

高速多通道光纤法布里-珀罗传感器解调系统研究

李健宁 朱 永 王 宁 李钧寿

(重庆大学光电工程学院光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 基于非扫描式相关解调原理,提出了白光干涉型多通道光纤法布里-珀罗传感器高速解调系统。采用斐索干涉仪和高性能线阵 CCD 实现了法布里-珀罗信号的解调,通过采用对称光路来提高系统光能的利用率,改善硬件系统的信噪比来提高系统的解调速度,实现了多通道法布里-珀罗信号的高速解调。设计加工了实验样机,并对样机进行了性能测试,测试结果表明:系统的分辨力为 8 nm,稳定性达到 7.5 nm,解调速度达到 1.5 kHz。该系统提高了光纤法布里-珀罗传感器的解调速度,拓展了仪器的应用领域。

关键词 光纤光学;法布里-珀罗解调;相关解调;高速;多通道

中图分类号 TP212.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s106001

Research on High Speed Multichannel Fiber Optical Fabry-Perot Sensor Demodulation System

Li Jianning Zhu Yong Wang Ning Li Junshou

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Education of Ministry, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract A multichannel fiber-optical Fabry-Perot (F-P) demodulation system based on non-scanning correlation demodulation using white light interfered F-P sensor is proposed. This system uses a Fizeau interferometer and a linear array CCD to achieve F-P demodulation. High speed demodulation is realized by means of enhancing optical energy utilization efficiency with symmetrical optical system and improving hardware system's signal-to-ratio. The prototype of non-scanning correlation demodulation fiber-optical F-P demodulator is made and tested. The testing results show that the demodulation resolution of the prototype is 8 nm, the stability is 7.5 nm and the demodulation speed is up to 1.5 kHz. This method provides a feasible solution, which achieves high demodulation speed and expands fiber-optical F-P demodulator's application fields.

Key words fiber optics; Fabry-Perot demodulation; correlation demodulation; high speed; multichannel

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 060.5060; 120.2230

1 引 言

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器以光波为载体,以光纤为媒介,在应变、震动、温度、压力等测量领域有着极高的测量精度,已被广泛地应用于建筑、能源、医疗、交通、航天航空等民用领域和军事领域^[1]。例如韩国在汉江最大跨度的 Sunggan 桥上安装了光纤法布里-珀罗传感器,进行应变监测;德国国家航空研究所将光纤传感器埋入机场跑道,以检测裂纹。

国外光纤法布里-珀罗传感器解调技术基础研究最早始于 20 世纪 80 年代,并将这一技术逐渐推向了应用且实现了产品化^[2]。以加拿大 FISO 公司、美国戴维森公司为代表,他们的产品技术最为先进,系统稳定性好,解调精度高,但同时存在技术垄断,售价高昂。我国 20 世纪 90 年代后,开始了光纤传感技术的应用研究,北京、上海、武汉、四川、重庆等地的高等院校纷纷投入大量研究力量,在光纤法布里-珀罗传感器应用于桥梁、公路等大型建筑中取

收稿日期: 2013-10-07; 收到修改稿日期: 2013-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61376121)、中央高校项目(106112013CDJZR,125502,20003,20008)

作者简介: 李健宁(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感与光电仪器等方面的研究。E-mail: ljn06002@163.com

导师简介: 朱 永(1973—),男,博士,教授,主要从事光微纳器件及系统、智能光电仪器等方面的研究。

E-mail: yongzhu@cqu.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S042011540S)

得的大量研究成果^[3]。重庆大学对光纤传感器和相关解调系统进行了大量的研究并投入到了实际应用中,目前已经应用在重庆大佛寺长江大桥、嘉陵江大桥等十余座桥梁结构健康监测中。

