

doi: 10.3788/gzxb20164510.1006005

# 具有温度补偿功能的光纤振动测量系统

姚国珍, 李永倩, 尚秋峰, 杨志

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

**摘 要:**针对光纤振动传感器受温度影响和灵敏度低的问题,设计了具有温度补偿功能的光纤振动测量系统.为减小温度对振动测量的影响,系统利用光纤布喇格光栅测量环境温度,对振动加速度值进行补偿;采用可调谐法布里-珀罗滤波器进行波长解调,并将其作为光纤反射镜,以提高传感器的灵敏度.分析并测试了振动和温度同时测量时的相互影响,结果表明,振动对光纤布喇格光栅中心波长的影响很小,通过数据处理的方法,可消除法布里-珀罗滤波器扫描对振动测量的影响;实验测得,温度变化 25℃ 时,振动加速度最大相对测量误差为 1.65%,振动测量的灵敏度为 107.70 mV/g.

**关键词:**振动测量;光纤传感器;温度影响;灵敏度分析;悬臂梁

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1006005-6

## Optical Fiber Vibration Measurement System with Temperature Compensation Function

YAO Guo-zhen, LI Yong-qian, SHANG Qiu-feng, YANG Zhi

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the optical fiber vibration acceleration sensor is influenced by temperature and its sensitivity is low, an optical fiber vibration measurement system with temperature compensation function was designed. The ambient temperature, which is used to compensate for the vibration acceleration to reduce the effect of temperature on the vibration measurement, was measured by a fiber Bragg grating. The tunable Fabry-Perot filter was used for wavelength demodulation and also as the fiber mirror to improve the sensitivity of the sensor. The mutual influences of vibration measurement and temperature measurement were analyzed and tested, the results show that the effect of the Fabry-Perot filter scanning on vibration measurement can be eliminated by data processing and the influence of vibration on temperature measurement is small. The temperature stability and sensitivity of the system were tested by experiments, which show that the maximum relative error of the vibration acceleration measurement is 1.65% under the temperature range of 25℃ and the sensitivity of vibration measurement is 107.70 mV/g.

**Key words:** Vibration measurement; Fiber optic sensors; Temperature effects; Sensitivity analysis; Cantilever beams

**OCIS Codes:** 060.2370; 120.6780; 120.7280

## 0 引言

对民用基础设施、工业设备等的振动监测可实现灾害预警、健康诊断等功能<sup>[1-2]</sup>,具有重要意义.与传统

的振动传感器相比,光纤振动传感器具有抗电磁干扰、体积小、易复用<sup>[3-4]</sup>等优点,在土木工程<sup>[5-6]</sup>、石油化工<sup>[7-8]</sup>、电力系统<sup>[9-10]</sup>等领域得到广泛应用.

按照传感原理分类,光纤振动加速度传感器主要

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(No. 13MS65)和国家自然科学基金(No. 61377088)资助

第一作者:姚国珍(1979-),男,讲师,硕士,主要研究方向为光纤传感技术. Email: ygz7943@163.com

导师:李永倩(1958-),男,教授,博士,主要研究方向为光通信与光传感. Email: liyongqian1958@163.com

收稿日期:2016-05-10;录用日期:2016-07-25

http://www.photon.ac.cn

有波长调制型<sup>[11-12]</sup>、相位调制型<sup>[10,13]</sup>、偏振态调制型<sup>[14]</sup>和强度调制型<sup>[15-16]</sup>四种类型。波长调制型传感器噪声影响小,相位和偏振态调制型传感器的解调灵敏度较高,强度调制型传感器解调原理比较简单。这些传感器存在封装结构复杂和传感器特性易受温度影响的问题。

文献[17]报道了一种基于强度调制的光纤振动加速度传感器,传感器封装和解调系统结构简单,但传感特性仍然受温度影响,且灵敏度较低。

为了减小温度对传感器的影响、提高传感器的灵敏度,本文对文献[17]中的传感器结构进行改进,并设计了解调系统以实现振动和环境温度的同时测量。利用环境温度对振动测量进行补偿,减小温度对振动传感特性的影响;利用可调谐法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)滤波器反射率高的特点提高传感器的灵敏度。

