

光纤光栅传感信号解调技术研究^{*}赵欣丹² 张小栋^{1,2} 侯成刚² 牛杭²

(1. 现代设计与转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049; 2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘要: 针对现有解调系统不能保证驱动电压的周期完整性的不足,提出了一种基于实时参考光路和可调谐 F-P 腔滤波器的光纤光栅波长解调系统设计方案。其中,硬件信号调理电路由二级放大电路和二阶低通滤波电路组成,具有高信噪比、低成本等特点;软件分析处理模块含有实时数据采集、处理及保存功能的高精度上位机程序,并提出了采样点补偿算法使驱动电压能够在任何情况下都以完整的周期驱动。实验结果表明:所提出的光纤光栅波长解调系统最大测量误差为 34 pm,测量范围为 40 nm,最大调谐速度为 100 Hz,能够对光纤光栅波长信息进行实时数据采集与处理,满足工程实际需要。

关键词: 光纤光栅;法布里-珀罗滤波器;参考光路;波长解调

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Research on fiber bragg grating demodulation technology

Zhao Xindan² Zhang Xiaodong^{1,2} Hou Chenggang² Niu Hang²

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the shortcomings of the existing demodulation system, which can not guarantee the cycle integrity of the driving voltage, a wavelength demodulation system based on real-time reference light path and the tunable F-P cavity filter is proposed in this paper. The hardware signal conditioning circuit consists of two-stage amplifier circuit and second-order low-pass filter circuit, which is high signal to noise ratio and low cost; The software analysis and processing module consists of high-precision computer program, which is real-time data acquisition, processing and preservation. What's more, a sampling point compensation algorithm which is proposed, which can make host computer produce complete periodic voltage under any circumstance. The experimental results show: the maximum measurement error of the demodulation system is 34 pm, the measurement range is 40 nm, and the maximum tuning speed is 100 Hz. This system can satisfy the requirements of engineering practice.

Keywords: FBG; F-P cavity filter; reference light path; wavelength demodulation

0 引 言

光纤光栅(FBG)是近年来发展迅速,应用广泛的光纤无源器件,除了具有可靠性好,抗电磁干扰,抗腐蚀等特点外,其波长编码特性使其测量结果不受光源功率波动及光的偏振态变化的影响,并且便于利用复用技术对多种传感量进行分布式多点测量,因此,其应用非常广泛^[1,3]。在传感领域,FBG一般作为波长调制型元件使用,被测物理量转化为FBG的反射波长信息,所以准确解调出该反射波长值是光纤光栅传感技术的关键^[4-7]。

目前,可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器解调法是应用较多的解调方法之一^[8-14],为进一步提高解调系统精度,常

采用标准具作为波长参考元件,对传感FBG波长进行插值计算,以改善可调谐F-P腔滤波器的迟滞效应以及驱动元件的非线性问题,但现有的解调系统并不能保证驱动电压启动时间与上位机采集开始时间的同时性以及驱动电压的周期完整性。

针对以上不足,本文首先在分析可调谐F-P滤波器解调法的基础上,制定基于实时参考光路和可调谐F-P腔滤波器光纤光栅波长解调系统总体方案,设计满足系统需求的信号调理电路以及能够进行高精度寻峰的上位机程序,最后对设计的光纤光栅波长解调系统实验验证,最终实现宽范围高精度光纤光栅波长解调。

收稿日期:2017-03

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51675419)资助

1 光纤光栅波长解调系统设计

1.1 解调系统总体方案设计

光纤光栅波长解调系统原理图如图 1 所示,主要有宽带光源、可调谐 F-P 腔滤波器、光耦合器、FBG、梳状滤波器 (FFPI)、光隔离器、信号调理板、多功能数据采集卡以及上位机等。宽带光源发出的光经过光耦合器后,一路(70%输出端)经过 FBG,另一路经过 FFPI,FBG 的反射光和 FFPI 的透射光同时进入信号调理板,数据采集卡对信号调理板输出的信号实时采集,将采集到的数据传递给上位机进行数据处理,从而得到 FBG 的波长数据,同时上位机通过数据采集卡输出周期性电压对 F-P 腔滤波器进行驱动,使其在特定的波长范围内进行扫描。

