

基于双长周期光纤光栅边缘滤波的光纤布拉格光栅解调系统

朱 珠¹ 梁大开² 孙红兵¹

¹淮阴师范学院电子与电气工程系, 江苏 淮安 223300
²南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要 从长周期光纤光栅(LPFG)透射光谱和光纤布拉格光栅(FBG)解调原理角度,详细研究了 LPFG 透射光谱的边缘滤波特性,提出了一种基于双长周期光纤光栅边缘滤波的 FBG 解调方案,使其在具有对被测参量变化高度灵敏性特点的同时,对温度、湿度等环境参量具有较好的自补偿性能,并对该方案进行了温度、振动信号监测验证。通过理论和实验验证,该解调方法对静、动态信号具有较好的响应特性,其动态信号的响应带宽约为 3 kHz,在 580,1000,2500 Hz 的激励频率下,该系统具有较好的响应度和精确度,符合结构健康监测领域对 FBG 解调的要求,具有广泛的应用前景。

关键词 光栅;长周期光纤光栅;光纤布拉格光栅;解调;边缘滤波;振动信号监测

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0305001

Double-Edged Filter Wavelength Demodulation System for Fiber Bragg Gratings Based on Long Period Fiber Grating

Zhu Zhu¹ Liang Dakai² Sun Hongbing¹

¹Department of Electronics and Electrical Engineering, Huaiyin Normal University,
Huai'an, Jiangsu 223300, China

²State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract From the angle of the transmission spectrum of long period fiber grating (LPFG) and the wavelength interrogation technology for fiber Bragg gratings (FBGs), the edged filter characteristic of LPFGs is studied. A double-edged filter wavelength interrogation technology for FBGs is proposed. The theoretical model is deduced and the experiments of temperature and vibration signal monitoring are verified. The demodulation system, which is repeatedly tested under the excitation frequency of 580, 1000 Hz and 2500 Hz, respectively, shows broad dynamic frequency band of 3 kHz, fast response time and high accuracy, with the extensive application prospects.

Key words gratings; long period fiber grating; fiber Bragg grating; demodulation technology; edged filter; vibration signal monitoring

OCIS codes 230.0040; 230.1480; 230.4685; 120.4820; 230.7408

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器作为一种较为成熟的传感元件,能够有效克服常规传感系统在

长期稳定性、耐久性、抗电磁干扰和分布式等方面的不足^[1~4],且对温度和应变等环境参量具有较高的灵敏度,易于埋入智能结构内部实现结构的健康

收稿日期: 2012-08-24; 收到修改稿日期: 2012-11-06

基金项目: 江苏省高校科研成果化推进项目(JH-009)和淮安市科技发展项目(HAG2011046)资助课题。

作者简介: 朱 珠(1983—),女,硕士研究生,助教,主要从事光纤光栅解调方面的研究。E-mail: zz716@hytc.edu.cn

导师简介: 梁大开(1956—),男,博士,博士生导师,主要从事使用光纤传感技术进行结构健康监测方面的研究。

E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网: www.opticsjournal.net

监测。

为获得被测结构内部或周围环境参量的变化情况,需对FBG光谱及FBG中心波长的采集和分析技术进行研究,FBG解调技术逐渐成为整个光纤光栅传感系统的关键,直接决定了传感测试系统的设计及应用水平。光纤光栅解调方法可分为滤波法和干涉法两大类^[5~7]。传统解调方法^[8,9]是用光谱仪、单色仪等设备对波长偏移进行解调,但其设备体积大、解调频率低,难以现场应用;匹配滤波法^[10]具有结构简单、便于携带等优点,但其解调精度不高;干涉解调法^[11,12]仅适用于对动态参量的检测,无法实现对绝对参量的检测。

为弥补上述方法的不足,本文将具有制作成本低、无背向反射、结构紧凑等优点的长周期光纤光栅(LPFG)传感技术^[13,14]引入到FBG解调领域,在分析边缘滤波解调方法的基础上,提出了基于双长周期双边缘滤波的解调方案,使其在具有对被测参量变化高度灵敏性特点的同时,对温度、湿度等环境参量具有较好的自补偿性能。