## 1 光纤传感器及其解调系统

### 1.1 光纤传感器结构及工作原理

传感器的机械结构部分由悬臂梁、基片和固定片构成<sup>[17]</sup>,如图1。传感器中的单模光纤上刻有一个光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG),光纤的栅区部分贴在悬臂梁的一侧,无栅区的部分挤压在基片和悬臂梁中间。

当振动作用到传感器上后,悬臂梁会周期性地挤压单模光纤,使光纤产生微小的形变。光纤变形使光纤中部分传导模转换为辐射模,导致在光纤纤芯中传输的入射光和反射光部分辐射到光纤包层中,最终损失掉,使光纤中的光功率受到振动的调制。通过解调系统检测光功率的变化,即可实现振动加速度的测量<sup>[17]</sup>。同时,固定在基片上的FBG可对传感器所在环境的温度进行测量。

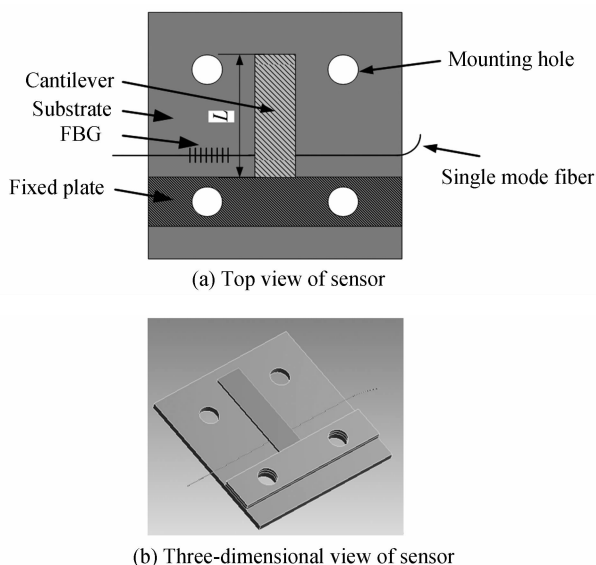


图 1 光纤传感器结构

Fig.1 Structure diagram of fiber sensor

### 1.2 解调系统工作原理

解调系统将振动引起的光功率变化转化为输出电压的变化,并解调出FBG中心波长的变化,解调系统结构框图如图2。宽带光源发出的光经环形器进入光纤传感器,经过强度调制后再经FBG进入可调谐F-P滤波器。系统选用的可调谐F-P滤波器的透射谱3 dB带宽为0.177 nm,自由光谱范围(Free Spectrum Range, FSR)为98.8 nm,精细度为574,图3为可调谐F-P滤波器在扫描电压为某一固定值时的反射谱。可见当宽谱光进入可调谐F-P滤波器后,只有带宽很窄的一部分光透过去,大部分光会被反射。反射光经环形器后进入光电检测器1转换为电压,通过数据采集卡的通道1进行数据采集,所以,通道1采集的电压值与振动加速度成线性关系,可实现振动加速度的测量。由