目前光纤法布里-珀罗传感器的解调方法主要分为强度解调和相位解调。相关解调属于相位解调的一种,由于其能够实现非扫描式解调,简化了系统、提高了精度、被广泛采用^[4-5]。但在应用上多限于低速动态检测,即解调速度不高,不能满足多测量点、高速检测的应用场合^[6]。现阶段光纤法布里-珀罗解调仪通过复用技术能够完成多点测量^[7-8],但仍存在单点检测成本高、解调速度较低的缺点,局限了其应用范围。为此,本文提出了基于非扫描式相关解调的多通道高速光纤法布里-珀罗解调系统,不仅实现了多点测量,降低了成本,同时提高了系统的解调速度,拓展了光纤法布里-珀罗传感器网络应用领域。

本文从信号相关性原理出发,分析了光纤法布里-珀罗传感器的相关解调原理,在理论的基础上进行了多通道光纤法布里-珀罗传感器解调系统的 optical 设计和硬件系统设计,并加工了实验样机,且对该样机进行了相应的实验测试。

2 非扫描式相关解调原理及实现

根据信号的相关性原理^[9],光纤法布里-珀罗传感器非扫描式相关解调原理如图 1 所示。宽带光源

发出的复色光,先经耦合器耦合进入光纤法布里-珀罗传感器,在法布里-珀罗腔两光纤端面发生多次反射和透射,形成多光束干涉。一部分携带腔长信息的反射输出光沿入射光纤原路返回,再次经耦合器到达准直透镜,准直透镜将光纤出射的圆光斑变成平行光,经斐索干涉仪(光楔)解调后由线阵 CCD 探测接收^[10],在光楔厚度与法布里-珀罗腔长相等处将出现光强最大值^[11-13]。通过标定,索引最大值对应的光楔厚度,便可知腔长值,完成相关解调。

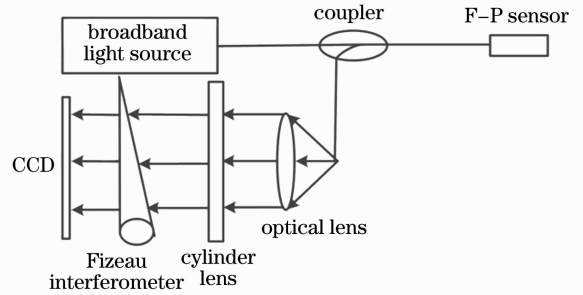


图 1 非扫描式相关解调原理图

Fig. 1 Schematic of non-scanning correlation demodulation

线阵 CCD 的光谱响应范围为 400~1000 nm,对于卤钨灯,其能量主要集中在 700~1100 nm。考虑到在该范围内,光纤的传输损耗较低,故选用卤钨灯作为系统光源。卤钨灯在光谱和空间上都呈高斯分布,因此光纤法布里-珀罗传感器斐索相关解调的数学模型为

$$I_{\text{out}}(x) = \exp\left[-\frac{(x-x_p)^2}{B_x^2}\right] \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{4\pi L}{\lambda}}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{4\pi L}{\lambda}} \cdot \frac{(1 - R_3)^2}{1 + R_3^2 - 2R_3 \cos \frac{4\pi x \tan \theta}{\lambda}} \times \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{B_\lambda^2}\right] \cdot I_0(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 x 为光楔长边上的任意位置, x_p 为光源的中心位置, B_x 为光源空间带宽所决定的高斯函数宽度, R_1 为法布里-珀罗腔近端的反射率, R_2 为法布里-珀罗远端的反射率, R_3 为光楔内表面的反射率, L 为光纤法布里-珀罗传感器腔长, λ 为波长, θ 为构成光楔两平面的夹角, λ_p 为光源光谱的中心波长, B_λ 是光源光谱宽度所决定的高斯函数宽度, $I_0(\lambda)$ 为光源光谱强度分布密度函数, 一般情况下为常量。

