

高精度光纤光栅振动解调系统研究与应用*

魏鹤鸣 车嘉炜 侯林嵩 刘云启 庞拂飞 王廷云
(上海大学特种光纤与光接入网重点实验室 上海 201900)

摘要:为实现工程系统中对振动信号的检测,提出了一种基于衍射光栅的光纤布拉格光栅(FBG)振动解调系统。解调系统通过色散成像原理获取传感器反射光谱,由所设计的嵌入式单元进行信号处理,并通过专用的上位机解调软件完成数据处理与分析。将系统封装为解调仪器,能实际应用于振动信号的探测。所设计的系统波长解调范围为1 525~1 570 nm,波长重复性可达 ± 1 pm,分辨率为0.5 pm,可实现8通道复用测量,最高光谱解调速度可达10 kHz。实验结果表明,该FBG振动解调系统能够高精度测量不同频率与幅度的振动信号,最小可探测应变约为 $0.319 \mu\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$,在结构安全监测等领域具有重要的应用前景。

关键词:光纤布拉格光栅;振动传感;光谱检测法;光纤传感

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.2

Research and application of high-resolution fiber Bragg grating vibration demodulation system

Wei Heming Che Jiawei Hou Linsong Liu Yunqi Pang Fufei Wang Tingyun

(Key Laboratory of Special Optical Fiber and Optical Access Network, Shanghai University, Shanghai 201900, China)

Abstract: To realize the detection of vibration signals in engineering systems, a fiber Bragg grating (FBG) vibration demodulation system based on diffraction grating is proposed. The demodulation system acquires the sensor reflection spectrum through the dispersion imaging principle, and the signal processing is carried out by the designed embedded unit, while the data processing and analysis are completed by the special upper computer demodulation software. The system is packaged as a demodulation instrument, which can be practically applied to the detection of vibration signal. The designed sensing system has a wavelength demodulation range from 1 525 to 1 570 nm, a wavelength repeatability of ± 1 pm, a resolution of 0.5 pm, 8-channel multiplexing with a maximum spectral demodulation speed of 10 kHz. The experimental results show that the proposed FBG vibration sensing system can be used for high-accuracy measurements of vibration signals of different frequencies and amplitudes with a minimum detectable strain of about $0.319 \mu\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$, which has potential applications in the field of structural health monitoring.

Keywords: fiber Bragg grating; vibration sensing; spectroscopic method; optical fiber sensing

0 引言

振动测量技术通常用于工程系统的故障预警和诊断,对于监测并保持现代工程系统的健康状态至关重要^[1-4]。对于性能良好的机械构件而言,其振动信号平稳,固有振动频率主要集中在0~10 kHz^[5]。若设备在服役过程中发生故障,其固有振动信号将会发生改变,因此,有必要对其振动信号进行检测并实现对故障的诊断,以避免事故的

发生。目前,对这类振动信号检测的传感技术主要有电学类振动传感器和光纤振动传感器。相比较而言,光纤传感器体积小、重量轻、抗电磁干扰,具有灵敏度高、稳定性好、耐腐蚀、易于嵌入到被测结构中等优点,能够实现被测结构的全寿命测量^[6-8]。

