

高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术

王拥军¹ 刘永超¹ 张靖涛¹ 杨昭怡¹ 王 智²

(¹北京邮电大学电子工程学院, 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)
²北京交通大学理学院光信息所, 北京 100044)

摘要 提出使用基于半导体光放大器(SOA)的环形激光器与可调谐光纤型法布里-珀罗(F-P)滤波器作为扫描光源的光纤布拉格光栅(FBG)解调方案,综合使用梳状滤波器与乙炔气体的吸收谱进行谱线标定,采用数字信号处理算法进行时域滤波与 3 dB 功率寻峰算法。实验证明,该解调方案可以同时实现对超过 1000 个温度 FBG,或 240 个应变传感光栅进行解调,解调频率达到 1000 Hz,波长分辨率达到 0.5 pm,温度检测精度达到 0.05 °C,应变检测精度达到 0.6 $\mu\epsilon$ 。

关键词 传感器; 光纤光栅解调; 可调谐环形激光器; 梳状滤波器; 乙炔气体吸收谱

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0205003

Interrogation Technology for High-Speed and High-Resolution Fiber Bragg Grating Sensing System

Wang Yongjun¹ Liu Yongchao¹ Zhang Jingtao¹ Yang Zhaoyi¹ Wang Zhi²

(¹ School of Electronic Engineering, State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China
² Institute of Optical Information, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A new interrogation scheme based on semiconductor optical amplifier (SOA) ring laser and tunable Fabry-Perot (F-P) interferometer for fiber Bragg grating (FBG) sensing system is proposed. In the interrogation scheme, a gas absorption spectral line is used as a wavelength reference, and a comb filter is designed as a standard device that can dynamically calibrate the wavelength of FBG sensors. With digital signal processing technology and wavelength detection algorithm based on the 3 dB-power point, more than 1000 temperature sensors or 240 strain sensors can be interrogated with frequency of 1000 Hz. Experiment demonstrates that the strain measuring accuracy and wavelength resolution can reach to 0.6 $\mu\epsilon$ and 0.5 pm, respectively, and the temperature measuring precision can reach to 0.05 °C.

Key words sensors; interrogation for fiber Bragg grating; tunable ring laser; comb filter; absorption spectral line for acetylene

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 140.3600

1 引 言

光纤传感器由于具有体积小、重量轻、价格低、易复用、不受外界电磁干扰等特性被广泛应用于石油、铁路、化工、电力、航空航天等领域中。分布式光纤传感系统可以实现对输油管道、铁轨、路基等大型

管线的应变、温度等参量的长期监控,在基础设施的结构健康监测中具有广泛的应用前景。但是,分布式光纤传感系统一般采用检测光纤中布里渊散射或瑞利散射光的方法,接收到的光功率小,需要通过多次平均(几千次至几十万次)才能达到要求的信噪

收稿日期: 2012-07-05; 收到修改稿日期: 2012-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61077014,61077048)、中央高校基本科研业务费专项资金(2009CZ07)和安全生产智能监控北京市重点实验室主任基金资助课题。

