

文章编号: 1006-4710(2013)04-0428-06

分布式光纤光栅传感系统中微弱信号检测研究

王亚萍, 胡辽林, 张卫超

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西, 西安 710048)

摘要: 设计了能够检测和放大微弱信号的光电检测和处理电路, 包括带差分输入和调零输出的前置放大、放大倍数可调的二级放大、低通滤波、电源转换、保护及滤波和数据采集等, 并用 Multisim 对其进行了仿真和实验测试。仿真和实验测试结果表明, 该检测电路能够检测 nW 级的光信号, 具有优异的抗干扰性能, 线性较好。

关键词: 光纤光栅; 传感; 微弱信号; 光电检测

中图分类号: TN86, TN248.4 **文献标志码:** A

Research on Weak Signal Detecting in Distributed FBG Sensing System

WANG Yaping, HU Liaolin, ZHANG Weichao

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The weak signal detecting and processing circuits are designed, which include pre-amplifier circuits with differential input and zero-measurand output, amplified fold adjustable second amplification circuits, low-pass filter, power conversion circuits, power supply protection and filtering, data acquisition circuits, etc. These circuits are simulated by Multisim and tested in experiment. The results from the simulation and experiments indicate that these detection circuits are able to detect nW grade light signal, having the excellent anti-interference performances and better linearity.

Key words: fiber Bragg grating; sensing; weak signal; photoelectric detection

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感器广泛用于应变和温度等参量的测量。FBG 传感检测的是光栅反射信号波长的变化, 与光源的偏振态、相位和强度无关, 对外界参量的测量精度主要由波长解调系统的精度决定^[1-3]。对于分布式 FBG 传感系统, 通常要求解调系统具有很高的解调速度和精度, 能够检测微弱光信号, 并可长期稳定工作^[4-6]。对 FBG 传感信号解调时, 一般不能对含有传感信息的光信号直接进行处理, 需要将其转换为电信号后再处理。光信号经过长距离传输或由低反射率 FBG 反射, 有时十分微弱, 一般在几 nW 到几百 μ W 之间, 外界环境对此影响也很大, 这就对光电检测的设计提出了很高的要求^[7]。检测微弱光信号的能力越强, 分布式光纤光栅传感系统能够复用的传感光栅就越多, 测量点相应也越多。本文针对一种基于光可调谐滤波器的分布式 FBG 传感解调系统, 设计

了能够检测微弱传感信号的光电检测和处理电路, 能够用于 nW 级微弱光信号的检测。并将设计的电路用于分布式光纤光栅传感系统中, 效果良好。

1 基于光可调谐滤波器的光纤光栅传感系统

基于光可调谐滤波器的分布式 FBG 传感系统如图 1 所示。ASE (Amplified Spontaneous Emission) 宽带光源为系统光源, 光通过隔离器后进入 3dB 耦合器, 然后入射到传感 FBG 阵列。满足特定波长条件的光将被 FBG 阵列沿原路返回。当 FBG 的外界环境 (温度或应力等) 发生变化时, 会引起光栅有效折射率和周期的变化, 使反射谱的中心波长也随之发生变化。反射光通过耦合器进入光可调谐滤波器, 光可调谐滤波器由一个三角波扫描电压控制, 加载的扫描电压和其输出波长之间有很好的对应关

收稿日期: 2013-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61275185); 陕西省教育厅科学研究计划项目 (2010JK716)。

作者简介: 王亚萍, 女, 硕士生, 研究方向为光纤传感。E-mail: wyp.14@163.com。

胡辽林, 男, 副教授, 研究方向为光纤传感及光纤通信。E-mail: huliaolin@163.com。

系。当FBG反射中心波长与光可调谐滤波器的中心波长重合时,输出光信号强度最大,通过光电检测电路后的输出电压也最大,记录此时可调谐滤波器的扫描电压,即可得出此时光可调谐滤波器的选通中心波长,亦即FBG反射波的中心波长。计算机通

过硬件控制光可调谐滤波器,使其在固定波长范围内扫描并实时记录数据。传感信号经光电检测电路后被采集,用LabVIEW编写VI(Virtual Instrument)程序,图形化界面控制和读取解调数据^[8-9]。

