

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0254-05

一种光纤布拉格光栅动态解调系统的研究

朱 珠¹ 曾 捷^{1,2} 梁大开¹ 何 仁²

(¹ 南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)

² 江苏大学江苏省汽车工程重点实验室, 江苏 镇江 212013

摘要 设计并实现了一种基于长周期光栅边缘滤波特性解调光纤布拉格光栅(FBG)的动态应变检测系统。研究了当试件加载垂直周期力时 FBG 受到的动态响应特性。将 FBG 作为传感元件,利用长周期光栅(LPFG)边缘滤波特性对光强调制,长周期光栅的透射光信号经光电转换获得电压信号,通过数采卡与 LabView 软件设计结合由计算机采集。根据试验结果,获取信号的时域波形图并进行频谱分析。结果表明,该系统采集的信号能够较好地反映施加振动载荷的频谱特征,并实现了 3 kHz 频率以下的动态应变测量,波长分辨极限达到 0.004 nm。

关键词 光栅; 动态解调; 边缘滤波; 长周期光栅

中图分类号 TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL200835s2.0254

Research on Dynamic Demodulating Technique for Fiber Grating Sensor System

Zhu Zhu¹ Zeng Jie^{1,2} Liang Dakai¹ He Ren²

¹ Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Material and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China
² Science Key Laboratory for Automobile and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract A dynamic-strain demodulating system based on a fiber Bragg grating (FBG) filtering is proposed and experimentally demonstrated. The FBG is glued onto the experimental laminate as smart material to monitor the structure vibration. Edge filtering of long-period fiber grating (LPFG) is used to demodulate FBG with light intensity. Through the connection of data collect card and LabView software, the voltage signal is transported to computer. Through the experiment, this system have a nice performance to reflect the exciting frequency. The vibration frequency up to 3 kHz can be realized and the wavelength resolving power is 0.004 nm in minimal.

Key words gratings; dynamic demodulating; linear demodulation; dynamic demodulating; long-period fiber grating

1 引 言

随着航空科技的飞速发展,轻质、高可靠性、高维护性、高生存力等性能指标使得飞机的结构材料面临更加恶劣的使用环境,结构材料力学性能的测试与评估是其中的重要环节。传统的应变计法,容易受到电磁干扰,且应变计的寿命较短,特别是在较恶劣环境下更显不足。光纤光栅作为一种新型的传

感元件,具有体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀、对应变有良好的灵敏度、易于构成传感网络等优点,有着广阔的应用前景。目前光纤光栅传感解调方案有许多,如利用非平衡马赫-曾德尔(M-Z)干涉解调法、匹配光栅解调法、可调光纤法布里-珀罗(F-P)滤波器解调法、边缘滤波解调法等^[1],但是能够实际应用的解调产品并不多,特别是用于动态解调的解调设备,尤

基金项目: 江苏省汽车工程重点实验室开放基金项目(QC200502)、国家自然科学基金重点项目(60535020)和类壁虎仿生机器人的关键基础研究(60535020)课题资助。

作者简介: 朱 珠(1983—),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: zhuzhu@nuaa.edu.cn

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

E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

为昂贵,不利于工程应用。本文利用长周期光栅具有边缘滤波特性,研究了一套光纤布拉格光栅(FBG)动态检测系统,并将其用于振动方面的测试。结果表明,该解调系统能够较好地检测振动信号,相对于其他解调方案,具有结构简单、解调速度快、成本较低等优点。

2 光纤布拉格光栅的传感原理

FBG是通过改变光纤芯区折射率使其产生小的周期性调制,根据布拉格(Bragg)衍射原理,当宽带光源发出的光入射到FBG中后,FBG将把以Bragg波长为中心的窄带光谱范围内的光反射回来,其反射中心波长 λ_B 为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda,$$

式中 Λ 为栅距, n_{eff} 为有效折射率。当FBG受应变、温度等因素使FBG栅距和有效折射率发生变化时,FBG反射的中心波长产生相应的变化。只要能检测反射中心波长的变化即可获得外界待测量的变化情况^[2~5]。