目前基于光纤的振动传感技术主要有干涉型振动传感器、强度型振动传感器以及光纤光栅型(FBG)振动传感器^[9]。光纤干涉型振动传感器主要基于相位解调,具有高

收稿日期:2022-09-22

* 基金项目:国家自然科学基金(62005153)、上海市自然科学基金(20ZR1420300)项目资助

分辨率和精度,但难以实现传感器复用且系统相对复杂^[10]。光纤强度型振动传感器具有结构简单、成本低、带宽大等优点,但测量结果易受光纤弯曲和功率波动等因素的影响^[11]。相比较而言,光纤光栅型振动传感器是一种基于波长解调的传感器件,具有波长复用能力,能够实现分布式/准分布式测量,对光强波动和光纤弯曲损耗等不敏感,能响应高频动态应变,在光纤振动传感领域具有广泛的应用^[12-15]。目前,FBG振动传感器的解调技术主要分为扫描法、干涉法和光谱法^[16-18]。基于可调谐激光器法^[19-20]、法布里-珀罗滤波器法^[21]和声光可调滤波器法^[16]的扫描方法,受到低采样率的限制,且难以实现多路复用。干涉解调法精度高,国内外基于此开展了大量的研究,Qiao等^[18]采用基于光折变晶体的双波混频(two-wave mixing, TWM)干涉仪,实现对FBG的动态解调,该解调技术具有自适应性和可复用性,光谱分辨率可达0.3 pm。Wei等^[22]采用非平衡迈克尔逊干涉仪(MI)作为FBG的解调方案,提出了一种基于反射型光放大器的自适应光纤激光FBG动态应变传感系统,能自适应环境的低频扰动,可探测频率为兆赫兹量级的超声信号。尽管干涉法在解调速率和精度方面具有明显的优势,但干涉仪可测量相位变化范围小,很难用于大幅度振动信号测量。光谱解调法主要利用衍射光栅或棱镜等光学器件实现FBG的光谱解调,Feng等^[17]提出了一种基于衍射光栅的高速解调技术,对光学模型进行了仿真,并对结构参数进行了优化,该解调设备的波长分辨率为1 pm,解调速度约为2 kHz。相比较而言,虽然光谱解调法难以实现高频振动信号的测量,但其解调速率通过硬件改进仍可达到数十千赫兹,且光谱法解调精度较高,同时具备探测微弱和大幅度振动信号的能力,能够满足绝大多数工程系统中对振动信号的测量需求。

本文提出一种基于衍射光栅色散成像原理的光谱法解调方案,结合嵌入式单元及上位机解调软件,搭建了一套8通道高速高精度光纤光栅振动传感系统。系统具有±1 pm的波长重复性,分辨率可达0.5 pm,最高解调速度达10 kHz。

1 高速光纤光栅振动解调系统

1.1 FBG振动传感原理

FBG的结构与工作原理如图1所示,当宽谱光源光传输经过FBG时,部分光被反射回,其反射光中心波长可表示为^[23]:

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

式中:布拉格波长 λ_B 是FBG反射光的中心波长; n_{eff} 是纤芯的有效折射率; Δ 是光栅周期。

从式(1)可以看出,反射光的中心波长 λ_B 与纤芯的有效折射率 n_{eff} 和周期 Δ 呈现线性关系。当FBG所处环境的温度、应变发生变化时,会使得光栅的周期或纤芯折射率发生变化,反射光的中心波长将相应改变^[3],可表

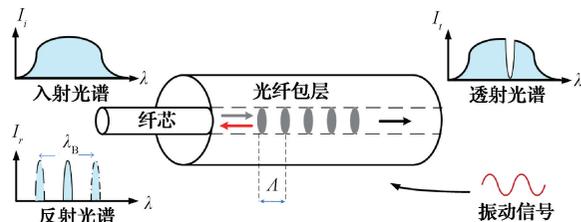


图1 FBG振动传感原理

示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B(f)}{\lambda_B} = (1 - \rho_e)\Delta\epsilon(f) + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B(f)$ 是FBG中心波长偏移量; $\Delta\epsilon$ 为轴向应变变量; ΔT 是温度增量; ρ_e 是光纤弹性光学系数; α 和 ζ 分别是光纤的热光系数和热膨胀系数。振动信号可以通过FBG的中心波长偏移进行编码,使用FBG解调仪器可以记录FBG中心波长并解调振动信号。

1.2 衍射光栅的色散原理

常见的光纤光栅传感系统通常包括光源、光纤光栅传感器、解调模型和解调软件。本文的解调模型是由光纤准直器、衍射光栅、反射镜以及探测器阵列组成的光学成像系统。如图2所示,来自FBG的反射光经过准直后到达衍射光栅1,根据衍射光栅的色散原理,不同波长的光将被衍射出一个与波长相关的角度,该角度信息为:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d} - \sin i\right) \quad (3)$$

式中:所有波长光束的入射角为 i ; λ 为入射波长; d 为光栅常数; θ 为衍射角。通过调整衍射光栅2的位置以捕捉所有具有适当入射角度的光束,来自衍射光栅2的不同波长的光束被反射镜聚焦在光电探测阵列的各像素点上。各像素点输出电压的强度变化将由专用电路系统读取,读取到的数据通过上位机软件的波长定位算法可以解调出FBG的中心波长。