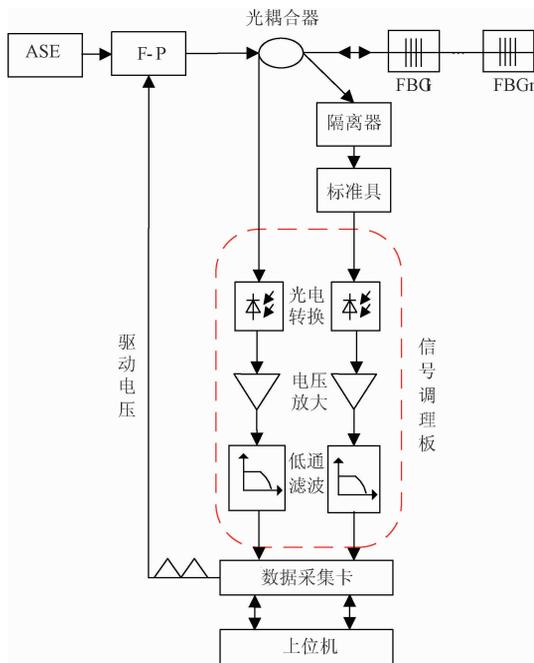


图 1 解调系统原理

构成 F-P 腔的两个高反射镜,一端固定,另一个在外力作用下可以进行移动,其背面贴有压电陶瓷,根据多光束干涉原理,当给压电陶瓷施加一个周期性扫描电压时,压电陶瓷将产生伸缩,从而可以改变 F-P 腔的腔长,使 F-P 腔的透射波长发生变化,如果 F-P 腔的透射波长和 FBG 的反射波长一致则探测器探测到的光强最大。F-P 腔滤波器的透射波长和滤波器的腔长是一一对应的关系,同时压电陶瓷上的驱动电压与 F-P 腔滤波器的腔长是一一对应的关系,所以压电陶瓷上的驱动电压与 F-P 腔滤波器的透射波长是一一对应的关系,即当已知驱动电压与 F-P 腔滤波器透射波长的关系并检测到 FBG 反射光谱在扫描电压周期中的位置时,可求得 FBG 反射波长值。

1.2 解调系统硬件设计

设计的解调系统用于检测 20 Hz 以内的静态或者准静

态信号。根据香农定理,扫描电压频率应设置为 100 Hz,又由于 FBG 的反射光谱频率成分一般分布在 40~50 Hz (如图 2 所示),为了将此光谱波形无失真采集出来,数据采集卡的采样频率应设置为扫描电压频率的 200 倍即 20 kHz。另外,数据采集卡能对信号进行不失真采集的电压为 100 mV 以上,故信号调理电路最终输出电压应该大于 100 mV。

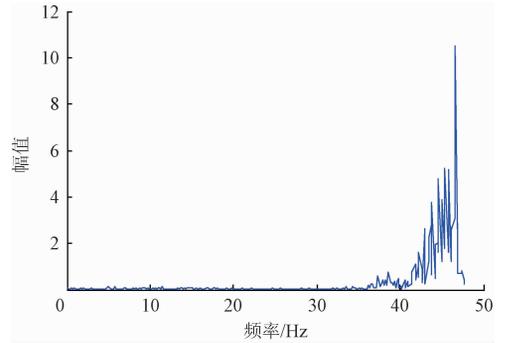


图 2 光纤光栅反射谱幅频图

信号调理板由 2 路原理及元件完全相同的调理电路组成,分别对光纤光栅的反射光及梳状滤波器的透射光进行处理。每路调理电路主要由光电转换模块,放大模块和低通滤波模块组成。设计的调理电路原理图如图 3 所示。

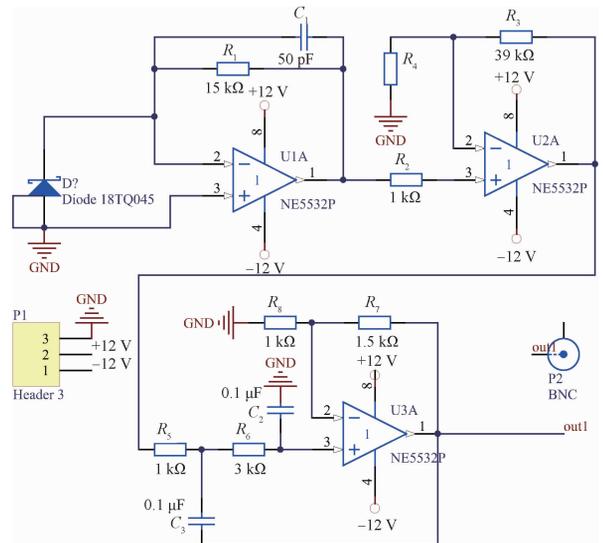


图 3 调理电路原理

信号调理电路选用的运放芯片为 NE5532,它是高性能低噪声双运算放大器集成电路,和很多标准运放相比,它具有更好的噪声性能,优良的输出驱动能力及相当高的小信号带宽,电源电压范围大,成本低等,因此很适合应用在信号调理电路中。