3 解调原理及系统的实现

3.1 基于长周期光纤光栅边缘滤波的解调原理

基于长周期光纤光栅解调系统的解调原理如图1所示。曲线C为长周期光纤光栅的透射谱^[6],在光纤光栅系统中,可以用归一化的光谱透射率曲线 $H(\lambda)$ 表示,曲线A为FBG的反射光功率谱密度 $R(\lambda)$,布拉格光栅反射光谱透过该滤波器后的光功率信号 $I(\lambda)$ 为^[7,8]

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

在一定的波长范围内 $H(\lambda)$ 近似为线性函数,而 $R(\lambda)$ 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

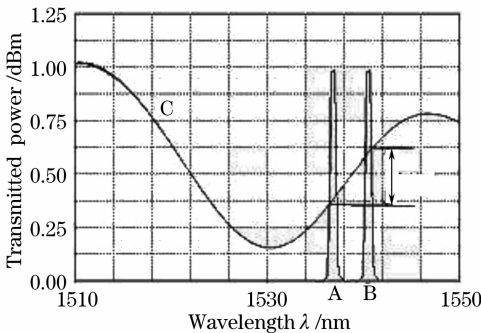


图1 基于长周期光栅的解调原理示意图

Fig.1 Sketch map of demodulating theory based on LPFG

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

式中 $I_1(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda'$ 为布拉格光栅的反射总功率。因此通过测量 $I(\lambda)/I_1(\lambda)$,即可获得波长信息。

当光纤布拉格光栅受待测量(如应力、温度等)变化的影响时,反射的中心波长便会向左或向右漂移,假设如图1中由中心波长A漂移至B,受到边缘滤波器件的调制,其接收到的光强差 Δ 会产生线性变化,由光电转换接收装置进行光强转换,经信号调理及采集数据,最后数据处理计算得出反射峰的漂移量,进而得到待测量的信息,达到解调的目的。

3.2 解调系统的构建

解调系统框图如图2,宽带光源采用FBG240光栅解调仪内部自带光源,经过 1×2 耦合器到达传感FBG,该传感光栅的反射中心波长为1536.529 nm,其反射的窄带光携带待测量信息,窄带光经过 1×2 耦合器耦合另一个 1×2 耦合器,50%光能进入长周期光栅,该长周期光栅的中心波长为1531.137 nm,在1510~1550 nm之间有明显的损耗峰,并且该光栅的透射谱在1534~1542 nm区域具有很好的线性,经光电转换模块转换为电压 V_1 ,50%光能直接经过光电转换模块转换为参考电压 V_2 。经过调制过的光信号由光电转换电路转换为电压信号。

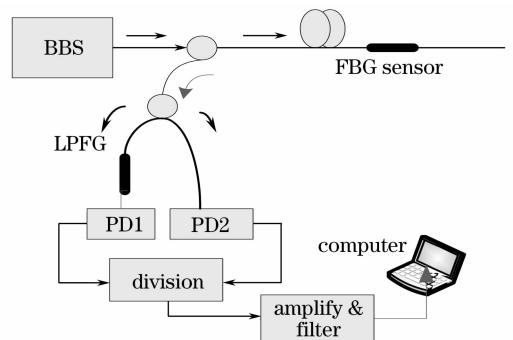


图2 基于长周期光栅的解调系统框图

Fig.2 Sketch map of systems based on LPFG

值得指出的是,由于光信号经过布拉格光栅反射与长周期光栅的透射,最后得到的光信号功率仅为几十纳瓦,采用高精度并具有良好的封装的光电转换模块进行转换,以减少外部电磁干扰,从而提高系统的信噪比。光电转换结束后,电压信号很微弱,在检测动态应变信号时,由于光电检测电路存在较大的基值电压,当电压变化量较小时,不容易被检测到。如果放大倍数过大,则会出现放大器饱和、甚至

损坏数据采集卡等情况,因此需要设计调零电路。调零电路使初始输出电压值近似为零,不仅能够更直观地反映振动信号波形的变化规律,而且使后续放大电路倍数的选择范围扩大,起到增强有用信号、提高信噪比的作用。微弱模拟信号在放大过程中极易受到干扰,使传送中的信号幅值或相位发生畸变,因此还需要对微弱的模拟信号做滤波处理。

该实验系统的数据采集及显示采用 NI6024E 数据采集卡和 LabView 软件设计结合,该软件比较适合开发数据采集,数据处理分析功能^[6]。软件编程一方面实现了直观的监测界面,显示实验中波形的变化;另一方面采集到相应的数据信息,便于进一步快速傅里叶变换(FFT)分析。解调过程关键程序如图 3 所示。

