

文章编号: 1001-3806(2013)04-0469-04

基于边缘滤波法的光纤光栅振动传感器解调技术

罗进^{1,2}, 江山^{1,2*}, 熊岩²

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 武汉理工光科股份有限公司, 武汉 430074)

摘要: 为了满足各种场合中对振动信号监测的需求, 基于长周期光栅的边缘滤波原理, 设计了一种结构简单、低成本的光纤布喇格光栅振动传感器解调系统。系统在硬件部分采用双光路结构及低噪声光电转换电路, 解调及显示软件基于 LabVIEW 平台开发。通过在可调谐振动台上试验, 证明了系统能实现对振动传感器可用范围 (0Hz ~ 300Hz) 内振动信号频率的解调, 误差在 3% 以内。结果表明, 振动加速度与模拟信号伏值成线性关系, 拟合得到本系统的比例因子为 0.94, 拟合程度为 0.9752, 可对加速度在 0 ~ 4.7g 范围内的振动信号进行振动加速度解调。

关键词: 传感器技术; 光纤布喇格光栅; 长周期光栅; 边缘滤波; 振动加速度; 频率解调

中图分类号: TP212.4⁺4 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.04.012

Demodulation technique of fiber grating vibration sensor based on the edge filter method

LUO Jin^{1,2}, JIANG Shan^{1,2}, XIONG Yan²

(1. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunication, Wuhan 430074, China; 2. WUTOS Technology Co. Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to meet the needs of vibration signal monitoring on various occasions, based on long-period grating edge filtering principle, a fiber Bragg grating vibration sensor demodulation system with simple structure and low cost was designed. Dual optical path structure and low noise photoelectric conversion circuit were used in the hardware part. Demodulation system and display software were based on LabVIEW platform. After the testing on a tunable vibration bench, the demodulation of vibration signal frequency was obtained in the available range (0Hz ~ 300Hz) of vibration sensors. The error was less than 3%. The results show that vibration acceleration analog signal volt value is a linear relationship, the fitting scale factor of the system is 0.94, the fitting extent is 0.9752 and vibration acceleration demodulation can be realized in the range of 0 ~ 4.7g of the acceleration of vibration signal.

Key words: sensor technique; fiber Bragg grating; long-period fiber grating; edge filter; vibration acceleration; frequency demodulation

引 言

近年来, 光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 在传感器领域中的应用引起了人们极大的兴趣, 相对于传统的电磁类振动传感器, 光纤光栅不仅具有更高的灵敏度及精度, 还具有抗电磁干扰、原子辐射、耐腐蚀、稳定性好等优点, 其对温度的测量已被广泛地应用于石油石化火灾报警、电力设备温度监测等众多领域^[1]。另一方面, 越来越多的工业应

用中要求对振动信号进行测量。例如大型的周界安防系统、石油勘探的地震检波系统、桥梁建筑的结构检测系统、机电领域中转子的高速转动等, 都急需具有抗电磁干扰、大动态范围、易复用、高灵敏度等高性能的加速度传感装置。而基于光波长调制的光纤传感器在这些方面展现了良好的应用前景, 因此, 相对基于机电、压电方法的传统传感器, 光纤光栅传感正在受到越来越多的重视^[2]。

与此同时, 光纤光栅传感解调技术也得到了不断发展, 人们相继提出了多种传感解调方案如非平衡马赫-曾德尔干涉仪解调法、可调谐 Fabry-Perot (F-P) 腔法、可调谐窄带光源法等。这些方法都已进入商用, 均具有较高的解调精度, 但都结构复杂价

作者简介: 罗进 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅解调仪表的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jshan@wri.com.cn

收稿日期: 2012-10-30; 收到修改稿日期: 2012-11-08

格昂贵。本文中采用特殊封装的 FBG 振动传感器, 利用长周期光纤光栅在透射区的线性效应作为边带滤波器, 对传感信息进行解调, 设计了一种结构简单、低成本系统的振动频率解调仪^[3]。能够通过 LabVIEW 软件实时绘制出振动信号, 并调出振动传感器的振动频率及加速度。

1 原理分析

1.1 光学原理分析

光纤布喇格光栅是一种能够反射特定波长光的光学器件, 其中心反射波长为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为光栅的有效折射率, Λ 为光栅的周期。当应变、温度等外界环境因素变化时, 相应的参量 Λ 和 n_{eff} 会发生相应改变, 从而引起 λ_B 的偏移。假定温度和应变引起的中心反射波长 λ_B 变化是独立的, 则光纤光栅的中心反射波长 λ_B 变化为:

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\varepsilon\Delta\varepsilon + \alpha\Delta T \quad (2)$$

