

doi: 10.3788/gzxb20124107.0845

基于匹配光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变解调方法

黄钊, 赵建林, 姜碧强, 秦川

(西北工业大学 理学院陕西省光信息技术重点实验室; 教育部空间应用物理与化学重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 提出并实验验证了一种基于匹配光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变传感器解调方法, 该方法综合了光纤法布里-珀罗干涉技术和匹配光纤光栅滤波法的优点. 通过半导体制冷片和压电陶瓷组成的闭环负反馈控制系统, 精确调节匹配光栅法布里-珀罗干涉仪的温度和应变, 有效解决了光栅法布里-珀罗干涉仪的失配问题, 从而保证系统静态工作点处于最佳匹配位置, 同时能够避免探头因环境温度波动导致的测量误差. 实验结果表明, 该系统能够响应 50~800 Hz 的输入信号, 应变最小分辨力至少为 $0.4 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$, 解调灵敏度高, 且不受环境温度波动的影响, 因而在动态应变或振动测量中具有较高的实用性.

关键词: 光纤光栅法布里-珀罗干涉仪; 半导体制冷片; 压电陶瓷; 匹配滤波

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)07-0845-5

0 引言

基于干涉原理的光纤传感器已广泛应用于高灵敏度的应变测量. 其中长基线干涉型光纤应变传感器具有高灵敏度的特点, 但这种传感器结构复杂、体积庞大, 常常需要数公里长的光纤^[1]. 目前, 以光纤布喇格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 为敏感元件的传感技术引起了人们极大的兴趣, 并得到了广泛的应用^[2-3], 但是其灵敏度在一定程度上受到波长解调设备的限制. 为此, 研究者提出了采用两个参量相同的 FBG 构成的光纤光栅法布里-珀罗干涉仪 (Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Interferometer, FBG-FPI) 作为传感元件^[4-12], 其既具有 FBG 的结构小巧、抗电磁干扰、易实现远距离分布式测量等优点, 又较 FBG 具有更高的灵敏度. 目前, FBG-FPI 传感器的信号解调方法主要有: 利用伪外差解调技术测量干涉相位的偏移量, 实现静态应变的精确测量^[5-6]; 通过对干涉光谱进行一定的数学转换, 提取波长移动或相位分布的变化^[7-8]; 利用激光锁频原理, 实现高灵敏度的振动测量^[9]; 基于窄带激光经 FBG-FPI 的滤波技术, 提取微弱波长或相位的变化^[10-13]. 但基于这些方法的系统复杂、成本高, 难以应用于工程实际中.

本文提出一种基于 FBG-FPI 匹配滤波的动态应变解调方法. 该方法综合了光纤法布里-珀罗

(Fabry-Perot, F-P) 干涉技术和匹配 FBG 滤波法^[14]的优点, 借助半导体制冷片与压电陶瓷 (Piezoelectric Ceramic, PZT) 组成的负反馈调制系统, 以解决 FBG-FPI 的失配问题, 从而构成一种响应速度快、灵敏度高、测量频率范围较宽且性能稳定的 FBG-FPI 应变解调系统. 首先, 通过半导体制冷片控制匹配 FBG-FPI 的温度, 使其与传感 FBG-FPI 的输出波长基本匹配; 其次, 通过调节驱动匹配 FBG-FPI 的 PZT 长度, 来使得两者精确匹配, 以获得最佳工作点. 该方法具有系统结构简单、成本低、对光源的要求低等优点, 并且也适用于匹配 FBG 滤波法的信号解调过程, 但灵敏度略低.

1 信号解调原理

1.1 信号检测原理

首先, 选用两个参量相近的 FBG-FPI (分别标记为 FBG-FPI_S 和 FBG-FPI_M), 其中传感 FBG-FPI_S 用来直接感受外界环境引起的应变, 匹配 FBG-FPI_M 作为解调元件. 然后, 控制 FBG-FPI_M 的中心波长, 使两个 FBG-FPI 的反射谱部分重叠, 即设置 FBG-FPI_M 静态工作点. 假设组成 FBG-FPI 的两个 FBG 的参量完全相同, 则可求得 FBG-FPI 的反射率为^[15]

$$R_{\text{FBG-FPI}} = \frac{F \sin^2(\beta h - \varphi_r)}{1 + F \sin^2(\beta h - \varphi_r)} \quad (1)$$