与原有两根LPFG相串联叠加的双LPFG方法不同,本文所提出方法是将两根中心波长不同的LPFG相并联,使其分别形成单独光路,当FBG反射光发生变化时,一光路的光强增加而另一光路的光强则减少,通过检测两光路中光强变化量的叠加实现对FBG绝对参量的检测,且解调系统的检测精

度得到大幅增加。该方法能够较好地适用于结构内部及环境参量的监测,具有较好的应用前景。

2 双LPFG双边缘FBG解调原理

2.1 LPFG边缘滤波解调

LPFG边缘滤波解调法原理是将FBG中心波长转化为光强解调,即通过测量FBG中心波长在LPFG滤波器线性边缘波段上漂移时的光强差,得到FBG中心波长的漂移量,从而获知FBG波长值^[15]。LPFG解调FBG的基本原理如图1(a)所示^[16]。

由图1(a)可知,曲线C为LPFG透射光谱,曲线A为FBG反射光谱。FBG反射光透过LPFG滤波器后的光功率信号 $I(\lambda)$ 可表示为

$$I(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') H(\lambda') d\lambda', \quad (1)$$

式中 $H(\lambda)$ 、 $R(\lambda)$ 分别为LPFG透射谱和FBG反射谱。由于在一定波长范围内 $H(\lambda)$ 可近似为线性函数,且 $R(\lambda)$ 的光谱线宽远小于该波长范围,则 $I(\lambda)$ 也可以近似为线性函数,即

$$I(\lambda) = H(\lambda) \cdot I_1(\lambda), \quad (2)$$

式中 $I_1(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda'$ 为FBG反射谱总功率。

由(2)式可知,通过测量 $I(\lambda)/I_1(\lambda)$ 的值即可获得波长信息,从而实现FBG中心波长的检测。

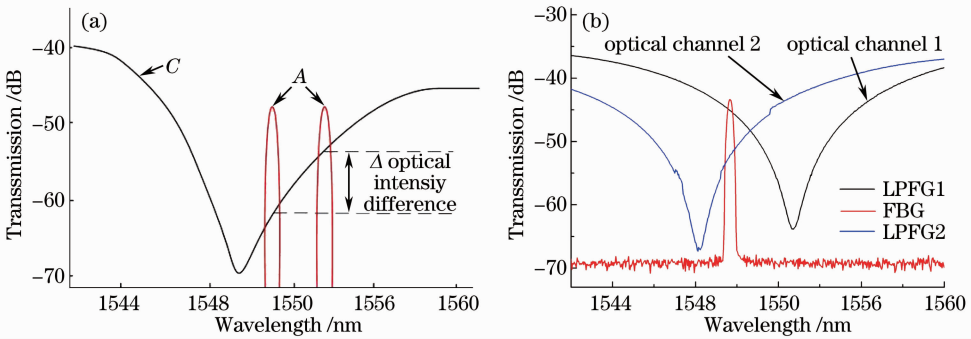


图1 (a) LPFG解调FBG基本原理;(b)双LPFG边缘滤波解调原理

Fig.1 (a) Demodulation of traditional LPFG edged filter; (b) demodulation of double LPFG edged filter

2.2 FBG反射谱、LPFG滤波器谱函数

为了模拟双边缘滤波条件,可给出理想状态下FBG反射谱与LPFG传输谱的高斯模拟函数^[17],即

$$B(\lambda) = b \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_b)^2}{\Delta\lambda_b^2}\right], \quad (3)$$

$$F_1(\lambda) = f_1 \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{f1})^2}{\Delta\lambda_{f1}^2}\right], \quad (4)$$

$$F_2(\lambda) = f_2 \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{f2})^2}{\Delta\lambda_{f2}^2}\right], \quad (5)$$

