

基于分布布拉格反射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器

鲁文高^{1,2} 孙琪真^{1,2} 沃江海^{1,2} 王 贺^{1,2} 刘德明^{1,2}

(¹ 华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074
² 华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 设计并验证了一种基于分布布拉格反射(DBR)光纤激光器的高灵敏度微振动传感器。该传感器结构采用常见的质量块-弹簧系统,质量块由于重力作用对 DBR 激光器的谐振腔产生侧向压力。当测试平台发生振动时,谐振腔所受到的侧向压力发生变化,导致激光器输出的两正交偏振模式产生的拍频信号改变。通过高速光电探测器和多通道数据采集平台对拍频信号进行采集,使用 LabVIEW 编程对采集信号进行处理,实现了对振动加速度信号的实时监测。理论分析与实验结果表明,该传感器具有极高的加速度灵敏度,对于单位重力加速度 g 其灵敏度达吉赫兹量级,能检测到微弱的振动信号。相较于传统光纤振动传感器而言,该传感器将光谱分析转化为频谱分析,使信号的采集与解调更加简单,且获得了更高的灵敏度。进一步分析表明,此结构在微重力环境下进行测量也是可行的,因此,在航空飞行器关键部件的微振动测量中有较大的应用潜力。

关键词 传感器;振动传感器;高灵敏度;分布布拉格反射光纤激光器;拍频

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0728006

High Sensitivity Micro-Vibration Sensor Based on Distributed Bragg Reflector Fiber Laser

Lu Wengao^{1,2} Sun Qizhen^{1,2} Wo Jianghai^{1,2} Wang He^{1,2} Liu Deming^{1,2}

¹ School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
² National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A high sensitivity micro-vibration sensor based on distributed Bragg reflector (DBR) fiber laser is designed and demonstrated. The sensor structure uses common mass-spring system. Due to gravity, the DBR laser cavity is subjected to lateral pressure caused by the mass. Because the lateral pressure that the laser cavity suffers changes when the testing platform is vibrating, the beat frequency generated by two orthogonally polarized modes of the laser output changes. By the high-speed photodetector and multi-channel data acquisition platform, the beat frequency signal is collected. The signal can be dealt with through the LabVIEW programming and the real-time monitoring of the vibration acceleration signal is achieved. Theoretical analysis and experimental results show that, the sensor has a very high acceleration sensitivity, which is up to gigahertz for an acceleration of gravity g , and can detect very weak vibration signal. Compared with the traditional optical fiber vibration sensors, this sensor convert optical spectrum analysis to frequency spectrum analysis, which makes the signal acquisition and demodulation easier, and obtains a higher sensitivity. Further analysis shows that the measurement of this structure in the micro-gravity environment is also feasible. Therefore, it has great potential in the micro-vibration measurements of key components of aerospace craft.

Key words sensors; vibration sensor; high sensitivity; distributed Bragg reflector fiber laser; beat frequency

OCIS codes 280.3420; 280.4788; 060.2370

收稿日期: 2014-01-06; 收到修改稿日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61275004,61290315)、国防科工局民用航天预研基金、华中科技大学国防自主创新基金

作者简介: 鲁文高(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: luwg@hust.edu.cn

导师简介: 孙琪真(1982—),女,博士,副教授,主要从事光纤传感、光纤激光器和传感器网络技术等方面的研究。

E-mail: qzsun@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

近年来,随着科技和生产的发展,微振动测量在建筑结构、工程机械、飞机导弹、航空平台等方面的需求越来越高^[1]。光纤振动传感器由于其高灵敏度、抗电磁干扰、易于网络化、适于远距离传输等显著优点而受到了广泛的关注和研究^[2]。传统的光纤振动传感器,诸如波长调制型^[3-4]、相位调制型^[5-7]、强度调制型^[8]等,大多利用光谱仪、光纤光栅解调仪或其他光器件研制的解调设备进行光谱信号的解调。然而结构复杂、解调繁琐等因素长期制约着光纤振动传感器的发展。

本文设计并验证了一种新颖的基于分布布拉格反射(DBR)光纤激光器的高灵敏度微振动传感器,激光器的谐振腔作为传感元件,将测试平台的振动加速度信号转化为激光器输出偏振光的拍频信号,使传感解调更为容易,通过实验验证获得了很高的灵敏度。由于传感部分采用全光设计,抗电磁干扰