式中, F 为构成 FBG-FPI 的 FBG 锐度系数, h 为 F-

第一作者: 黄钊 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感方面的研究. Email: huangzhao_nwpu@sina.com

导师 (通讯作者): 赵建林 (1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光信息技术及应用. Email: jlzhao@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2012-02-02; 修回日期: 2012-04-18

P 腔的腔长, β 为光波在 FBG-FPI 中的传播常量, φ_r 为 FBG 复振幅反射系数的相位角. 系统总的反射率为 FBG-FPI_S 与 FBG-FPI_M 反射率的卷积. 若假设两个 FBG-FPI 的中心波长相差 $\Delta\lambda$, 其他参量相同, 则系统反射率为

$$R = \frac{F_S F_M \sin^2(\beta h - \varphi_{r_1}) \sin^2(\beta h - \varphi_{r_2})}{[1 + F_S \sin^2(\beta h - \varphi_{r_1})][1 + F_M \sin^2(\beta h - \varphi_{r_2})]} \quad (2)$$

式中, F_S 与 F_M 分别为构成 FBG-FPI_S 与 FBG-FPI_M 的 FBG 锐度系数, 即

$$F_S = \frac{4|r(\lambda)|^2}{[1 - |r(\lambda)|^2]^2} \quad (3a)$$

$$F_M = \frac{4|r(\lambda + \Delta\lambda)|^2}{[1 - |r(\lambda + \Delta\lambda)|^2]^2} \quad (3b)$$

假设在 FBG-FDI_S 探头上加载的扰动为一正弦函数 $y = A \sin(\omega t)$, 所引起的其中心波长改变量为 $\Delta\lambda' = A_\lambda \sin(\omega t)$, 其中 A 和 A_λ 分别为扰动幅度和中心波长的改变幅度. 现设定两个 FBG-FPI 的中心波长分别为 1 550.000 nm 和 1 550.080 nm, 反射率均为 90%, 则计算得出两个 FBG-FPI 的反射光谱如图 1. 此时, 经数值模拟可以得出, 当给系统输入 20 Hz 的扰动信号时, 其输出振幅的改变量如图 2, 图中纵坐标为归一化的振幅模拟值.

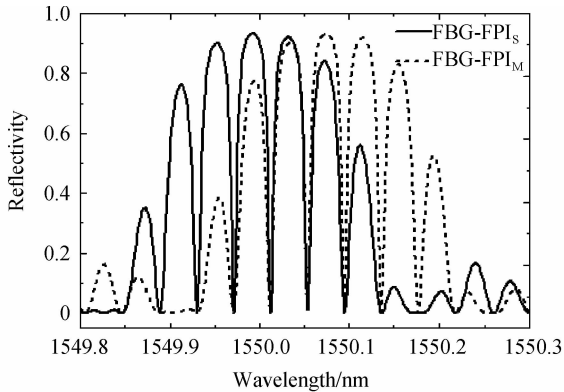


图 1 FBG-FPI_S 与 FBG-FPI_M 的反射光谱
Fig. 1 Reflection spectra of FBG-FPI_S and FBG-FPI_M

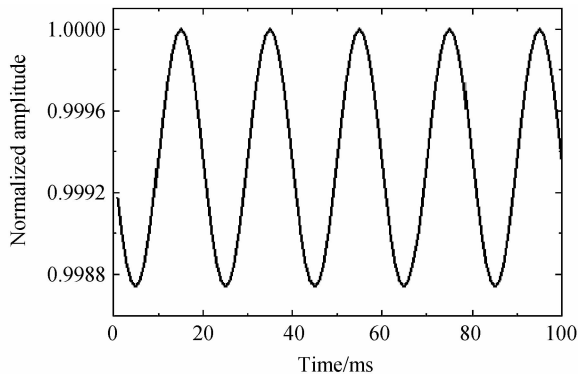


图 2 输入 20 Hz 扰动时系统的输出信号
Fig. 2 Output of the demodulation system with input disturbance of 20 Hz

从图 2 中模拟结果可以看出, 系统的信号输出频率为 20 Hz, 与输入的扰动信号频率相符, 是一个

准正弦信号. 若系统后端的光电转换单元是线性的, 则最终采集到的信号频率将与待测目标信号频率相符. 通过定标和换算可得出目标信号的幅度与最终采集到的信号幅度之间的关系, 从而可复原出待测目标信号.