作者简介: 王拥军(1968—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信与光传感等方面的研究。

E-mail: wangyj@bupt.edu.cn

比,并且测量范围广(几千米至几十千米),完成一次有效测量的时间长达几十秒至几分钟,因此分布式光纤传感系统不适用于实时性要求较高的监测场合。此外,对于分布式光纤传感系统,需要在施工时将光纤预埋在待测物体内部,限制了系统的应用范围;为了保证施工过程中传感光纤不能断裂,传感光纤需要特殊封装,增加了系统成本。通过时分、波分等复用方式,光纤布拉格光栅(FBG)能够组成准分布式传感系统,可以实现大范围的定点监控;被测的参量仅取决于FBG的反射波长,通过波长解调技术得到相应的被测参量,不需要多次平均,可以有效提高检测的速度与精度;通过各种封装的技术,实现FBG与各种待测物体有效的物理接触,扩大了FBG的应用范围;传输光纤不需要特殊封装,不需要埋入待测物体中,减小了施工难度,降低了系统成本。相比于分布式光纤传感系统,目前FBG传感系统的商业应用更为广泛。一个完整的FBG传感系统由FBG传感器、传输光路与解调设备构成。FBG解调设备采用波长解调方法,解调方法不仅影响传感系统的测量精度、测量速度,而且决定传感系统中FBG的复用方式、复用数量及传感网络的拓扑结构。文献[1]中提出利用参考光栅对传感光栅进行解调的方案,可以得到较高的波长分辨率与较高的速度,但是,这种方案不利于FBG的复用;文献[2]中提出使用阵列波导光栅(AWG)的解调方案,可同时实现对多个FBG传感器的解调,可解调的信号频率超过100 kHz,但是,该方案中一个光栅需要一个AWG通道和一个光接收单元,增加了系统成本;文献[3]中使用干涉光谱法实现对FBG的快速解调,可解调信号的频率高达48.6 MHz,但是,该方案中复用FBG的数量有限;文献[4,5]提出使用宽带光源与可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器对FBG进行解调,复用光栅的数量有所增加,解调速度达到1000 Hz,波长分辨率达到2 pm,但是,复用的FBG数量与波长检测精度不足。对于一般的FBG传感系统的应用场合,要求传感系统有较大的覆盖范围,即要求较多的FBG复用数量;系统有较快的响应速度,1000 Hz的解调速度可以满足大多数实时监控的需要;系统的波长分辨精度小于1 pm,相对应的温度检测精度小于0.1 °C,微应变检测精度小于1 $\mu\epsilon$;系统的成本较低。针对以上要求,本文提出使用基于半导体光放大器(SOA)的环形激光器作为FBG传感系统的光源,使用可调谐F-P滤波器进行波长扫描,联合使用梳状滤波器与乙炔气体的吸收

谱对波长进行动态定位,有效提高了可利用的光谱宽度、复用路数、复用的FBG数量、扫描频率和光谱分辨精度。

2 解调原理与动态波长标定方法

系统结构如图1所示,SOA、光隔离器、宽带滤波器、可调谐F-P滤波器与光耦合器构成一个可调谐的环形激光器。压电陶瓷(PZT)用来调节可调谐F-P滤波器的腔长,在PZT上施加扫描电压,PZT产生伸缩,F-P滤波器的中心波长就随之变化。当向SOA注入一个大于其阈值电流的直流电流时,SOA会产生放大作用,当SOA的增益大于环路的损耗时,环形激光器输出与F-P滤波器的中心波长对应的激光。

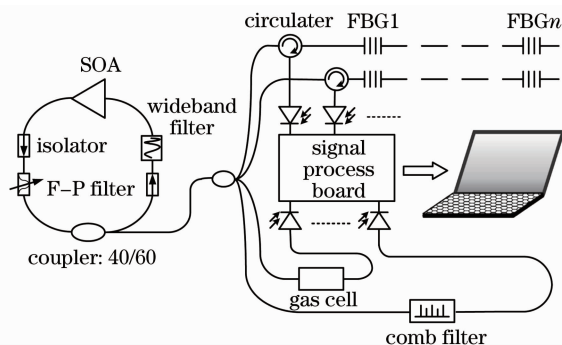


图1 系统结构图

Fig.1 System configuration

SOA的增益系数为

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T^2 + P/P_s}, \quad (1)$$

式中 g_0 为最大增益系数, ω 为注入光信号的角频率, ω_0 为原子本振角频率, T 为偶极子的松弛时间, P 为注入的光功率, P_s 为增益介质的饱和功率;信号光经过整个SOA增益区的增益为

$$G = \exp(gL), \quad (2)$$

式中 L 为SOA增益区的长度;稳态下SOA的注入电流 I ,载流子浓度 N 与输出功率 P 的关系为

$$\frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_e} = \frac{a(N - N_0)P}{\sigma_m h\nu}, \quad (3)$$

