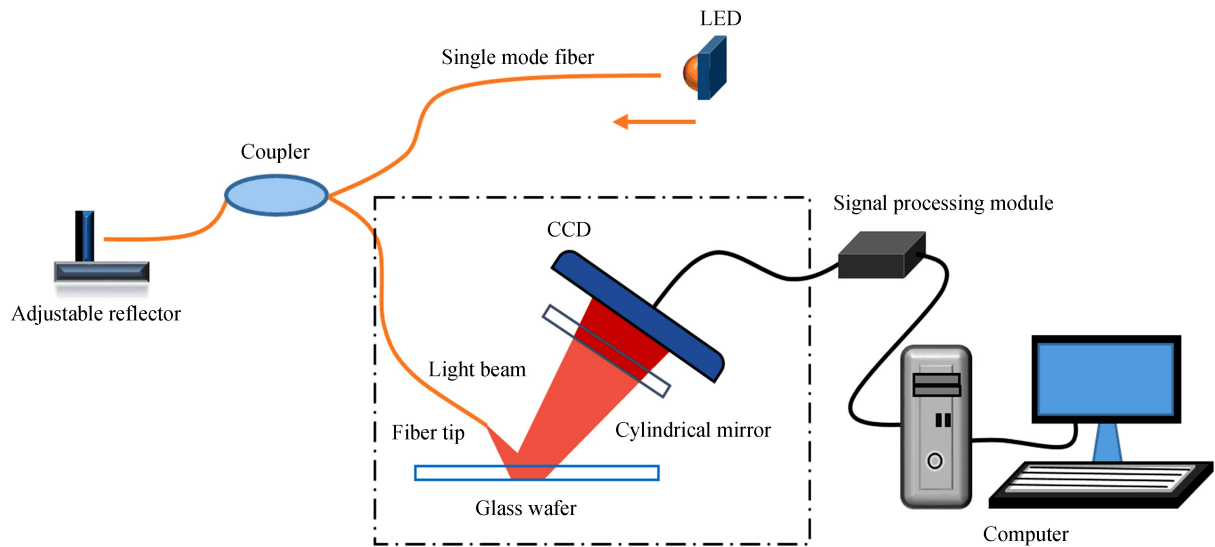


图 3 解调仪结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the demodulator

2.2 线阵 CCD 数据采集系统设计

线阵 CCD 数据采集系统包括基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,FPGA)和通用串行总线(USB)通信的 CCD 信号高速采集电路以及 CCD 数据采集软件.CCD 数据采集流程如图 4 所示.运行基于 LabVIEW 的上位机程序,初始化后,向基于 FPGA 的下位机发送数据采集指令,驱动 CCD 开始工作.CCD 将采集到的光信号转换为电信号,经高速模数转换后由 FPGA 控制写入先入先出队列(First Input First Output,FIFO)进行缓存后,将数字量的图像信息发送至上位机,单次数据采集结束.

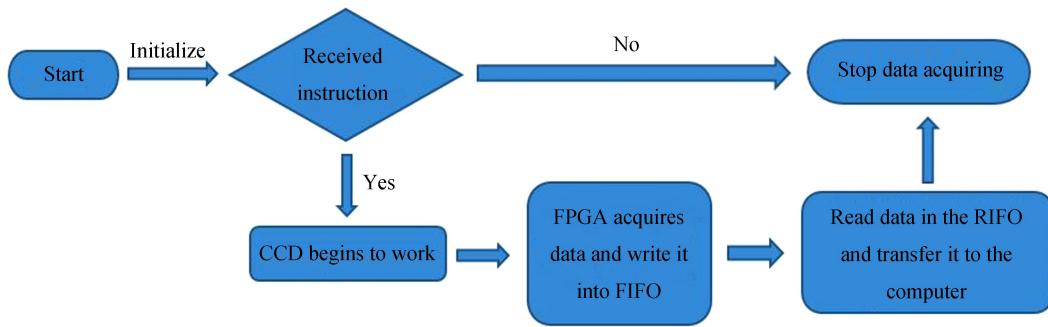


图4 线阵 CCD 数据采集流程图
Fig.4 Flow chart of data acquisition for linear CCD

3 实验结果与分析

3.1 不同光纤对比实验

在解调系统中分别采用多模光纤和单模光纤,线阵 CCD 积分时间分别设置为 50 ms 和 10 s,并用 LabVIEW 软件进行信号采集与处理,得到的多模光纤传感系统和单模光纤传感系统的光学相关图像分别如图 5(a)和图 5(b)所示.由于采用单模光纤的解调系统对比度更高,信号质量优于采用多模光纤的解调系统,因此,下文的实验中选用单模光纤.