1.2 静态工作点与灵敏度分析

匹配 FBG-FPI_M 的静态工作点会直接影响到系统的测量灵敏度、稳定性与线性度. 在本系统中, FBG-FPI_S 的反射信号又是 FBG-FPI_M 的输入信号, 而 FBG-FPI_M 的匹配线性区域有一定范围, 因此 FBG-FPI_S 与 FBG-FPI_M 之间中心波长差的改变, 导致系统灵敏度也将发生变化. 针对两个 FBG-FPI 中心波长差与系统灵敏度之间关系问题, 图 3 给出了一组数值模拟分析结果. 其中, 图 3(a) 表示不同波长差情况下, FBG-FPI_S 与 FBG-FPI_M 之间的相对位置关系; 图 3(b) 表示不同波长差情况下, 给 FBG-FPI_S 施加相同波长扰动 0.1 pm 时, 对系统输出相对幅度的影响. 在数值模拟过程中, 设定 FBG-FPI_S 的中心波长为 1 550 nm, FBG-FPI_M 与 FBG-FPI_S 之间的波长差分别为 0.01 nm、0.05 nm、0.1 nm、0.15 nm.

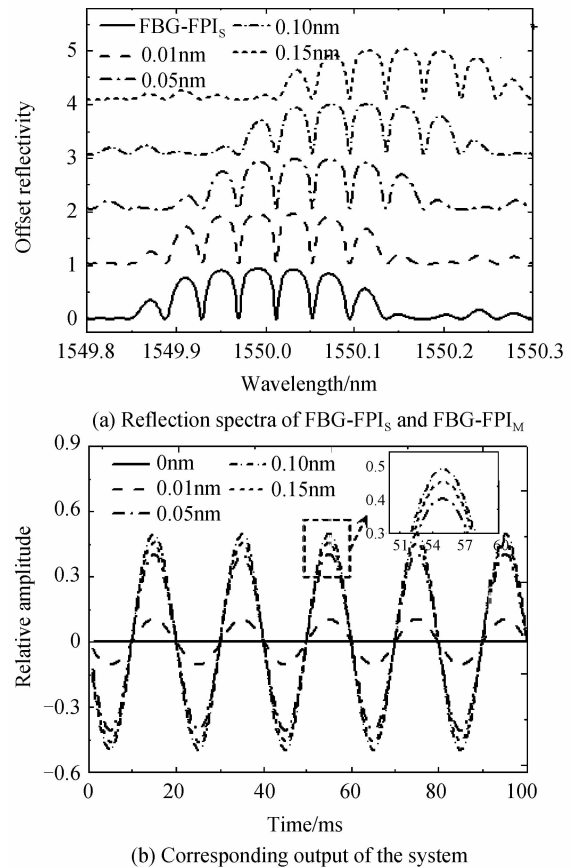


图 3 FBG-FPI_S 和 FBG-FPI_M 的模拟光谱与系统输出
Fig. 3 Analog spectra of FBG-FPI_S and FBG-FPI_M, and corresponding output of the system

从图 3(b) 可以看出, 当施加相同幅度的扰动量

时,FBG-FPI_S 与 FBG-FPI_M 的波长差不同,系统的灵敏度不同,且呈现非线性关系.为了进一步验证不同波长差对系统灵敏度的影响,设定 FBG-FPI_S 的中心波长为 1 550 nm,FBG-FPI_M 的中心波长自 1 549.500 nm至 1 550.500 nm 连续变化,加载在 FBG-FPI_S 的中心波长扰动量仍然为 0.1 pm.

图 4 为 FBG-FPI_S 受到相同波长的扰动时,数值计算得出的系统输出相对幅度随 FBG-FPI_M 中心波长变化的分布曲线.在同一扰动量下,系统输出相对幅度的改变量可以体现出系统在不同工作点下的灵敏度.由图 4 可以看出,当波长差为零或大于 1 nm时,系统的灵敏度较低,而在波长差约为 0.1 nm时系统的灵敏度最高.