光电转换模块在信号调理电路中的功能是将光传感信号转换成电信号。此模块的核心是光电探测器,这里使用了光敏面积为 85 μm PIN 型光电二极管作为探测器,其转

换率通常接近于 1 A/W, 由于光纤光栅反射谱的光强一般为 0.1 μ W 左右, 所以经过光电探测器之后的电流信号通常在 100 nA 左右。光电转换模块的传递函数为:

$$H_1(\omega) = \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 j\omega} \quad (1)$$

R_1 表示放大增益, 此处 R_1 不能取太大, R_1 取太大就要求放大器的输入阻抗更大, 会对信号产生更大的分流作用, 加大输入偏置电流, 设计 R_1 为 15 k Ω 。电容 C_1 用于防止发生自激同时还可以减少输出直流电平的纹波, 同时 $R_1 C_1$ 并联组合设置信号带宽, 取 C_1 为 50 pF, 故此模块能够滤除 200 kHz 以上的高频信号, 减少电路的高频噪声。

光信号经过光电转换模块之后, 实现了光-电流-电压的转换, 为了满足后续电路的需要, 必须对信号进行二次放大。放大模块的传递函数为:

$$H_2(\omega) = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad (2)$$

设计放大倍数为 40 倍, 故取 $R_3 = 39$ k Ω , $R_4 = 1$ k Ω 。

低通滤波模块在调理电路中的作用是滤除不需要的高频信号防止频率混淆现象发生, 因此设计了二阶低通有源滤波电路, 其传递函数如式(3)所示:

$$H_3(\omega) = \frac{A_f \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} j\omega + \omega_0^2} \quad (3)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_5 R_6 C_2 C_3}} \quad (4)$$

$$A_f = 1 + \frac{R_7}{R_8} \quad (5)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_5 R_6 C_2 C_3}}{C_3 (R_5 + R_6) + R_5 C_2 (1 - A_f)} \quad (6)$$

其中: ω_0 为截止频率, A_f 为通带增益, Q 为品质因数。

选用滤波效果较好的巴特沃斯低通滤波器进行低通滤波, 根据理论分析可知, 当 $Q = 1/\sqrt{2}$ 时, 二阶低通滤波为巴特沃斯低通滤波。设计 $R_5 = 1$ k Ω , $R_6 = 3$ k Ω , $C_2 = C_3 = 0.1$ μ F, $R_7 = 1.5$ k Ω , $R_8 = 1$ k Ω , 则信号调理电路截止频率为 10 kHz, 增益为 2.5。

由于运算放大器存在内部增益以及零极点, 故设计的调理电路截止频率及增益与理论值稍有偏差。对低通滤波模块进行电路仿真, 其幅频特性曲线如图 4 所示, 截止频率约为 11.4 kHz, 放大增益约为 3.4, 仿真结果与理论分析基本相符。

综合上述式(1)~(3), 所设计的信号调理电路传递函数为:

$$H(\omega) = \frac{5R_1}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{2j\omega}{\omega_0}\right) (1 + R_1 C_1 j\omega)} \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \quad (7)$$

对整个调理电路进行 Multisim 软件仿真, 当调理电路输入 100 nA, 100 Hz 的交流正弦信号时, 通过 Multisim 中

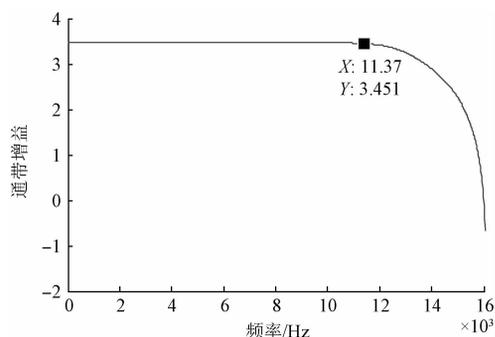


图 4 低通滤波器幅频特性曲线

的示波器观察每一级的输出结果, 结果表明: 经过光电转换模块的电压约为 1.4 mV, 经过放大模块的电压约为 50 mV, 最终的输出电压约为 200 mV, 如图 5 所示, 满足电路设计需求。