式中, α_ε 为光纤光栅的应变灵敏度系数; α 为光纤光栅的温度灵敏度系数; $\Delta\varepsilon$ 为应变的变化量; ΔT 为温度变化量。外界温度或应力变化信号作用于光栅时, 就会导致光栅反射波长的变化, 温度或应力信息通过检测光信号前后的变化即可得到^[4]。

基于 FBG 原理的振动传感器结构如图 1 所示, 悬臂梁末端固定有一重锤, FBG 两端的光纤固定在悬臂梁上的光纤固定槽中。当振动传感器振动时, 重锤会做上下运动, 则 FBG 会随悬臂梁的形变被拉伸或是被压缩。

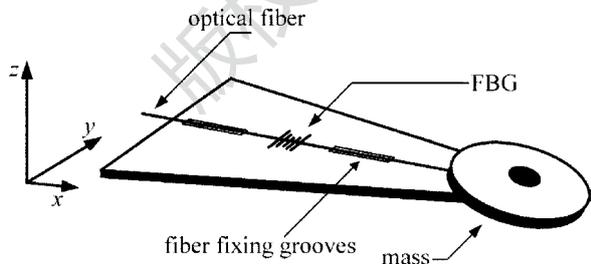


Fig. 1 Diagram of vibration sensor

振动传感器轴向应变引起的波长漂移可以写成:

$$\Delta\lambda = \lambda_s(1 - P_c)\Delta\varepsilon \quad (3)$$

式中, P_c 为弹光系数, 对于通常的掺锗光纤有 $P_c \approx 0.21$ 。根据上式, 在 1550nm 处的光纤光栅, 其中心波长对轴向应变的灵敏度为 $1.22\text{pm}/\mu\varepsilon$ ^[5]。三角形悬臂梁的厚度为 H (z 方向), 长度为 L (x 方向), W_1 表示三角形的底边宽度(y 方向), G 为一个跟传

感器结构有关的常量, E 为悬臂梁材料的杨氏模量, 同时考虑悬臂梁上和传感光栅之间应变的转换因子 η , 近似认为其值为 1。可推导出:

$$\Delta\lambda = \lambda_s(1 - P_c) \frac{6LG\eta}{EW_1H^2} \cdot a \quad (4)$$

(4) 式表明, 传感光栅的波长变化 $\Delta\lambda$ 正比于被测物体的加速度 a 。

长周期光纤光栅 (long-period fiber grating, LPFG) 是一类特殊的光纤光栅, 其传光原理是将前向传输的基模耦合到前向传输的包层模中。近年来, 由于其宽带滤波、极低的背景反射等特点引起了人们的重视, 是一种新型的宽带带阻滤波器^[6-7]。本设计中选用纤芯折射率为 1.4681、包层折射率为 1.4628、光栅长度为 30mm 的 LPFG。利用 MATLAB 对 LPFG 传输谱进行模拟可以发现, LPFG 在其透射峰附近具有一定范围的线性区。在这一范围内, 透射光的损耗与光波长成线性关系, 利用这一特点, 采用长周期光纤光栅作为线性的边带滤波器^[8]。根据(2)式, 当 FBG 所受应力或温度变化时, 其反射光的中心波长会发生改变, 当反射光的中心波长变化范围位于 LPFG 透射峰的线性区时, 则波长编码的传感信息将转化为强度信号的变化, 然后由光电探测系统进行测量, 从而推知传感信号的变化^[9]。FBG 反射光波长在 LPFG 透射峰线性区的变化如图 2 所示。

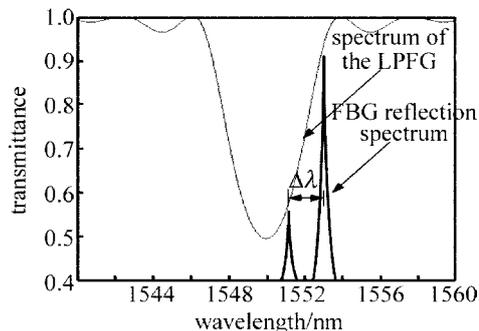


Fig. 2 Principle of edge filtering

根据上述分析可知, 在 1550.2nm ~ 1553.8nm 范围内, 经过 LPFG 边缘滤波后的光信号的波长 λ 与光强成线性。若光电转换后的信号电压伏值 V 正比于光强, 设线性比例因子为 μ , 则有 $V = \mu a$ 。

1.2 光电转换电路设计

在传统的光电转换电路中, 前端电流-电压转换电路通常采用跨阻放大电路, 这种电路结构简单便于计算, 但是如果入射光光强较小, 则需要一个大的电阻来实现放大 (通常在 $1\text{M}\Omega \sim 5\text{M}\Omega$ 之间), 这样大的一个电阻会给电路带来很多不稳定的因素, 十