式中 λ_b 、 λ_{f1} 和 λ_{f2} 分别为FBG中心波长(被测波长)、两个LPFG中心波长, b 、 f_1 和 f_2 分别是FBG高斯型的反射峰值、两个滤波器的传输峰值, $\Delta\lambda_b$ 、 $\Delta\lambda_{f1}$ 和 $\Delta\lambda_{f2}$ 分别为FBG反射谱、两个LPFG传输谱衰减达到峰值一半时的半峰全宽(FWHM)。

2.3 双 LPFG 双边缘解调原理

本文所提出的解调方法是将两根中心波长不同的 LPFG 相并联,使其分别形成单独光路,FBG 反射光经过 50% 分光后分别进入两个光路,光谱原理如图 1(b) 所示。当 FBG 反射光发生变化时,一光路的光强增加而另一光路的光强则减少,通过检测两光路中光强变化量的叠加可实现对 FBG 绝对参数的检测,且解调系统的检测精度得到大幅增加。

在满足双边缘滤波条件下,FBG 反射光分别通过两光路的 LPFG 滤波器,且两条光路的传输特性曲线相交迭,其交迭部分为测量波长的有效范围。理论上,光路输出谱为输入谱和其信道特征的卷积^[18],取光电转换装置为光电二极管,则可设通过光路 1 滤波器的检测电压 $V_1(\lambda_b)$ 为

$$V_1(\lambda_b) = d_1 \cdot P_1(\lambda_b) = d_1 \cdot S(\lambda) \int_0^{\infty} B(\lambda) F_1(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

式中 d_1 为光电二极管的响应率, $P_1(\lambda_b)$ 为分支 1 的输出光强, $S(\lambda)$ 是光源的发射谱。

理想情况下,滤波器带宽变化比光源谱密度缓慢得多,即 $S(\lambda) \equiv S(\lambda_f)$ 。假设此时 FBG 反射光波长为 x ,将(3)式、(4)式代入(6)式,可得

$$V_1 \approx d_1 S(\lambda_{f1}) f_1 b \Delta\lambda_{f1} \Delta\lambda_b \sqrt{\frac{\pi}{(\Delta\lambda_{f1}^2 + \Delta\lambda_b^2) 4 \ln 2}} \times \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{f1} - x)}{\Delta\lambda_{f1}^2 + \Delta\lambda_b^2}\right], \quad (7)$$

同理可得,

$$V_2 \approx d_2 S(\lambda_{f2}) f_2 b \Delta\lambda_{f2} \Delta\lambda_b \sqrt{\frac{\pi}{(\Delta\lambda_{f2}^2 + \Delta\lambda_b^2) 4 \ln 2}} \times \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{f2} - x)}{\Delta\lambda_{f2}^2 + \Delta\lambda_b^2}\right]. \quad (8)$$

当两个 LPFG 滤波器、FBG 参数(反射峰值、

FWHM)、光电转换器已定时,各参数 $\lambda_b, \lambda_{f1}, \lambda_{f2}, \Delta\lambda_b, \Delta\lambda_{f1}, \Delta\lambda_{f2}, b, f_1, f_2, d_1$ 均为常量,(7)式、(8)式可表示为

$$Z_1 \equiv V_1(x) \approx A_1 \cdot \exp[C_1(\lambda_{f1} - x)], \quad (9)$$

$$Z_2 \equiv V_2(x) \approx A_2 \cdot \exp[C_2(\lambda_{f2} - x)], \quad (10)$$

式中 C_1, C_2, A_1, A_2 均为常数,假设 $|\Delta\lambda_{f2} - \Delta\lambda_{f1}| \ll \Delta\lambda_b$,将(9)式、(10)式代入 $\rho(\lambda) = \lg \frac{V_2(\lambda)}{V_1(\lambda)}$,可得^[19]

$$\rho(x) = \lg \left\{ \frac{A_2}{A_1} \cdot \exp[C_2(\lambda_{f2} - x) - C_1(\lambda_{f1} - x)] \right\}. \quad (11)$$

由(11)式可知,当两光路的特性曲线相交时, $\rho(x) = 0$;FBG 中心波长 x 和 $\rho(x)$ 呈线性关系,从而 x 值可由测量 $\rho(x)$ 的值得到,实现双 LPFG 边缘解调 FBG。