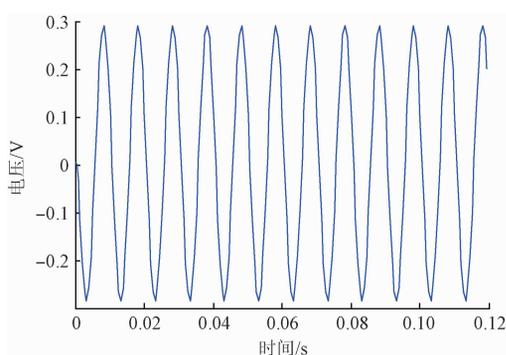


图 5 信号调理电路仿真

1.3 上位机程序设计

光纤光栅波长解调系统上位机程序在 LabVIEW 平台上开发, 采用模块化结构设计, 由信号采集模块、寻峰算法模块、波长计算模块以及驱动电压模块组成, 人机界面如图 6 所示。

信号采集模块的主要功能是信号实时采集以及系统采样率和采样点等参数的设置。这一模块主要包括光纤光栅反射光信号采集和梳状滤波器透射光信号采集, 可以通过改变采样率和采样点的数值, 观察光纤光栅反射光信号和梳状滤波器透射光信号的变化情况, 以便选取最佳采样率与采样点的数值。

寻峰算法模块是数据处理中的核心模块, 主要是对光纤光栅反射谱进行峰值寻找。在本文所设计上位机程序中, 采用寻峰精度较高的高斯拟合算法进行光纤光栅峰值提取。以高斯函数描述的 FBG 反射谱谱型为:

$$I(\lambda) = \frac{I_0 R_0}{4} \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\delta}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中: I_0 、 R_0 、 $\Delta\delta$ 、 λ_B , 分别为 FBG 输入光强、最大反射率、反射谱的半宽度、中心反射波长。

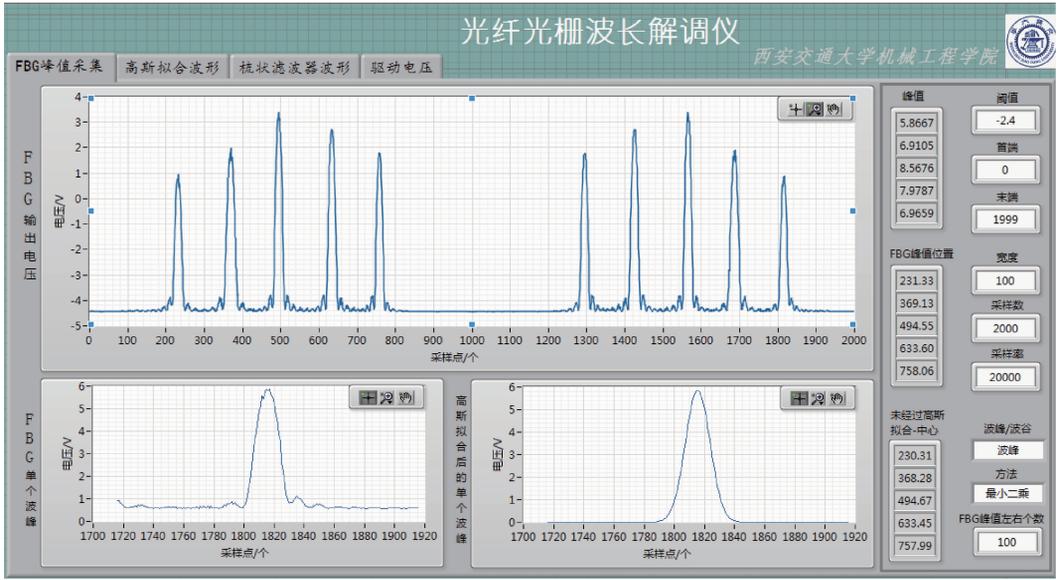


图 6 上位机人机界面

高斯拟合曲线与光纤光栅的真实谱线比较如图 7 所示,从图 7 可以看出,高斯函数的模型与光纤光栅反射谱的实际形式很接近。所以采用高斯拟合算法也最为准确,直观,这也为高斯拟合算法提供了理论基础。经过高斯拟合的光纤光栅波形曲线更加光滑,峰值的位置也更加稳定与准确。

