

基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅 振动传感器的动态解调

邹红波^{1,2} 梁大开¹ 曾捷¹ 穆昊¹ 周丽¹

(¹南京航空航天大学飞行器结构力学与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210016)

²三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002

摘要 提出一种基于级联长周期光纤光栅(CLPG)的光纤布拉格光栅(FBG)振动传感器动态解调方法。宽带光源发出的光经 FBG 反射后,进入到 CLPG,经过 CLPG 调制后 FBG 反射光强会发生变化。通过温度测量实验对监测系统进行了静态标定,再将 FBG 传感器粘贴于铝板表面,采用该系统监测筒支铝板结构在低频和高频下的振动信号。系统采集到的动态信号时域波形及频谱与涡电流位移计的测量结果相吻合,表明该监测系统可实现 2 kHz 以下的动态信号测量。

关键词 光纤布拉格光栅;级联长周期光纤光栅;动态解调;振动监测;传感器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0805005

Dynamic Demodulation of Fiber Bragg Grating Vibration Sensor Based on Cascaded Long-Period Fiber Grating

Zou Hongbo^{1,2} Liang Dakai¹ Zeng Jie¹ Mu Hao¹ Zhou Li¹

(¹Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China
²College of Electric Engineering and Renewable Energy, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract A dynamic demodulation method of fiber Bragg grating (FBG) vibration sensor based on cascaded long-period fiber grating (CLPG) is proposed. The light of broad optical source is reflected by FBG, then the reflected light enters the CLPG. The intensity of reflected light of FBG changes after being modulated by CLPG. Monitoring system is calibrated by temperature-measuring experiment firstly. Then FBG is stuck on the surface of aluminum specimen, and wavelength change of FBG caused by vibration of the aluminum specimen in low and high frequency is monitored by the system. The acquired vibration signal and fast Fourier transform (FFT) of the experiment data agree with the signal of eddy current displacement meter. It is shown that the FBG dynamic demodulation based on CLPG can be used to monitor no more than 2 kHz dynamic signal.

Key words fiber Bragg grating; cascaded long-period fiber grating; dynamic demodulation; vibration monitoring; sensor

OCIS codes 060.0060; 060.2380; 060.3738; 060.3735

1 引言

波长解调技术是光纤布拉格光栅(FBG)传感系统的核心技术之一。在 FBG 传感技术实用化进程

中^[1~5],波长解调技术的研究一直是研究人员重点关注的课题^[6,7]。目前 FBG 解调的方法有很多种,大致可分为两大类:滤波解调法^[8~11]和干涉解调

收稿日期: 2011-01-17; 收到修改稿日期: 2011-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(60907038)、中国博士后科学基金(20090461116)、江苏省自然科学基金(BK2009370)和江苏省博士后科研资助计划(1001010B)资助课题。

作者简介: 邹红波(1978—),男,博士研究生,主要从事光纤光栅传感器方面的研究。E-mail: zhbhorace@163.com

导师简介: 梁大开(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感器及其在结构健康监测用的应用等方面的研究。

E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

法^[12,13]。其中干涉解调法受环境影响大,仅局限于测量动态信号,不适于静态信号的测量,而滤波解调法适用于动态、静态测量。在滤波解调法中光纤光栅匹配滤波器法结构简单但精度不高;可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器法精度较高但价格昂贵,目前市场上的专用FBG解调仪多基于可调谐F-P滤波器法,价格昂贵限制了其在工程中的应用;边沿滤波器法具有结构简单、价格低、解调速度快等优点。可以作为边沿滤波器的元件有很多,包括波分复用器(WDM)^[14]、高双折射光纤环镜(HiBi-FLM)^[15]、倾斜光纤光栅(TFBG)^[16]、长周期光纤光栅(LPFG)^[17]等。

级联长周期光纤光栅(CLPG)是由两个参数相同的均匀LPFG和一段普通单模光纤(SMF)连接而成,级联后可以获得比单个LPFG更好的光谱性能^[18]。本文采用CLPG实现了FBG静、动态信号解调,动态信号频率可达2 kHz。