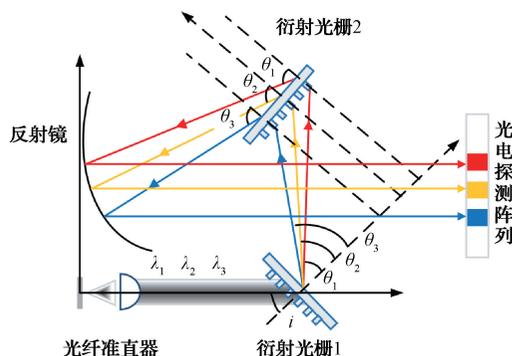


图2 衍射光栅的色散原理

由外部信号驱动的探测器阵列将从每个像素点(光电二极管)输出一个电信号,通过控制该驱动信号的频率即可改变光谱数据输出速率。此外,探测器的信号增益是由片上电荷放大器设置的,该电荷放大器在设定的曝光时间内整合光电二极管的电流,即使在低光照度下,延长曝

光时间也能将输出信号提高到易于处理的水平。本文设计选用型号为 G11620-256DF 的 InGaAs 光谱采集模块 (I-MON 256),其光谱探测范围为 1 525~1 570 nm,像素点个数为 256,最高响应速度可达 30 kHz。

1.3 嵌入式单元设计

嵌入式单元主要实现光电探测阵列驱动、数据采集、数据预处理及数据发送 4 方面功能。采用 STM32 系列芯片作为嵌入式单元的主控芯片,设计并焊接最小系统电路板,其与光电探测阵列集成化结构如图 3 所示。嵌入式单元输出两路脉冲宽度调制(PWM)信号作为探测器阵列的驱动脉冲,分别表示为 CLK 和 RESET,对应波形如图 4 所示。其中,CLK 配置为占空比 50%、高电平为 5 V 的周期信号,以作为探测器阵列输出光电信号的驱动脉冲;RESET 信号作为复位脉冲,用于初始化在 CMOS 芯片中电荷放大器的反馈电容,曝光时间由该周期脉冲的高电平决定。InGaAs 探测器输出的光电转换信号由嵌入式单元的模数转换模块(ADC)按照 CLK 时钟频率高速采集,并将采集到的数据经过预处理后通过 USB 接口实时发送给上位机的解调软件。

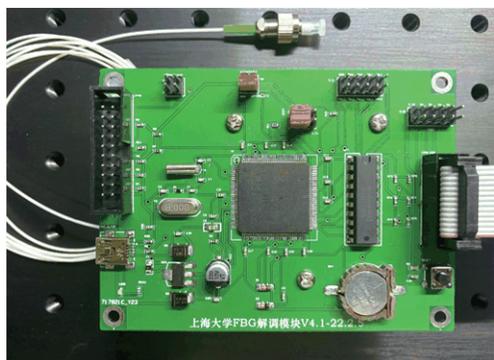


图 3 嵌入式单元与光电转换模块集成化结构

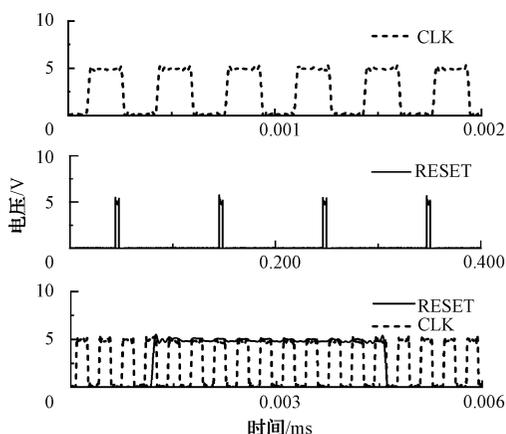


图 4 探测器阵列驱动脉冲

1.4 中心波长定位原理

对基于光谱法的解调系统而言,FBG 的反射光谱通

过光学系统成像于探测器阵列的像元点上。实际探测到的光谱信号是对连续光谱做离散抽样的结果,因此,不能将探测到的峰值直接作为 FBG 的中心波长。而 FBG 反射光谱的强度分布可近似为高斯分布^[24],其表达式为:

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

式中: I_0 为反射光谱强度的幅值; λ_c 为反射光谱中心波长; $\Delta\lambda$ 为反射谱的 3 dB 带宽。对读取到的光谱数据进行高斯曲线拟合,确定 FBG 的中心波长如图 5 所示。图 5 中,黑色点线显示了探测器阵列输出的典型 FBG 反射谱数据,红色曲线为对其进行高斯拟合的结果,将拟合得到的中心位置带入到像素点与波长对应关系中,即可得到 FBG 反射谱的中心波长。其中,探测器阵列像素点与波长的关系可以通过可调谐激光器标定得到。