由于 LPFG 对温度、湿度等环境参数的变化具有较高的灵敏性,采用 LPFG 作为元件的解调系统中最大的技术难点在于解调过程中系统自身 LPFG 的温漂、湿漂问题,本文利用两根 LPFG 在解调过程中不同的变化趋势,在增加系统自身检测精度的同时,实现对 LPFG 解调系统的温度、湿度自补偿,即解决在 FBG 解调过程中 LPFG 自身的温漂、湿漂问题。

3 双 LPFG 双边缘 FBG 解调系统

基于双长周期双边缘滤波的 FBG 解调系统框图如图 2 所示,系统主要分为光路、电路及数据采集三部分。其中,光路部分包括宽带光源(由 FBG240 自带光源提供)、光隔离器、Y 型耦合器 1(分光比 1:99)、Y 型耦合器 2(分光比 50:50)、传感 FBG(中心波长为 1549.668 nm)、两根长周期光纤光栅[中心波长分别为 1548.120 nm 和 1552.728 nm,其交

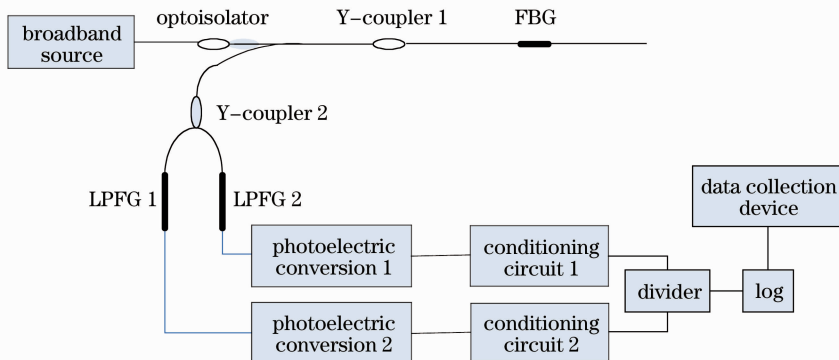


图 2 基于双长周期光栅双边缘滤波的 FBG 解调系统框图

Fig. 2 System diagram of double LPFG edged filter for FBG demodulation

叠的线性区域为 1548.5~1551.5 nm,如图 1(b)所示]和光电探测器;电路部分由调零电路、前置放大电路、除法器组成;数据采集部分采用 NI6024E 型数据采集卡接入计算机 PCI 接口通过 LabView 软件编程实现数据的采集和显示。

由图 2 可知,宽带光源发出的光分别经过光隔离器、Y 型耦合器 1 后到达传感 FBG,经 FBG 反射后进入 Y 型耦合器 1 和 2,分别进入两个长周期光纤光栅,且通过光电转换模块使光信号转化为电压信号,将调零、前置放大后的信号进行除法运算,采

用数据采集卡实现最终的信号采集。

4 双 LPFG 双边边缘滤波温度验证实验

4.1 双 LPFG 双边边缘 FBG 温度监测系统

图 3 为双 LPFG 双边边缘 FBG 温度监测实验现场图。实验中,利用温控箱加热进行温度调节,传感 FBG 的中心波长为 1549.668 nm,LPFG 1 中心波长为 1548.120 nm,LPFG 2 中心波长为 1552.728 nm,LPFG 1 与 LPFG 2 交叠的线性区域为 1548.5~1551.5 nm。实验现场如图 3 所示。