2 解调原理

FBG和CLPG的光谱图如图1所示。

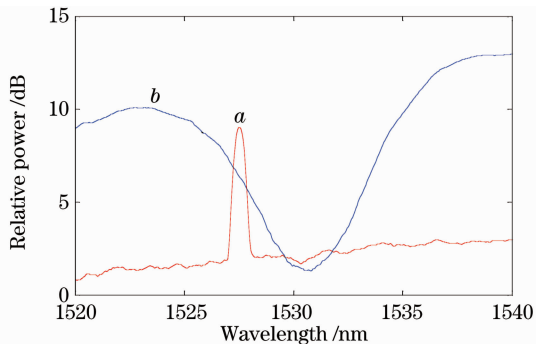


图1 FBG和CLPG的光谱图

Fig. 1 Spectra of the FBG and the CLPG

图1中,曲线a为FBG的反射光谱 $R(\lambda)$,FBG中心波长为1527 nm,曲线b为CLPG的透射光谱 $H(\lambda)$,CLPG中心波长为1530 nm。

在1522~1528 nm波长范围内 $H(\lambda)$ 近似为线性函数

$$H(\lambda) = A(\lambda - \lambda_0), \quad (1)$$

式中 λ_0 为FBG的初始波长,A为线性滤波器的比例系数。

假设FBG反射光是谱宽为 $\Delta\lambda$ 的高斯(Gaussian)分布,则其反射光强为

$$I_1(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda' = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 R, \quad (2)$$

式中 I_0 为信号光强, R 为FBG的反射率。

当FBG反射光经CLPG滤波后光功率变为^[11]

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') H(\lambda') d\lambda' = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 R A \left(\lambda_B - \lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{\pi}} \right), \quad (3)$$

式中 λ_B 为待测的FBG波长。由(2),(3)式可得

$$\frac{I(\lambda)}{I_1(\lambda)} = A \left(\lambda_B - \lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{\pi}} \right). \quad (4)$$

因此通过测量 $I(\lambda)/I_1(\lambda)$ 的值即可获得 λ_B 信息,从而实现对FBG波长的监测。这种方法基于光强监测,适用于动态、静态测量,具有较好的线性输出。

3 解调系统结构

基于CLPG的FBG解调系统如图2所示,系统由一个宽带光源(BLS)、两个耦合器(C1,C2)、一个FBG、一个CLPG、两个光电探测器(PD1,PD2)、一个数据采集卡(DAC)和一台计算机(PC)构成。采用宽带光源激励FBG传感器,反射光经过3 dB耦合器分为两束光,一路光直接进入光电探测器,用于测量FBG的反射光功率,作为参考光;另一路光经CLPG滤波后再进入光电探测器,用于测量FBG反射光谱经过CLPG滤波后的光功率,最后两路光电探测器得到的数据通过数据采集卡进入PC机进行除法运算处理。

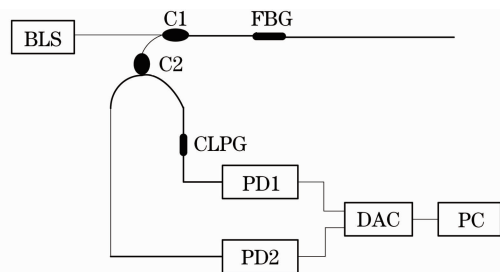


图2 基于CLPG的FBG解调系统

Fig. 2 Scheme of FBG demodulation system based on CLPG

该解调系统中光源采用Agilent 83437型宽带光源,是一种边发射的发光二极管(LED),其光谱如图3所示。由图3可以看出,光源的输出谱在1520~1560 nm范围内具有一段平坦区;实验中选用的FBG的中心波长为1527 nm,其反射光谱见图1中曲线a;CLPG由两个均匀LPFG和一段普通SMF连接而成,实验中选用的两个均匀LPFG的栅区长度均为4 cm,周期均为460 μm,用于连接两段均匀LPFG的普通SMF的长度为10 cm,CLPG的