性良好,适合在复杂环境下工作,并且,传感器灵敏度与外界重力环境无关,在微重力环境下的测量也是可行的,因此,适用于对航空平台及航空飞行器关键部件的微振动测量。

2 实验原理

传感系统总体结构如图 1 所示。其中,传感器由活动质量块与固定在金属圆筒顶部的弹簧连接,构成质量块-弹簧系统;传感光纤(DBR 激光器谐振腔)采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)封装,固定在底座上,通过底座上的开槽引出,接入外部光路。图 1 中,LD 为半导体激光器,WDM 为 980 nm/1550 nm 波分复用器,ISO 为隔离器,EDF 为掺铒光纤,FBG 为布拉格光栅,PC 为偏振控制器,polarizer 为起偏器,1:1 coupler 为分光比为 1:1 的耦合器,OSA 为光谱分析仪,PD 为光电探测器,data process system 为美国 NI 公司的 PXI 数据采集平台。

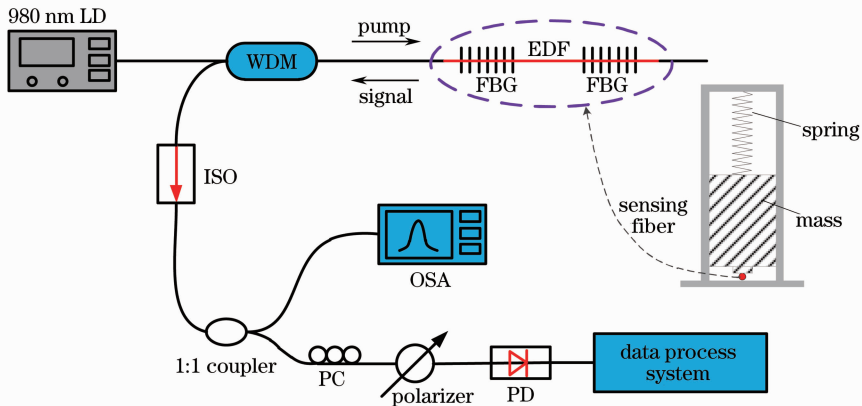


图 1 传感系统总体结构图

Fig. 1 Schematic diagram of sensing system

激光器工作原理如下:980 nm 的 LD 输出的光经过 WDM 耦合进入激光器的谐振腔后,激发 EDF 中的铒离子产生受激辐射,经过两光栅滤波并来回反射振荡放大后,最终后向输出的激光通过 OSA 和数据处理系统来分别监测光谱和采集频谱信号。其中,ISO 用于控制光路方向以确保输出激光向一个方向传输,PC 和 polarizer 用于控制输出激光的偏振态以获得最大强度的拍频输出。实验中,980 nm 抽运激光器采用 Oclaro 公司的半导体激光器,其最大输出光功率为 460 mW,OSA 为日本横河公司的 AQ6370C-20 型光谱仪,其分辨率为 0.02 nm。

短腔 DBR 光纤激光器是由一对波长匹配、间隔一定距离的 FBG 刻写于增益光纤上获得,使得两个正交的偏振模式能够在一个谐振腔内同时起振并输

出激光^[9]。为了实现稳定的单纵模输出,激光谐振腔腔长要尽可能短,且作为反射腔面的 FBG 的反射率尽可能高,因此采用直接在有源光纤上刻写一对光栅的方法制备,获得长度仅为 1~5 cm 的激光谐振短腔。采用美国 Verrillon 公司生产的 EDF-1-125 型 EDF 刻写光栅,其吸收系数约为 6 dB/m。为了提高 EDF 的光敏性,需要对该光纤先进行载氢处理^[10-11],然后采用相位掩模板结合扫描紫外曝光的方法^[12],制作反射率达到 23 dB(99.5%)的光纤光栅,谐振腔的等效腔长为 12.98 mm,实验中激光器抽运功率约为 200 mW。