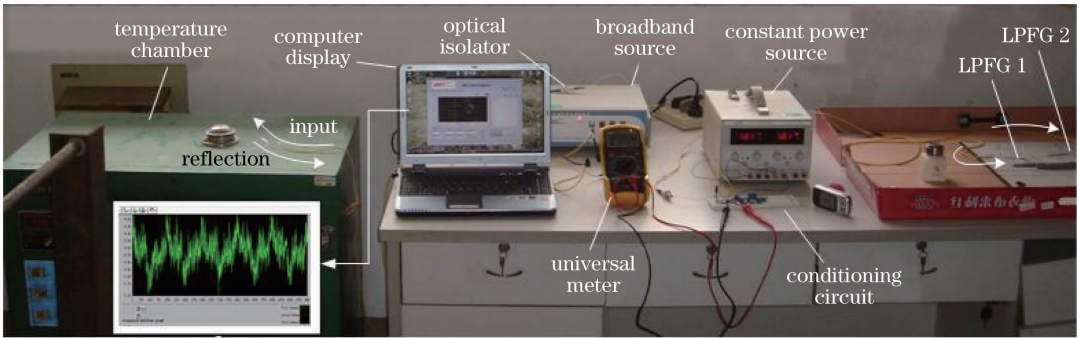


图 3 温度实验现场图

Fig. 3 Field experiment of temperature test

4.2 温度监测实验及结果分析

实验中,将传感 FBG 放入恒温箱中,加热过程从 40 °C 到 170 °C,每隔 10 °C 分别记录 FBG 波长值和输出值,FBG 波长值由解调仪 FBG240 直接读出,输出值则通过解调系统采集,降温过程由 170 °C 降到 40 °C。图 4 为升温和降温过程中 FBG 中心波长随温度的变化曲线。

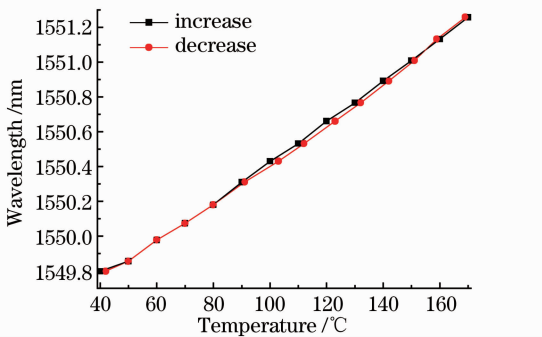


图 4 FBG 中心波长随温度的变化曲线

Fig. 4 FBG wavelength as a function of temperature

图 5 为升温和降温过程中双 LPFG 双边边缘滤波解调系统输出值随温度的变化曲线。由图 4 和图 5 可知,在升温和降温过程中,解调系统的输出值、FBG 中心波长都与温度变化呈较好的线性关系,解调系统的输出值和 FBG 中心波长的对应关系如图 6 所示。

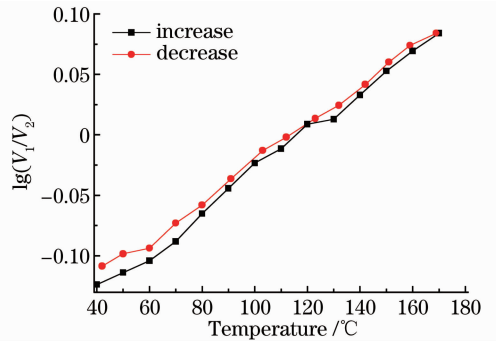


图 5 解调系统输出随温度的变化曲线

Fig. 5 Output as a function of temperature for demodulation system

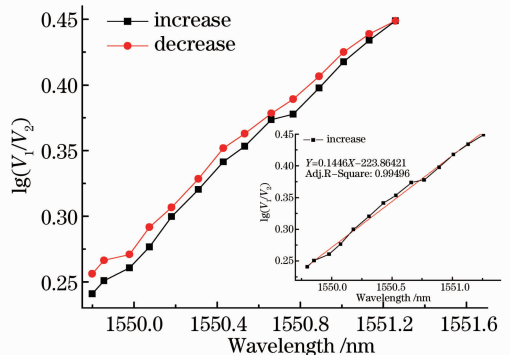


图 6 解调系统输出值和 FBG 中心波长的对应关系曲线

Fig. 6 Relationship between FBG wavelength and output

由图 6 可知,根据系统输出值可得到 FBG 中心波长值,实现对 FBG 的解调,从而获得相应的温度信息。对升温过程中的系统输出值和 FBG 中心波长曲线进行线性拟合,拟合曲线为 $Y=0.14460X-223.86421$,其相关系数分别为 99.496%。实验结果表明,利用双 LPFG 双边缘滤波效应检测的信号可以对 FBG 进行解调,检测结果具有较好的线性,其解调检测精度为 0.14460 nm^{-1} 。由于采用了全光纤传导,该系统具有成本低、响应快、使用方便等优点,同时也避免了扫描法中机械移动部分,比扫描式的解调方法测量速度更快,运行时更稳定、更精确。