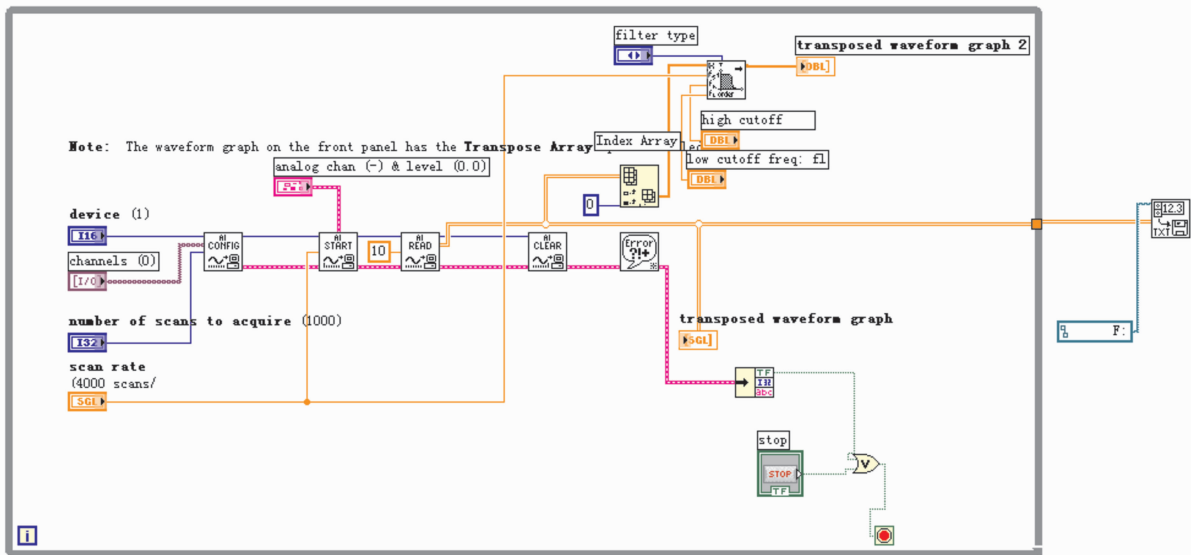


图 3 数据采集关键程序

Fig. 3 Main program of data collection

最后,由于长周期光纤光栅对外界的温度变化比较敏感,其透射谱随着温度的变化而变化。这里 LPFG 是用来作为边缘滤波器使用的,需要稳定的透射谱,即对温度等外界的变化不敏感,为了克服 LPFG 谐振波长的温度敏感性,选择有机玻璃材料对 LPFG 进行封装,当温度变化时有机玻璃的热胀冷缩使 LPFG 发生应变,采用有机玻璃作为封装材料,可以使谐振波长的温度和应变效应相互补偿,从而减小谐振波长的温度灵敏度^[1]。

4 试验及结果分析

实验利用四边筒支(1500 mm×250 mm×2 mm),弹性模量 $E=68$ GPa 试件,模拟飞机蒙皮结构。在试件的中间位置粘贴一根光纤布拉格光栅,在室温 20 ℃时,其反射中心波长为 1536.529 nm。在实验过程中,将激振器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 4 是在试件上加载 30 Hz 垂直周期力时的时域波形图和经过快速傅里叶变换的频谱分析图,图 4(a)是功放电压为 2 V 时所采集的信号及分析图,图 4(b)是功放电压为 4 V 时采集的信号及分析图。可以看出,当激振幅度增大时,采集到的信号幅值也大,幅频图上相应的谐波分量也随之增大。由此可见,利用长周期光栅的线性滤波能够较好地判断试件的振动幅度。

图 5 为系统采集到的电压信号时域波形图以及由快速傅里叶变换得到的频谱分析图。实验中,系统采集数据频率为 50 kHz,从频谱图中看出激振产生的能量集中频段与施加载荷的频率吻合,当激振器产生的信号为 580 Hz 正弦波时,系统的输出也是一个幅值在 -2~+2 V 之间频率 580 Hz 的正弦信号,相应的 FFT 分析结果是在一个较宽频带中,信号的主要能量集中在 580 Hz 附近。当激励信号为 1000 Hz 和 2500 Hz 正弦波时,同样可以通过时域波形图和频谱分析图反映出系统对振动信号良好的响应特性。