设光纤内两个偏振方向分别为 x 方向和 y 方向,其对应的偏振模式的频率分别为 ν_x 和 ν_y ,则其对应的输出波长为

$$\lambda_x = 2n_x\Lambda, \quad (1)$$

$$\lambda_y = 2n_y\Lambda, \quad (2)$$

式中 n_x 和 n_y 分别是光纤内沿 x 方向和 y 方向的折射率, Λ 为光栅周期。

由于 n_x 和 n_y 非常接近, 二者差别很小, 一般在 $10^{-8} \sim 10^{-5}$ 量级, 因此这里采取近似计算, 令 $n_x \approx n_y \approx n_0$, n_0 为光纤平均折射率, 则两偏振模式合成的拍频为

$$\Delta\nu = \nu_x - \nu_y = \frac{c}{\lambda_x} - \frac{c}{\lambda_y} = \frac{c(n_y - n_x)}{2n_x n_y \Lambda} \approx \frac{c}{n_0 \lambda_0} B, \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速, B 为光纤的双折射系数, $\lambda_0 = 2n_0\Lambda$ 为光纤光栅的布拉格波长。

当光纤受到侧向压力时, 双折射系数变化可表示为^[13]

$$\Delta B = 2n_0^3 (p_{11} - p_{12})(1 + \nu_p) \cdot \frac{f \cos(2\theta)}{\pi r E}, \quad (4)$$

式中 p_{11} 和 p_{12} 为光纤材料的光弹性系数, ν_p 为泊松比, f 为线力(单位长度受力), θ 为侧向压力作用方向与光纤双折射轴的夹角, r 为光纤的半径, E 为光纤材料的杨氏模量。

设光纤初始固有双折射系数为 B_0 , 则当光纤受到侧向压力时, 两偏振模式合成的拍频

$$\Delta\nu = \frac{c}{n_0 \lambda_0} (B_0 + \Delta B) = \frac{c}{n_0 \lambda_0} B_0 + \frac{c}{n_0 \lambda_0} \Delta B. \quad (5)$$

传感器固定在测量平台上, 当外界发生振动时, 引起活动质量块产生垂直方向的振动, 使光纤上承受的侧向压力发生变化, 导致光纤双折射系数改变, 两正交偏振模式合成的拍频信号也随之发生改变。

由于光纤两偏振方向的折射率非常接近, 因此温度变化导致的两偏振激光波长漂移近似相等。理论分析表明, DBR 光纤激光器输出拍频对温度的灵敏度仅为 $12.1 \text{ kHz}/^\circ\text{C}$, 因此一般情况下 DBR 光纤激光加速度计的温度交叉敏感问题可以忽略。

振动加速度传感器的力学模型可以简化为一个单自由度的有阻尼的质量块-弹簧系统^[14], 如图 2 所示, M 为质量块的质量, k 为弹簧的劲度系数, C 为系统的阻尼系数, a 为平台振动加速度。

由振动理论分析可知, 在 $\omega/\omega_0 \ll 1$ 时(ω_0 为系统的固有频率, ω 为平台振动频率), 质量块作用于光纤上的压力表示为

$$F = F_0 + Ma, \quad (6)$$

式中 F_0 为质量块保持平衡状态时作用于光纤上的压力。

由(3)~(6)式可得, 拍频与振动加速度的关系

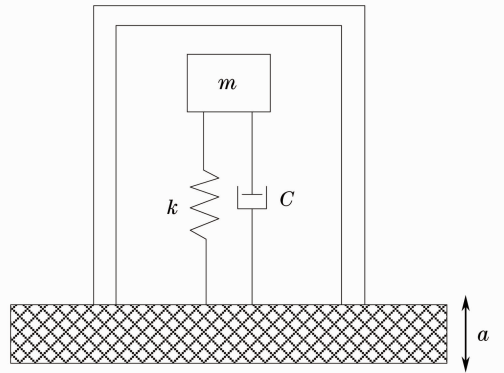


图 2 振动加速度传感器的力学模型

Fig. 2 Mechanical model of vibration acceleration sensor

式为

$$\Delta\nu = \frac{c}{n_0 \lambda_0} B_0 + \frac{2cn_0^2 (p_{11} - p_{12})(1 + \nu_p) \cos(2\theta)}{\lambda_0 l \pi r E} \cdot (F_0 + Ma), \quad (7)$$