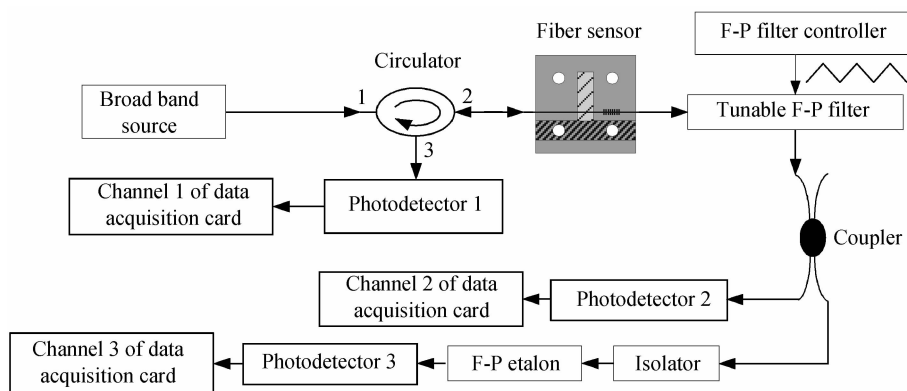


图 2 解调系统结构框图

Fig.2 Structure diagram of demodulation system

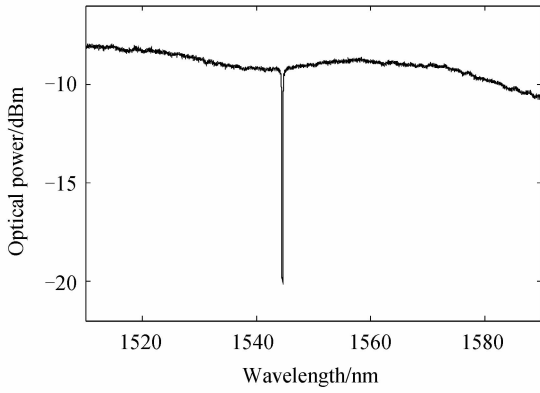


图3 可调谐 F-P 滤波器反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum of tunable F-P filter

于可调谐 F-P 滤波器的反射率远远高于光纤端面的反射率,所以本设计可提高振动测量的灵敏度。

可调谐 F-P 滤波器在三角波的驱动下对 FBG 的透射光进行扫描.扫描光经耦合器分为两部分,一部分直接进入光电探测器 2 转换为电压信号,另一部分经隔离器进入 F-P 标准具.数据采集卡通道 2 得到的 FBG 的透射谱如图 4(a),负峰即为 FBG 将宽带光源中波长与其中心波长相等的光滤掉后形成的.图 4(b)为数据采集卡通道 3 得到的 F-P 标准具形成的透射谱,系统中采用的 F-P 标准具自带波长标记功能,所以透射谱中存在一个负峰;负峰左侧有一个幅值较小的正峰,与图 4(a)中的负峰相对应,同样是 FBG 的作用产生的.利用图 4(b)中 F-P 标准具的透射峰作为波长参考,可解调出 FBG 的中心波长<sup>[18]</sup>,即可实现对温度的测量. FBG 与传感器的机械结构处于同一温度环境中,所以可通过 FBG 测得的温度值对传感器测得的振动加速度进行修正,实现温度补偿。

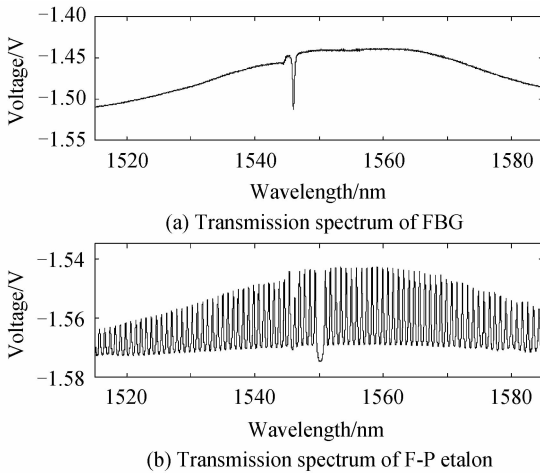


图4 F-P 标准具和 FBG 的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of F-P etalon and FBG

## 2 实验测试

### 2.1 波长解调对振动测量的影响

在三角波电压的驱动下,可调谐 F-P 滤波器对宽

谱光源的输出光进行扫描.此时,不同波长的光会随驱动电压的变化顺序透射过可调谐 F-P 滤波器.由图 4 可看出,宽谱光源的光谱不够平坦,不同波长的光的功率不同,所以可调谐 F-P 滤波器透射的光功率会随三角波发生周期性变化.同理,其反射率也将发生周期性变化.由于解调系统根据反射光功率变化解调振动加速度,所以可调谐 F-P 滤波器反射率的变化会对振动加速度的测量带来影响。

假设光纤传感器的入射光功率为  $P_1$ ,经可调谐 F-P 滤波器反射后由传感器输出的光功率为  $P_0$ ,则两者的关系可表示为<sup>[19]</sup>

$$P_0 = P_1 [T_{\text{trans}}]^2 R \quad (1)$$

式中,  $T_{\text{trans}}$  是光纤变形部分的透射率,  $R$  是可调谐 F-P 滤波器的反射率.由文献<sup>[17]</sup>可知,当振动作用到传感器上后,  $T_{\text{trans}}$  的变化量与振动加速度成正比,所以  $T_{\text{trans}}$  可表示为

$$T_{\text{trans}} = 1 - k - k \sin \omega t \quad (2)$$

式中,  $k$  表示振动加速度对  $T_{\text{trans}}$  的影响系数,其正比于振动加速度值,即  $k \propto a$ ,  $\omega$  表示振动加速度的角频率,  $t$  为时间.式(2)中前两项为  $T_{\text{trans}}$  受振动加速度影响后的平均值,即直流部分,最后一项则为其交流部分。

