

Fiber Bragg Grating Vibration Sensing Hardware Circuit Design and Experiment Research Based on Intensity Demodulation

Shufang Chen, Faye Zhang, Mingshun Jiang, Qingmei Sui, Lei Jia

School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan
Email: shufang0520@163.com

Received: Apr. 22nd, 2014; revised: Apr. 24th, 2014; accepted: Apr. 28th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper presents a circuits design of high-speed FBG demodulation based on ASE edge demodulation technology. After a detailed performance parameter analysis, the core components of FBG demodulation circuit, FDSP625 and LTC6240, are adopted to match other circuit elements so that the demodulation accuracy is improved. In order to confirm the characteristics of the designed FBG demodulation circuit, FBG dynamic measurement system is employed to analyze the frequency response. The data from experiments indicate that the static white noise is in 500 mV, and it can give a well response to the external frequency changes within the range of 0 Hz - 1000 Hz frequency.

Keywords

Fiber Bragg Grating, Photoelectric Detection, Intensity Demodulation, Vibration Signal Monitoring

强度解调的光纤光栅振动检测硬件电路设计及实验研究

陈树芳, 张法业, 姜明顺, 隋青美, 贾 磊

山东大学控制科学与工程学院, 济南
Email: shufang0520@163.com

收稿日期：2014年4月22日；修回日期：2014年4月24日；录用日期：2014年4月28日

摘要

在分析光纤光栅动态解调方式的基础上，设计了一种基于ASE光源边缘解调技术的高速FBG硬件解调电路。在详细分析光电转换及放大电路元件性能参数的基础上，选择光电管FDSP625及放大器LTC6240作为该高速光纤光栅解调硬件电路的核心元器件，实现了该电路元器件之间的优化匹配，提高了该硬件解调电路的解调精度。构建光纤光栅动态检测平台，详细验证了该光纤光栅硬件解调系统的频率响应特性。实验数据表明该光电解调电路静态白噪声在500 mV内；在0 Hz~1000 Hz频率范围内，可以较好的响应外界频率的变化。

关键词

光纤光栅，光电检测，强度解调，振动信号监测

1. 引言

光纤布拉格光栅(FBG)，以其光无源性、抗干扰、检测灵敏等特点，广泛应用于航空航天、煤矿、油井等领域的安全监测。基于FBG的振动、声发射监测系统与传统的电类振动监测系统具有抗电磁干扰、体积小、质量轻、耐腐蚀等优势。

当外界动态载荷所引起工程结构的震荡频率接近其固有频率时，工程结构将产生不可以逆转的损坏。因此，早期结构振动监测对于预测结构振荡频率走势及诊断结构健康状态具有重要的意义[1]。与传统的电类振动传感器相比，光纤布拉格光栅(FBG)振动传感器以其抗电磁干扰、体积小、质量轻、耐腐蚀等优势而广泛应用于公路、隧道、大坝等大型地质工程的安全监测中[2]-[5]。光纤光栅动态解调仪昂贵的价格限制了光纤光栅振动检测系统在某些小型工程结构健康监测中的应用。为推进光纤光栅振动传感器的广泛应用，研制解调宽频带、低制作成本的光纤光栅动态信号的解调仪成为现阶段研究亟待解决的关键问题。

现有光纤光栅解调方法主要分为：光谱仪检测法、匹配光栅法、边缘滤波器法、非平衡M-Z(Mach-Zehnder)干涉仪解调法、可调谐F-P(Fabry-Perot)滤波器法等[6]。然而上述解调方法中大部分方法仅仅可以实现低频的光纤光栅的解调。针对边缘滤波器法及可调谐F-P(Fabry-Perot)滤波器法现今比较主流的光纤光栅动态解调方式[7]，学者们做出了大量的研究。崔海军[8]基于边缘滤波器法结合Labview实现了快速光纤光栅的解调；赵艳[9]分析了可调谐F-P(Fabry-Perot)滤波器法仅适用于动态参量的检测，无法实现对绝对参量的检测，并对其进行了相应的改进。但是针对光纤光栅动态解调电路器件之间最优匹配组合实现高精度动态解调的研究相对较少[10]。