分容易受外界的干扰。本设计方案中,将前端电路转电压电路改为 T 型网络,通过使用 3 个阻值较小的电阻即可实现大倍数放大,同时也有效避免了使用大的跨阻带来的漂移误差。

令 3 个电阻的交点为 V_1 , 流过光敏管的电流为 I , 则经过 T 型放大网络后的电压 V_0 的数学模型为:

$$V_0 = V_1 + (I_{R_{12}} + I)R_{13} = R_{11}I + \left(\frac{R_{11}}{R_{12}} + 1\right)R_{13}I \quad (5)$$

使 $R_{11} \gg R_{12}$, 即可做到通过 3 个阻值较小的电阻去实现较大的放大, 而 3 个小阻值构成的电流-电

压转换电路也可以很好地避免外界的干扰。但是, 由于实际中运算放大器在其输入端存在一个小的偏置电流, 可能会影响到该 T 型电路的性能, 因此要选用低偏置电流的运放。

由于光电探测器存在暗电流的影响, 经过多级放大后暗电流所产生的直流分量会对实验结果的分析产生影响, 因此在第 2 级放大电路中, 利用减法电路将暗电流产生的直流分量滤除。第 3 级为可调谐正向放大电路, 通过调整 R_9 与 R_{11} 的阻值可以对整个放大电路零点的位置及放大倍数进行调整。第 4 级放大前放置隔直电容, 进一步滤除直流分量。整个光电转换电路如图 3 所示。

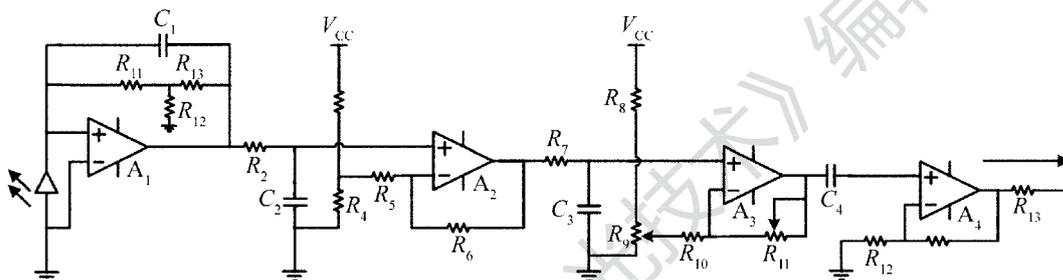


Fig. 3 Light-electricity conversion circuit

2 实验装置

实验装置如图 4 所示, 宽带光源采用在 1550nm ~ 1580nm 的波长区间具有良好的稳定性的半导体激光器抽运的掺铒光纤超荧光光源 (superfluorescent fiber source, SFS)。光源发出的宽谱线光经过环形器入射到已封装好的振动传感器上, 振动传感器固定于振动台, 其振动频率与振动加速度可由振动台自由调谐。为了防止光纤的断面反射而影响传感信号, 将光纤尾端浸入匹配液 (index matching liquid, IMG)。光源发出的激光经过 FBG 振动传感器反射入环形器后进入 3dB 耦合器, 分为两束相同的光: 光路 1 和光路 2。光路 1 进入 LPFG 边缘滤波器然后进入 PIN 光电探测器 (photoconductive detector, PD) PD_1 , 再经电流电压转换放大后进入除法器的分子输入端。光路 2 作为参考光路直接进入 PD_2 , 经过电流电压转换放大后进入除法器的分母输入端。

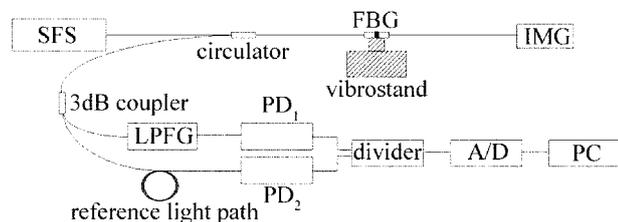


Fig. 4 Experimental setup

除法器输出的模拟信号由数据采集卡采集, 并完成 A/D 变换。最后在上位机利用 LabVIEW 进行数据处理, 即可将振动信号还原, 实现对振动信号加速度及频率的解调^[10]。

3 实验结果

试验中分别对振动频率与振动加速度进行解调。首先恒定振动台的振动加速度, 调谐振动频率, 记录装置解调出来的振动信号, 再通过对解调出的信号做快速傅里叶变换得到信号频谱并做记录。图 5 为振动台振动加速度为 4.6g (g 为重力加速度)、振动频率为 17Hz 时 LabVIEW 界面所显示解调出的振动波形。