式中 l 为光纤上受力部分的长度, 除参量 a 之外, 其余均为常数。

由(7)式知拍频信号与振动加速度呈线性关系, 得到传感器的灵敏度表达式为

$$S = \frac{d(\Delta\nu)}{da} = \frac{2cn_0^2 (p_{11} - p_{12})(1 + \nu_p) \cos(2\theta)}{\lambda_0 l \pi r E} \cdot Ma. \quad (8)$$

由(8)式可知, 灵敏度取决于质量块的大小 M 、作用于光纤上的长度 l 与角度 θ 及 DBR 激光器自身的特性(包括光纤折射率 n_0 、杨氏模量 E 、弹光系数 p_{11} 、 p_{12} 等参数)。实验中传感器的相关参数取值如下^[15]: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n_0 = 1.451$, $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$, $p_{11} \approx 0.121$, $p_{12} \approx 0.270$, $\nu_p \approx 0.17$, $E = 7.2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $r = 62.5 \text{ }\mu\text{m}$, $l = 25 \text{ mm}$, $M = 2 \text{ kg}$, 取 $\theta = 0^\circ$, 并取重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。由此得到传感器理论灵敏度:

$$S_m = 0.804 \times 10^9 \text{ Hz}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) = 7.88/\text{g} \text{ GHz}. \quad (9)$$

从(8)式可以看到, 当传感器结构选定时, 传感器灵敏度与侧向压力作用方向和光纤偏振轴的夹角 θ 相关。当 θ 为 0° 或 90° (即压力施加方向平行于某光纤偏振轴) 时, 传感器的灵敏度达到最大值 $7.88/\text{g} \text{ GHz}$ 。当 θ 为 45° 时, 其灵敏度为 0, 也就是说此时激光器将不受侧向压力的影响。因此, 灵敏度大小会受到外界压力作用方向的影响。

3 实验结果与分析

搭建好实验光路, 将所设计的振动传感器和标

准高精度加速度计(型号为 PCB 393B12,最小可测加速度为 $10^{-6} g$)固定于精密减振台上,如图 3 所示。

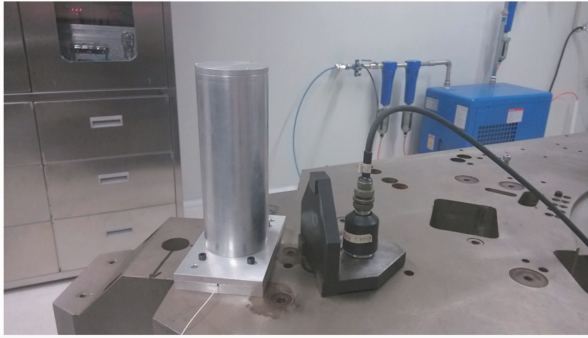


图 3 实验装置图

Fig. 3 Photograph of the experimental facility

实验中选用力锤作为激励器,并选用较软顶帽提供低频振动信号。锤击时,顶帽与振动台发生冲击接触,锤击力相当于一个半正弦形的宽频带脉冲,其幅值谱在一定频率范围内是平坦的。在 80 s 内进行了 10 次锤击实验,拍频信号通过美国 NI 公司的多通道数据采集平台(PXI)进行采集,并应用 LabVIEW 对采集信号进行相应处理,获得了传感器的拍频信号。对采集信号进行相应处理后,得到如图 4 所示结果。

图 4(a)为标准加速度计采集的加速度信号。图 4(b)蓝色部分为所设计的传感器测得的拍频信

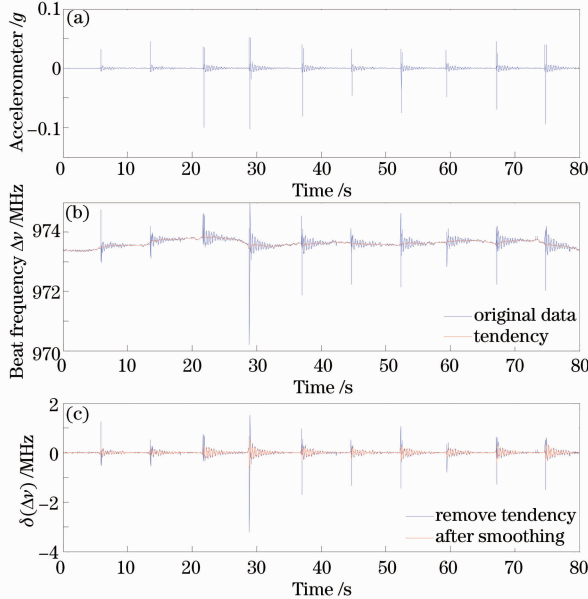


图 4 (a)标准加速度计测量结果;(b)采集的拍频信号及其趋势项;(c)消除趋势项与平滑后的拍频信号

Fig. 4 (a) Measurements of standard accelerometer; (b) beat frequency signal collected and its tendency; (c) beat frequency signal by removing tendency and after smoothing