式中 N_0 为透明载流子浓度, a 为微分增益数, τ_e 为载流子寿命, σ_m 为有源区的横截面积, $h\nu$ 为光子能量, q 为电子电量;光纤型F-P滤波器输出的光强为

$$I_T = \frac{I_0}{1 + \frac{4(1-\alpha)R}{[1 - (1-\alpha)R]^2} \sin^2 \frac{2\pi nL'}{\lambda}}, \quad (4)$$

式中 α 、 R 、 L' 、 n 、 λ 分别为F-P腔中的损耗、端面反射率、腔长、材料折射率与工作波长。系统中F-P

滤波器的自由谱区为 80 nm, 精细度为 500~600。一般的解调系统, 使用可调谐 F-P 滤波器对宽谱光源进行滤波, 输出的扫描光源的谱宽为 0.13~0.16 nm, 一般 FBG 传感器的反射谱的 3 dB 谱宽在 0.1~0.3 nm, 实际测得的 FBG 的反射谱为光源光谱与 FBG 反射谱的卷积, 因此, 采集到的 FBG 的反射谱被展宽; 为了保证相邻的 FBG 之间不交叠, 复用的光栅数量要减少。向 SOA 注入 250 mA 的电流, 使用 SOA 的分段模型, 通过(1)~(4)式可以得到图 2 所示的环形光纤激光器输出的激光光谱, 可以看出, 要形成稳定的激光, 连续光需要在光纤环中绕行 250 圈以上; 在 50 圈时, 激光光谱的 3 dB 带宽小于 0.05 nm, 接近稳定输出时的激光光谱, 作为扫描光谱不会对采集的 FBG 反射光谱产生大的误差。实验中静态测试发现: 在不同的波长区激光光谱的 3 dB 带宽的数值不同, 其范围在 0.01~0.06 nm 之间。与一般的使用可调谐 F-P 滤波器对宽谱光源进行滤波的方法相比, 输出的扫描光谱比较窄, 相应的采集到的 FBG 反射谱也比较窄, 使复用的光栅数量增加。光纤环的长度为 2 m, 按 50 圈的延迟计算, 环形激光器输出可用激光的延迟时间约为 500 ns, 对于 80 nm 的光谱范围抽样 1024 次, 完成一个自由谱区的扫描时间约 0.512 ms, 因此光源的扫描频率不高于 2000 Hz。当频率增加时, PZT 的

变形跟不上扫描电压的变化, 使 F-P 滤波器的扫描范围缩小, 考虑到 PZT 的响应特性, 解调系统的扫描频率可以达到 1000 Hz。向 SOA 注入 250 mA 的电流时, 环形激光器输出的激光功率超过 12 mW, 可以平均分配到 30 个传感通道与 2 个校准通道, 每个通道得到的光功率约 0.375 mW, 考虑到光栅的反射率(0.9)与传输光纤(10 km)的损耗, 接收到的最大光功率约 0.16 mW, 对于普通的 PIN 光电探测器, 检测灵敏度小于 1 μ W, 因此, 接收的动态范围超过 22 dB, 利用普通 PIN 光电探测器完全可以分辨反射谱的形状。对于一般的温度传感光栅, 温度变化 1 $^{\circ}$ C, FBG 波长漂移约为 10 pm, 温度测量范围为 -50 $^{\circ}$ C~150 $^{\circ}$ C, 每个温度传感光栅的波长漂移约为 2 nm, 对于每个通道 75 nm 的波长范围可以用复用 37 个温度传感光栅, 整个系统的 30 个传感通道复用的温度传感光栅超过 1000 个; 对于一般的应变传感光栅, 波长漂移 10 pm 约对应 12 μ ϵ , 应变测量范围 \pm 4000 μ ϵ , 每个温度传感光栅的波长漂移约 6.7 nm, 考虑到应变测量过程中的温度补偿, 一个传感光栅需要一个补偿光栅, 补偿光栅的最大波长漂移为 2 nm, 每个通道可以复用 8 个应变传感光栅, 理论上整个系统的 30 个传感通道复用的应变传感光栅达到 240 个。