中心波长为 1530 nm,其透射光谱见图 1 中曲线 *b*,由曲线 *b* 可看出光谱峰值附近波长范围分别为 1522~1528 nm,1532~1538 nm 处的光强与波长近似为线性关系;光电探测器由武汉欧迪电子科技有限公司提供,其型号为 OD-PD-2,可将波长范围在 1100~1700 nm 的光信号转化为电压信号;采用的数据采集卡为 NIDAQCard-6024E,设定采样频率为 10 kHz,采集的电压信号输入计算机进行处理。

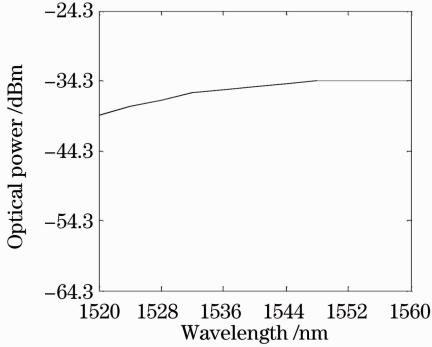


图 3 光源光谱图

Fig. 3 Spectrum of broadband light source

4 实验结果与数据分析

4.1 标定实验

为了提高测量精度,需要对该解调系统进行标定。由于 FBG 对温度、应变交叉敏感,在应变测量中无法完全剔除温度影响,因此本文通过温度监测实验建立起系统输出量与输入量之间的准确关系,并对 FBG 波长偏移与温度之间的关系进行分析。系统的温度变化 ΔT 引起布拉格波长 λ_B 的移动 $\Delta \lambda$ 可表示为^[19]

$$\Delta \lambda / \lambda_B = (\alpha + \zeta) \times \Delta T, \quad (5)$$

式中 α 为光纤的热膨胀系数, $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}$; ζ 为掺锗光纤的热光系数, $\zeta = 6.67 \times 10^{-6}$ 。由(5)式可知,当 $\lambda_B = 1527$ nm 时 FBG 的波长偏移与温度为线性关系,温度灵敏度为 0.011 nm/°C。

将传感 FBG 放入 DH401CT 温控箱内,该温控箱的最高温度可达 200 °C,实验时将箱内温度由室温升至 115 °C,每隔 5 °C 测量一次,在达到设定温度后保温 10 min。采用上述解调系统测定输出电压,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,该解调系统的输出电压与温度成线性关系,拟合度为 0.9996,根据数据拟合结果计算得输出电压值与温度关系为 0.49334 mV/°C。

同时对传感 FBG 的波长偏移量与温度关系进行测量,温度由室温升至 115 °C,每隔 5 °C 测量一

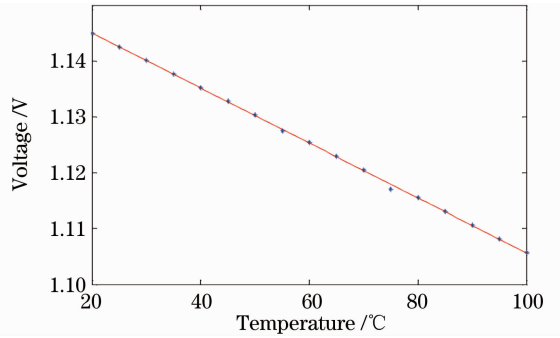


图 4 输出电压与温度的关系

Fig. 4 Relationship between output voltage and temperature

次,在达到设定温度后保温 10 min,用光谱仪记录此时的波长值,得到的实验结果如图 5 所示。

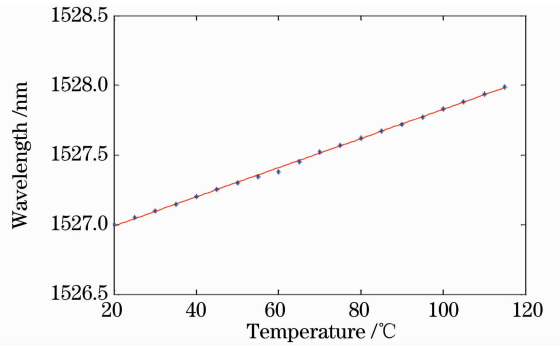


图 5 波长漂移与温度的关系

Fig. 5 Relationship between wavelength and temperature

从图 5 可以看出,传感 FBG 的波长漂移与温度成线性关系,拟合度为 0.9988,根据数据拟合结果计算得波长漂移与温度关系为 0.0103 nm/°C。

由图 4,5 可知,输出电压与波长漂移关系为 0.0475 mV/pm,验证了当 FBG 波长在 CLPG 线性区移动时,CLPG 的透射光强与 FBG 波长偏移量成线性关系。