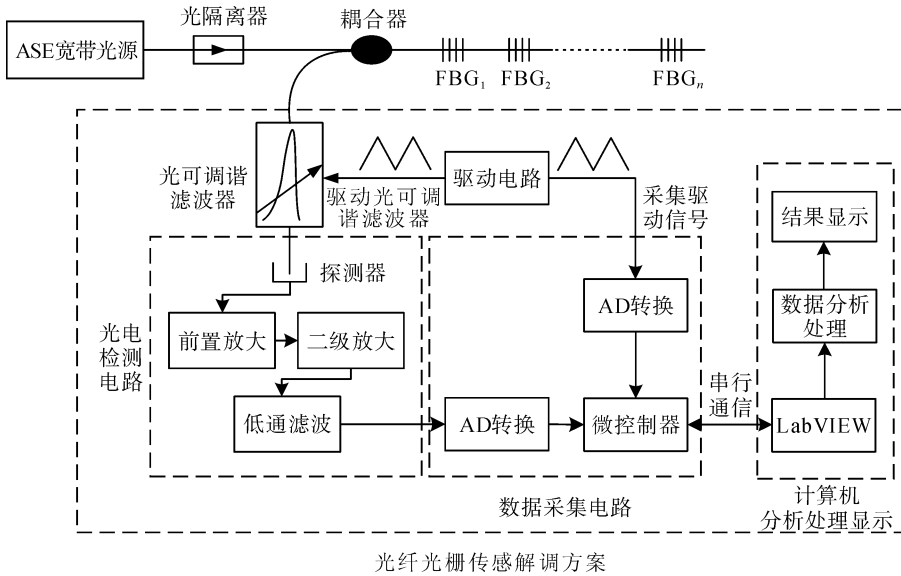


图1 基于光可调谐滤波器的分布式光纤光栅传感系统框图

Fig.1 Schematic of a distributed FBG sensing system based on tunable filter

2 电路设计

微弱光信号检测的关键是如何降低光电探测器、放大器等电路的固有噪声,提高信噪比。与其他光电检测电路相比^[10-13],本检测电路综合考虑各种影响因素,采用高信噪比的器件以及多项抑制噪声

措施,来确保电路的各项性能指标均达到要求。光电检测电路除了光电探测器、前置放大电路、二级放大电路、滤波电路外,如图2所示,还有电源电路和数据采集电路等,必须具备很强的抗干扰能力,才能够检测和放大微弱信号。