基于上述现状，本文基于ASE光源边缘解调技术，重点分析高速、高精度、低噪声的光电检测电路的实现方法，采用高速硅基PIN光电二极管作为光电转换器，选用偏置电流典型值仅为0.2 pA的放大器实现硬件搭建，并通过参数配置优化设计，组建FBG高频传感系统，实现了光纤光栅的高精度、低成本的动态解调。在激振频率上限为1000 Hz的振动台开展性能试验，结果表明在0~1000 Hz频率范围内，系统具有很好的高速解调效果，具有一定的应用价值。

2. 设计原理

2.1. 光电解调电路

解调电路主要由光电转换模块、信号放大模块组成，其中信号放大模块由三级放大电路组成。

光电转换模块用于实现将光强度转化为电流强度。图 1 所示为一个光电二极管和前置电流电压转换器的电气模型，其基本传递函数为

$$V_{out} = \frac{I_{photo} \times R_f}{1 + sC_f R_f}$$

式中， I_{photo} 为光电二极管的输出电流， R_f 和 C_f 的并联组合设置信号带宽。

由于光强度很弱，要求光电管有很低的偏置电压且高带宽。

理论上，光电二极管的全部输出电流均通过 R_f ，但由于运算放大器都存在输入偏置电流，导致其输出产生误差，因此，需选择低输入偏置电流，低失调电压的放大器。

2.2. 光源分析与光电转换器的选择

图 2 为 ASE 光源光谱图，从图中可以看出，ASE 光源有 4 个单调区间，选择斜率最大的 1558 nm~1570 nm 单调区间，选择光纤光栅中心波长 1563.0189 nm。

选择 PDS143-COT-B0101 型光电二极管作为光电转换器。PDS143 是带尾纤的 InGaAs PIN 光电二极管，响应频率 2 GHz，其能量谱图如图 3 所示，在 1550 nm 波长处的典型值为 0.95 A/W。PDS143 具有低偏置电压、高带宽的特性，适用于高速光电转换的应用。

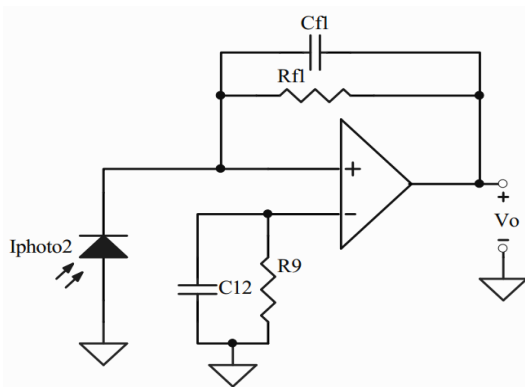


Figure 1. Photodiode and pre-amplifier electric circuit
图 1. 光电二极管与前置运放电路

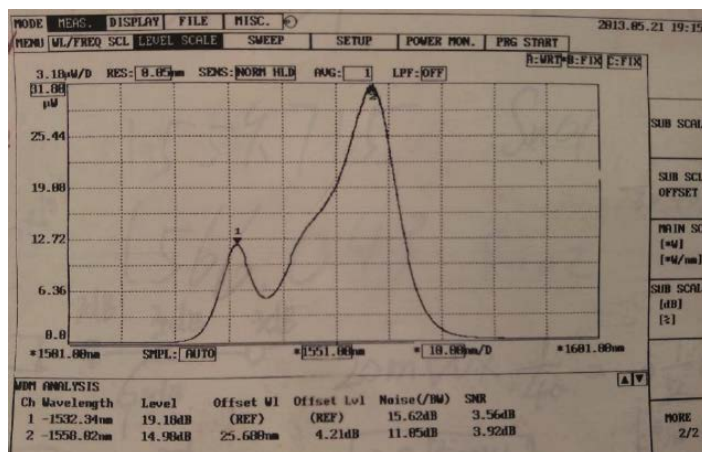


Figure 2. ASE light source spectrum
图 2. ASE 光源光谱图

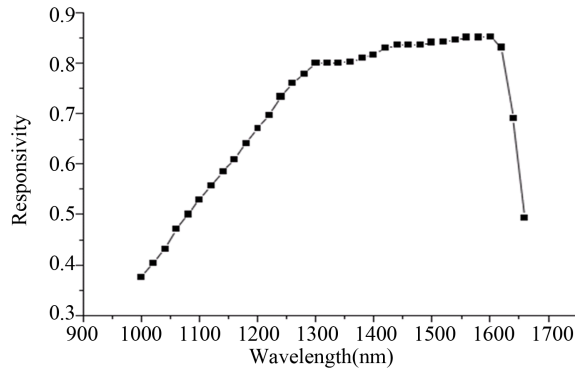


Figure 3. PDS143 energy spectrum
图 3. PDS143 能量谱图

2.3. 运算放大器选择

本设计选用的前置放大器型号为 LTC6240。LTC6240 是一款单通道，18 MHz，低噪声，轨至轨输出，CMOS 运算放大器，其输入偏置电流典型值 0.2 pA，最大值 1 pA，输入偏置电压最大 125 uV。