当可调谐 F-P 滤波器对图 4(a)所示的宽谱光进行扫描时,可调谐 F-P 滤波器的反射率  $R$  将不再是定值,可表示为

$$R = R_0 (1 + f(t)) \quad (3)$$

式中,  $R_0$  为可调谐 F-P 滤波器反射率的平均值,  $f(t)$  为可调谐 F-P 滤波器在三角波驱动下反射率的变化函数。

将式(2)和式(3)代入式(1)得

$$P_0 = P_1 R_0 [1 - k(1 + \sin \omega t)]^2 [1 + f(t)] \quad (4)$$

由于光纤变形非常小,所以  $k$  非常小,同时,可调谐 F-P 滤波器反射率的变化  $|f(t)|$  也非常小,所以式(4)中关于  $k$  的二次方项及  $k$  与  $f(t)$  的乘积项均可忽略掉,可得

$$P_0 = P_1 R_0 [1 - 2k(1 + \sin \omega t) + f(t)] \quad (5)$$

由式(5)可知,传感器输出的反射光功率为直流分量、与振动加速度成正比的交流分量及与可调谐 F-P 滤波器反射率成正比的交流分量的叠加.所以,数据采集卡通道 1 测得的信号包含振动信号及可调谐 F-P 滤波器进行扫描时产生的低频信号。

为了便于与文献<sup>[17]</sup>进行对比,实验中传感器采用的悬臂梁的尺寸均为  $30 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ ,光纤距悬臂梁固定端为  $5 \text{ mm}$ ,传感器的输入光功率均设置为  $600 \mu\text{W}$ 。

将光纤传感器固定在振动台上,设置振动台的振动频率为  $1000 \text{ Hz}$ ,振动加速度幅度为  $30 \text{ m/s}^2$ .通过调整可调谐 F-P 滤波器驱动电压的峰峰值,使可调谐

F-P 滤波器的扫描的波长范围为 1 520~1 580 nm,扫描频率设置为 30 Hz. 图 5(a)为数据采集卡通道 1 采集到的振动信号的时域波形及频谱图. 图中信号的高频部分即为振动信号,叠加到振动信号上的低频信号为可调谐 F-P 滤波器扫描时反射率变化产生的信号,其主要集中在低频段. 在扫描过程中,当可调谐 F-P 滤波器的透射波长与 FBG 的中心波长相同时,将几乎没有光透射过可调谐 F-P 滤波器. 此时,反射光功率会突然变大,在测得的振动信号中会产生峰值. 由于三角波驱动电压在一个周期的上升部分和下降部分两次对 FBG 的透射谱进行扫描,所以峰值成对出现.

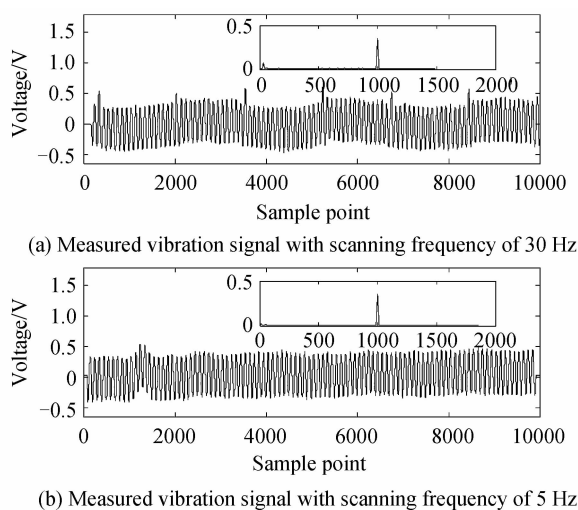


图 5 测得的振动信号时域波形和频谱

Fig. 5 Time domain waveform and frequency spectra of measured vibration signal

由于系统中只采用了一个 FBG,所以可调谐 F-P 滤波器的波长扫描范围可适当减小,只需要覆盖 F-P 标准具的标记波长和 FBG 的波长即可. 在较小的波长范围内,宽谱光源的功率变化也较小,同时,由于环境温度变化往往较慢,可适当降低可调谐 F-P 滤波器的扫描频率,使干扰信号的带宽和幅度降低.