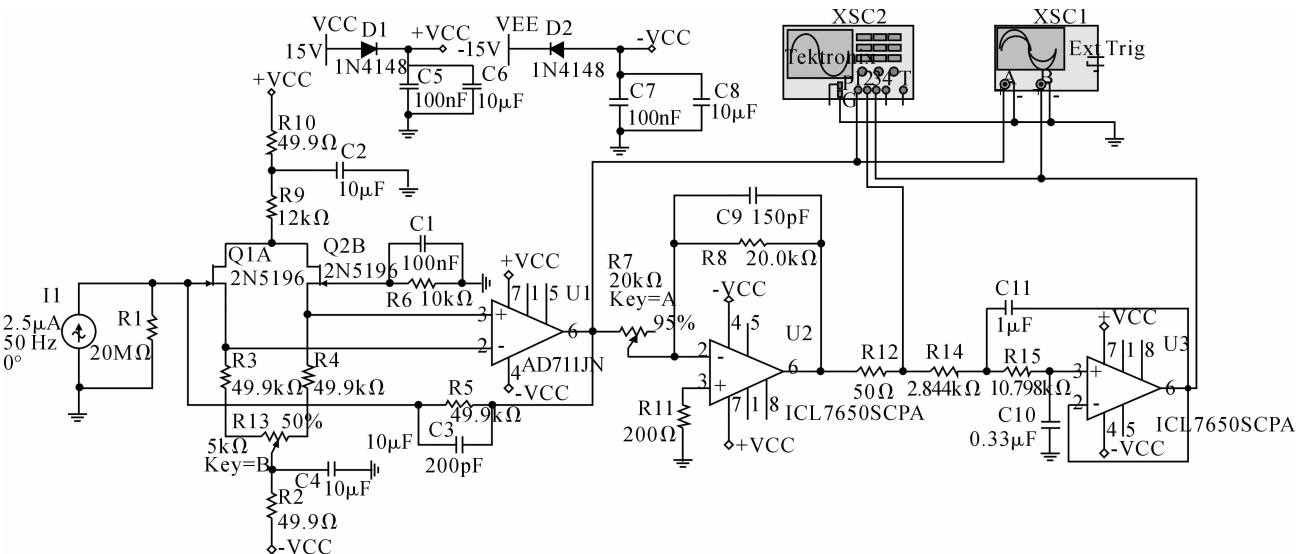


图2 光电检测电路及其仿真

Fig.2 Photoelectric detection circuits and its simulation

2.1 前置放大电路和二级放大电路

由于光电转换电路的输出信号通常在 mV 数量级,且信号常常淹没在噪声中,因此前置放大电路需有较强的滤噪和放大能力。光电探测器作为本系统中唯一的光电转换器件,其性能的优劣直接制约着检测精度。本文采用海特公司的 PIN3-07-13 型 PIN 光电二极管,其性能参数均能够满足要求。系统中 PIN 输出电流在几十 nA 到几十 μA 之间。一般要求用作前放的运放其输入偏置电流比输入信号至少小两个数量级;第一级放大后输出的信号一般为 mV 级,因此也必须考虑运放自身的输入失调电压。

场效应管(Field Effect Transistor, FET)的栅极漏电流很小,可以减少输入偏置电流。本文采用 AD711 作前放,其输入级为 BiFET(Bipolar Field Effect Transistor)结构,具有优异的低噪声特性和低输入电流,温漂为 $3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,最大噪声为 $4\mu\text{VP-P}$,输入失调电压为 0.2 mV,输入失调偏置电流为 15-50 pA。为了获得较低的噪声和温度漂移,设计了带差分输入级和调零输出的前放。用一个 N 沟道结型 FET 对称管 2N5196 来调节运放的输入,它具有极低的漏电流,约为 5pA。电阻 R_5 为负反馈电阻, $R_5 = 49.9\text{ k}\Omega$ 。这样使 PIN 的输出电流几乎全部流过 R_5 ,前放的输出电压为 $U_{o1} = I_p \times R_5$, I_p 为 PIN 输出的光电流。

前置放大的输出仍然比较低,需要二级放大。通常光信号强度变化范围较宽,如果放大电路的放大倍数过高,光强较强时,输出信号就会很大,不便于后续的采集与处理;放大倍数过小时,在光强较弱时输出信号会很弱,同样不便于采集和处理。因此在设计时需要考虑电压放大倍数可调,实现放大倍数可调的方法有两种:一种是采用可调电阻来实现;另一种是采用集成的程控放大器来实现,但程控放大器通常需要与单片机结合,且价格较高。本文采用电位器调节电阻来实现放大倍数可调。二级放大选用 ICL7650,其失调电压极低,可以很大程度地减少放大过程中引入的噪声。当调节电位器 R_7 到 1 k Ω 时,总输出为:

$$U_o = I_p \times R_5 \times \frac{R_8}{R_7} = I_p \times 49.9 \times 10^3 \times \frac{20 \times 10^3}{1 \times 10^3} = 9.98 \times 10^5 I_p \quad (1)$$

则总的电压电流放大倍数为:

$$A_{ui} = U_o / I_p = 9.98 \times 10^5 (\text{V/A})$$

调节电位器 R_7 ,可以灵活地改变整个电路的电

压电流放大倍数,使输出电压在 mV 到 V 量级之间变化。

2.2 滤波电路

对目前的光纤光栅传感解调系统,其解调速度一般较低,待测信号是低频信号,为了改善传感解调系统的分辨率,需要低通滤波。本文设计了一个二阶压控电压源巴特沃斯型低通滤波电路, $R_{14} = 2.844\text{ k}\Omega$, $R_{15} = 10.798\text{ k}\Omega$, $C_{11} = 1\mu\text{F}$, $C_{10} = 0.33\mu\text{F}$ 。实际元件参数相对于设计值的误差不超过 5% 即可满足要求。

2.3 供电电路

PIN 的供电电压为 5 V,对称管 2N5196 和两个高精度运放的供电要求为 $\pm 15\text{ V}$ 。实验中只有 5 V 稳压电源,采用 MAX743 双输出 PWM 开关模式稳压器,将 5 V 直流电压转化为稳定的 $\pm 15\text{ V}$,如图 3 所示。