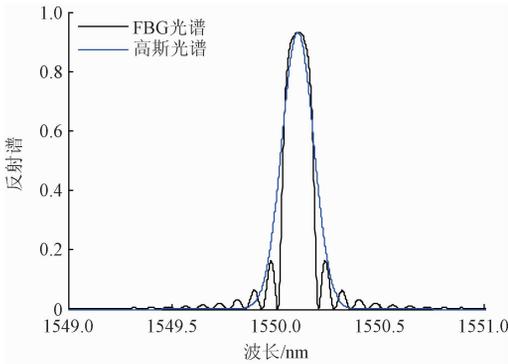


图 7 光纤光栅光谱和高斯拟合光谱对比

波长计算模块主要功能是将所得采样点数据转换成波长值。由于 FFPI 几乎不受温度影响,它的输出谱周期为 0.8 nm,在 40 nm 的波长范围内输出 50 条干涉条纹,干涉条纹峰值对应的波长基本为定值,所以利用已知的波长对检测到的 FBG 反射波长进行标定,便能够得到更为准确的光纤光栅波长数据,可以改善 F-P 腔滤波器的非线性以及系统漂移问题。

梳状滤波器两个通带之间的间隔比较小,两个通带之间的采样点数与波长基本上是线性关系,因此,可以认为梳状滤波器的采样点数与波长的关系是分段线性的,光纤光栅的波长标定原理如图 8 所示。

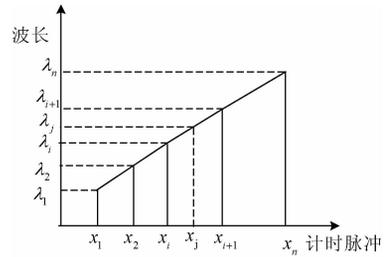


图 8 标定原理

设光纤上某个传感光栅波峰对应的采样点个数为 x_j , 且 $x_i \leq x_j \leq x_{i+1}$, λ_i, λ_{i+1} 为梳状滤波器的标准波长值,其对应的采样点数分别为 x_i, x_{i+1} , 则光纤光栅的实际波长为:

$$\lambda_j = \frac{x_j - x_i}{x_{i+1} - x_i} (\lambda_{i+1} - \lambda_i) + \lambda_i \quad (9)$$

驱动电压模块主要功能是产生驱动 F-P 腔滤波器的周期性驱动电压,并且这一模块设计与信号采集模块同时触发的算法以保证驱动电压输出与上位机采集的同时性,人机界面如图 9 所示。设有三角波、锯齿波、正弦波以及自定义波形 4 种形式,经过多次实验验证,F-P 腔滤波器在三角波的驱动下其非线性误差较小,故本文采用的是周期性三角波对 F-P 腔滤波器进行驱动,其频率、幅值和相位均可进行实时调整。将驱动电压分别接入数据采集卡输入接口以及 F-P 腔滤波器驱动端口,以便能够实时观察驱动电压的变化情况,对驱动电压进行实时调整。

多功能数据采集卡共用一个 A/D 转换,故驱动电压输出存在延时,驱动电压对 F-P 腔滤波器开始扫描时,驱动电压并不是每个电压周期的起始点,可能是前个周期的一部分加后一个周期的一部分,非规则周期如图 10 所示, N