系统中 F-P 标准具的波长标记为 1 550.165 nm, 25 °C 时 FBG 的中心波长为 1 546.028 nm. 考虑到温度变化时 FBG 中心波长的变化,设置可调谐 F-P 滤波器的波长扫描范围约为 1 545~1 551 nm,扫描频率设置为 5 Hz,重新对振动信号进行测量,测得的振动信号时域波形如图 5(b). 可以看出,低频信号的影响明显减小,但仍存在一个峰值. 系统中数据采集卡的采样频率为 100 kHz,每次采集的采样点数为 10 k,所以当扫描频率为 5 Hz 时,每次采集的数据中最多只会存在一个峰值. 在对数据进行分析时可将峰值部分对应的数据去掉,消除峰值的影响. 图 5(b)中的频谱图即为去掉前 2000 个数据点后得到的,可见,采用可调谐 F-P 滤波器进行波长解调时对振动测量的影响很小.

## 2.2 振动对温度测量的影响

系统中的振动加速度传感器为强度调制型,当振动作用到传感器上后会导致入射到 FBG 的光强发生变化,但 FBG 通过波长变化传感温度,所以对温度测量影响较小. FBG 固定在基片上跟随基片振动,基片会对 FBG 产生径向力,从而引起 FBG 中心波长的变化. 由于 FBG 质量非常小,因此产生的径向力对其中心波长的影响也很小<sup>[20]</sup>,可忽略不计,所以振动对温度测量影响很小.

限于实验室条件,无法将振动台和传感器置于恒温箱中,所以采用了相对粗糙的测试方法. 将振动台和传感器放进壁厚为 2 cm 的泡沫隔热箱中,在隔热箱的一侧开孔,将振动台的驱动电缆和传感器光纤引出. 同时,设定室内空调为 25 °C,使传感器所在环境保持相对恒温. 保持振动台的振动加速度为 30 m/s<sup>2</sup>,振动频率分别设置为 1 000 Hz、2 000 Hz 和 3 000 Hz,每种频率的振动保持 10 min,观察 FBG 中心波长的变化. 然后,保持振动台的振动频率为 3 000 Hz,振动加速度幅度分别设置为 45 m/s<sup>2</sup>、60 m/s<sup>2</sup> 和 75 m/s<sup>2</sup>,每种加速度的振动保持 10 min,观察 FBG 中心波长的变化,实验结果如图 6. 对图 6 中的曲线进行统计分析可知,其方差为 0.001 3 nm,最大值与最小值之差为 0.007 nm. 测试过程中,振动频率和加速度都发生了很大变化,但 FBG 的中心波长的波动变化不明显,说明其中心波长主要受温度波动影响,振动对中心波长的影响很小.

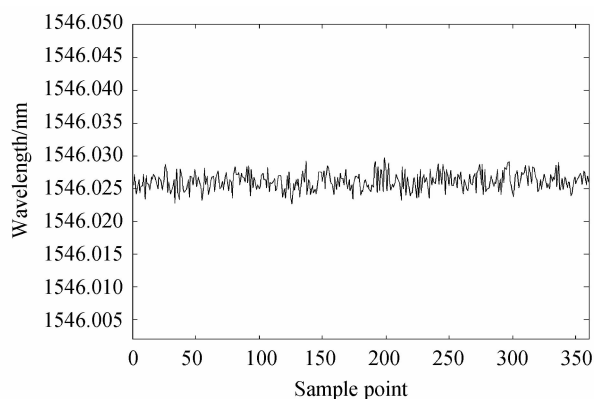


图 6 振动对温度测量的影响

Fig. 6 Effect of vibration on temperature measurement

## 2.3 温度对振动测量的补偿实验

由文献[17]可知,解调系统中数据采集卡通道 1 的电压幅度与振动加速度呈线性关系,同时,温度对输出电压的影响也近似呈线性关系,所以输出电压幅度与振动加速度和温度的关系可表示为