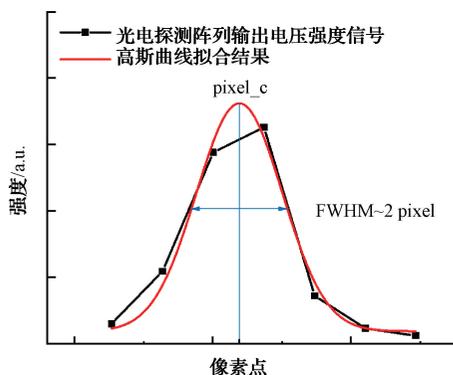


图 5 中心波长定位原理

1.5 解调软件设计

使用 LabVIEW 开发平台搭建了配套的上位机解调软件,解调软件的设计流程如图 6 所示。解调软件具备通信功能,在软件界面设置好解调速率后,通过 VISA 写入初始化指令给嵌入式单元,嵌入式单元相应的配置不同速率的光电转换驱动信号(CLK、RESET),以实现上位机控制解调速率的功能。上位机也可以通过 VISA 读取嵌入式单元采集到的光谱数据,并在主界面显示 FBG 反射光谱图像。随后,在上位机软件中对光谱进行阈值分峰,将多峰信号划分成多个单峰信号,以此来识别 FBG 传感器的接入个数。在程序中截取每个单峰数组,依次获取峰值索引坐标,结合波长数组进行高斯拟合,可以得到各 FBG 的中心波长数据。此外,上位机可以实时获取系统时钟,在波形图表中显示 FBG 中心波长随时间变化的情况,拟合得到的各 FBG 中心波长数据可以存入文本文件中。

上位机解调软件的主界面如图 7 所示,当前软件界面中显示将 10 个 FBG 传感器接入解调系统后的反射光谱图像,光谱下方表格中实时显示各 FBG 中心波长数据。系统设置区域可通过下拉菜单和按钮进行通信设备、解调速率、拟合方法的选择。数据存储区域可以设置文本保存

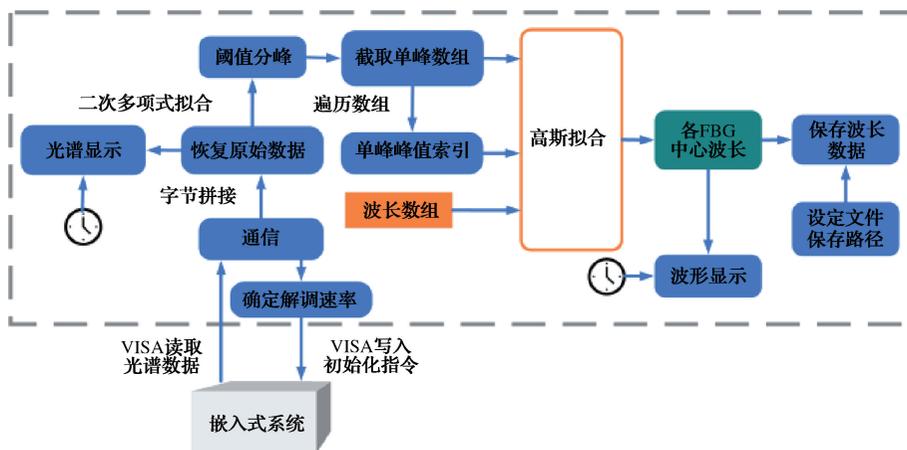


图6 上位机软件设计流程

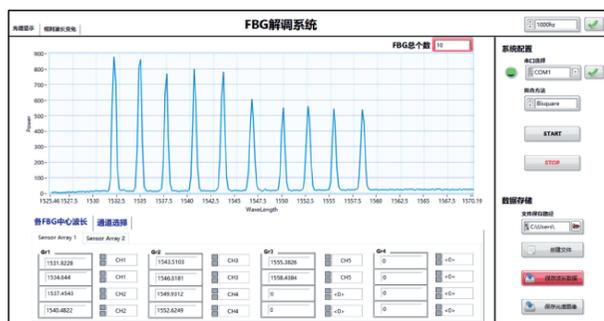


图7 软件界面



图9 振动传感系统集成

路径,将接入解调系统的各FBG中心波长实时存入路径下的文本文档中。

1.6 系统集成

如图8所示,搭建了基于衍射光栅色散成像原理的光纤光栅振动传感系统。将宽谱光源模块、环形器、耦合器、光开关、光电转换模块及嵌入式单元封装成便携化的解调仪器,光纤光栅振动解调仪实物如图9所示。