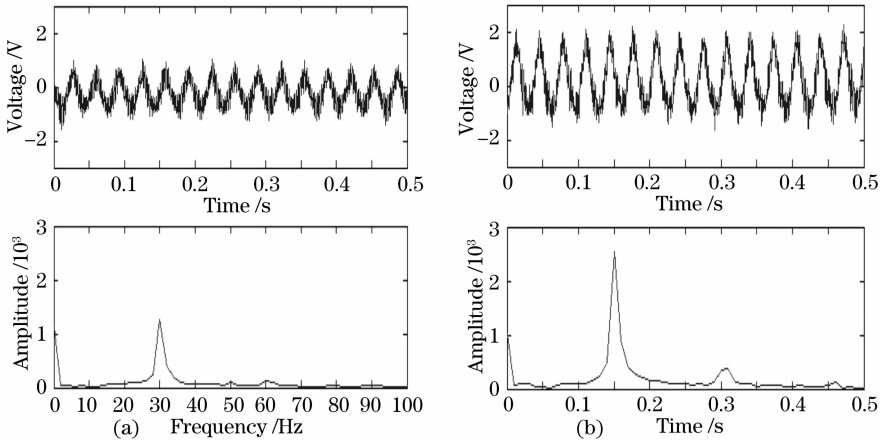


图 4 加载不同振幅的 30 Hz 振动频率的时域波形图和频谱分析图。(a)加载振动频率为 30 Hz,功放电压为 2 V; (b) 加载振动频率为 30 Hz,功放电压为 4 V

Fig. 4 Time-domain waveforms and frequency spectra of loading different amplitudes. (a) Load 30 Hz vibration and the voltage 2 V; (b) load 30 Hz vibration and the voltage 4 V

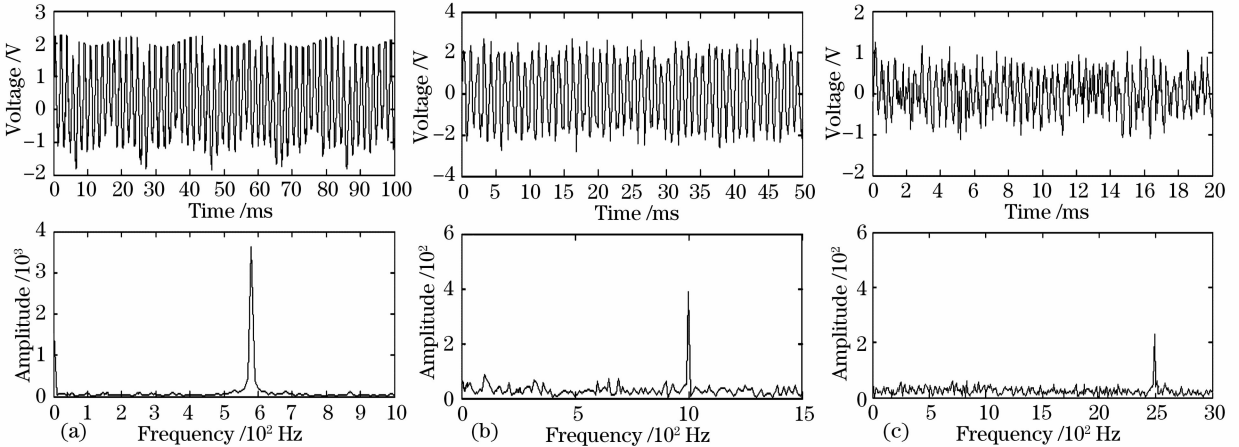


图 5 加载不同振动频率的时域波形图和频谱分析。(a)加载振动频率为 580 Hz; (b)加载振动频率为 1000 Hz; (c)加载振动频率为 2500 Hz

Fig. 5 Time-domain waveform and frequency spectra of loading different frequencies. (a) Excitation is 580 Hz; (b) excitation is 1000 Hz; (c) excitation is 2500 Hz

光纤光栅解调系统探测到的信号频率和激振器信号频率吻合,说明解调系统能正确地解调出激励信号,改变激振器的激振频率和幅度,光纤光栅解调系统能解调出蒙皮结构的应变信号。实验证明该解调系统稳定,能较好地实现振动跟踪。