由图 1 知 CLPG 线性区的斜率为 2 dB/nm,系统中采用的光电探测器能够探测到的最小相对光功率变化为 0.01 dB,则可得系统的波长分辨率为 5 pm。对应于本实验,该系统可监测的最小温度变化量为 0.5 °C。实验结果表明,该解调方案可以对 FBG 静态信号进行解调。

4.2 振动监测实验

尺寸为 345 mm×255 mm×2 mm 的铝板采用四边简支方式,将波长为 1527 nm、长度为 15 mm 的传感 FBG 粘贴于铝板背面中心位置,粘贴方向为平行长边方向。型号为 HEV-02 激振器粘贴于铝板表面中心位置,击振力为 2 kg,振幅 5 mm,激振器与 HEA-S 功率放大器相连,频率范围 0~16 kHz,输出

电压设为 2 V,监测系统如图 6 所示。

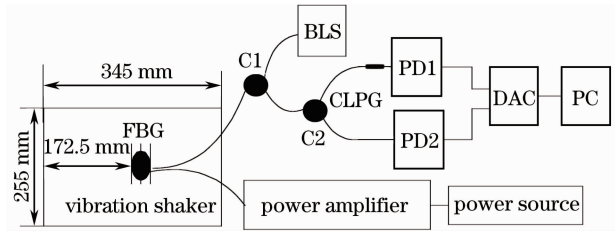


图 6 振动监测实验装置

Fig. 6 Experimental device for vibration monitoring

当激振器工作时,与激振器相连的铝板受到垂直作用的应力而产生应变。当激振信号为正弦波,铝板随激振器往复振动,同时 FBG 随之受拉或受压,中心波长减小或增大,因此 FBG 波长变化反应了铝板的振动情况。

为检验该监测系统在不同频率下的特性,选用两组具有代表性的激振频率。一组是低频 $f_1 = 100$ Hz,另一组是高频 $f_2 = 2$ kHz。为进一步验证该监测系统的可靠性,在铝板背面中心位置放置 AEC-5520 涡电流位移计对振动信号进行探测,并与 FBG 监测的信号进行对比。

当激振频率为 100 Hz 时,分别利用 FBG、涡电流位移计监测铝板的振动响应信号,并对信号进行频谱分析,实验结果如图 7,8 所示。

当激振频率为 2 kHz 时,分别利用 FBG、涡电流位移计监测铝板的振动响应信号,实验结果

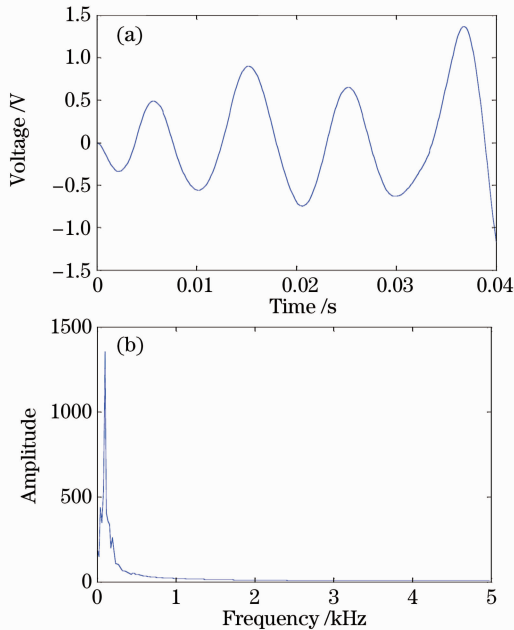


图 7 FBG 低频振动信号。(a)电压;(b)幅值

Fig. 7 Vibration signal detected by FBG in low frequency. (a) Voltage; (b) amplitude