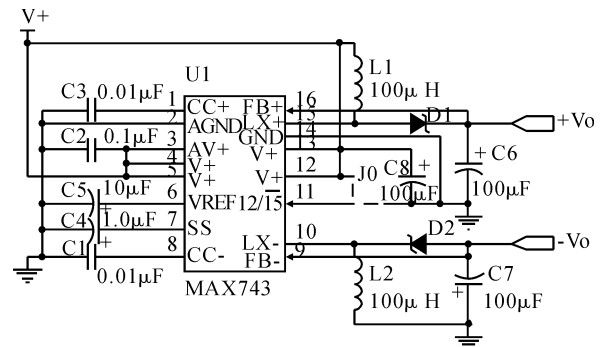


图3 电源转换电路

Fig. 3 Power conversion circuits

供电电路对微弱信号放大有较大影响。要对电源极性进行保护,如果不小心将极性接反而又没有保护措施,会造成运放损坏,极性保护可以在运放的正负供电端加入两个二极管来解决。在微弱信号检测电路中,为了减小电源的输出纹波,要对电源进行滤波。由多级运放组成的负反馈电路如果处理不当,会产生自激,防止自激的有效方法是对运放的电源进行高频滤波。在运放供电引脚附近增加工作特性稳定的高频去耦电容 C_6 和 C_8 。

2.4 数据采集

传感信号经光电检测电路后为模拟量,需要对其采集,同时也要采集施加给光滤波器的三角波驱动信号,将二者在计算机中通过 LabVIEW 编程进行处理,最终得到传感量。用于采集的 ALIENTEK MiniSTM32 是基于 ARM Cortex-M3 内核的 32 位处理器 STM32F103。设计解调系统时要求可调谐滤波器的波长扫描范围为 40 nm,分辨率为 1 pm,扫描频率为 50 Hz,那么采集电路的采样速率 f 应满足:

$$f \geq \frac{40 \times 10^3 \text{ pm}}{1 \text{ pm}} \times 50 = 2 \times 10^6 \text{ Hz} \quad (2)$$

即最小 2 MHz 的采样速率。本文实验时光可调谐滤波器的扫描频率仅为 0.2 Hz,扫描范围 10 nm 左右,最小采样速率 2 kHz。今后的快速解调和工程应用时,不能降低要求。

3 电路仿真

使用 NI 公司的 Multisim 来设计和仿真电路。先仿真调零输出,即通过前放的调零功能将输入电流调为零,观察输出情况,如图 4 所示。调节电位器 R_{13} ,用探针观察输出电压。在调零仿真过程中发现,无论怎样调节 R_{13} ,输出都不能为零,输入为零时输出为 $7.35 \mu\text{V}$ 。这是由于仿真中的元件模型都是根据实际参数设定的,仿真过程也会产生各种噪声,观察到的很小的输出电压就是噪声电压值。

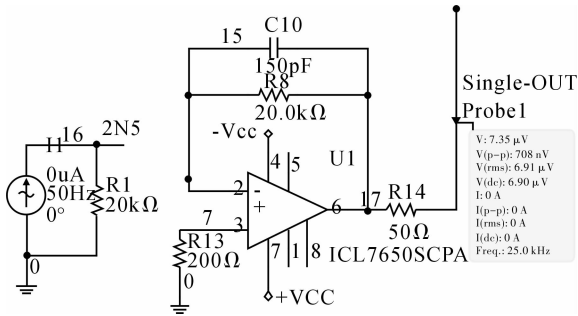


图 4 调零输出仿真
Fig. 4 Zero output

仿真时,光电二极管可用一个电流源与一个大电阻的并联来等效,电流源用 50 Hz 交流源,电阻设为 $20 \text{ M}\Omega$,光电检测电路的整体仿真如图 2 所示。