决定前置放大器所能实现的稳定带宽的参数有： R_f 、放大器的增益带宽积(18 MHz)、放大器总输入电容 C_{in} 。在零偏置模式下，本设计选用的光电管电容值 $C_j < 0.75$ pF，LTC6240 的共模输入电容为 $C_c = 3$ pF，差模输入电容为 $C_d = 3.5$ pF。

故

$$C_{in} = C_j + C_c + C_d < 7.25 \text{ pF}$$

取 $R_f = 100 \text{ K}$ ，在 45° 相位裕量下产生的信号带宽可以表示为：

$$f_{(45)} = \sqrt{\frac{f_{CR}}{2\pi \times R_f \times C_{in}}} > \sqrt{\frac{18 \text{ MHz}}{2\pi \times 100 \text{ K} \times 7.25 \text{ pF}}} \approx 1.99 \text{ MHz}$$

可实现的最大带宽大于所需带宽，因此，LTC6240 满足本设计需求。

R_f 和 C_{in} 在放大器的环路传递函数中产生一个极点，它可能会导致峰化和电路不稳定。增加 C_f 可以在环路的传递函数中创建一个零点，它能补偿上述极点的影响并降低信号带宽。

根据选定的 R_f ，则产生 1 KHz 带宽，且保证 45 度相位裕量，需要的 C_f 为：

$$C_f = \sqrt{\frac{C_{in}}{2\pi \times R_f \times f_{CR}}} = \sqrt{\frac{7.25 \text{ pF}}{2\pi \times 100 \text{ K} \times 18 \text{ MHz}}} \approx 0.8 \text{ pF}$$

增加电容值可以增加相位裕量，计实际选用 1 pF 的电容。

采用 5 V 满量程输出，电路如图 4 所示。

3. 光纤光栅振动实验系统

在完成电路元器件筛选及参数优化计算后，设计集成电路并搭建实验系统，验证该集成电路的高频采集系统性能。图 5 所示为本实验系统结构图。

实验中，选择中心波长为 1563.0189 nm 的光栅使用粘结剂粘在振动台上。选择清华大学 ZJY-601T 振东与控制教学实验仪，设定振动频率为 150 Hz，600 Hz，1000 Hz。光栅采集到的信号通过光电转换，选择 Tektronix 公司的 TDS2012C 示波器采集数据并保存，最后通过 matlab 完成实验数据的分析，进而确定该集成电路的性能。