本系统带通滤波器设置为 200 Hz~3 kHz,对动态信号的响应带宽约为 3 kHz,系统进行自动跟踪,在 580 Hz, 1000 Hz, 2500 Hz 的激励频率下,对试件施加激励,并对采集到的数据进行频谱分析。结果证明,系统有较好的响应速度,改变光电探测电路的反应速度可以改善这个指标。在 200 Hz~5 kHz 带宽内,电路输出的本底噪声为 100 mV,其分辨率为 $\frac{110 \text{ mV}}{210.168 \text{ (mV/pm)}} / \sqrt{3000 \text{ Hz}}$

$$= 0.0096 \text{ pm} / \sqrt{\text{Hz}}^{[9\sim 12]}$$

5 结 论

基于长周期光纤光栅的动态解调系统利用 LPFG 的透射谱具有较宽的损耗带,并且在损耗波段内有很好的线性,即边缘滤波特性,利用此特性进行 FBG 解调。此方案相对于其他解调办法,较容易实现。本文采用该系统对 3 kHz 以下的振动信号进行监测,结果表明系统在解调范围内能较好地恢复出原来的激励信号,很好地实现动态波长的解调,达到较高的信噪比,并且抗电磁干扰能力强,因而显示出良好的工程应用前景。

参 考 文 献

- 1 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. The Theory and Application of Fiber Grating[M]. Beijing: Science Press, 2006. 1~2
饶云江,王义平,朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 1~2
- 2 Wang Min, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Research on demodulating techniques for fiber Bragg grating sensor system design of a new type interleaver[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(12): 54~58
王敏,乔学光,贾振安等. 光纤布拉格光栅传感系统信号解调技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(12): 54~58
- 3 Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, (12): 57~59
- 4 Li Li, Lin Yuchi, Wang Wei *et al.*. The study of fiber Bragg grating demodulating technology based on unbalanced M-Z interferometer[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, (2): 16~18
李丽,林玉池,王为等. 光纤光栅非平衡 M-Z 干涉解调技术研究[J]. 压电与声光, 2008, (2): 16~18
- 5 Wang Jianbin, Chen Ruiyuan. Design for air defense C³I multisensor data fusion simulation system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, (5): 65~69
王建斌,陈瑞源. 防空 C³I 多传感数据融合仿真系统设计[J]. 系统工程与电子技术, 2001, (5): 65~69
- 6 Shen Xiaoyan, Lin Yuchi, Fu Luhua *et al.*. A new FBG demodulation system based on LabVIEW[J]. *Chin. J. Sensors and Actuators*, 2008, (1): 61~65
沈小燕,林玉池,傅陆华等. LabVIEW 实现光纤光栅传感解调[J]. 传感技术学报, 2008, (1): 61~65
- 7 Tu Yaqin, Liu Xingchang. Intelligent Structures Based on Optical Fibers[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. 3
涂亚庆,刘兴长. 光纤智能结构[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 3
- 8 Jiang Desheng, Richard O. Claus. Smart Materials Devices Structures and Their Applications [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006. 1~2
姜德生, Richard O. Claus. 智能材料器件与应用[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2006. 1~2
- 9 Li Qianghua, Li Junqing, Li Chunfei. Study on strain measurement using dynamic demodulation technique with two fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1196~1199
励强华,李俊庆,李淳飞. 应用平衡双光纤光栅动态解调技术测量应力的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1196~1199
- 10 Zhu Jun, Qu Bing, Jiao Shengjie *et al.*. Dynamic demodulation method for external pressure measurement with fiber grating sensor[J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(5): 438~441
朱军,屈彬,焦生杰等. 用光纤光栅传感器测量外压力的动态调制方法[J]. 应用光学, 2006, **27**(5): 438~441
- 11 Liu Bo, Tong Zhenrong, Chen Shaohua *et al.*. A novel method of edge filter linear demodulation using long-period grating in fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 199~202
刘波,童峥嵘,陈少华等. 一种长周期光纤光栅边沿滤波线性解调新方法[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 199~202
- 12 Li Li, Lin Yuchi, Wang Wei *et al.*. Research on material impacting based on PGCD with fiber Bragg grating [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, (8): 55~57
李丽,林玉池,王为等. 基于光纤光栅 PGCD 的材料冲击实验研究[J]. 传感器与微系统, 2007, (8): 55~57