输出电压可通过调节 R_7 来改变,调节到 95% 即 $1 \text{ k}\Omega$ 时,探测到的电压波形如图 5 所示。CH1 为前置放大输出,CH2 为二级放大输出,CH3 为滤波后输出,电压值分别为 127 mV 、 2.41 V 和 1.75 V 。滤波后幅值降低,但不影响观察,为准确分析,用二级放大后的数据进行分析。CH1 与 CH2 二者反相,输出电压和电流源的频率是一致的,均为 50 Hz 。由此得到二级放大电路的放大倍数为 $A = 2.41 \text{ V}/127 \text{ mV} = 18.98$,小于理论计算值 $A = R_8/R_7 = 20 \text{ k}\Omega/1 \text{ k}\Omega = 20$ 。仿真结果比理论计算值更接近实际情况。光电流与输出电压关系如表 1 所示。由仿真结果看出,光电流大于 100 nA ,能线性地放大微弱信号,线性较好,拟合方程为:

$$U_o = 993.5I_p + 1.7 \quad (3)$$

但在 $5 \sim 100 \text{ nA}$ 之间线性不是很好,还需要对其进行进一步处理。由表 1 可以看出电流电压放大倍数 A_{ui} 为 9.94×10^5 ,小于理论计算值 9.98×10^5 ,这同二级放大电路的放大倍数与理论计算值的差别是一致的。

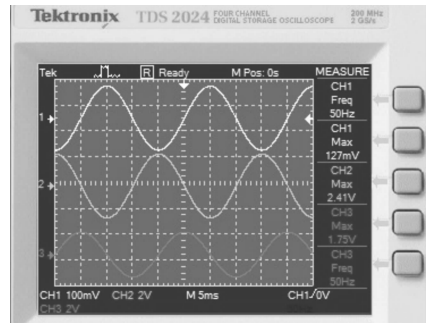


图 5 示波器观测到的电压波形
Fig. 5 Voltage waveform

表 1 光电流与输出电压对应表

Tab. 1 Photocurrent and output voltage

光电流/nA	0	5	10	20	30	40	60	80	100	300
输出电压	$7.35 \mu\text{V}$	2.91 mV	7.92 mV	17.8 mV	27.8 mV	37.7 mV	57.7 mV	77.6 mV	97.5 mV	296 mV
$A_{ui}/(\times 10^5)$		5.82	7.92	8.90	9.27	9.43	9.62	9.70	9.75	9.87
光电流/ μA	0.5	0.7	0.9	2	4	6	8	10	13	15
输出电压	495 mV	694 mV	893 mV	1.99 V	3.98 V	5.97 V	7.96 V	9.95 V	12.9 V	14.9 V
$A_{ui}/(\times 10^5)$	9.90	9.92	9.92	9.93	9.95	9.95	9.95	9.95	9.92	9.93

4 电路测试

首先进行电路静态测试,测试框图如图 6 所示。调节衰减器,使输入光电探测器的光功率逐渐变化,同时用万用表测出光电检测电路输出电压,得到输入光功率和输出电压的关系。线性拟合结果如图 7 所示,拟合曲线为:

$$U_o = 415.54P_i - 145.49 \quad (4)$$

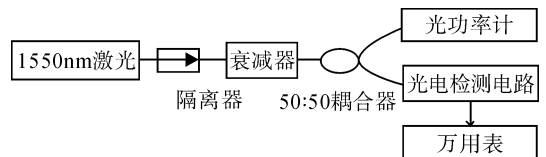


图 6 静态测试系统

Fig. 6 Static measurement system

由图7可以看出,该检测电路能够检测到 nW 级微弱的光信号。PIN 的响应度为 $\rho = I_p/P_i$, 在 1 550 nm 处的响应度为 0.8 A/W, 则静态测试电路的电压电流放大倍数为:

$$415.54 \times 10^3 / 0.8 = 5.20 \times 10^5$$

测试结果与仿真结果同量级,但比仿真小,主要是因为系统中光学器件的连接有损耗,所以实测值会小于仿真值。将实验电路分别置于室温和冰箱冷藏室下经多次测量,冷藏室中的测量值略低于室温中的测量值,结果相差甚微,这是因为降低温度可以降低热噪声。由此可以得出本检测电路的稳定性良好。