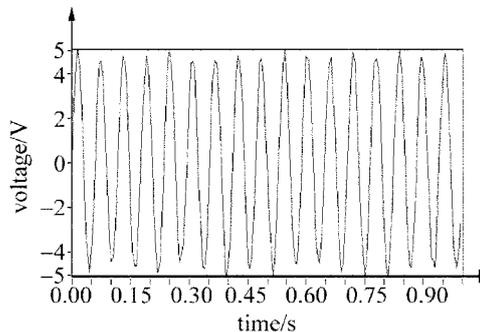


Fig. 5 Display of LabVIEW interface

图 6 为对该 17Hz 的振动信号进行快速傅里叶

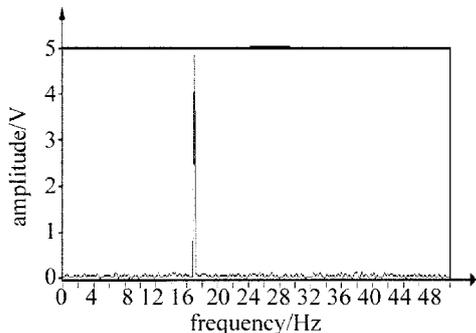


Fig. 6 FFT spectrum graph

变换 (fast Fourier transform, FFT) 后的频谱图形。通过本实验装置对振动平台上不同频率的振动信号做频率解调, 得到该解调仪能对振动传感器可用范围 (0Hz ~ 300Hz) 内的振动信号做出响应并解调其振动频率。将振动台的振动频率与系统解调出的频率进行对比, 通过计算得到其最大误差小于 3%。

再固定振动频率, 调整振动台的振动加速度, 记录系统的解调信号。如图 7 所示, 将振动平台所施加的加速度 a 与经过光电转换电路后的电压伏值 V 做线性拟合, 得到斜率为 0.94, 线性度为 0.9752。将振动加速度调至 $4.7g$ 时, 放大电路输出即已达到饱和电压 (5V)。即该解调系统中, 加速度 a 与电压伏值 V 的比例因子 $\mu = 0.94$, 线性度为 0.9752, 且对振动加速度的解调范围为 $0 \sim 4.7g$ 。

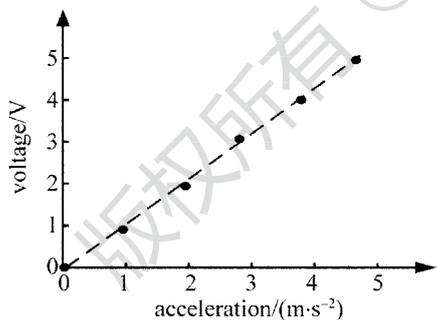


Fig. 7 Linear fitting of acceleration and voltage

4 结 论

本系统在 LPFG 透射谱的线性区 (1550.2nm ~ 1553.8nm) 内, 能对 0Hz ~ 300Hz 内的振动信号做频率解调, 解调出的信号频率与振源频率误差不大于 3%。并且验证在振动过程中, FBG 中心波长的漂移量正比于外界加速度的大小。通过线性拟合得到本系统中外界振源加速度与响应电压伏值正比的比例因子 $\mu = 0.94$, 振动加速度的解调范围为 $0 \sim 4.7g$ 。

参 考 文 献

- [1] ZHAN Y G, LU Q, XIANG X Q. Optimization of fiber grating sensor matching grating demodulation method [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33 (6) : 711-715 (in Chinese).
- [2] REN L. Fiber grating sensing technology in structural health monitoring [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 1-165 (in Chinese).
- [3] LIU Y Q, LIU S L, LIU Z G, et al. All-fiber grating sensors based on long-period grating filter [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2000, 24 (4) : 242-245 (in Chinese).
- [4] ZENG N. A number of key technology of the fiber optic accelerometer [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005: 1-121 (in Chinese).
- [5] WANG Z. Fiber optic accelerometer technology research [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008: 1-79 (in Chinese).
- [6] HUANG P. Study on the excursion rule of resonant waves of long period fiber grating [J]. Laser Technology, 2012, 36 (5) : 674-676 (in Chinese).
- [7] WEI Y S, ZHOU Ch X, ZENG X K, et al. Study on temperature characteristics of the transmission spectra three-layer model long period fiber gratings [J]. Laser Technology, 2011, 35 (2) : 252-254 (in Chinese).
- [8] LIU B, TONG Z R, CHEN S H. A long period fiber grating edge filter linear demodulation method [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (2) : 199-202 (in Chinese).
- [9] ZHANG J H, WANG Y B, WANG X C. FBG demodulation system based on the edge of the filter [J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, 33 (4) : 232-234 (in Chinese).
- [10] SHENG X Y, LIN Y C, FU L H, et al. FBG sensor demodulation with labview [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21 (1) : 61-65 (in Chinese).