$$V_p(T, a) = k_1 T + k_2 a + C_1 \quad (6)$$

式中,  $V_p$  表示解调系统的输出电压,  $k_1$  和  $k_2$  分别表示温度和加速度对输出电压的影响系数,  $T$  为环境温度,

$a$  为振动加速度,  $C_1$  为常量. FBG 的中心波长与温度呈线性关系, 可表示为<sup>[21]</sup>

$$\lambda = k_3 T + C_2 \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  表示 FBG 的中心波长,  $k_3$  表示温度对中心波长的影响系数,  $C_2$  为常量. 由式(6)和式(7)可获得温度补偿后的输出电压为

$$V_p(T, a) = k_1 T + k_2 a + C_1 - k_1 \cdot \frac{\lambda - C_2}{k_3} = k_1 T + k_2 a - \frac{k_1}{k_3} \cdot \lambda + C \quad (8)$$

式中,  $C$  表示常量. 由式(8)可知, 确定  $k_1/k_3$  的值, 就可通过 FBG 的波长值补偿温度对振动加速度测量的影响.

为了验证温度补偿方法的有效性, 采用文献[17]中的方法进行了两次实验.

将光纤传感器固定在振动台上, 第一次实验时设置振动台的振动加速度幅值为  $30 \text{ m/s}^2$ , 振动频率为  $1\,000 \text{ Hz}$ . 用热风枪加热光纤传感器, 同时读取 FBG 的波长值, 当 FBG 波长值不再明显增加时, 继续加热  $5 \text{ min}$ , 以保证整个传感器受热均匀. 停止加热后, 光纤传感器在室温状态下自然降温, 降温至接近室温后, 再利用室内空调使室温发生两次明显波动. 整个实验持续约  $3 \text{ h}$ , 共获得  $3\,000$  个采样数据, 结果如图 7.

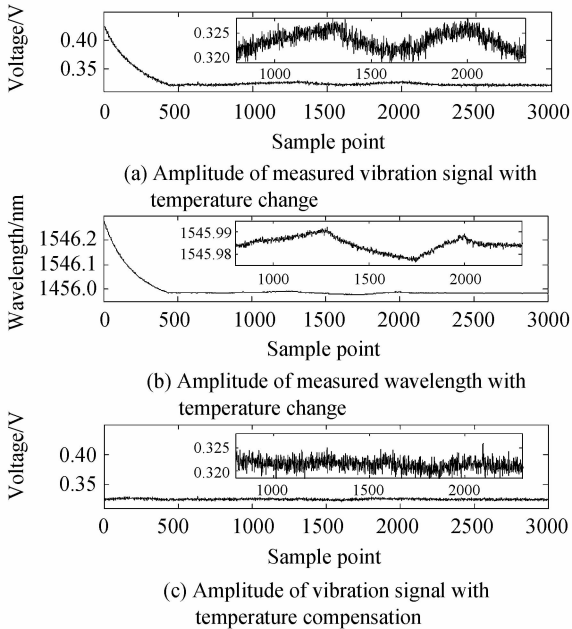


图 7 加速度为  $30 \text{ m/s}^2$  时对振动测量进行温度补偿  
Fig. 7 Temperature compensation for vibration measurement under vibration acceleration of  $30 \text{ m/s}^2$

图 7(a) 为光纤传感器测得的反映振动加速度的电压值, 图 7(b) 为光纤传感器上 FBG 中心波长的变化. 采集到前 500 点左右的数据中, 振动加速度和中心波长值呈减小趋势, 反映的是光纤传感器用热风枪加热后自然冷却的过程; 后面出现了两次明显的变化, 则是

采用室内空调使室温发生了波动造成的. 图 7(c) 为采用中心波长值对电压值进行补偿后获得的数据. 由于现有实验室条件无法准确获得式(8)中  $k_1$  和  $k_3$  的准确数值, 所以数据处理时采用寻求最优解的思想, 即改变式(8)中  $k_1/k_3$  的值, 同时计算  $V_p$  的方差, 当方差最小时, 即认为获得了最好的补偿. 通过对比图 7(a) 和 (c) 可看出, 经过补偿后的反映振动加速度的电压值已基本消除了温度的影响.