为了达到最优的解调结果,需要对光纤法布里-珀罗和光楔进行膜系优化。考虑到实际的镀膜工

艺,该系统的最优膜系参数为法布里-珀罗腔近端镀 $R_1=0.04$ 、远端镀 $R_2=0.1$ 且光楔两端 $R_3=0.5$ 的膜系。对(1)式进行计算,其中 $R_1=0.04$, $R_2=0.1$, $R_3=0.5$, $L=20 \mu\text{m}$, $\lambda=0.4\sim 1000 \text{ nm}$, $I_0(\lambda)=1$, $\theta=0.03^\circ$, $x_p=80 \text{ mm}$, $B_x=300 \text{ mm}$, 结果如图 2 所示。该膜系的输出光强满足系统的光能要求,对比度较好,使系统能够达到最优的解调效果。

3 光纤法布里-珀罗高速解调系统设计

光纤法布里-珀罗高速解调系统整体架构如图

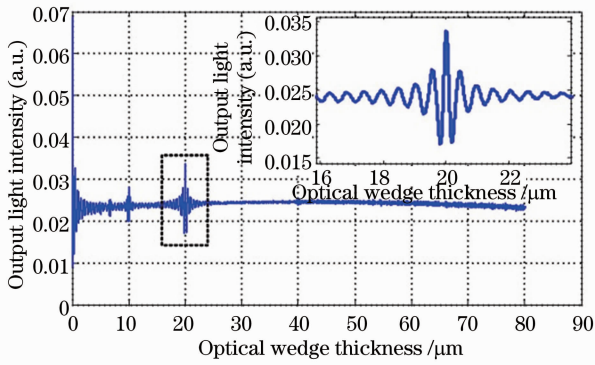


图2 输出光强与腔长的关系

Fig. 2 Relationship between output light intensity and cavity length

3所示,系统由上位机、8通道解调模块和传感器模块构成。其中上位机为工控机或PC机;传感器模块则由8个光纤法布里-珀罗传感器构成,用于测量被测物理量。8通道解调模块由8个功能完全相同的单通道解调模块构成,每个单通道解调模块具有独立的光学解调模块和完整的硬件系统,能够单独实现单个光纤法布里-珀罗传感器信号的预处理、采集与解调。解调结果经主控模块由同步串行外设接口(SPI)总线系统与上位机进行通信与数据传输,完成测量数据的显示与存储。

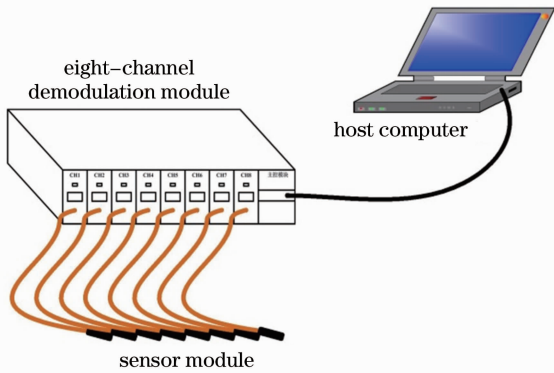


图3 系统整体架构

Fig. 3 Whole frame of the system

该系统主要通过改善系统的光学性能和硬件系统性能来提高解调速度。光学性能的改善主要通过减小光学系统各个传输环节的光能损耗,同时采用对称光路来提高光能的利用率,增强 CCD 探测接收的光能量。硬件系统性能的改善主要采用数字信号处理器(DSP)与现场可编程逻辑门阵列(FPGA)双高速微处理器配合的电路设计来提高信号解调速度,采用低噪声的信号调理电路对信号进行预处理,采用低噪声、高稳定度的电源系统为电路各模块供电等几方面来抑制系统噪声。

3.1 光学解调模块设计

由图1可知,复色光从光源耦合进入光纤后需要经过几个环节才能被光楔解调,由 CCD 探测接收,每一个环节都必不可少地存在光能量损耗,所以 CCD 探测到的光能量十分微弱。而现有的高速线阵 CCD 的光接收灵敏度有限,再加上系统解调速度较高,CCD 积分时间较短,因此,光学设计在尽可能地减小光能损耗的前提下提高 CCD 探测到的光信号强度,为此本系统的光学设计采用对称光路来提高系统光能利用率。