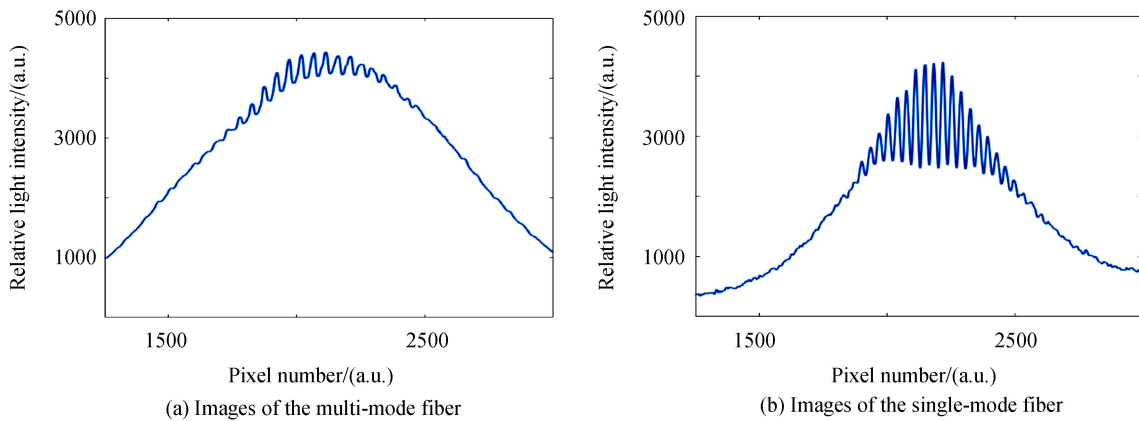


图5 光纤传感系统的光学相关图像
Fig.5 Optical correlation images of the sensing system

3.2 信号处理

信号的频谱如图 6 所示,有效信号的频率范围约为 95-120 Hz.为去除噪声和光源强度分布对结果的影响,采用带通滤波器对采集的图像进行滤波,低截止频率为 80 Hz,高截止频率为 130 Hz.通过微调反光镜位置改变 F-P 腔长,得到不同腔长下滤波后的光学相关图像,如图 7 所示.通过 LabVIEW 软件提供的寻峰模块,得到不同腔长下的光谱峰值位置对应的像素点.