5 基于双 LPFG 双边缘滤波的 FBG 解调系统振动监测实验

5.1 铝板结构振动监测

实验中,被测结构为四边简支的铝板结构,其尺

寸为 $1500 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$,弹性模量 $E=68 \text{ GPa}$ 。传感 FBG 粘贴于试件中心位置,其中心波长为 1536.529 nm 。实验过程中,将激振器(型号为 HEV-02)产生的垂直周期力加载到试件上,通过改变激振器的振动频率和幅值来激发板结构做周期振动。利用 LabView 软件显示实验中信号的变化,数据采集和处理部分实现观察输出信号波形和信号的频谱特性。

图 7(a)、(b)分别为 30 Hz 激振情况下基于双 LPFG 双边缘滤波的 FBG 解调系统所采集到的不同振幅下的波形图及相应的频谱分析图,其功放电压分别为 2 V 和 4 V。通过对比可知,当激振幅度增大时,采集到的信号幅值也相应增加,且幅频图上相应的谐波分量也随之增大。由此可见,利用本文所设计的 FBG 解调方案能够较好地判断试件的振动幅度。

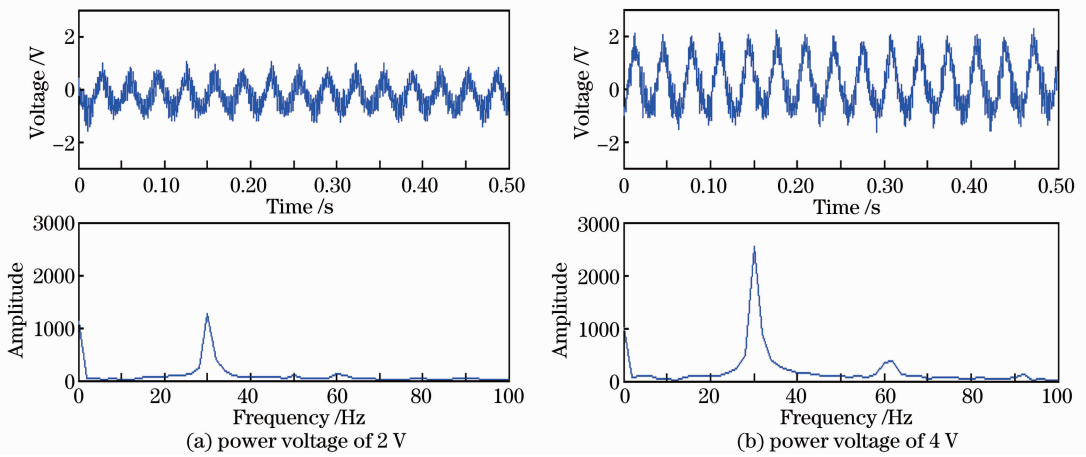


图 7 30 Hz 激振情况下不同振幅的波形图和频谱分析图

Fig. 7 Waveforms and frequency spectrums of different amplitudes of vibration with 30 Hz