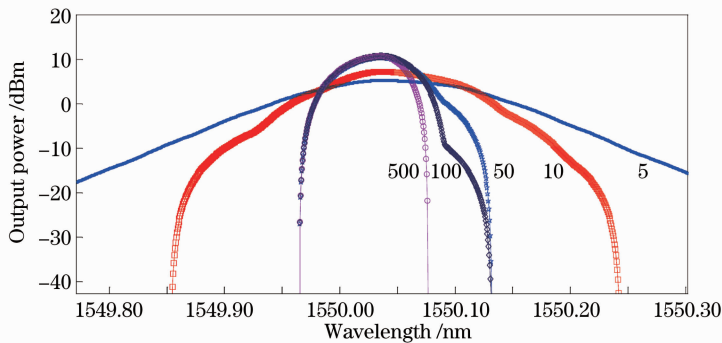


图 2 SOA 环形激光器光谱

Fig. 2 Spectra of SOA-based ring laser

在解调方案中, 通过改变施加在 PZT 上的电压改变 F-P 滤波器的腔长, 当电压从 0 变到 18 V, 环形激光器的输出波长扫过一个 F-P 滤波器的自由谱区, 一个确定的电压对应着环形激光器一个确定的输出波长。环形激光器在波长域内对各分路中的 FBG 进行扫描, 采集到的 FBG 的反射谱为光功率与电压的分布关系, 由 F-P 滤波器的中心波长与施加在 PZT 上电压的关系曲线可以对 FBG 的反射谱波长进行标定, 得到真实的 FBG 反射谱。图 3 为实

验中 3 次不同时间测得的 F-P 滤波器的中心波长与施加在 PZT 上的电压的关系曲线, 可以看出: F-P 滤波器的中心波长与施加在 PZT 上的电压呈现非线性关系; 每次扫描结束后 PZT 的位置有所不同; 每次扫描的曲线变化形式不同, 无法用曲线拟合得到统一的数学表达式。此外, PZT 不仅受电压影响, 环境温度也会改变 PZT 的工作状态, 实验表明, 温度改变 10 $^{\circ}$ C, 同一电压下 F-P 滤波器的中心波长改变 3~5 nm。因此, 实际系统中每次扫描过程中

需要对可调谐 F-P 滤波器进行动态标定,同时构成一个闭环控制过程,通过被标定的波长,动态的调整 PZT 扫描电压的起始值,使 F-P 滤波器工作在一个受控的稳定状态。在图 1 的方案中,一个梳状滤波器被用来对可调谐 F-P 滤波器进行动态标定。梳状滤波器两个峰之间的间隔为标准的 0.8 nm,将 F-P 滤波器的自由谱区分成 100 个区,每个区的电压对波长的变化可以认为是线性关系。当对传感分路进行扫描时,同时也对梳状滤波器进行扫描,FBG 的反射谱必定处于梳状滤波器的某个区中,然后使用线性插值就可以得到 FBG 反射谱的准确位置。

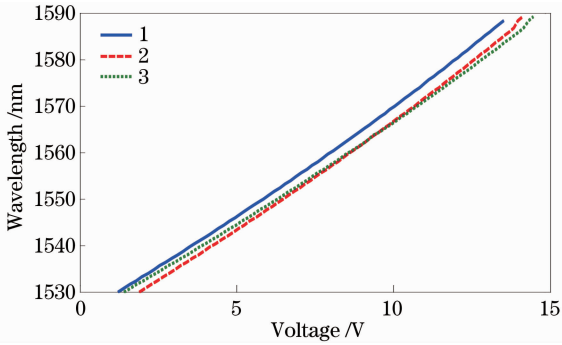


图 3 实测 PZT 的电压与 F-P 滤波器中心波长的关系曲线

Fig. 3 Curves of relationship between PZT voltage and center wavelength of F-P filter in experiment