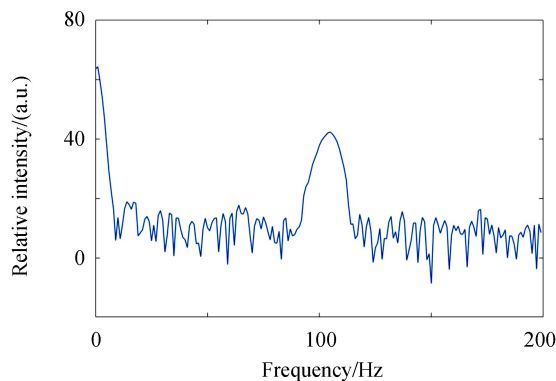


图6 光学相关信号的频谱
Fig.6 Spectrum of the optical correlation signal

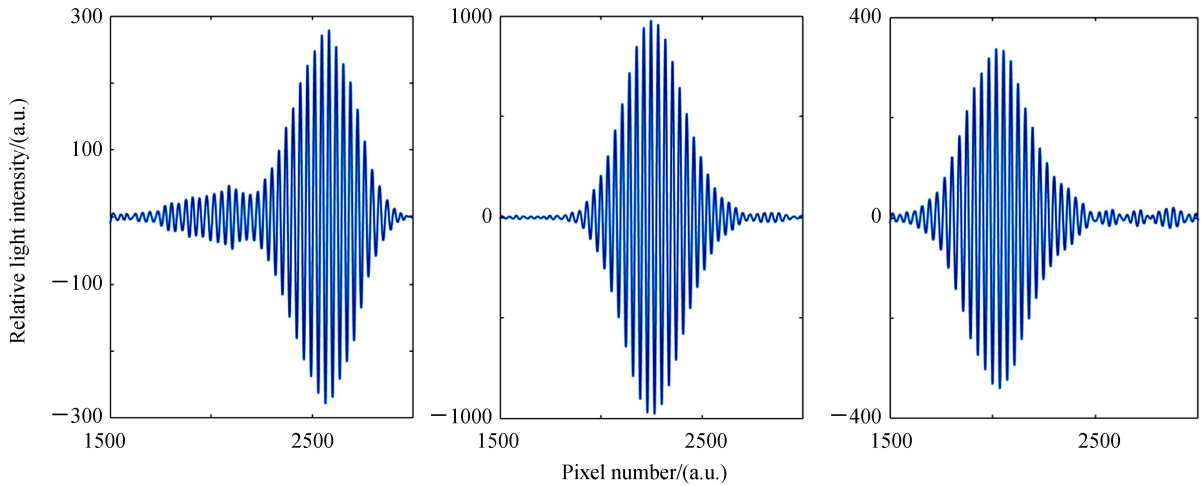


图 7 不同 F-P 腔长下滤波后的光学相关图像
Fig.7 Filtered optical correlation image with different F-P cavity lengths

3.3 腔长标定

由于系统存在的平板玻璃厚度和系统安装误差等因素,线阵 CCD 探测图像中光强最大值对应的像素位置与理论分析结果存在偏差,不能得到精确的腔长测量值,因此需要进行标定.采用微型光纤光谱仪(HR2000,Ocean Optics)作为腔长标定的参考仪器,并采用高精度最小均方根估计解调法对测量的光谱进行相位解调得到绝对腔长值^[15-16].根据不同腔长的测量结果,得到像素与 F-P 腔长的对应关系,如图 8 所示.线性拟合结果表明,光学相关图像峰值对应像素位置与腔长具有较好的线性关系,线性拟合方程为 $y = -0.017\ 016x + 383.86$.

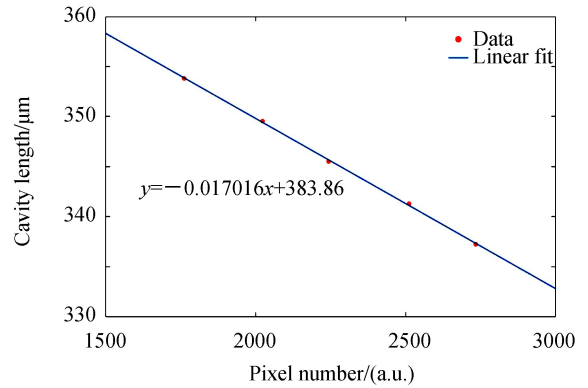


图 8 光学相关图像峰值对应像素位置与 F-P 腔长的关系
Fig.8 Linear fitting results between peak of the optical correlation image and F-P cavity length

3.4 腔长解调分辨率

线阵 CCD 积分时间设置为 10 s,并采用平滑滤波(半宽移动平均设置为 3)进行降噪处理,保持 F-P 腔长不变,连续测量 50 次,解调结果如图 9 所示.解调的腔长分辨率(1 倍标准差)达到 0.72 nm,该指标可以满足光纤 F-P 传感器在油田测井中对压力测量的需求,对于更高分辨率测量,可采用更高功率的宽谱光源,提高系统的信噪比.

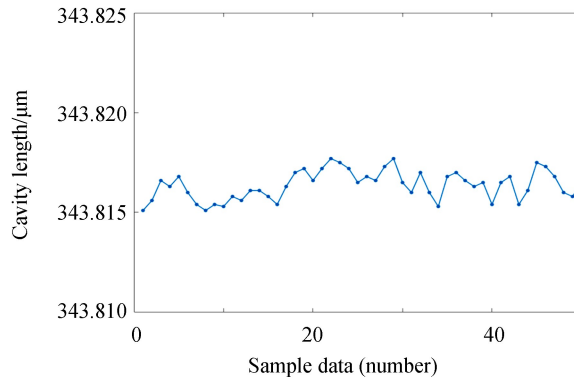


图 9 F-P 腔长的连续解调结果
Fig.9 The results of consecutive demodulation of F-P cavity length

4 结论

本文建立了一种基于线阵 CCD 的非扫描式光学相关解调系统的理论模型,得到光学相关图像峰值对应像素位置与 F-P 腔长的线性关系.在此基础上搭建了一套实验系统,并通过腔长标定,实现了对单模光纤 F-P 传感器的高稳定性解调,腔长分辨率达到 0.72 nm.该方案利用低成本的平板玻璃代替精密光楔,并用线阵 CCD 代替面阵 CCD,解决了传统 F-P 腔长解调方案成本高、系统结构复杂和长期稳定性不高等问题.在静态压力、温度和位移等参量测量的应用中具有较好的应用前景.