4. 实验数据及其分析

4.1. 静态下的白噪声

基于上述实验平台，观察静态白噪声下，该集成电路的输出电信号谱图，如图 6 所示。该集成电路在静态下输出的白噪声电信号幅值在 500 mV 左右。

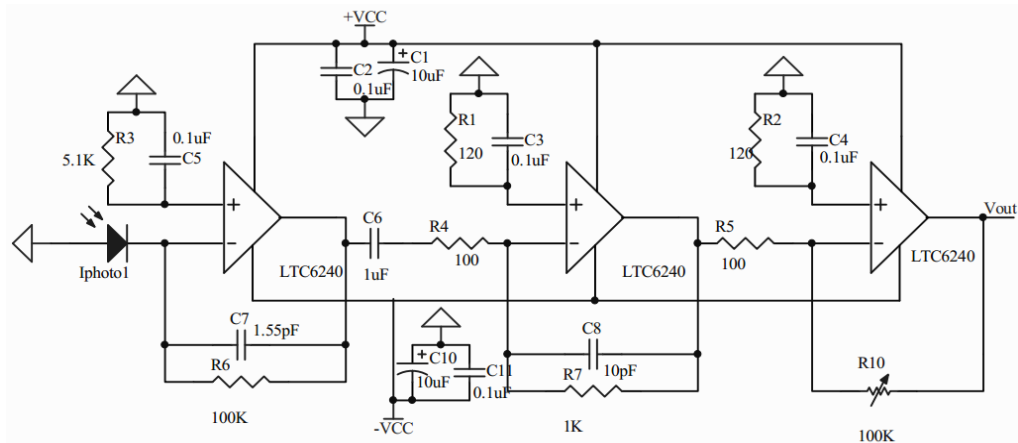


Figure 4. Photodiode and amplifier part

图 4. 光电管与放大器部分

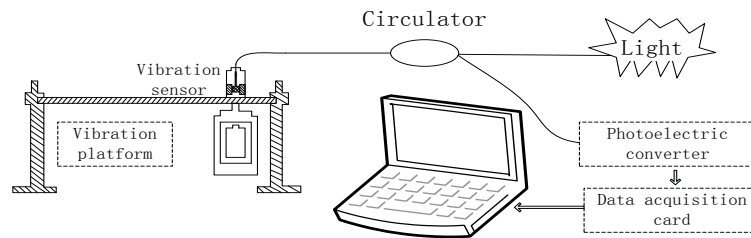


Figure 5. Experiment system structure chart

图 5. 实验系统结构图

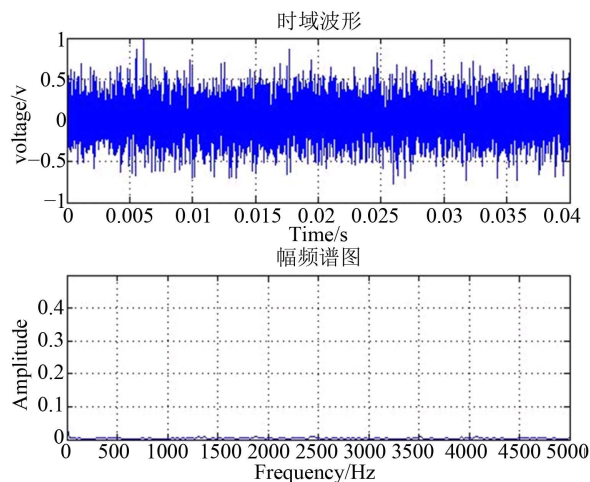


Figure 6. White noise wave and frequency distribution

图 6. 白噪声波形与频谱

4.2. 标准正弦实验

将 150 Hz 标准信号加到振动台，采集到的数据绘图如图 7 中数据波形所示，可以看到，采集到的时域数据波形失真较小，傅里叶分析得实验测得的信号频率为 150 Hz。

将 600 Hz 标准信号加到振动台，采集到的数据绘图如图 8 中数据波形所示，可以看到数据波形很好。FFT 处理后该信号频率为 600 Hz。

将 1000 Hz 标准信号加到振动台上，采集到的数据绘图如图 9 中数据波形所示，数据 FFT 处理后如图 9 中幅频谱图所示，可以看到，数据波形很好，频率为 1000 Hz。