梳状滤波器也会受到温度的影响,当温度变化 100 ℃ 时,梳状滤波器各峰值的位置漂移 2~5 pm,因此定标器件也会带来测量误差。由于气体的吸收谱线不随温度变化,为了校正梳状滤波器带来的误差,注入乙炔气体的气室被引进在图 1 的方案中。在 1530 nm 附近,乙炔气体有 6 个较大的吸收谱峰: 1528. 12, 1530. 37, 1531. 59, 1532. 84, 1534. 12, 1535. 40 nm, 如图 4 所示,它们被用来对梳状滤波器进行校正。此外,由于在 1518 nm 附近,乙炔气

体也有 6 个较大的吸收谱峰,因此在系统中引入一个谱宽约为 75 nm 宽带滤波器,使实际环形激光器的输出波长限定在 1525~1600 nm 的范围。进行一次扫描后可以由梳状滤波器对吸收峰进行标定,得到的结果与标准的吸收谱线的差值即为由温度引起的测量误差,用这个误差对 FBG 的反射谱进行校正,就可以得到真实的反射谱。文献[6]也用气体吸收谱进行标定,但是不能解决 PZT 造成的非线性问题。

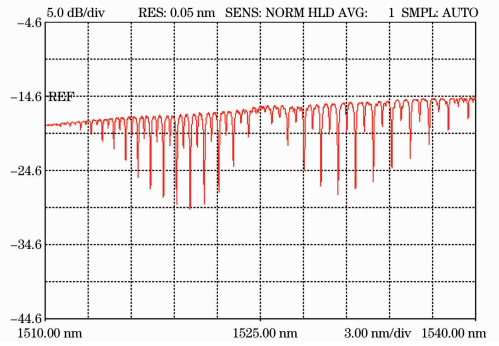


图 4 实测乙炔气体的吸收谱线

Fig. 4 Experimental gas absorption spectrum of acetylene

由于受到电路光路噪声、环形激光器输出功率波动、采样的不连续性等因素的影响,实际采集的 FBG 的反射谱包含许多噪声,要正确快速地确定谱线的漂移,需要先对采用到的曲线进行去噪声处理。首先对采集的 FBG 反射谱进行频谱分析,按照分析结果设计一个 63 节的有限脉冲响应(FIR)滤波器,然后在嵌入式可编程门阵列(FPGA)中实现相应的 FIR 数字滤波器。图 5 为 FIR 滤波前后的一个 FBG 反射谱,可以看出,经数字滤波后,FBG 反射谱中的噪声被完全滤除。一般采用寻峰法确定 FBG 反射谱的波长^[7],但是通过对滤波过的 FBG 反射谱的观察发现,FBG 反射谱不是标准的高斯型,波峰