通过对光纤传感器中的 FBG 进行标定, 可获得式(7)所示的中心波长和温度的关系, 进一步可获得实验时 FBG 测得的温度值. 计算可知, 第一次实验中, 第 1 个数据点对应的温度值约为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 第 440 个数据点温度下降到接近室温约为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 所以图 7(c) 中前 440 个数据的最大相对误差应最大. 经计算, 前 440 个数据和全部数据的最大相对误差分别为  $1.65\%$  和  $1.43\%$ , 与文献[17]中报道的数据相比, 稳定性得到了明显提高.

第二次实验时, 设置振动台的振动加速度幅值为  $50 \text{ m/s}^2$ , 振动频率仍为  $1\,000 \text{ Hz}$ . 室温条件下, 在约  $3 \text{ h}$  内, 利用室内空调使室温发生两次波动, 测得的电压值及 FBG 的波长值如图 8(a) 和 (b). 采用第一次实验时相同的方法可获得温度补偿后的电压值, 如图 8(c), 可看出, 补偿后的电压值基本消除了温度的影响. 两次实验说明温度对振动测量的补偿方法有效.

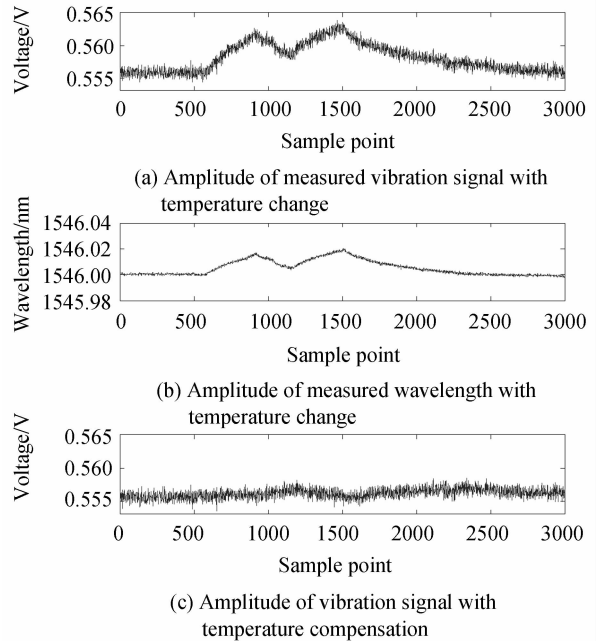


图 8 加速度为  $50 \text{ m/s}^2$  时对振动测量结果进行温度补偿  
Fig. 8 Temperature compensation for vibration measurement under vibration acceleration of  $50 \text{ m/s}^2$

## 2.4 灵敏度实验

设置振动台的振动加速度频率为  $1\,000 \text{ Hz}$ , 幅值变化范围为  $10 \sim 100 \text{ m/s}^2$ , 步进  $10 \text{ m/s}^2$ , 测试解调系统输出与振动加速度幅值的关系, 测试结果如图 9. 对数据进行线性拟合可获得传感器的灵敏度为

107.70 mV/g(10.99 mV/(m·s<sup>-2</sup>)),可见,采用可调谐 F-P 滤波器作为反射镜后,灵敏度得到了明显的提高。

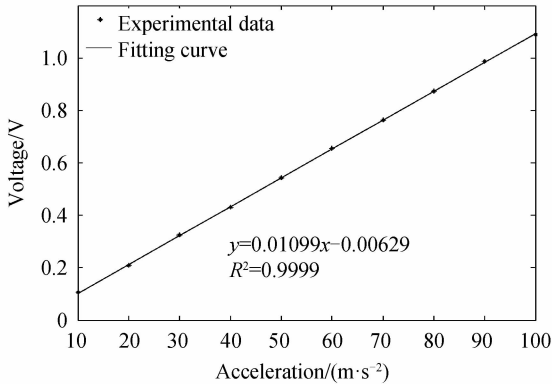


图9 解调系统输出与振动加速度的关系

Fig.9 Relationship between demodulation system output and amplitude of vibration acceleration

### 3 结论

本文设计了具有温度补偿功能的光纤振动测量系统.利用 FBG 测量环境温度,实现了对振动测量的补偿,提高了振动测量的温度稳定性;利用可调谐 F-P 滤波器作为光纤反射镜,提高了振动测量的灵敏度.实验测试表明,温度变化 25℃ 时的振动加速度测量最大相对误差为 1.65%,振动测量的灵敏度为 107.70 mV/g,与文献[17]报道的传感器相比,得到了明显的提高。