参考文献

- [1] RAO Y J. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry - Perot interferometric sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**(3): 227-237.
- [2] YU Q X, ZHOU X L. Pressure sensor based on the fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(1): 72-83.
- [3] YU Qing-xu, WANG Xiao-na, SONG Shi-de, *et al.* Fiber optic pressure sensor system based on extrinsic fabry-perot interferometer for high temperature oil well measurement[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(03): 299-302.
于清旭, 王晓娜, 宋世德, 等. 光纤 F-P 腔压力传感器在高温油井下的应用研究[J]. *光电子 • 激光*, 2007, **18**(03): 299-302.
- [4] ZHANG Fang, GAO Jiao-bo, WANG Nan, *et al.* LWIR imaging spectrometer employing a variable gap Fabry-Perot interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(3): 0318001.
张芳, 高教波, 王楠, 等. 变间隙法布里-珀罗干涉式长波红外光谱成像系统[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(3): 0318001.
- [5] LENG J S, ASUNDI A. Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, **103**(3): 330-340.
- [6] CHEN K, ZHOU X L, YANG B K, *et al.* A hybrid fiber-optic sensing system for down-hole pressure and distributed temperature measurements[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, **73**: 82-87.
- [7] LI Chao, WANG Yong-jie, LI Fang. Highly stable FBG wavelength demodulation system based on F-P etalon with temperature control module[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(1): 0122002.
李超, 王永杰, 李芳. 基于 F-P 温控标准具的高稳定性 FBG 波长解调系统[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(1): 0122002.
- [8] JING Zhen-guo, YU Qing-xu, ZHANG Gui-ju, *et al.* A novel wavelength demodulating method for white light optical fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 53-57.
荆振国, 于清旭, 张桂菊, 等. 一种新的白光光纤传感系统波长解调方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 53-57.
- [9] WANG N, ZHU Y, GONG T C, *et al.* Multichannel fiber optic Fabry-Perot nonscanning correlation demodulator[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**(7): 070601.
- [10] YIN J D, LIU T G, JIANG J F, *et al.* Wavelength-division-multiplexing method of polarized low-coherence interferometry for fiber Fabry - Perot interferometric sensors[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(19): 3751-3753.
- [11] ZHAO Yan, WANG Dai-hua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Pérot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(01): 87-93.
赵艳, 王代华. 用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(01): 87-93.
- [12] LI Jun-shou, ZHU Yong, WANG Ning, *et al.* An algorithm for improving the signal stability of the fast fiber optic Fabry-Perot nonscanning correlation demodulation system[J]. *Acta Photonica Sinica* 2015, **44**(01): 91-97.
李钧寿, 朱永, 王宁, 等. 一种提高快速光纤法-珀非扫描式相关解调系统信号稳定性的算法[J]. *光子学报*, 2015, **44**(01): 91-97.
- [13] YU Z H, TIAN Z P, WANG A B, *et al.* Simple interrogator for optical fiber-based white light Fabry-Perot interferometers [J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(4): 727-730.
- [14] 赵凯华. 新概念物理教程-光学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
- [15] ZHOU X L, YU Q X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry - Perot interferometer for subnanometer measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(7): 1602-1606.
- [16] ZHOU X L, YU Q X, PENG W. Simultaneous measurement of down-hole pressure and distributed temperature with a single fiber[J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, **23**(8) : 085102.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 51277021), The Doctoral Starting Foundation of Liaoning Province (No. 201601040)

引用格式: CHEN Ke, GUO Min, WANG Ze-lin, *et al.* Optical Correlation Based Demodulator for Fiber-optic Fabry-Perot Sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0606001

陈珂, 郭珉, 王泽霖, 等. 基于光学相关的光纤法布里-珀罗传感器解调仪[J]. *光子学报*, 2018, **47**(6): 0606001