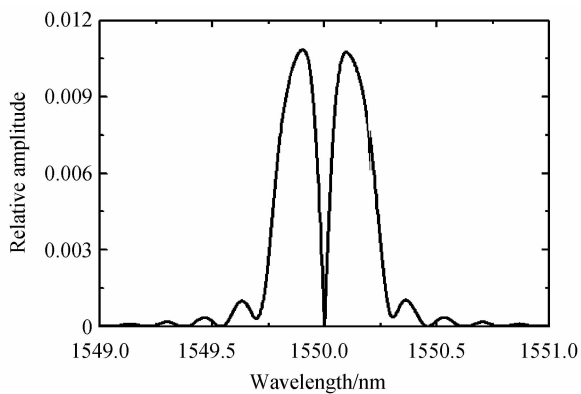


图 4 系统输出信号幅度随 FBG-FPI_M 中心波长的变化
Fig. 4 Relative amplitude of the output signal with central wavelength of FBG-FPI_M

1.3 温度补偿原理

根据基本的传感理论,若应变与温度同时作用于 FBG-FPI,则在不考虑交叉敏感的情况下,FBG-FPI 的中心波长 λ 可以表示为

$$\lambda = K_T \Delta T + K_\epsilon \Delta \epsilon + \lambda_0 \quad (4)$$

式中, λ_0 表示 FBG-FPI 的初始中心波长, K_T 、 K_ϵ 分别表示 FBG-FPI 的温度与应变灵敏度系数, ΔT 、 $\Delta \epsilon$ 分别为温度和应变改变量.可以看出,温度和应变可分别独立地改变 FBG-FPI 的中心波长.当 FBG-FPI_S 同时受到温度与应变的影响时,只要 FBG-FPI_S 的中心波长随温度的变化具有低频特性(如小于 10 Hz),可通过采集系统输出的电压值并作低通滤波,以提取其中低于 10 Hz 的分量来确定 FBG-FPI_S 所处的温度.如果环境温度变化频率较高,则可将 FBG-FPI_S 浸入保温油中,来防止温度的剧烈变化.其次,通过中控单元驱动半导体制冷片来改变匹配 FBG-FPI_M 所处环境的温度,使其与 FBG-FPI_S 所处环境的温度基本相同.考虑到半导体制冷片可通过温度改变,来大范围但不能精确地控制 FBG-FPI_M 的中心波长,故而在系统中进一步加入 PZT 来驱动 FBG-FPI_M,对其提供一个小范围缓变

的应变,以精确控制 FBG-FPI_S 与 FBG-FPI_M 的中心波长差 $\Delta \lambda$ 的低频分量,从而抵消 FBG-FPI_S 所处环境温度变化的对测量结果的影响.

2 实验系统及工作原理

图 5 为实验系统的结构框图.由 ASE 光源发出的宽带光信号经过光纤环形器 1 后,进入固定在 PZT1 上的传感 FBG-FPI_S,经其反射的光信号通过光纤环形器 1 和 2 进入放置在温控盒中的匹配 FBG-FPI_M,相应的反射光信号再通过光纤环形器 2 进入后端的光电转换与数据处理系统. FBG-FPI_M 固定在 PZT2 两端的金属支撑块上,外侧利用导热硅脂将半导体制冷片粘合在温控盒上.利用信号发生器输出的电压信号驱动 PZT1,为 FBG-FPI_S 提供标准应变信号.由光电探测器 PD 和转换电路完成对光信号的转换,并将模拟电压信号通过通道 1 的 ADC 采集后输入控制单元,进而反馈控制半导体制冷片,以改变匹配单元内的温度,实现大范围地控制 FBG-FPI_M 的中心波长;同时,将光电转换后的信号放大 1 000 倍,并作 10 Hz~1 kHz 的带通滤波后输入通道 2 进行采样,经控制单元运算后控制 PZT 的伸缩量,以实现精确控制两个 FBG-FPI 的中心波长差.经过一段时间的稳定后,采集数据并传输到计算机中进行数据处理与分析.

