

双光栅 π 相位差温度不敏感加速度传感技术研究

刘钦朋^{1,2} 乔学光^{1,3} 赵建林¹ 贾振安² 傅海威²

¹西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072
²西安石油大学陕西省光电传感测井重点实验室, 陕西 西安 710065
³西北大学光纤光栅传感应用技术研究所, 陕西 西安 710069

摘要 提出了一种基于 π 相位温度不敏感的双光纤布拉格光栅加速度传感技术,并设计了双光栅加速度传感器,对该传感器的温度特性和加速度对中心波长的响应进行了研究。给出了该传感器的结构及封装方法。从理论上分析了基于 π 相位温度不敏感的双光纤布拉格光栅加速度传感原理,分析了温度和加速度对波长的响应关系,推导了该光栅加速度传感器的响应灵敏度的解析表达式。通过实验分析双光栅的加速度响应和平坦区。实验结果表明,在温度比较宽的范围内,可实现温度不敏感加速度的准确测量,加速度响应灵敏度为 $15.52 \text{ pm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$,实验值与理论值的相对误差为 3.06% ,加速度与波长具有较好的线性关系,线性度为 99.8% ,在小于共振频率的低频段具有较好的平坦区。表明该双光纤布拉格光栅加速度传感器具有温度不敏感特性,能实现低频加速度的准确测量。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;加速度测量;温度不敏感

中图分类号 TP253;TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0205006

Temperature-Insensitive Acceleration Sensing Technology Based on π Phase of Double Fiber Bragg Gratings

Liu Qinpeng^{1,2} Qiao Xueguang^{1,3} Zhao Jianlin¹ Jia Zhen'an² Fu Haiwei²

¹Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

²Shaanxi Key Laboratory of Photoelectric, Gas-Oil Logging and Detecting, Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

³Institute of Fiber Bragg Grating Application Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China

Abstract A novel temperature-independent technology based on π phase of double fiber Bragg grating (FBG) acceleration is proposed. The double fiber Bragg grating accelerometer is designed. The temperature response and acceleration response of the sensor versus wavelength are researched. The configuration and coating of the accelerometer are designed. The temperature-independent principle based on π phase of double fiber Bragg grating accelerometer is analyzed. The temperature response of FBGs and the acceleration response versus wavelength are analyzed. And the analytical formula of acceleration sensitivity is also deduced. Acceleration response and flat range of the accelerometer are analyzed by experiment. Experimental results indicate that precise measurement can be realized in the large range of temperature, and the sensitivity is $15.52 \text{ pm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$, relative error is 3.06% . The sensor demonstrates extremely linear response, and linear fitting is 99.8% . There is a good flat response at frequencies less than the mechanical resonance frequency, which indicates that the accelerometer has good

收稿日期: 2010-07-26; 收到修改稿日期: 2010-09-26

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z413), 国家自然科学基金(60727004)、教育部科技创新工程重大项目培育资金(708087)和陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项(2009ZDKG-42)资助课题。

作者简介: 刘钦朋(1977—),男,讲师,博士研究生,主要从事光纤传感理论及应用等方面的研究。

E-mail: Lqp1977@163.com

导师简介: 乔学光(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤技术方面的研究。

E-mail: qiaoxueguang@xsyu.edu.cn(通信联系人)

temperature-independent characteristic and can realize precise measurement.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; acceleration measurement; temperature-insensitive

OCIS codes 060.2310; 050.2065; 230.1480

1 引 言

近几年来,随着光纤光栅传感技术的不断发展,光纤光栅在准静态测量工程领域已取得广泛的应用^[1~4]。但针对目前一些特殊应用领域,例如石油勘探的地震检波系统、航空航天的制导系统、桥梁建筑的结构检测系统、交通情况监测系统等,要求对振动加速度进行测量。由于光栅加速度传感器具有抗电磁干扰、高灵敏度、大动态范围、易复用等特点,逐渐引起人们的兴趣,且已被证明可用于动态测量^[5~10]。由于这些加速度传感器的信息再现是通过检测应变引起波长的变化来获取振动信息的,具有波长编码信息,从而克服了由于光源的波动以及光路中的各种损耗对信号检测的影响,提高了检测精度。光纤光栅对温度和应变同时敏感,这种交叉敏感使从单个波长的变化量中难以分辨出应变和温度各自的变化量,国内外学者提出了啁啾光栅测量方法^[11~14]。由于啁啾光栅测量方法检测的是利用温度对带宽展宽不敏感来检测光强信息实现加速度测量,失去了波长编码的特点,因此不利于多点分布式测量。