在光学解调模块中,利用柱面镜成线性光斑的特性及 2 倍焦距处成等大倒立像的原理对柱面反射镜结构进行了计算,成像原理如图 4 所示。STO 为柱面镜面,IMA 为像面, $\sin \theta = NA = 0.22$ (NA 为光纤的数值孔径),CCD 的感光长度为 29.7 mm,考虑到光源呈高斯分布且保证 CCD 上所有的像敏元都被感光,选用 $L = 38$ mm 为例。由图 4 可知,像面处于柱面镜二倍焦距处,则柱面镜的曲率半径 $\rho = 2f$ 。由于光是从同一光纤中发出的,而光纤处于 CCD 中点处,则光敏面的半长度

$$S = \frac{1}{4}L = \frac{1}{4} \times 38 \text{ mm} = 9.5 \text{ mm}. \quad (2)$$

而 $\sin \theta = NA = 0.22$,则 $\tan \theta = S/2f = 0.22553$,推算出柱面反射镜的曲率半径 $\rho = 2f = 42.1239$ mm,焦距 $f = 21.0619$ mm。

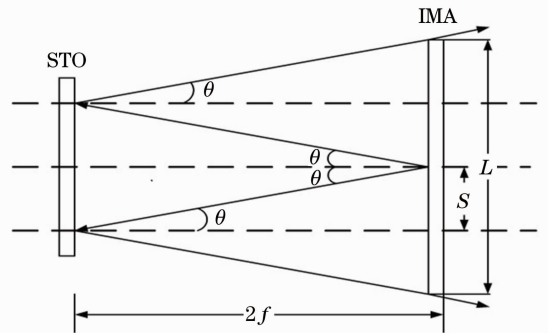


图4 透镜 2 倍成像原理

Fig. 4 Imaging principle of two times of lens

实际设计的解调模块光学结构如图 5 所示。在该设计中,当柱面反射镜的位置偏差 $\Delta \leq 0.2$ mm 时,CCD 接收到的能量基本保持一致。对称光路充分地利用了柱面镜的有效反射面面积,增加了反射光能量。经柱面镜转换后的线形光斑几乎垂直于 CCD 光敏面入射,提高了光能利用率。

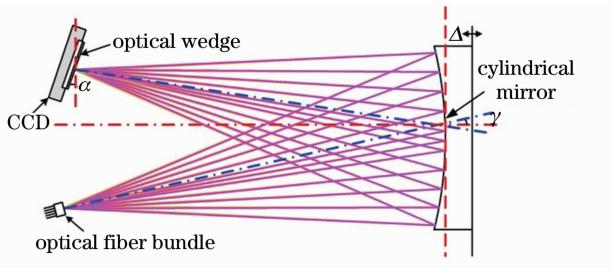


图 5 解调模块光学结构

Fig. 5 Optical structure of demodulation module

3.2 硬件系统设计

整个硬件系统分为一个主控模块和 8 个单通道解调模块构成, 主要实现两方面的功能: 1) 由单通道解调模块完成对线阵 CCD 的驱动以及对其输出信号进行预处理和信号采集与解调; 2) 由主控模块完成下位机与上位机的通信和数据传输、显示。

本系统解调速度快、数据量大, 要求高速信号处理电路, 因此, 每个单通道解调模块硬件系统采用 DSP 与 FPGA 双高速微处理器相结合的结构进行设计。FPGA 作为系统逻辑控制的核心, 同时用作 DSP 的外部接口部件, 使 DSP 高速数据处理能力与 FPGA 高速、复杂逻辑控制能力相结合, 减轻了 DSP 的工作负担, 大大提高了 DSP 工作效率。单通道解调模块的硬件系统设计如图 6 所示, 主要由 DSP 处理器、FPGA、线阵 CCD、信号调理电路和模数转换器(ADC)等组成。