号变化,红色部分为采用五点滑动平均处理后获得的信号长周期趋势项^[16]。可以看出,拍频信号在 973.5 MHz 附近变化,这与(7)式的结果相一致,即拍频信号存在一个常数项部分,但由于激光器的不稳定性,此常数项有一定的浮动。通过减去这一趋势项(也即常数项),得到拍频信号 $\delta(\Delta\nu)$ 随加速度变化的部分,经过处理后的拍频信号在 0 附近变化,即去除了(7)式中的直流量,只剩下与加速度呈线性变化的交流量,如图 4(c)中蓝线所示。由于本文主要针对低频振动测量,因此采用多点平均处理和平滑滤波对信号进行处理^[16],进一步消除采样数据中的高频噪声,使采样数据尽可能接近其真实值,由此得到图 4(c)红线部分。

由于锤击后,测试平台作小阻尼衰减振荡,选取其衰减时加速度的峰谷值与拍频信号的峰谷值进行对比,获得传感器的灵敏度。图 5 为选取的 29~42 s 时的两次振荡过程的标准加速度所测结果与最终处理后的拍频信号。图 6 为两次振荡过程中拍频信号峰谷值与加速度峰谷值对应的关系。

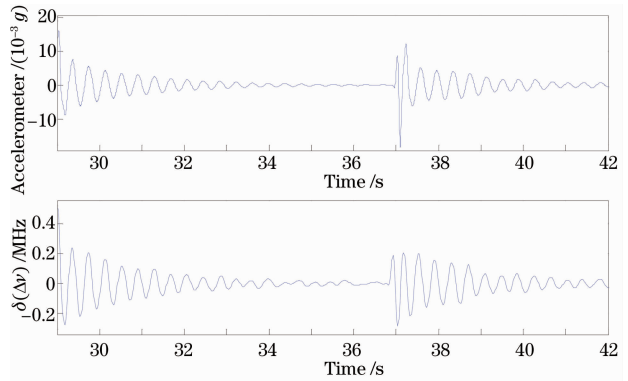


图 5 两次振荡过程中加速度及处理后的拍频信号变化。

(a)加速度;(b)拍频信号

Fig. 5 Acceleration and beat frequency signal after processing during twice oscillation. (a) Acceleration; (b) beat frequency signal

从图 5 可以看到,测试平台作小阻尼衰减振荡,频率为 2.5 Hz;从图 6 可以看到,所设计的振动传感器的拍频变化与加速度呈现线性关系,与理论预期一致,通过线性拟合,得到传感器灵敏度为 35.0/g MHz。多次实验数据拟合得到相同的结果,说明传感器对低频振动信号检测稳定性良好,可重复性强。由前面理论分析可知,该光纤传感器的理论最大灵敏度为 7.88/g GHz,实验值与理论值的差别主要来源于压力作用方向和光纤偏振轴的夹角 θ 相对于 0° 或 90° 的偏离。由于在光纤熔接、封装过程中,这一受力方向很难控制,因此导致了实际灵

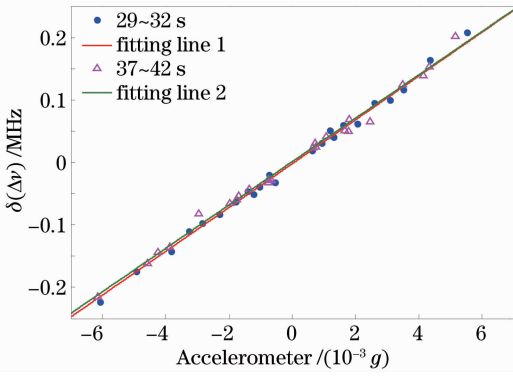


图6 拍频信号峰谷值与振动加速度的峰谷值对应关系

Fig. 6 Corresponding relationship between peak values and valley values of the beat frequency signal and vibration acceleration