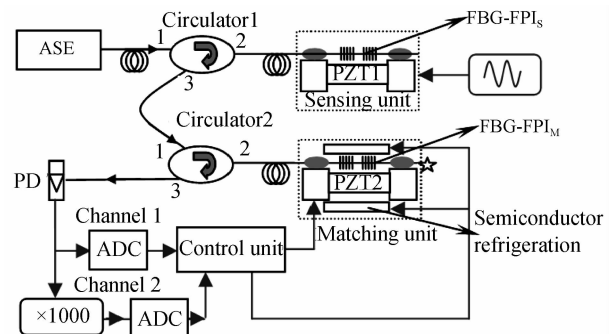


图 5 基于匹配 FBG-FPI 的解调系统原理
Fig. 5 Scheme of the demodulation system based on matched FBG-FPI

控制匹配单元的温度来改变两个 FBG-FPI 之间的波长差,当系统的灵敏度最大时,这时的波长差作为该系统的静态工作点,通过控制单元确定此时通道 1 与通道 2 的电压值,记录至中控单元.当传感单元的温度改变时,通过控制单元对经通道 1 和通道 2 采集的电压信号进行数据处理,进而控制半导体制冷片改变匹配单元的温度,以实现大范围调节 FBG-FPI_M 的中心波长.同时改变 PZT2 的驱动电压,精细调节 FBG-FPI_M 的中心波长,从而控制系统的静态工作点以消除失配现象.

3 实验结果及分析

在实验中,FBG-FPI_S 与 FBG-FPI_M 的初始中心波长分别为 1 550. 676 nm 和 1 550. 865 nm. 首先,根据模拟得到的结果,通过调整控制单元参量,使得两者的中心波长差为 0. 1 nm,此时 FBG-FPI_M 处于最佳灵敏度状态. 依次给 FBG-FPI_S 加载大小为 24 nε、频率为 50 Hz、100 Hz、200 Hz、300 Hz、400 Hz、800 Hz 的交流应变信号,得到图 6(a)所示的系统响应情况. 可以看出,在 50~400 Hz 范围内,系统响应的一致性较好,相对误差小于 3. 4%,但大于 400 Hz 后,系统响应开始衰减,这是由于 PZT 与光纤粘接的部分在频率较高时出现松动造成. 选择信号响应一致性较好的 100 Hz、200 Hz、300 Hz、400 Hz 频率段,测试系统对不同应变量的响应情况. 当不同频率时,改变应变信号幅度分别为 11 nε、24 nε、35 nε、47 nε,系统的响应结果如图 6(b),其线性度分别为 99. 8%、99. 7%、99. 4%、99. 6%.

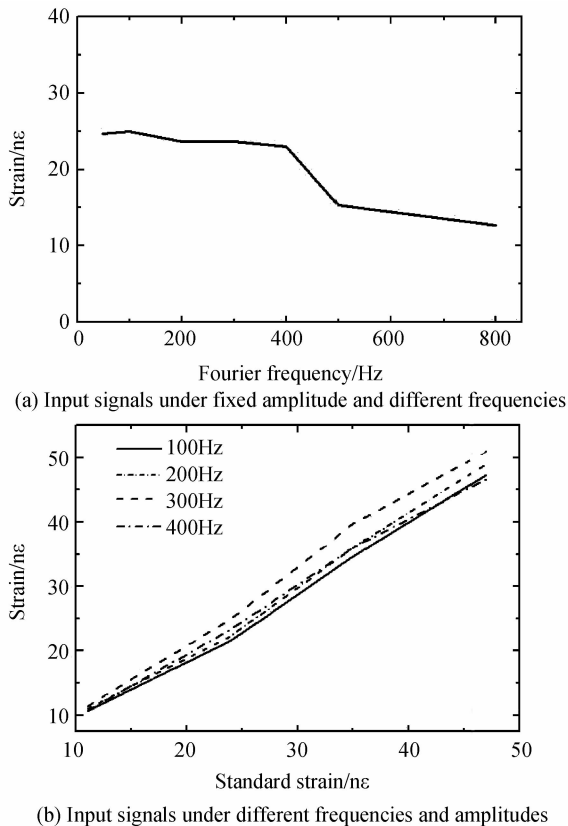


图 6 系统对不同信号的应变响应
Fig. 6 Strain responses of the system under different input signals

接着,在 19. 6℃ 室温下,利用 PZT1 对 FBG-FPI_S 施加 200 Hz 的微小交流应变 5 nε,通过系统输出信号的频谱评估其应变感知灵敏度,结果如图 7. 图中显示了在 200 Hz 处系统的最小分辨力至少为 0. 4 nε/Hz^{1/2}.