上位机通过 SPI 总线系统向主控模块发出指令, 控制 8 个单通道解调模块开始工作。此时, 每个单通道解调模块中的线阵 CCD 在 FPGA 驱动时序下将光信号转换为模拟电信号, 经信号调理电路处理后信号最大振幅约为 5 V, 带宽约为 5.6 MHz, 再由 ADC 转换为适合 DSP 处理的数字信号并存储到 FPGA 的随机存储器中。DSP 通过外部扩展口与

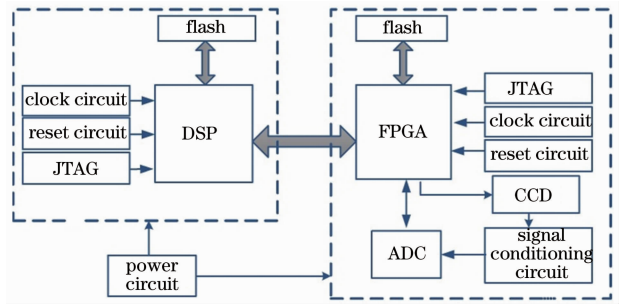


图 6 单通道解调模块硬件系统

Fig. 6 Hardware system of single-channel demodulation module

FPGA 建立的高速缓存通道访问 FPGA 内部存储器, 并通过 16 位数据总线将数据不间断地读入 DSP 中进行运算处理, 运算结果再通过 SPI 总线系统上传至上位机进行存储与显示。采用联合测试工作组(JTAG), 其接口的主要作用是将编写完成的驱动程序烧写进 FPGA。

信号调理电路的性能直接影响系统的信噪比, 为此本系统设计了低噪声信号调理电路, 如图 7 所示, 主要实现信号放大与滤波。为降低系统引入噪声, 运放选用 Analog Devices 的 ADA4898-2, 它是一款超低噪声(典型输入电压噪声为 $0.9 \text{ nV} \cdot \sqrt{\text{Hz}}$)和失真、宽带宽[-3 dB 带宽为 65 MHz(带宽增益 $G = +1$)]、单位增益稳定、电压反馈型双运算放大器。放大电路一共分为三级, 为了去除 CCD 光电转换后输出电信号中的 7.4 V 直流分量, 第一级采用差分放大电路, 第二级、第三级为反相放大, 具有较高共模抑制比, 同时将负电压信号变为正电压信号。由(1)式可知, 经柱面镜反射后通过光楔解调由 CCD 接收的光信号存在不均匀性, 使 CCD 输出的电信号存在低频噪声。同时采样保持电路和其他环节会引入高频噪声, 故滤波器采用二阶带通滤波器可将相关信号选择出来, 滤除高频与低频噪声。