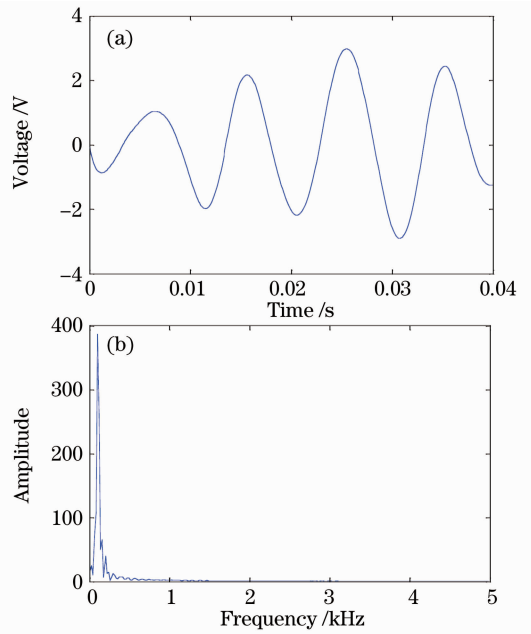


图 8 涡电流位移计测量的低频振动信号。(a)电压;(b)幅值

Fig. 8 Vibration signal detected by eddy current displacement meter in low frequency. (a) Voltage; (b) amplitude

如图 9,10 所示。

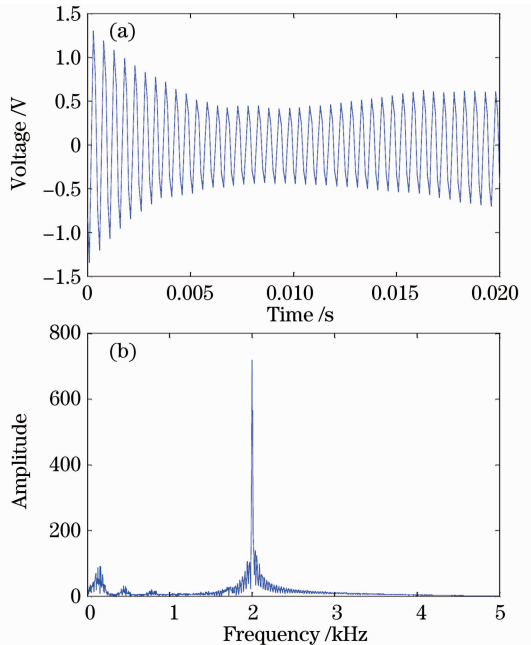


图 9 FBG 高频振动信号。(a)电压;(b)幅值

Fig. 9 Vibration signal detected by FBG in high frequency. (a) Voltage; (b) amplitude

由图 7 与图 8 对比可知,当激振频率为 100 Hz 时,由 FBG、涡电流位移计得到的振动信号的频率均为 100 Hz,且两者的时域信号的变化趋势基本一致。实验结果表明,低频振动条件下由监测系统得

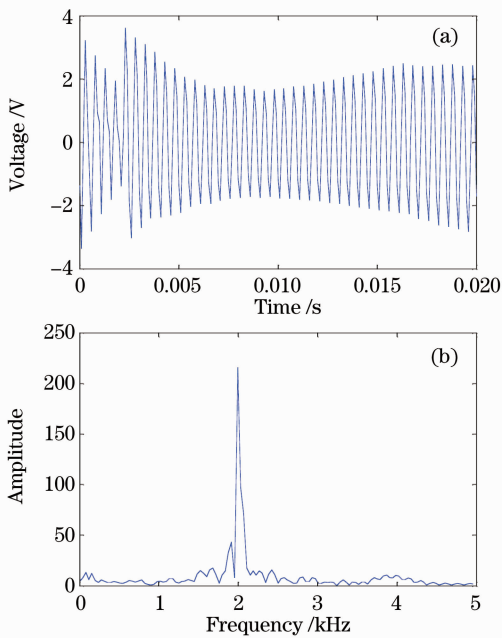


图 10 涡电流位移计测量的高频振动信号。(a)电压；(b)幅值

Fig. 10 Vibration signal detected by eddy current displacement meter in high frequency. (a) Voltage; (b) amplitude