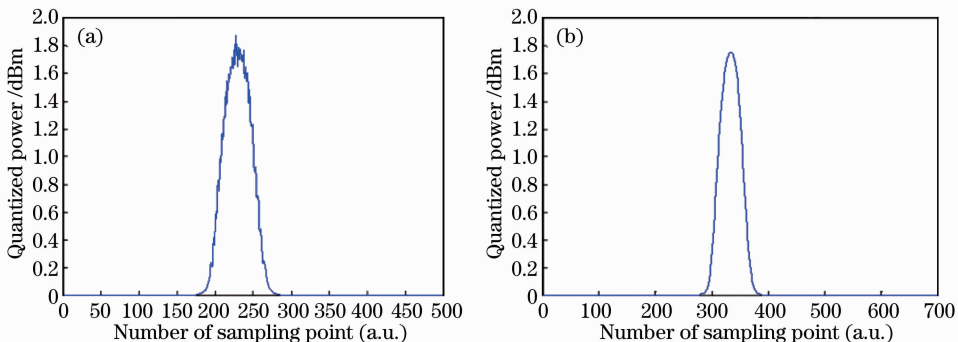


图 5 FBG 的反射谱。(a)滤波前;(b)滤波后

Fig. 5 Reflected spectra of FBG. (a) Before filtered; (b) after filtered

的形状不规则,有的峰值偏左,有的偏右,这种偏向对于同一个 FBG 是随机的。若采用寻峰法系统,解调精度会降低。采用 3 dB 中点波长提取算法,通过算法找到每个光栅 3 dB 功率值的中点,作为 FBG 反射谱的波长,解调精度较寻峰算法有了很大的提高。

3 实 验

在图 1 的系统的一个传感通道上,串接两个分别封装的应变传感光栅与温度传感光栅,室温下无应力时应变传感光栅的中心波长为 1549.5 nm,室温下温度传感光栅的波长为 1547.7 nm。为了解决

应变传感光栅对温度的交叉敏感,在应变传感器中也封装了一个中心波长为 1530.96 nm 的温度传感光栅对应变传感光栅进行修正,修正公式为: $\epsilon = K(\lambda_1 - \lambda_0) + B(\lambda_{t_1} - \lambda_{t_0})$,其中的 K, B 为与材料有关的常数, λ_1, λ_0 与 $\lambda_{t_1}, \lambda_{t_0}$ 分别应变传感光栅与温度修正光栅的当前波长与初始波长。所有光栅的峰值反射率约为 0.9。为了得到解调系统的波长检测精度,对两个传感光栅在同一温度处应变的反射波长进行了多次测量(见图 6)。可以看出,在恒温下,温度传感光栅的波长漂移在 0.5 pm 以内;在恒温、恒应力下,应变传感光栅的波长漂移也在 0.5 pm 以内。结果说明解调系统的波长检测精度达到 0.5 pm。

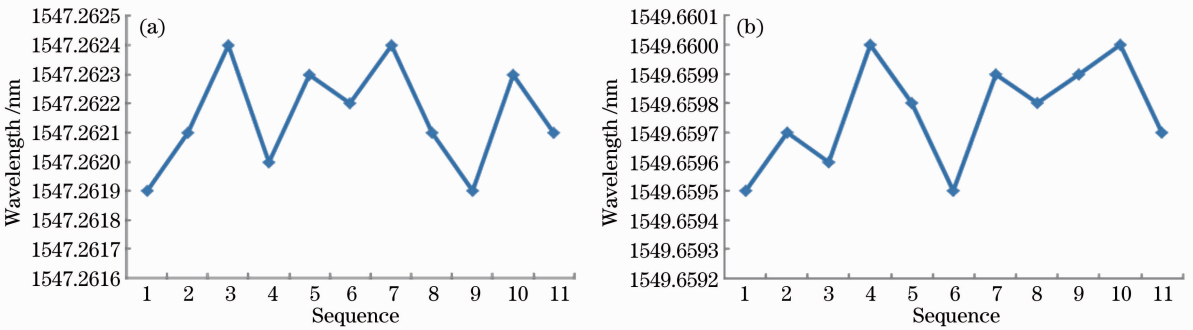


图 6 波长漂移测量结果。(a)温度传感器;(b)应变传感器

Fig. 6 Measured results of wavelength drift. (a) Temperature sensor; (b) strain sensor

在应变测量中,恒温下应变传感器一端固定,另一端加载重物,并逐渐增加重物的重量,记录重物重量与对应的 FBG 反射谱中心波长,然后与应变片在同一重量下的应变进行比较,得到应变与 FBG 反射谱的关系[见图 7(a)],可以看出,在 0~2300 $\mu\epsilon$ 范围内,应变与波长保持很好的线性关系;波长测量的准确度达到 0.5 pm,对应应变的准确度达到