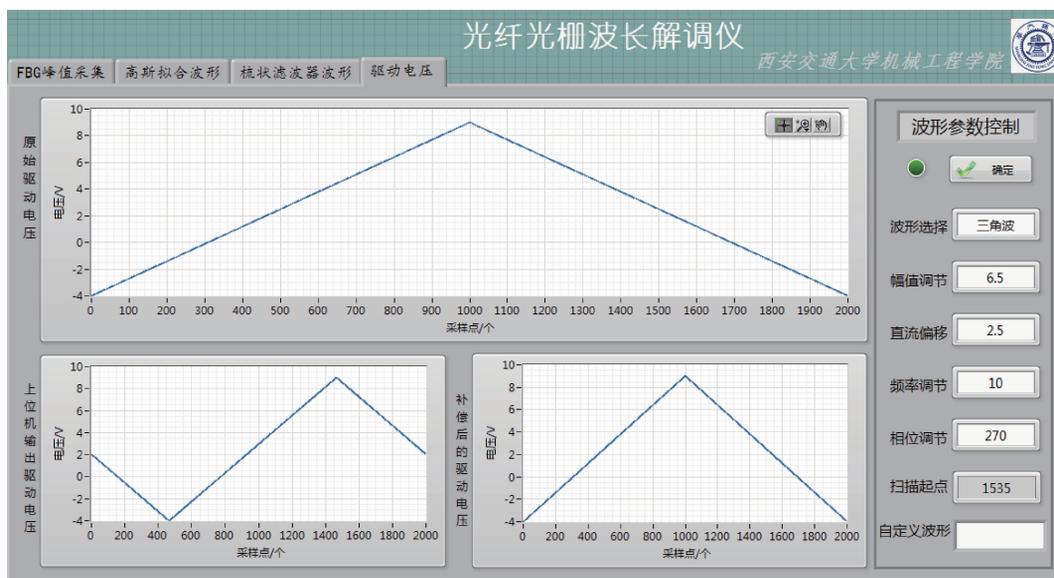


图9 驱动电压人机界面

表示整个周期的采样点总数,如式(10)所示。非规则周期的驱动电压对后续的数据处理会造成很大的困扰,所以本文提出了一种采样点补偿算法来解决这个问题。

$$N = a + b + c \quad (10)$$

式中: a , b , c 分别为整个周期中的部分采样点。

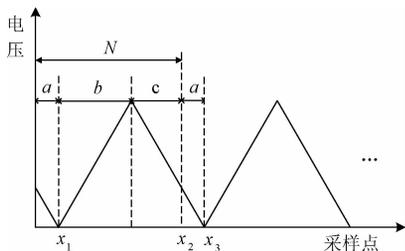


图10 周期性三角波

首先是在算法中设置寻找出驱动电压中最小电压值点 x_1 , 找到最小值点之后,以最小值点作为驱动电压周期的开始,设计算法对驱动电压进行采样点补偿,将最小值点去掉的采样点补到 x_2 之后,这样所得周期性驱动电压所对应采样点便是一个完整周期的采样点。通过设计采样点补偿算法,上位机输出驱动电压无论在什么情况下都输出完整规则性的周期电压,能够有效地提高后续数据处理的速度以及降低数据处理的复杂性。

2 实验系统搭建与性能测试分析

2.1 实验系统搭建

为了验证所设计波长解调系统的性能,搭建了如图11所示的实验系统装置,其主要包括有 ASE 宽带光源、可调谐 F-P 腔滤波器、光耦合器、光纤光栅、光隔离器、梳状滤波器、信号调理板、多功能数据采集卡、3.3 V 直流电源、

±12 V 直流电源、计算机以及光谱仪等。实验中所用数据采集卡为 NI 公司的多功能数据采集卡 NI USB-6211,它有 16 个输入通道以及 2 个输出通道,最大采样率为 250 ks/s,在数据采集卡中,当使用多个通道进行采集时,每个通道将平均分配采集卡的最大采样率,由于在本次实验中使用了 3 个输入通道,所以每通道采样率约为 80 ks/s,在保证能够采集完整信号波形的采样点情况下,解调系统的最大速度可达 100 Hz。

实验采用的宽带光源为光纤光栅解调专用光源,它的工作波长为 1 525~1 565 nm,输出功率为 10 dBm 到 20 dBm,光谱平坦度小于 7 dBm,它为整个解调系统提供了较为平坦的光源。F-P 腔滤波器采用的是 MOI 公司的 FFP-TF2,它的自由光谱范围大于 200 nm,主要工作在 1 520 nm 到 1 570 nm 范围内。光纤光栅传感器为本实验室自行设计,一根光纤上刻有 5 个传感光栅,中心波长为 1 550 nm。