灵敏度相对理论值降低很多。结合图(5)中的测量结果和图(6)得到的灵敏度,通过比对标准加速度计与所设计的传感器的测量结果,可得当测量相对误差控制在10%以下时,传感器能够识别的最小加速度为 $5.2 \times 10^{-4} g$ 。

下面针对该光纤加速度计的其他性能参数进行分析讨论:

1) 测量范围:根据传感器的工作机理,其测量范围主要受限于光纤的受力极限(超过受力极限,光纤会断裂)和探测器的响应频带。一方面,一般光纤局部能够承受的最大横向力为几十牛到几百牛不等(与光纤材料及结构有关)。取50 N为例分析,结合(6)、(7)式,实验传感器灵敏度为 $35/g$ MHz时,对应的最大加速度为 $1.5g$ 。如果采用承受力更大的特种光纤,可进一步提高测量范围。另一方面,实验所用高速光电探测器测量范围为 $15 \text{ kHz} \sim 1.1 \text{ GHz}$,实验中在不施加振动时,拍频信号在 973.5 MHz 左右变化,传感器灵敏度 $35/g$ MHz,由此得到能测量的最大加速度为 $3.6g$ 。如果采用更高响应频带的探测器以及降频技术,测量范围可进一步提高。综合两方面因素,该振动加速度测量系统的测量范围为 $0 \sim 1.5g$ 。

2) 测量精度:取决于激光器的拍频稳定性和数据处理系统的鉴频精度。现在电信号鉴频技术已经相当成熟,频率测量精度可以达到 100 Hz 甚至更小,因此本系统的测量精度主要由激光器拍频稳定性决定。实验中无振动信号施加时,激光器的拍频信号最大波动幅度为 25 kHz ,如图7所示。

传感器灵敏度为 $35/g$ MHz,因此得到传感器的理论测量精度为 $7.14 \times 10^{-4} g$ 。同时,通过与高精度定标加速度计测试结果比对得到当相对误差控

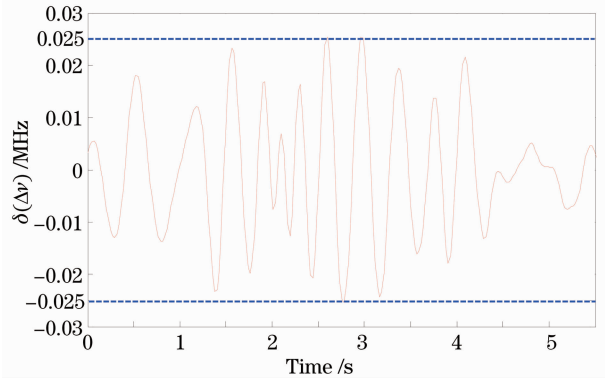


图7 无振动信号施加时记录的激光器输出拍频频移

Fig. 7 Shift of beat frequency signal without vibration

制在10%以下时,实际测量精度为 $5.2 \times 10^{-4} g$,如图6所示。为了提高光纤加速度传感器的测量精度,可通过对DBR激光器谐振腔进行精确控温以降低温度变化对激光器稳定性的影响,或采用保偏光纤结构降低激光器因随机偏振态导致的拍频不稳定性。

3) 测量频带:光纤加速度传感器采用弹簧-质量块结构,其固有频率由弹簧劲度系数和质量块大小决定。实验中,弹簧劲度系数 k 约为 $1 \times 10^4 \text{ N/m}$,质量块 $M=2 \text{ kg}$,传感器固有频率为 $f_0 = \sqrt{k/M}/2\pi = 11.3 \text{ Hz}$,因此,该传感器的响应频率在 11 Hz 以下。显然,这个频带是较低的,这主要是由质量块过重导致的。通过改进传感器结构、优化结构参数,例如选用质量更小的质量块、劲度系数更大的弹簧,可提高传感器的测量频带范围。

4) 测量时间:由于振动信号传递和传感光信号的传输时间可以忽略,测量时间主要取决于数据采集和处理的时间。整个处理流程经过测算,耗时约为 20 ms 。因此,传感器所测数据与标准加速度计结果相比,略有延迟,但这对于低频振动加速度测量的影响可以忽略。通过选用专门器件进行高速模数转换与信号采集,基于现场可编程门阵列(FPGA)芯片的高速、高精度鉴频算法设计,可显著提高测量实时性和准确性,将测量时间缩短至微秒量级。