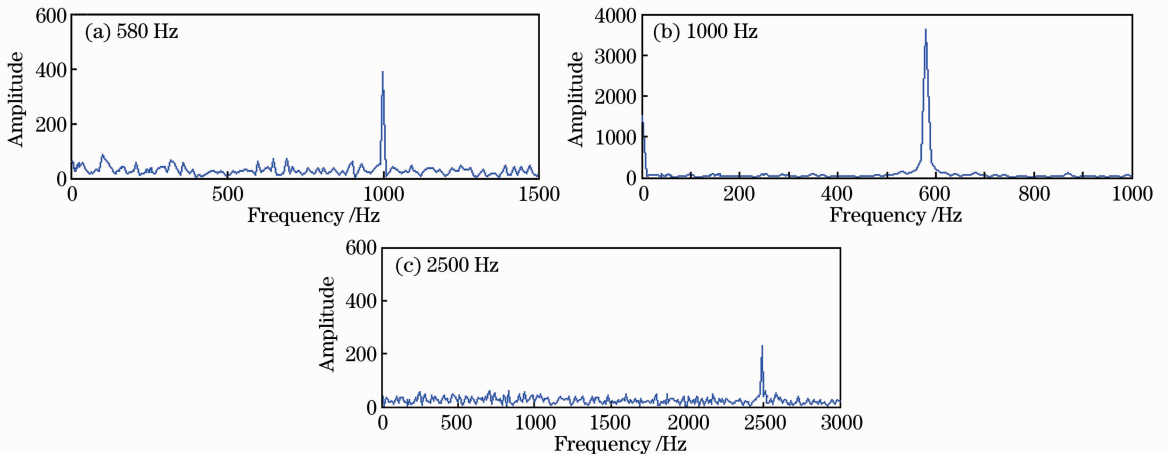


图 8 加载不同振动频率的频谱分析图

Fig. 8 Frequency spectrums of different vibration frequencies

图 8 为 580, 1000, 2500 Hz 激振下系统采集到电压信号的频谱分析图。由图可知, 激振产生的能量集中频段与施加载荷的频率相吻合, 即本文所设计的解调系统对不同频段振动信号具有较好的响应特性。

综上所述, 所设计解调系统探测到的信号频率和激振器信号频率相吻合, 改变激振器的激振频率和幅度, 该系统仍能对振动信号进行解调。通过上述实验表明, 该解调系统性能稳定, 具有较好的振动跟踪能力。

5.2 碳纤维复合材料薄板结构振动监测

采用如 5.1 节所示的实验方案, 在各向异性的碳纤维复合材料薄板试件上进行了振动实验, 其中 CFRP 薄板结构的尺寸为 40 mm×40 mm×1.6 mm, 固支方式为螺栓夹紧, 实验装置如图 9 所示。

图 10(a), (c) 为 20 Hz 激振情况下, 功放电压为 2 V 和 4 V 时的频谱分析图。图 10(b), (d) 为 200 Hz 激振情况下, 功放电压为 1 V 和 2 V 时的频谱

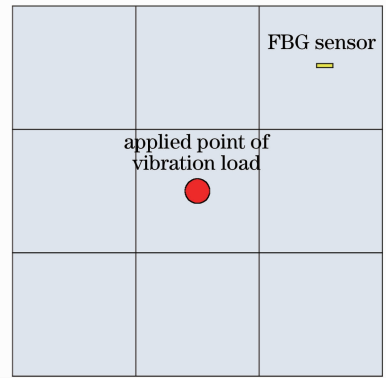


图 9 实验方案简图

Fig. 9 Diagram of experimental scheme

分析图。由图 10 可知, 随着功放电压的增加, 输出信号的幅值也随之增加, 即本文所设计的 FBG 解调系统能够较好地反映加载振动信号的频率和能量。但由于复合材料自身特性的复杂性, 解调得到的信号没有在单一金属材料上效果理想, 在激励产生较高频率时出现较为明显的其他能量分量。