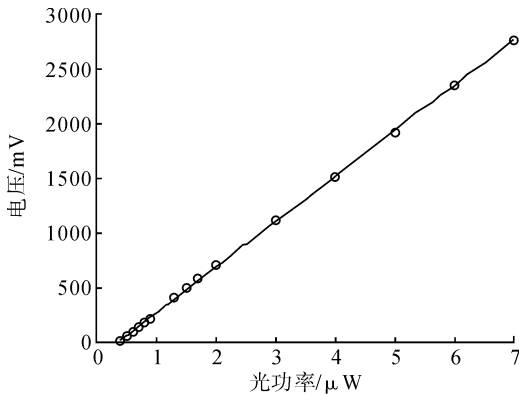


图7 静态测试结果

Fig. 7 Static measurement result

然后进行动态测试,将设计的光电检测电路放入如图1所示的传感系统中对其进行测试。这里只是用了一个 FBG, PIN 在波长 1 550 nm 处的响应度大于等于 0.8(A/W), 测试时 FBG 反射谱的功率为 2.3 μ W, PIN 输出电流范围应在 0.8 A/W \times 2.3 μ W 到 1 A/W \times 2.3 μ W, 即 1.84 μ A 到 2.3 μ A 之间。二级放大电路中的电阻 R_7 为 1 k Ω , 按照拟合方程式(3), 计算出实际光电检测电路的输出电压范围应在 1.83 V 到 2.29 V 之间。

光电检测电路的实测输出波形如图8所示。可以看出,每次输出时都有两个电压峰值,这是由于光可调谐滤波器由三角波信号驱动,在一个扫描周期中会探测到两个电压峰值波形。实测电压值近似为 1.9 V, 与仿真结果相符。对比仿真结果与实测结果,说明设计的光电检测电路能够很好地进行微弱光信号放大,可以作为传感系统中的探测电路使用。实测波形有少许毛刺,这是电路中的噪声引起的,在后续工作中还要进一步提高电路的抗干扰性能及对噪声的滤除能力。将检测电路中的光电二极管去掉,测量得二级放大后的输出为 0.955 mv, 这个值就是实测电路的噪声。这个值与仿真测得的噪声值

7.35 μ V 差距较大,这主要是因为 Multisim 中的元件模型只是根据实际器件参数设定的,因此在电路仿真的过程也会产生各种噪声,但实际测量中可能存在其他因素引起的噪声,如系统周围的电磁干扰,电源纹波干扰等。

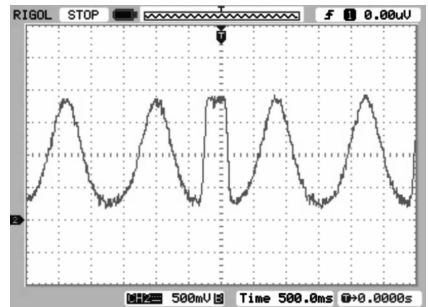


图8 测试的输出波形

Fig. 8 Output waveform

5 系统实验

将设计的检测电路接入图1所示的系统中进行系统实验。实验时共串联了5个 FBG。FBG2 和 FBG4 粘贴于悬臂梁,其余三个 FBG 处于自由状态。对 FBG2 和 FBG4 添加砝码(0 kg 到 9 kg),随着砝码的增加,FBG2 和 FBG4 波长都向右(长波长方向)移动,而其余三个处于自由状态的 FBG 的波长基本没有发生变化。将 FBG2 和 FBG4 的波长漂移量与加载砝码的质量做线性拟合后,如图9所示,两条拟合直线的斜率分别为 48.8 μ m/kg 和 56.8 μ m/kg。实验表明,整个传感系统的线性较好,说明设计的光电检测电路的线性也好。

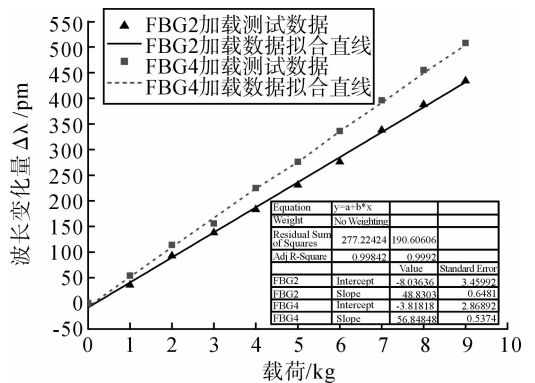


图9 系统实验结果(FBG2 与 FBG4)