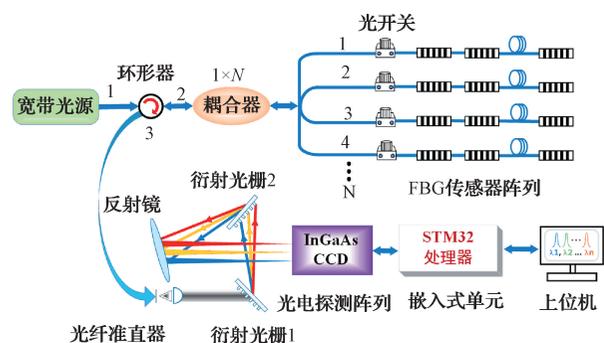


图8 振动传感系统集成

2 实验分析与讨论

2.1 系统稳定性测试

在实验室条件下(24℃),设置解调速率为2 Hz,对

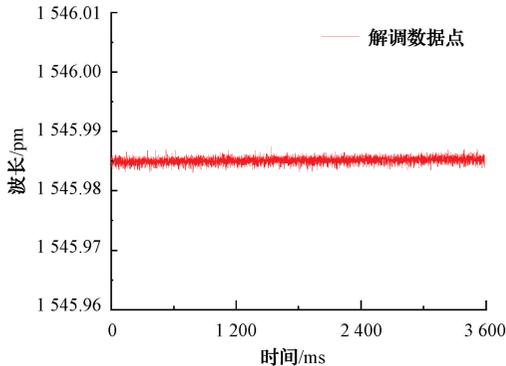
FBG解调系统进行稳定性测试。在准静态情况下,系统解调自由状态下FBG传感器的中心波长在1 h内的变化情况,如图10(a)所示,中心波长较为稳定。对获取的测量数据进一步统计分析,图10(b)为中心波长分布直方图,可以看出,FBG中心波长集中在 $(1\ 545.985 \pm 0.001)$ nm范围内,均方差约为0.5 pm。经过多次测试,所搭建的FBG解调系统的稳定性为 ± 1 pm,分辨率为0.5 pm。

2.2 振动测试

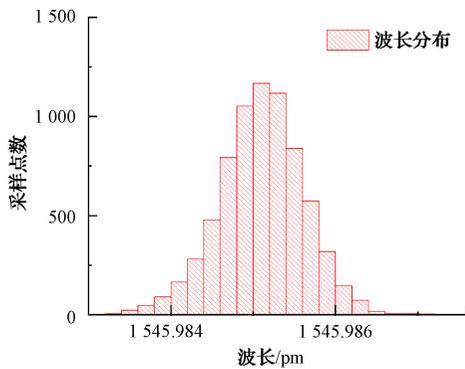
如图11所示,搭建了一套FBG振动测量系统,在振动测量的演示中,使用压电陶瓷(PZT)对FBG传感器施加动态应变。将FBG用紫外胶直接粘贴于PZT的表面,PZT由信号发生器输出的正弦电压驱动,通过改变信号发生器输出正弦信号的频率,从而控制PZT施加在FBG传感器上动态应变的频率。

在上位机软件中设置解调系统的解调速率为10 kHz,对不同频率的振动信号进行实时采集和数据存储分析。当信号发生器输出电压为10 V,频率分别为500 Hz、1.2、4 kHz的信号时,FBG中心波长变化的时域信号如图12所示,从图12可以看到,4组时域信号呈现不同频率的正弦波动(波形的失真仅是由于解调速率的限制)。