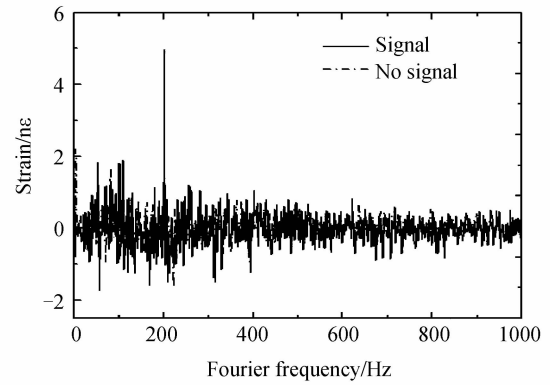


图 7 200 Hz 标准应变时解调系统记录的信号谱
Fig. 7 Strain spectrum recorded by the demodulation system with an input signal of 200 Hz

其次,在 FBG-FPI_S 上长时间施加 200 Hz 的交流应变信号 70 nε,通过系统输出信号的频谱对系统的长期稳定性进行估计. 图 8 所示为在 20 min 内记录的系统输出信号在 200 Hz 处功率谱密度的值. 分析表明,系统的平均相对误差小于 2. 84%,说明其稳定性较好. 尽管在一段时间内的数据采集过程中环境温度的改变会使 FBG-FPI_S 的温度发生小幅改变,然而,测量数据并没有发生明显波动的结果,说明该系统具有良好的温度不敏感性.

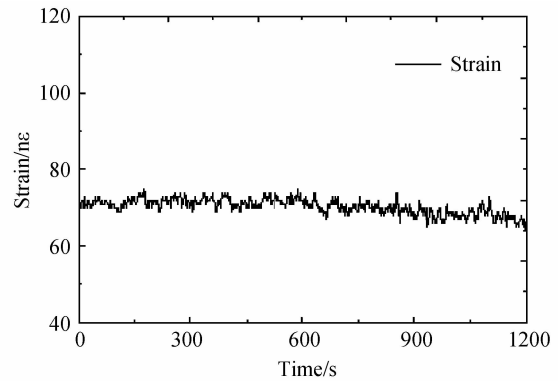


图 8 输入 200 Hz 信号时系统稳定性测试结果
Fig. 8 Amplitude test of output signal under a steady input signal of 200 Hz

4 结论

针对 FBG-FPI 应变传感器的宽频率范围和高灵敏度信号解调问题,提出了一种采用压电陶瓷和半导体制冷片综合驱动 FBG-FPI 的匹配滤波方法. 理论和实验分析表明:该方法综合了光纤 F-P 干涉技术和匹配 FBG 滤波的特点,对频率在 50~800 Hz 范围的信号系统均具有良好的响应和较高的稳定性;在一定范围的环境温度改变下,通过半导体制冷片和压电陶瓷来精确地控制匹配 FBG-FPI 的中心波长,可以保持系统的静态工作点不发生改变,且对于稳定的信号源,系统的相对误差小于 2. 84%;具有较高的灵敏度,对于应变的最小分辨力

至少为 $0.4 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 。相对于传统的匹配滤波法,该方法不需要将匹配 FBG-FPI 与传感 FBG-FPI 置入同一环境中来保证其对环境温度的不敏感性,也无需在传感探头中增加用于温度补偿的 FBG-FPI,与其他 FBG-FPI 的解调方法相比,具有结构简单、灵敏度高、测量频率范围较宽且适应性较好的特点。