Fig. 9 Results of FBG2 and FBG4 dynamic demodulation

6 结语

通过对设计的光电检测电路和信号处理电路的测试和系统实验分析,证明该电路能够用于分布式光纤光栅传感系统的微弱信号检测,线性较好。本

检测方法是针对分布式光纤光栅传感系统设计的,但它也可用于单个光纤光栅传感器或其它光纤传感系统的微弱信号检测。本检测方法还需要进一步完善,提高其抗噪声性能,并且还需提高其在 nW 量级信号的信噪比。而对于极低反射率分布式光纤光栅这类光纤传感系统,其传感信号功率更弱,有可能达 pW 量级,这就需要采用更灵敏的探测方法,如光子计数。

参考文献:

- [1] Jiang Biqiang, Zhao Jianlin, Qin Chun, et al. An optimized strain demodulation method based on dynamic double matched fiber bragg grating filtering [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(3):415-418.
- [2] Crunelle C, Wuilpart M, Caucheteur C, et al. Original interrogation system for quasi-distributed FBG-based temperature sensor with fast demodulation technique [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 150(2):192-198.
- [3] 张燕君, 姜俊波, 唐瑞雪, 等. 新型分布式布喇格光纤光栅传感系统的研究[J]. *光电工程*, 2010, 37(1):88-94.
Zhang Yanjun, Lou Junbo, Tang Ruixue, et al. Novel distributed sensor system based on fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(1):88-94.
- [4] 张卫华, 童峥嵘, 苗银萍, 等. 基于倾斜光纤光栅的传感解调技术[J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(4):284-287.
Zhang Weihua, Tong Zhengrong, Miao Yiping, et al. Sensing and demodulation technique based on tilted fiber Bragg grating[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(4):284-287.
- [5] Chien C M, Kuo C C, Bo R L, et al. Investigation of the dynamic demodulation ability of a tilted fiber bragg grating filter in an all-fiber displacement sensing system [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 168(1):179-186.
- [6] 李恩邦, 彭刚定, 姚建铨. 用于光纤光栅传感的低成本高分辨率多通道波长解调仪[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(1):1-5.
Li Enbang, Peng Gangding, Yao Jianquan. Low-cost high resolution wavelength demodulator for multi-channel dynamic FBG sensing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(1):1-5.
- [7] 朱萍玉, Dhillon B S, 李学军, 等. 一种光纤光栅传感实验的可靠性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(4):673-678.
Zhu Pingyu, Dhillon B S, Li Xuejun, et al. Reliability analysis of an interrogation instrument for optical fiber bragg grating sensing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(4):673-678.
- [8] 沈小燕, 林玉池, 付鲁华, 等. LabVIEW 实现光纤光栅传感解调[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(1):61-65.
Shen Xiaoyan, Lin Yuchi, Fu Luhua, et al. A new FBG demodulation system based on LabVIEW [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(1):61-65.
- [9] 胡辽林, 张卫超, 华灯鑫, 等. 基于 LabVIEW 的光纤光栅传感的动态解调 [J]. *计算机应用*, 2013, 33(5):1473-1475.
Hu Liaolin, Zhang Weichao, Hua Dengxin, et al. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating sensing based on LabVIEW [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(5):1473-1475.
- [10] 贾振安, 郑德琳. 光纤光栅微弱信号检测的解调电路 [J]. *传感技术与传感器*, 2012, (5):79-81.
Jia Zhen'an, Zheng Delin. Demodulation electric circuit of optical fiber grating weak signal detection [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012, (5):79-81.
- [11] 乔学光, 冯宏飞, 贾振安, 等. 光纤光栅传感信号解调硬件电路的研究 [J]. *光电子·激光*, 2009, 20(11):1426-1429.
Qiao Xueguang, Feng Hongfei, Jia Zhen'an, et al. Study on a demodulation circuit of the fiber sensing signal [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(11):1426-1429.
- [12] 陈楚, 张雅虹, 黄春晖, 等. 高速差分光电检测电路的设计 [J]. *光电技术应用*, 2008, 23(1):45-49.
Chen Chu, Zhang Yahong, Huang Chunhui, et al. Design of high-speed differential photoelectric detection circuit [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2008, 23(1):45-49.
- [13] 王诣, 王选择, 翟中生, 等. 新型光电检测电路的研究与设计 [J]. *光电子技术*, 2012, 32(2):131-136.
Wang Yi, Wang Xuanze, Zhai Zhongsheng, et al. Study and design of the new photoelectric circuit [J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, 32(2):131-136.

(责任编辑 王卫勋)