对采集到的4组时域信号进行快速傅里叶变换(FFT)可获得振动信号的频率信息,将解调得到的信号频率与实际输入的信号频率汇对比如表1所示。由表1可



(a) 1 h内FBG中心波长解调结果



(b) 解调波长分布直方图

图10 系统稳定性测试

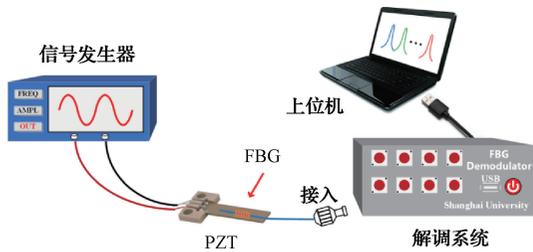


图11 振动测量

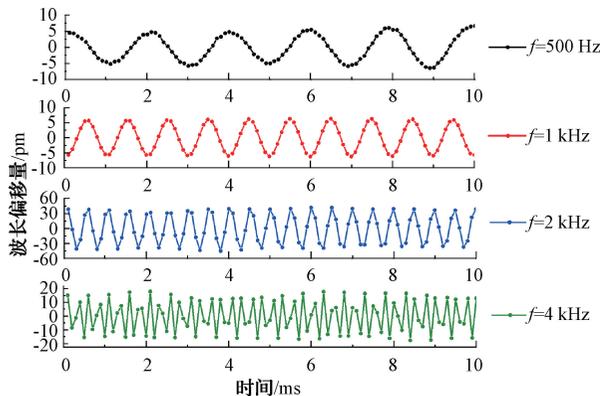


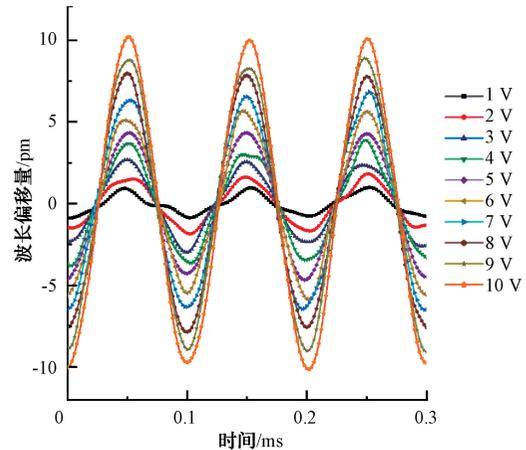
图12 不同频率激励下FBG时域响应信号

知,所搭建的振动测量系统能够准确测得振动信号的振动频率。

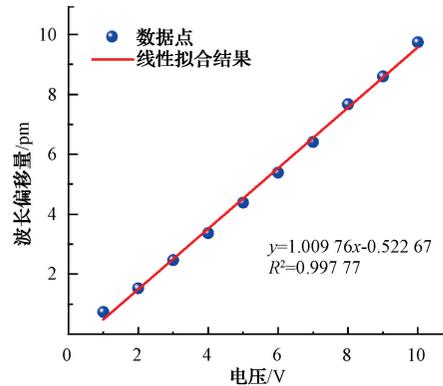
表1 振动信号频率分析 (Hz)

| 输入信号频率 | 500 | 1 000 | 2 000 | 4 000 |
|--------|---------|---------|-----------|-----------|
| 解调信号频率 | 499.851 | 999.802 | 1 999.852 | 3 999.549 |

此外,在同一频率下,通过改变信号发生器输出正弦信号的电压幅值可以控制施加在FBG传感器上振动信号的强弱。设置信号发生器输出10 Hz的正弦激励信号,调节其电压幅值从1 V变化至10 V,FBG中心波长偏移情况如图13(a)所示。记录每组响应曲线峰值的平均值,其与信号发生器输出电压的关系如图13(b)所示,可以看出FBG中心波长最大偏移量与信号发生器输出信号幅值间具有良好线性关系($R^2=0.99777$)。结果表明,所设计的解调系统可以准确采集到不同频率和强度的振动信号。



(a) 不同强度激励下FBG响应曲线



(b) 中心波长最大偏移量与电压幅值间关系

图13 解调系统不同幅度振动响应测试

在此基础上,对振动传感系统的最小可探测应变进行了研究。图14所示为PZT振动频率为2 kHz时解调得到的频率信息,频率分辨率为 $\Delta f=1$,由图14可知,传感系统的信噪比(SNR)达到47.45 dB。同时,FBG传感器所受应变可以通过 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 的比例关系由FBG中心波长偏移量进行转换,由图12可知,振动频率为2 kHz时,FBG所受应变约为 $75 \mu\epsilon$,由此估算得到系统最小可探测应变量为 $0.319 \mu\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 。