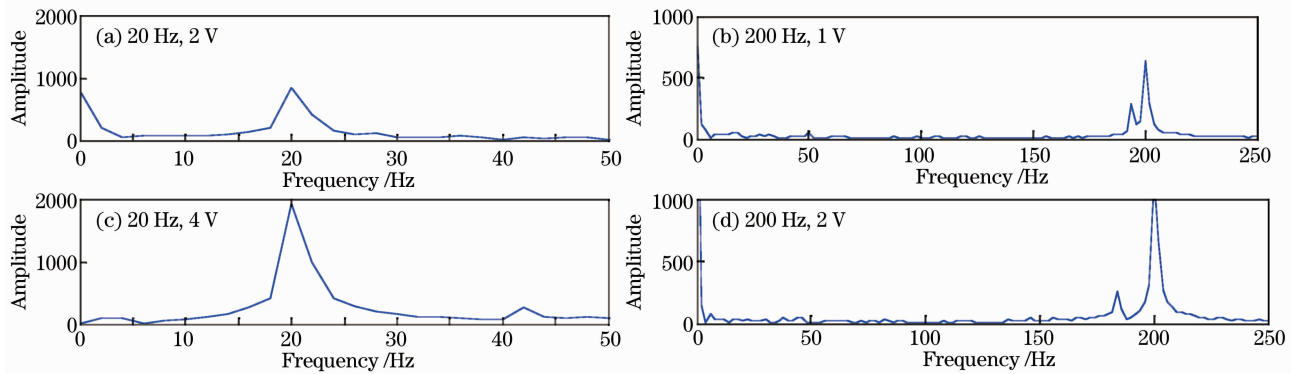


图 10 碳纤维复合材料试件频谱分析图

Fig. 10 Frequency spectrograms of carbon fiber composite material specimen

6 结 论

通过研究边缘滤波解调方法及长周期光纤光栅斜波效应的基础上, 将 LPFG 传感技术与 FBG 解调技术相结合, 提出了一种基于双长周期双边缘滤波的 FBG 解调方案, 并对该系统进行了温度、振动信号监测验证。研究表明: 该解调系统可解调静态及 3 kHz 以下的动态信号, 验证了该解调方法的合理性和正确性。

参 考 文 献

- 1 Y. J. Rao. Recent progress in applications of in-fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Laser. Eng.*, 1999, **31**(4): 297~324
- 2 Jinsong Leng, Anand Asundi. Structural health monitoring of smart composite materials by using EPFI and FBG sensors[J].

- Sen. Actuat. A-Phys.*, 2003, **103**(3): 330~340
- 3 Kyung-Ruk Sohn, Joon-Hwan Shim. Liquid-level monitoring sensor systems using fiber Bragg grating embedded in cantilever [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2009, **152**(2): 248~251
- 4 Gao Shecheng, Li Qianghua. Characterization of polarization dependent loss in reflection in uniform fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0306004
- 高社成, 励强华. 均匀光纤布拉格光栅的反射偏振相关损耗特性 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0306004
- 5 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
- 6 Yong Zhao, Yanbiao Liao. Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2004, **41**(1): 1~8
- 7 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *J. Lightw. Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 8 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
- 9 Yasukazu Sano, Toshihiko Yoshino. Fast optical wavelength interrogator employing array waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2003, **21**(1): 132~139
- 10 Zhang Dongsheng, Guo Dan, Luo Pei *et al.*. Researches on fiber grating vibration sensor based on matching filtering demodulation [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(2): 311~313
张东生, 郭丹, 罗裴等. 基于匹配滤波解调的光纤光栅振动传感器的研究[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(2): 311~313
- 11 Yage Zhan, Hua Wu, Qinyu Yang *et al.*. A multi-parameter optical fiber sensor with interrogation and discrimination capabilities[J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2009, **47**(11): 1317~1321
- 12 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
- 13 Wang Jieyu, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0905003
王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰等. 基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0905003
- 14 Zeng Xiangkai, Rao Yunjiang, Liang Kuai. Characteristic analysis of LPFG resonance wavelength shift owing to transverse load[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106002
曾祥楷, 饶云江, 梁快. 长周期光纤光栅谐振波长的横向负载特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106002
- 15 Zengling Ran, Yunjiang Rao. A FBG sensor system with cascaded LPFGs and music algorithm for dynamic strain measurement[J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2007, **135**(2): 415~419
- 16 Zhang Wei. Research on Dynamic Demodulating Technique for Fiber Grating Sensor System [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008
张伟. 光纤光栅动态解调系统及其应用的研究[D]. 南京航空航天大学, 2008
- 17 Hiroshi Tsuda. Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(14): 2349~2351
- 18 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
- 19 J. Yang, Y. Zhao, B. Peng *et al.*. Temperature-compensated high pressure FBG sensor with a bulk-modulus and self-demodulation method [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2005, **25**(2): 254~258

栏目编辑: 王晓琰