#### 参考文献

- [1] MAGALHÃES F, CUNHA A, CAETANO E. Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: from automated OMA to damage detection[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, **28**(2): 212-228.
- [2] LI Z X, YAN X P, WANG X P, et al. Detection of gear cracks in a complex gearbox of wind turbines using supervised bounded component analysis of vibration signals collected from multi-channel sensors[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, **371**: 406-433.
- [3] TVETEN A B, DANDRIDGE A, DAVIS C M. Optical fiber accelerometer[J]. *Electronics Letters*, 1980, **16**(22): 854-856.
- [4] CHENG Zhen-long, ZHAO Jian-lin, ZHOU Wang-min, et al. A vibration sensor based on fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 47-52.  
成振龙, 赵建林, 周王民, 等. 一种基于光纤光栅法布里-珀罗腔的低频振动传感器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 47-52.
- [5] SUN Ru-jiao, SUN Li-min, SUN Zhi, et al. Design research of fiber Bragg grating accelerometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 63-67.  
孙汝蛟, 孙利民, 孙智, 等. 一种新型光纤布喇格光栅振动传感器研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 63-67.
- [6] CHAO S H, LOH C H, LI C H. Vibration-based damage identification of reinforced concrete member using optical sensor array data[J]. *Structural Health Monitoring*, 2013,

**12**(5-6): 397-410.

- [7] XU D S, YIN J H, CAO Z Z, et al. A new flexible FBG sensing beam for measuring dynamic lateral displacements of soil in a shaking table test[J]. *Measurement*, 2013, **46**(1): 200-209.
- [8] GUO T, QIAO X G, JIA Z A, et al. Technology of fiber gratings sensing and its applications in petroleum industry[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, **18**(3): 208-213.
- [9] POSADA-ROMAN J, GARCIA-SOUTO J A, RUBIO-SERRANO J. Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems[J]. *Sensors*, 2012, **12**(4): 4793-4802.
- [10] YU B, KIM D W, DENG J, et al. Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers[J]. *Apply Optics*, 2003, **42**(16): 3241-3250.
- [11] 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**(1): 79-85.
- [12] LI K, CHAN T H T, YAU M H, et al. Very sensitive fiber Bragg grating accelerometer using transverse forces with an easy over-range protection and low cross axial sensitivity[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(25): 6401-6410.
- [13] ZHANG T X, ZHAO Y F, WEI D M, et al. Fiber-optic Michelson accelerometer based on frequency modulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(23): 2361-2364.
- [14] ZHANG Z Y, BAO X Y. Continuous and damped vibration detection based on fiber diversity detection sensor by Rayleigh backscattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(7): 832-838.
- [15] QIN F X, LI H G, FAN W D, et al. Experimental study on vibration frequency response of micro-bend optic-fiber sensor [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(7): 556-559.
- [16] KISHORE P, DINAKAR D, SRIMANNARAYANA K, et al. Vibration sensor using 2 × 2 fiber optic coupler[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(10): 107104.
- [17] YAO G Z, LI Y Q, YANG Z. A simple intensity modulation based fiber-optic accelerometer [J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, **29**(5): 53-58.
- [18] LI Yong-qian, YAO Guo-zhen, YANG Zhi. A high precision fiber Bragg grating wavelength demodulation system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(12): 1405-1411.  
李永倩, 姚国珍, 杨志. 一种高精度光纤光栅波长解调系统 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(12): 1405-1411.
- [19] NI K, CHAN C C, DONG X, et al. Temperature-independent accelerometer using a fiber Bragg grating incorporating a biconical taper [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(5): 410-413.
- [20] NGOIB K A, PAUL J, ZHAO L P. Enhanced lateral pressure tuning of fiber Bragg gratings by polymer packaging [J]. *Optics Communications*, 2004, **242**(4-6): 425-430.
- [21] YU You-long, XUE Hang, WANG Yan-xiao, et al. Temperature distributed sensing technique for the local-area of the surface based on fiber Bragg gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0506004.  
余有龙, 薛航, 王彦晓, 等. 基于光纤光栅的物体表面附近温度场测量[J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 0506004.