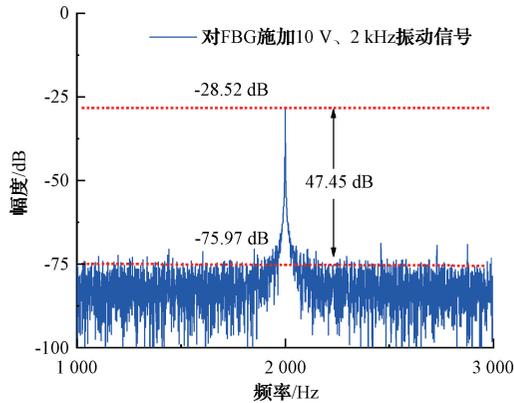


图 14 PZT 振动频率为 2 kHz 时采集信号的频谱分析

2.3 悬臂梁振动测试

将所搭建的 FBG 解调系统用于悬臂梁低频振动信号的测量。如图 15 所示,采用 iniconel625 合金材料模拟悬臂梁结构,将 3 个不同中心波长的 FBG 用紫外胶固化在悬臂梁结构上。实验中,使用铁锤敲击其自由端,由于其结构一定,必然以一定的固有频率进行上下振动,振动幅度与敲击的冲击力有关。由于悬臂梁上下振动,使贴附在其表面的 FBG 传感器受到一定的拉伸应变和压缩应变,并以结构的固有频率进行交替变化。

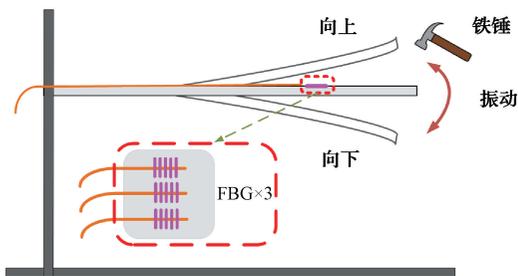


图 15 悬臂梁结构示意图

将三路 FBG 传感器同时接入到解调系统中,并在上位机软件中检测中心波长的变化情况。图 16(a)~(c)所示为三路 FBG 传感器采集到的悬臂梁振动信号,3 组信号在振幅突然变化后均呈现阻尼衰减趋势,这也实际符合悬臂梁振动理论^[26-27]。对 FBG 采集到的振动信号进行 FFT 分析,其结果如图 16(d)所示,从图 16(d)可以看出,FBG 采集到的 3 组振动信号的频率均在 28 Hz 左右,结果表明,解调系统能够准确采集到悬臂梁在受到敲击后所产生的振动信号。

3 结论

本文基于衍射光栅色散成像原理搭建了一套光纤光栅振动传感系统。为实现对振动信号的高速率、高精度测量,采用了基于 ARM 内核的嵌入式硬件平台,设计了高速采集模块及通信模块;考虑到系统电磁干扰及环境的扰动,设计了脉冲信号触发调制电路、信号预处理算法以及

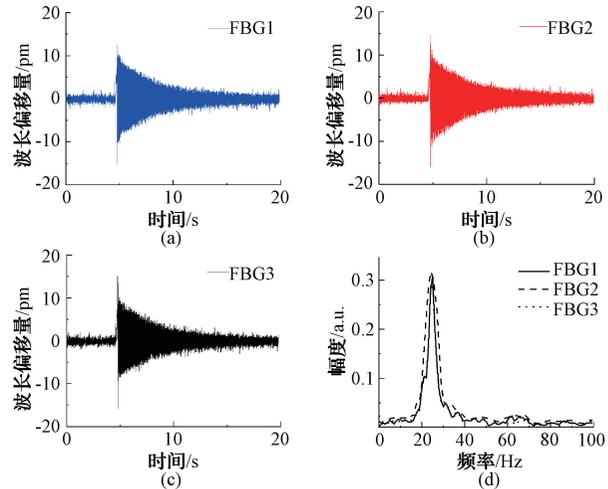


图 16 悬臂梁振动测试

高斯拟合等算法模块,解决了光谱峰值波长解调的不稳定性。针对不同场景下的振动测量需求,系统可以选择不同的解调频率,最高 8 通道复用频率可至 10 kHz。经过测试,所设计的传感系统能够长期稳定工作,波长波动性小于 ± 1 pm,并具备探测极微小振动信号的能力,最小可探测应变约为 $0.319 \mu\epsilon/\text{Hz}^{1/2}$ 。意味着所设计的传感系统能够满足绝大部分工程系统中对振动信号的探测需求,在结构安全检测等领域有着重要的应用前景。