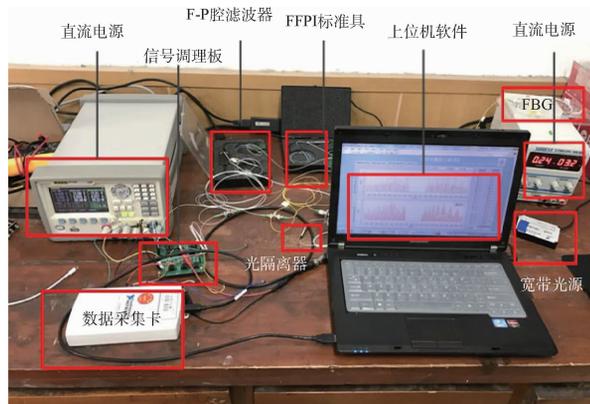


图11 实验系统装置图

2.2 实验系统性能测试分析

F-P 腔滤波器的驱动电压采用的是周期性三角波,相当于是对信号进行了两个周期的扫描,实验所得数据及图形如图 12 所示,实线代表梳状滤波器的光谱图,每个周期

获取 50 个波峰,虚线代表的是一根光纤上刻有的 5 个传感光栅的光谱图。通过上位机程序波长计算模块便可求出解调系统解调出的 FBG 波长。

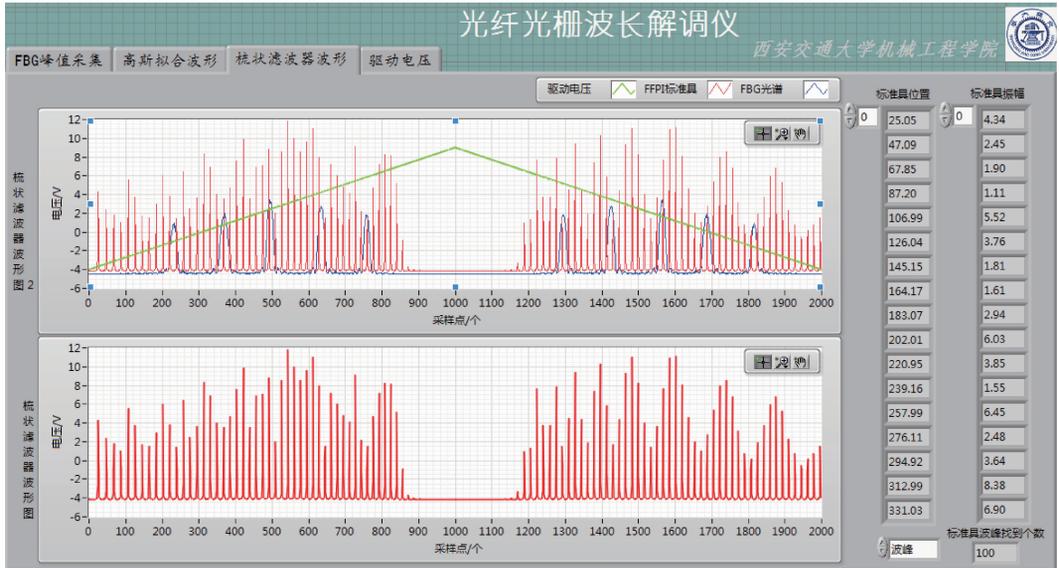


图 12 信号光谱图

实验数据如表 1 和表 2 所示,表 1 中采样点 1 表示 FFPI 的 50 个波峰所对应的采样点,实际波长表示采用光谱仪测得 FFPI 的 50 个标准波长。表 2 中采样点 2 表示光纤上 5 个传感光栅波峰所对应的采样点,实际波长表示采用光谱仪测得 5 个 FBG 的波长,并以此作为标准波长,解调波长表示通过本文所设计的解调系统所测得 5 个 FBG

的波长值。

表 1 FFPI 标准波长数据 (nm)

FFPI	1	2	...	49	50
采样点 1	18.039	39.748	...	852.140	867.993
实际波长	1 527.250	1 528.780	...	1 563.000	1 564.640

表 2 光纤光栅波长数据 (nm)

FBG	1	2	3	4	5
采样点 2	186.243	324.088	449.860	589.397	714.166
实际波长	1 530.838	1 536.739	1 543.194	1 548.834	1 554.865
解调波长	1 530.860	1 536.705	1 543.172	1 548.823	1 554.878
绝对误差	0.022	0.034	0.022	0.011	0.013

传统解调方法是利用高精度的光谱仪精确的检测 FBG 的反射波长,但是其体积庞大,价格昂贵。目前,在已实用化的 FBG 波长解调产品中,美国 MOI 公司的 SM125 在 80 nm 的动态范围内不超过 0.08 nm 的解调精度(分辨率 1 pm),扫描速度 50 Hz,但它们售价均在 10 万元以上,这在很大程度上成为了 FBG 传感广泛应用的障碍。