0.6 $\mu\epsilon$ 。在温度测量实验中,将封装的温度传感光栅放入恒温箱中,逐渐增加恒温箱的温度,记录温度与对应的 FBG 反射波长,得到温度与 FBG 反射波长的关系曲线[见图 7(b)],可以看出温度与 FBG 反射波长具有良好的线性关系;波长测量的准确度达到 0.5 pm,对应的温度检测精度达到 0.05 $^{\circ}\text{C}$ 。

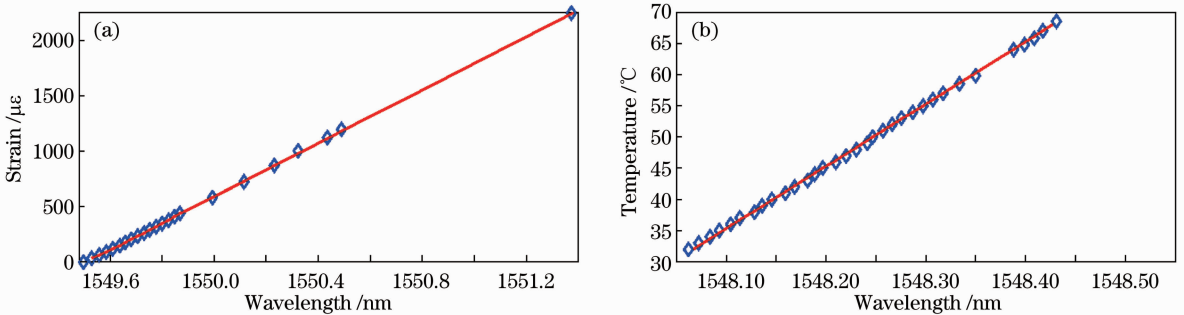


图 7 实验结果。(a)应变;(b)温度

Fig. 7 Experimental results. (a) Strain; (b) temperature

4 结 论

采用基于 SOA 的环形激光器作为光源,在 PZT 上施加扫描电压控制可调谐光纤型 F-P 滤波

器,改变环形激光器输出波长的方法,实现对 30 个传感通道多达 1000 个温度传感 FBG 或 240 个应变传感 FBG 的同时解调,解调频率达到 1000 Hz;联

合采用梳状滤波器与乙炔气体的吸收谱,对可调谐 F-P 滤波器进行动态定标,消除了 PZT 的非线性与不稳定性对测量带来的影响;采用实时数字滤波技术与 3 dB 中点波长确定方法,提高了解调系统的波长测量精度。实验可得系统的波长测量精度达到 0.5 pm,对应的应变测量精度达到 0.6 $\mu\epsilon$,温度测量精度达到 0.05 $^{\circ}\text{C}$ 。理论与实验表明,该 FBG 解调系统达到了低成本、快速、高精度的测量要求。

参 考 文 献

- 1 Y. Sano, T. Yoshino. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 132~139
- 2 G. Xiao, N. Mrad, F. Wu *et al.*. Miniaturized optical fiber sensor interrogation system employing echelle diffractive gratings demultiplexer for potential aerospace applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1202~1207
- 3 C. Wang, J. Yao. Ultrafast and ultrahigh-resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(9): 2927~2933
- 4 W. Wu, L. Liang. Long-term real-time monitoring system for port machinery based on fiber grating sensors[C]. Wuhan: First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS), 2008. 354~357
- 5 W. Allan, Z. Graham, J. Zayas *et al.*. Multiplexed fiber Bragg grating interrogation system using a microelectromechanical Fabry-Perot tunable filter [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, **9**(8): 936~943
- 6 C. C. Chan, W. Jin, H. L. Ho *et al.*. Improvement of measurement accuracy of FBG sensor systems by use of gas absorption lines as multi-wavelength references [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(12): 742~743
- 7 Zhu Haohan, Qin Haikun, Zhang Min *et al.*. Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 893~897
朱浩瀚, 秦海琨, 张敏等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 893~897

栏目编辑:何卓铭