参考文献

- [1] 思悦,孔令飞,李旭阳,等. 基于振动信号的深孔钻削涡振在线检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 250-256.
- [2] 马会防,黄巍,虞磊,等. 某型航空发动机试验件的异常振动分析[J]. 振动·测试与诊断, 2019, 39(6): 1259-1263.
- [3] QIAO X G, SHAO Z H, BAO W J, et al. Fiber Bragg grating sensors for the oil industry [J]. Sensors, 2017, 17(3): 429.
- [4] 曾光,段民封,倪冰雨,等. 机械臂架系统的非随机振动分析[J]. 中国机械工程, 2019, 30(10): 1142-1149.
- [5] LI T L, GUO J X, TAN Y G, et al. Recent advances and tendency in fiber Bragg grating-based vibration sensor: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20): 12074-12087.
- [6] 李开心,肖倩,贾波. 一种基于干涉型光纤振动传感器的信号处理方法[J]. 复旦学报:自然科学版, 2021, 60(2): 176-181.
- [7] LI J, WANG Y, WANG P, et al. Pattern recognition for distributed optical fiber vibration sensing: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(10): 11983-11998.

- [8] WEI H M, ZHAO X F, LI D S, et al. Corrosion monitoring of rock bolt by using a low coherent fiber-optic interferometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 67:137-142.
- [9] GARCIA Y R, CORRES J M, GOICOECHEA J. Vibration detection using optical fiber sensors [J]. *Journal of Sensors*, 2010, DOI:10.1155/2010/936487.
- [10] ZAHID M N, JIANG J, RIZVI S. Reflectometric and interferometric fiber optic sensor's principles and applications[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2019, 12(2): 215-226.
- [11] DI H T, XIN Y, JIAN J Q. Review of optical fiber sensors for deformation measurement [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2018, 168: 703-713.
- [12] 卢淑源, 赵振刚, 姚敏. 光纤 Bragg 光栅振动传感器的标定与不确定度分析[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(11): 1753-1758.
- [13] SONG H, WANG Q, LIU M, et al. A novel fiber Bragg grating vibration sensor based on orthogonal flexure hinge structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(10): 5277-5285.
- [14] 魏莉, 刘壮, 李恒春, 等. 基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 90-98.
- [15] WEI L, YU L, WANG J, et al. An FBG-sensing two-dimensional vibration sensor based on multi-axis flexure hinge [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(10): 3698-3710.
- [16] XU M G, GEIGER H, DAKIN J P. Modeling and performance analysis of a fiber Bragg grating interrogation system using an acousto-optic tunable filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(3): 391-396.
- [17] FENG Z W, ZHANG L. Demodulation technique based on diffraction optical element for fiber Bragg grating sensing system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7853: 78530I.
- [18] QIAO Y, ZHOU Y, KRISHNASWAMY S. Adaptive demodulation of dynamic signals from fiber Bragg gratings using two-wave mixing technology[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(21): 5132-5142.
- [19] 吕沛桐, 宋凯文, 孙铭阳, 等. 近红外波长扫描激光高精度 FBG 解调系统[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(4): 20210230.
- [20] FOMITCHOV P A, KRISHNASWAMY S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(4): 956-963.
- [21] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(16): 1370-1372.
- [22] WEI H M, TAO C Y, ZHU Y N, et al. Fiber Bragg grating dynamic strain sensor using an adaptive reflective semiconductor optical amplifier source[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2752-2759.
- [23] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [24] 张天地, 贺锋涛, 周强, 等. 光纤光栅解调系统的寻峰算法研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(1): 36-39.
- [25] WU G, HU X, LIU X, et al. Fabrication of glass diaphragm based fiber-optic microphone for sensitive detection of airborne and waterborne sounds [J]. *Sensors*, 2022, 22(6): 2218.
- [26] KHAN M M, PANWAR N, DHAWAN R. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 205: 79-85.
- [27] WANG B K, SUN W L, WANG H W, et al. Location determination of impact on the wind turbine blade surface based on the FBG and the time difference[J]. *Sensors*, 2021, 21(1): 232.

作者简介

魏鹤鸣, 博士, 副教授, 主要研究方向微纳光子器件、微纳 3D 打印、光纤传感系统及结构安全监测等。

E-mail: hmwei@shu.edu.cn

车嘉炜, 硕士研究生, 主要研究方向为仪器与测试技术、光学传感等。