到的动态信号与涡电流位移计的测量结果相吻合。由图 9 与图 10 对比可知,当激振频率为 2 kHz 时,由 FBG、涡电流位移计得到的振动信号的频率均为 2 kHz,两者的时域信号在 0~0.002 s 时间段内振动波形略有不同,在 0.002~0.02 s 时间段内振动波形变化趋势基本一致。其原因可能是 FBG 直接粘贴于铝板表面,而涡电流位移计传感探头与铝板有一定距离,在振动的初始时间段内涡电流传感探头测得的信号有延迟。实验结果表明,高频振动条件下由监测系统得到的动态信号与涡电流位移计的测量结果相吻合。

5 结 论

利用级联长周期光栅作为边沿滤波器,实现了 FBG 振动传感器的动态解调。解调系统具有结构简单、成本低、解调速度快等优点。采用该系统监测筒支铝板结构的微小振动,实现了 2 kHz 以下的动态信号监测,因而既适用于固有频率低的结构动态监测,又适用于固有频率较高的结构动态监测。通过与涡电流位移计测量结果对比表明采用该系统测量板结构的振动信号是可行的。

参 考 文 献

1 K. R. Sohn, J. H. Shim. Liquid-level monitoring sensor

systems using fiber Bragg grating embedded in cantilever [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, **152**(2): 248~251

2 Y. Zhan, H. Wu, Q. Yang *et al.*. A multi-parameter optical fiber sensor with interrogation and discrimination capabilities [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2009, **47**(11): 1317~1321

3 Y. Dai, Y. Liu, J. Leng *et al.*. A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2009, **47**(10): 1028~1033

4 Jia Ziguang, Ren Liang, Li Hongnan *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1298~1303

贾子光, 任亮, 李宏男等. 应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1298~1303

5 Ying Chaofu, Peng Baojin, Ren Zhijun *et al.*. Demodulation method of distributed fiber Bragg grating sensor using blazed fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2891~2895

应朝福, 彭保进, 任志君等. 基于闪耀光纤光栅透射特性的分布式光纤布拉格光栅传感器解调方法 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2891~2895

6 Z. Ran, Y. Rao. A FBG sensor system with cascaded LPFGs and MUSIC algorithm for dynamic strain measurement [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, **135**(2): 415~419

7 Y. Zhao, Y. Liao. Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2004, **41**(1): 1~18

8 D. A. Jackson, A. B. Lobo Ribeiro, L. Reekie *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192~1194

9 M. A. Davis, A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 822~823

10 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~1372

11 S. M. Melle, K. Liu, R. M. Measures. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(5): 516~518

12 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 236~238

13 Y. Yu, H. Tam, W. Huang. Fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique [J]. *Chin. J. Sensors and Actuators*, 2001, **21**(8): 987~989

14 M. A. Davis, A. D. Kersey. All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(1): 75~77

15 X. Dong, S. Li, K. Chiang *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fibre laser based on a high-birefringence fibre loop mirror [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(19): 1609~1610

16 J. Song, L. Shao, A. Zhang *et al.*. Novel FBG triangular filter for interrogating a FBG sensor in dynamic strain measurement [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(5): 336~338

17 R. W. Fallon, L. Zhang, L. A. Everall *et al.*. All-fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating [J]. *Measurement Sci. Technol.*, 1998, **9**(12): 1969~1973

18 Y. Liu, J. A. R. Williams, L. Zhang *et al.*. Phase shifted and cascaded long-period fiber gratings [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **164**(1): 27~31

19 J. Yang, Y. Zhao, B. Peng *et al.*. Temperature-compensated high pressure FBG sensor with a bulk-modulus and self-demodulation method [J]. *Sensors and Actuators*, 2005, **25**(2): 254~258