所设计的 FBG 波长解调系统在低成本的基础下,在 40 nm 的动态范围内最大误差不超过 35 pm,即解调系统具有在 40 nm 的动态范围内不超过 0.04 nm 的解调精度(分辨率 1 pm),最大调谐速度可达 100 Hz,满足工程实际的需要并且系统可进行集成化设计,使其能够更广泛的应用于工程实践。

3 结 论

针对现有解调系统不能保证驱动电压启动时间与上位机采集开始时间的同时性以及驱动电压的周期完整性的不足,提出了一种基于实时参考光路和可调谐 F-P 腔滤波器的光纤光栅波长解调系统,其主要特点或优势体现在:

1)解调系统使用梳状滤波器作为标准具对光纤光栅波长进行校正,改善了可调谐 F-P 腔滤波器的非线性,提高了解调系统的精度;

2)设计的信号调理电路主要包括能够减小运算放大

器偏置电流产生的误差的二级放大电路以及能够降低电路噪声提高电路信噪比的二阶低通电路,实现了高信噪比、低成本;

3)上位机程序采用了精度比较高的寻峰算法—高斯拟合算法,能够对光纤光栅波长信息进行实时采集,处理及保存,并且能够保证驱动电压输出与上位机采集的同时性,而且提出了采样点补偿算法使驱动电压能够在任何情况下都以完整周期驱动可调谐 F-P 腔滤波器;

4)最后,经过实验测定,本文设计的光纤光栅波长解调系统具有良好的性能,其最大测量误差为 34 pm,分辨率 1 pm,测量范围为 40 nm,最大调谐速度为 100 Hz,满足工程实际的需要。

参考文献

- [1] 贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1806-1812.
- [2] 冉鑫涛, 马少平. 光纤光栅压力传感器的理论及实验研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 873-879.
- [3] ZHAO X, ZHANG X, NIU H. Research on measurement for bending stress of gear with Fiber Bragg Grating (FBG) and optimization of FBG probe installation[C]. IEEE 12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient, Korea, 2015, 336-340.
- [4] 赵姚, 高叶生, 韩正英. 高精度光纤光栅波长检测系统[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(1): 49-53.
- [5] TSIGARIDAS G, POLYZOS D, LONNONE A. Theoretical and experimental study of refractive index sensors based on etched fiber bragg gratings[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014(209): 9-15.
- [6] GUAN B, LI J. Fiber bragg gratings in optical microfibers[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 793-801.
- [7] 倪凯, 徐海松, 董新永, 等. 基于光纤布拉格光栅的温度不敏感的倾斜传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2104-2107.
- [8] LONGHI S, GATTI D, LAPORTA P, et al. Synthesis of fiber Bragg grating filters for optimal DPSK demodulation[J]. Optical Fiber Technology, 2008, 14(4): 259-261
- [9] 王巧琴, 顾金良, 罗红娥. 动态应变微光信号检测系统的设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(7): 71-74.
- [10] 陈显, 余尚江, 杨吉祥, 等. 线性滤波法高速解调技术中的测量有效性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 145-150.
- [11] 张锦龙, 余重秀, 王葵如, 等. 基于偏振干涉的光纤光栅传感解调方法[J]. 物理学报, 2009, 58(6): 3988-3994.
- [12] 李红, 祝连庆. 基于改性型 UDP 和 CIGI 的光纤光栅高速解调技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 129-135.
- [13] 梁霄, 刘铁根, 刘琨, 等. 一种可调谐光滤波器非线性实时标定方法研究[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1445-1449.
- [14] PARLEVLIET P, BREESE H E N, BEAKERS A. Measurement of (post) curing strain development with fiber Bragg gratings [J]. Polymer Testing, 2010, 29(3): 291-301.
- [15] 张素萍, 李朝强. 基于 MScComm 和队列技术的 LabVIEW 数据采集系统设计[J], 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 86-91.

作者简介

赵欣丹, 西安交通大学机械工程学院硕士研究生, 主要从事光纤光栅动态检测的研究。

侯成刚, 1997 年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学副教授, 研究生导师, 主要从事智能检测、诊断技术研究。

E-mail: chghou@mail. xjtu. edu. cn