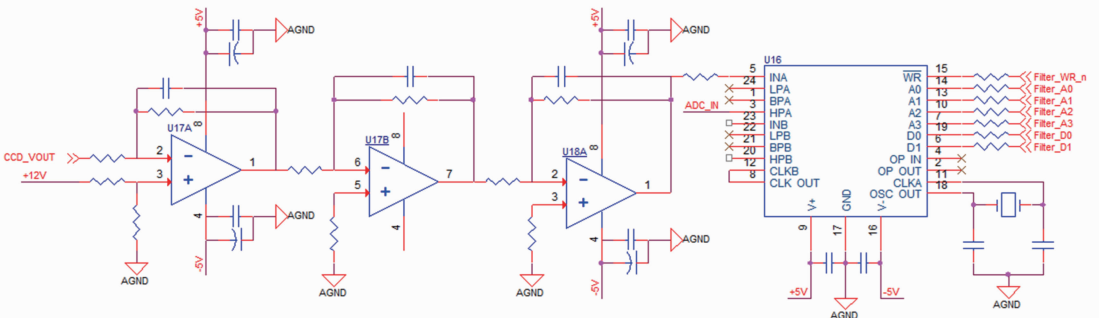


图 7 信号调理电路

Fig. 7 Signal conditioning circuit

在该电路系统的设计中采用线性电源和线性稳压器(LDO),电源的纹波约为 10 mV,有效地降低了电路系统的噪声,使电路系统达到很高的稳定性。

4 实验与分析

4.1 信号测试

使用该解调仪通道 1 测试标准腔长值为 15.383 μm 光纤法布里-珀罗传感器,经巴特沃斯带通滤波器滤除线性光不均匀性所带来的低频信号和高频噪声及直流分量,提高了信号对比度,准确检测出相关条纹的最大值,与相关解调原理理论分析相吻合,结果如图 8 所示。

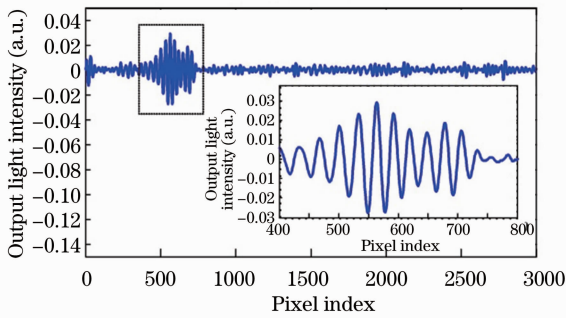


图 8 经巴特沃斯带通滤波器去噪后的检测结果

Fig. 8 Waveform with a Butterworth band-pass filter

4.2 腔长标定

采用 4 个腔长分别为 14.732、15.047、16.236、16.898 μm 的标准法布里-珀罗腔对系统各通道进行标定,结果如图 9 所示,从图中可看出各通道腔长标定结果基本一致且呈线性变化。根据腔长标定结果可知,系统的分辨率为 8 nm。

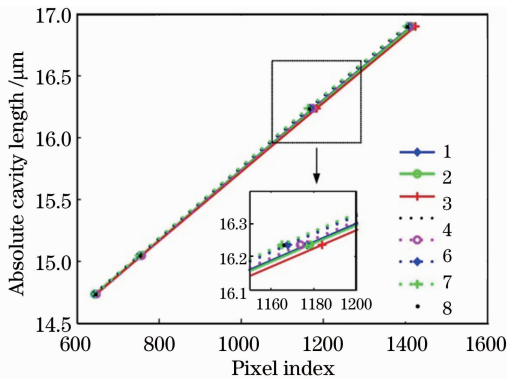


图 9 各通道腔长标定结果

Fig. 9 Calibration results of each channel's cavity length

4.3 稳定性测试

为评价系统的稳定性,对每个通道进行稳定性测试。以通道 1 为例,在法布里-珀罗传感器处于恒

定条件下连续测试了 1000 次,结果如图 10 所示。从图中可看出,在连续采集的情况下,测试结果是很稳定的,相关函数的极大值只向左/右偏离了一个像敏元,即本系统的稳定性为 7.5 nm,对样机进行解调频率测试可知,系统的解调速度达 1.5 kHz。