参考文献

- [1] REITZE D. Chasing gravitational waves [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**: 582-585.
- [2] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Journal Lightwave Technology*, 1997, **15** (8): 1442-1463.
- [3] LI K, ZHOU Z. A high sensitive fiber Bragg grating strain sensor with automatic temperature compensation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(3): 191-193.
- [4] CHEN D, LIU W, JIANG M, *et al.* High-resolution strain/temperature sensing system based on a high-finesse fiber cavity and time-domain wavelength demodulation [J]. *Journal Lightwave Technology*, 2009, **27**(13): 2477-2481.
- [5] RAO Y J, COOPER M R, JACKSON C N, *et al.* Absolute strain measurement using an in-fibre-Bragg-grating-based Fabry-Perot sensor[J]. *Electronics Letters*, 2000, **36** (8): 708-709.
- [6] LI Li-xin. WU Fei, CAI Lu-lu, *et al.* Study of fiber Bragg grating Fabry-Perot strain sensor [J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2006, **19**(3): 807-809.
李立新, 吴飞, 蔡璐璐, 等. Bragg 光纤光栅法布里-珀罗应变传感器研究[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(3): 807-809.
- [7] MIRIDONOV S V, SHLYAGIN M G, TENTORI D. Twin-grating fiber optic sensor demodulation [J]. *Optics Communications*, 2001, **191**(3-6): 252-262.
- [8] LI Jia-fang, LV Ke-cheng, Han Qun, *et al.* Theoretical studies on a novel sensor system with fiber grating Fabry-Perot cavity[J]. *Optoelectronic Technology*, 2004, **24**(1): 21-26.
李家方, 吕可诚, 韩群, 等. 基于光纤光栅 F-P 腔的一种新颖传感系统的理论研究[J]. *光电子技术*, 2004, **24**(1): 21-26.
- [9] ZHANG Le, WU Bo, YE Wen, *et al.* Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 47-52.
张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 47-52.
- [10] YUAN Zong-heng, LIU Yong-zhi, YANG Ya-pei. Influence of linewidth on sensitivity of intrinsic fiber-optic Fabry-Perot magnetic sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1112-1116.
袁纵横, 刘永智, 杨亚培. 光源线宽对内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器灵敏度影响的分析[J]. *光学学报*, 2000, **20** (8): 1112-1116.
- [11] YIN Guo-lu, LOU Shu-qin, PENG Wan-jing, *et al.* Sensitivity of fiber Bragg grating-based Fabry-Pérot interferometric sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(6): 1490-1495.
尹国路, 娄淑琴, 彭万敬, 等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式传感器灵敏度[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1490-1495.
- [12] WAN X, TAYLOR H F. Intrinsic fiber Fabry - Perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(16): 1388-1390.
- [13] FAN Fan, ZHAO Jian-lin, WEN Xi-xing, *et al.* Sensitivity analysis on strain sensor based on Fabry-Perot interferometer with intensity interrogation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(6): 1525-1531.
樊帆, 赵建林, 文喜星, 等. 强度解调型光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变传感灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2010, **37** (6): 1525-1531.
- [14] ZHAI Yu-feng, ZHANG Long, LI Fei, *et al.* Study on temperature compensation for matched grating interrogation system[J]. *Acta Potonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1365-1368.
翟玉峰, 张龙, 李飞, 等. 动态匹配光栅解调传感系统温度补偿研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1365-1368.
- [15] GUAN Bai-ou, YU You-long, GE Chun-feng, *et al.* Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20** (1): 34-38.
关柏鸣, 余有龙, 葛春风, 等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 34-38.

Strain Demodulation Method Based on Matched Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Interferometer

HUANG Zhao, ZHAO Jian-lin, JIANG Bi-qiang, QIN Chuan

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology; the Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry (Ministry of Education), School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A novel demodulation method based on matched Fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometer (FBG-FPI) for strain measurement is proposed and demonstrated, which combines the advantages of fiber Fabry-Perot interferometry and matched fiber Bragg grating filtering technique. In order to solve the mismatch problem and keep the static working point at the best matching position, the strain and temperature of the matched FBG-FPI are adjusted by a closed-loop control system consisted of the semiconductor refrigeration and piezoelectric ceramic. Meanwhile, the system is immune to the surrounding temperature. Experimental results show that the system can respond to the input signal with the frequency range of 50~800 Hz, is insensitive to the temperature fluctuation, and the strain resolution is up to $0.4 \text{ n}\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$. Therefore, this method has a higher practicality for dynamic strain monitoring and vibration measurement.

Key words: Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Interferometer (FBG-FPI); Semiconductor refrigeration; Piezoelectric ceramic; Matched filtering