综上所述，在 160 Hz，600 Hz，1000 Hz 处，通过强度解调可以较准确采集到振动频率信号。

5. 结束语

本文基于强度解调方式，通过优化器件选择、参数配置及电路优化设计，设计了光纤光栅动态解调

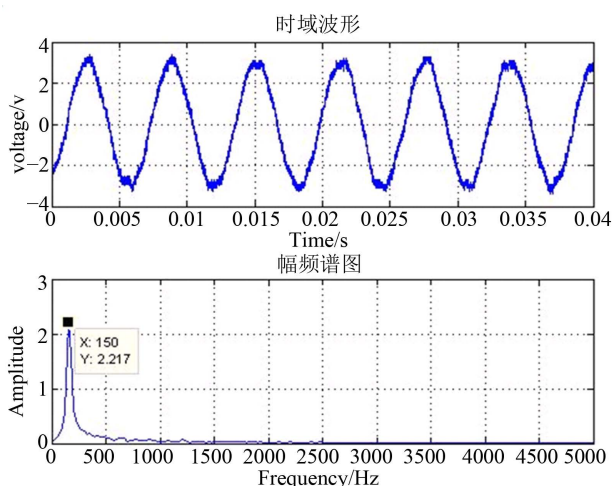


Figure 7. 150 Hz wave and frequency distribution

图 7. 150 Hz 波形与频谱

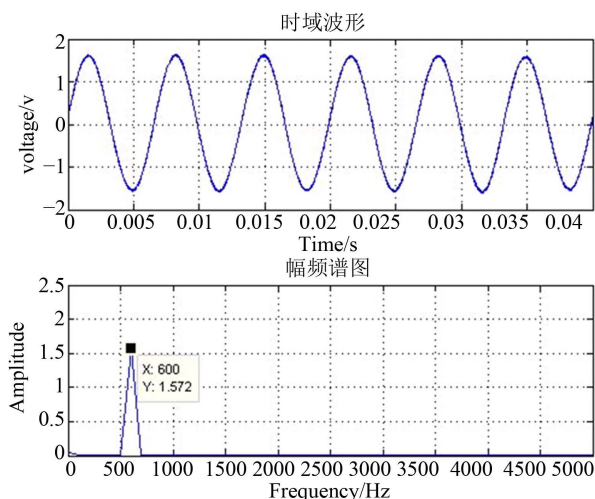


Figure 8. 600 Hz wave and frequency distribution

图 8. 600 Hz 波形图与频谱

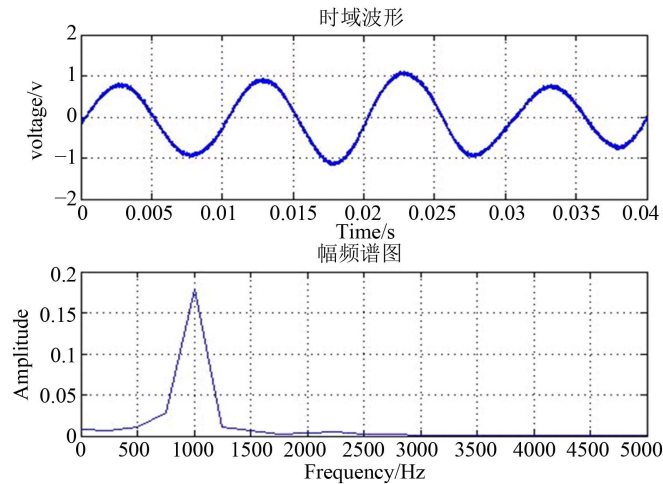


Figure 9. 1000 Hz wave and frequency distribution
图 9. 1000 Hz 波形图

集成电路实现了光纤光栅宽频带、高精度的动态解调。搭建光纤光栅振动实验平台，很好的验证了该集成电路 0~1000 Hz 的频率响应特性。实验数据证实该集成电路可以较高的实现光纤光栅的动态解调且频率响应特性较好。

基金项目

国家自然科学基金(61174018); 山东省自然科学基金(ZR2011FQ025)。

参考文献 (References)

- [1] Doebling, S.W., Farrar, C.R. and Prime, M.B. (1998) A summary of vibration-based damage identification methods, *The Shock and Vibration Digest*, **30**, 91-105.
- [2] 剑华, 张鸿, 刘优平, 等 (2011) 光纤 Bragg 光栅在公路软基沉降监测中的应用. *中南大学学报(自然科学版)*, **5**, 1442-1446.
- [3] 刘胜春, 张顶立, 黄俊, 等 (2011) 大型盾构隧道结构健康监测系统设计研究. *地下空间与工程学报*, **4**, 741-748.
- [4] 段杭, 任大春, 王宗魁, 等 (2010) 光纤 Bragg 光栅温度传感器在三峡大坝坝前水温监测中的应用. *长江科学院院报*, **9**, 25-28.
- [5] Zhang, X.-S. and Ning, C.-X. (2007) Application of fiber Bragg grating sensors on monitoring of cables' tension. *8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*, 16 August-18 July 2007, 4-232-4-235.
- [6] 廖延彪 (2010) 光纤光学——原理与应用. 清华大学出版社, 北京.
- [7] 朱珠, 梁大开, 孙红兵 (2013) 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. *中国激光*, **40**, 0305001-0305007.
- [8] 崔海军 (2012) 新型快速光纤 Bragg 光栅解调技术研究. 硕士论文, 重庆大学, 重庆.
- [9] 赵艳, 王代华 (2011) 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. *光学学报*, **1**, 0106007.
- [10] Morris, J.M. and Yi, X. (2012) Results on gas detection and concentration estimation via mid-IR-based gas detection system analysis model. *IEEE Sensors Journal*, **12**, 2347-2354.