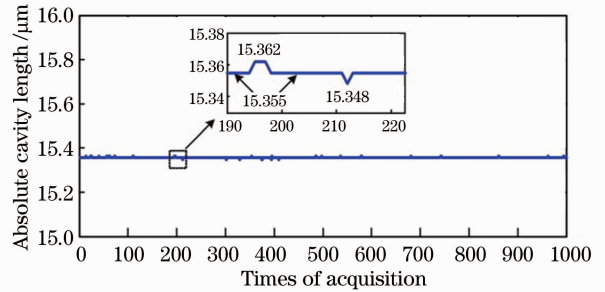


图 10 通道 1 腔长稳定性测试

Fig. 10 Stability testing in channel 1

5 结论

基于非扫描式相关解调原理设计了高速 8 通道光纤法布里-珀罗传感器解调仪。建立了系统的光学模型,优化了系统的光学参数,设计了用于高速解调的光学系统和软硬件系统。搭建了实验样机,并对其性能进行了测试,结果表明该仪器测量范围为 10~30 μm ,系统分辨率为 8 nm,稳定度达到 7.5 nm,每个通道的解调速度可达 1.5 kHz。可通过修改光学设计及仪器结构设计将解调仪扩展成 16 通道。通过修改 FPGA 逻辑控制,在同步信号控制下,通道之间或者仪器之间可以实现同步解调。

参考文献

- Jing Zhang, Hao Sun, Qiangzhou Rong, *et al.*. High-temperature sensor using a Fabry-Perot interferometer based on solid-core photonic crystal fiber [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10 (7): 070607.
- Venu Gopal Madhav Annamdas. Review on developments in fiber optical sensors and applications [J]. *International Journal of Materials Engineering*, 2011, 1(1): 1-16.
- Feng Jun, Zhu Yong, Li Xianyu, *et al.*. Experiment study on shrink strain monitoring of concrete with fiber optical F-P strain sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(10): 908-912.
封君,朱永,李晓宇,等. 光纤法布里-珀罗传感器监测混凝土固化期收缩应变的实验研究[J]. *光子学报*, 2000, 29(10): 908-912.
- En Lu, Zengling Ran, Fei Peng, *et al.*. Demodulation of micro fiber-optic Fabry-Perot interferometer using subcarrier and dual-wavelength method [J]. *Opt Commun*, 2012, 285: 1087-1090.
- J W Berthold, L A Jeffers, R L Lopushansky. Fiber optic sensors for the refinery of the future [C]. *Sensors for Industry Conference, 2nd ISA/IEEE*, 2002. 40-43.
- Lü Tao, Li Zhengjia, Xia Danqing. Photoelectric conversion card applied in intensity-modulated extrinsic Fabry-Perot cavity optical fiber sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48

- (8): 080603.
- 吕 涛, 李正佳, 夏丹青. 用于强度解调型非本征法布里-珀罗腔光纤传感器的光电转换卡[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 88-92.
- 7 Lu Haisong, Zhang Peng, Chen Weimin, *et al.*. Study on Fabry-Perot strain sensor series and parallel mixed multiplexing with discrete gap transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(5): 842-846.
- 陆海松, 章 鹏, 陈伟民, 等. 光纤法布里-珀罗应变传感器串并联混合复用的离散腔长变换解调研究[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 842-846.
- 8 Tang Qingtao, Rao Yunjiang, Zhu Tao, *et al.*. High-resolution signal demodulation method for fiber-optic Fabry-Perot multiplexing system [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(10): 1353-1357.
- 唐庆涛, 饶云江, 朱 涛, 等. 光纤法-珀传感器系统高分辨率复用信号解调方法[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1353-1357.
- 9 Zheng Junli, Ying Qixian, Yang Weili. *Signal and System* (2nd Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 341-349.
- 郑君里, 应启衍, 杨为理. 信号与系统(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 341-349.
- 10 Zhao Yan, Wang Daihua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106007.
- 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(1): 0106007.
- 11 Huang Zhao, Zhao Jianlin, Jiang Biqiang, *et al.*. Strain demodulation method based on matched fiber bragg grating Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(7): 845-849.
- 黄 钊, 赵建林, 姜碧强, 等. 基于匹配光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变解调方法[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 845-849.
- 12 Sofyan A Taya, Taher M El-Agez. Optical sensors based on Fabry-Perot resonator and fringes of equal thickness structure [J]. *Optik*, 2012, 123(5): 417-421.
- 13 Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, *et al.*. Mathematical model of illumination of CCD in the space scanning optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1128006.
- 孟祥娥, 江俊峰, 刘铁根, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型研究[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128006.

栏目编辑: 王晓琰