由传感器的测量机理及(7)、(8)式表明,传感器对振动信号的测量并不依赖于地面的重力环境,只与质量块的大小有关,而与外界重力无关。只要台面振动,质量块受到惯性力作用时,传感器就能工作。因此,理论上来说,此结构在微重力环境下的测量也是可行的。

4 结 论

设计并制作了一种基于DBR光纤激光器的高

灵敏度微振动传感器,介绍了该传感器的传感原理及结构设计,并对其性能进行了实验测试。实验结果表明,该传感器对低频振动信号的灵敏度达到了 $35.0/g$ MHz,最小检测到 $5.2 \times 10^{-4} g$ 的振动加速度。并对其测量范围、测量精度、测量频带和测量时间进行了分析,提出了改进方案。此外,通过优化传感器结构,改善光纤受力方向与偏振方向的角度,可以获得更高的灵敏度。该传感器不仅适用于普通测量平台微振动信号的检测,而且,对航空平台及航空飞行器关键部件的微振动测量也有较大的应用潜力。

致谢 感谢暨南大学关柏鸥老师课题组提供了本项目研究中所用的分布布拉格反射光纤激光腔。

参 考 文 献

- 1 D Kamesh, R Pandiyan, A Ghosal. Modeling, design and analysis of low frequency platform for attenuating micro-vibration in spacecraft [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329 (17): 3431–3450.
- 2 V T Chitnis, S Kumar, D Sen. Optical fiber sensor for vibration amplitude measurement [J]. *J Lightwave Technol*, 1989, 7(4): 687–691.
- 3 N Basumallick, I Chatterjee, P Biswas, *et al.*. Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 173(1): 108–115.
- 4 Guo Yongxing, Zhang Dongsheng, Li Jieyan, *et al.*. Two dimensional fiber Bragg grating accelerometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1214001.
郭永兴, 张东生, 李杰燕, 等. 光纤光栅二维加速度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214001.
- 5 Mo Wenqin, Wu Huaming, Gao Dingshan, *et al.*. A novel accelerometer based on microring resonator [J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(9): 798–801.
- 6 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot

- cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0406006.
- 张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0406006.
- 7 Lin Qiao, Chen Liuhua, Li Shu, *et al.*. A high-resolution fiber optic accelerometer based on intracavity phase-generated carrier (PGC) modulation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(1): 015303.
 - 8 A Malki, P Lecoy, J Marty, *et al.*. Optical fiber accelerometer based on a silicon micromachined cantilever [J]. *Appl Opt*, 1995, 34(34): 8014–8018.
 - 9 Guan Baiou, Sun Xiansheng, Tan Yannan. Dual polarization fiber grating laser accelerometer [C]. *Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, International Society for Optics and Photonics, 2010. 76530Z.
 - 10 Feng Dejun, Huang Wenyu, Liu Guanxiu, *et al.*. Dual-wavelength orthogonally polarized Yb³⁺-doped double clad fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1214001.
冯德军, 黄文育, 刘冠秀, 等. 正交偏振的双波长掺镱双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1214001.
 - 11 Cao Yanjun, Xia Kegui, Yao Yao, *et al.*. Self-polarized ytterbium-doped fiber laser [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(9): 091408.
 - 12 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Li Shujuan, *et al.*. Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706009.
宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706009.
 - 13 Zhang Yang, Guan Baiou, Tam Hwa-Yaw. Characteristics of the distributed Bragg reflector fiber laser sensor for lateral force measurement [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(18): 4619–4622.
 - 14 Yang Jia, Jia Shuihai, Du Yanfen. Novel optical accelerometer based on Fresnel diffractive micro lens [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 151(2): 133–140.
 - 15 Zhang Yang, Guan Baiou. High-sensitivity distributed Bragg reflector fiber laser displacement sensor [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21(5): 280–282.
 - 16 Hu Xiao, Wang Ji. *Matlab in the Application of Vibration Signal Processing* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. 69–78.
胡晓, 王济. *Matlab在振动信号处理中的应用* [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. 69–78.

栏目编辑: 王晓瑛