本文提出了一种新颖的基于 π 相位温度不敏感的双光纤布拉格光栅加速度传感技术,在受到外界振动激励时,其中一个光栅和另一个光栅的振动状态相差 π 相位,两个光栅波长的移动方向相反,若一个光栅的中心波长红移(或蓝移),则另外一个光栅的中心波长则蓝移(或红移),但两光栅的中心波长的差值不受温度影响,实现温度不敏感加速度准确测量,保留了波长编码的优点。

2 传感器设计及原理

2.1 传感器设计及封装

传感头的结构设计如图 1 所示,双梁为弹性系统,左端为固定端,右端为自由端,实心部分为质量块。该结构可以简化为由集中质量、集中刚度和集中阻尼组成的二阶单自由度受迫振动系。单悬梁的自由端在载荷的作用下,自由端既产生挠度,又产生转角,而且抗扭能力差。而对于如图 1 所示的双悬梁结构,梁端部载荷的作用下其端部将近似产生平动,并且抗扭刚度显著大幅度提高,梁截面弯矩较同尺寸单悬臂梁增大 1 倍。实验中采用的双悬梁由不锈钢材料制成,双悬梁的上下梁的尺寸和材料完全

相同,其左端固定,右端自由。设梁的厚度为 d ,宽度为 b ,长度为 L , $h(h \gg d)$ 为梁间距,由材料力学知^[15],梁的自由端施加载荷为 F 时,引起梁的自由端面发生的最大应变为

$$\epsilon = \frac{3L}{2Ebd^2}F, \quad (1)$$

式中 F 方向为垂直于梁的长度方向向下, E 为梁的弹性模量。

基于有限元方法分析,在左端固定和在自由端加力的边界条件下,梁的右侧区域表面应力最大。基于该分析,通过高强度环氧粘接剂将两只串联光纤布拉格光栅(FBG)粘贴于梁的上下自由端面,粘贴时确保两光栅与梁表面粘贴的牢固性和准直性,同时又严格对称,光栅封装如图 2 所示。

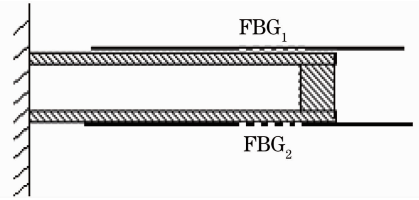


图 1 传感头结构示意图

Fig. 1 Structure of sensor head

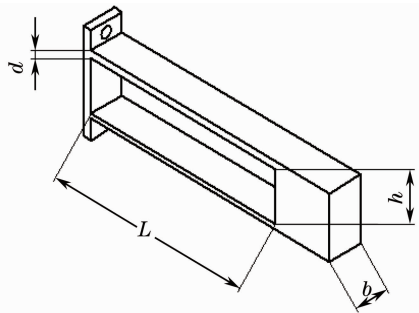


图 2 FBG 封装图

Fig. 2 FBG stickled to double cantilever

2.2 工作原理

由 FBG 耦合模理论^[16],均匀光纤布拉格光栅波长 λ_B 为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (2)$$

式中 n_{eff} 为导模的有效折射率, Λ 为光栅周期。当光纤光栅受到外力作用或当环境温度变化时,由于弹光效应、热光效应、热膨胀、形变等的作用,引起光纤布拉格光栅波长变化。在温度和应变同时作用下引起的光纤布拉格光栅波长的漂移为^[17]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_0} = (1 - P_e)\epsilon + [(\alpha_f + \xi) + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha_f)]\Delta T, \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda_B = \lambda_B - \lambda_0$, λ_B 为温度和应变同时作用后的布拉格中心波长, λ_0 为初始中心波长, α_f 为光纤的热膨胀系数, ξ 为热光系数, α_s 为基底材料的热膨胀系数, P_e 为光纤的有效弹光系数, 对常用的石英光纤来说, $P_e \approx 0.22$. ΔT 为温度的变化。

光栅加速度信号的测量通常是利用惯性原理, 通过感知惯性力所产生的应变导致波长的变化而测得相应的加速度, 由该传感器的结构知, 双悬梁在左端固定的情况下, 双梁和右侧自由端的质量块 m 构成了一个谐振系统, 质量块 m 在垂直于梁面的方向作加速度为 a 运动时, 自由端梁面将产生应变, 使两布拉格中心波长漂移, 同时考虑温度的影响, 得 FBG_1 和 FBG_2 的相对波长变化量为

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{01}} = \left[\frac{3(1 - P_e)L\beta}{2Ebd^2} ma \right] + [(\alpha_f + \xi) + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha_f)]\Delta T, \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{02}} = - \left[\frac{3(1 - P_e)L\beta}{2Ebd^2} ma \right] + [(\alpha_f + \xi) + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha_f)]\Delta T, \quad (5)$$

式中 $\Delta\lambda_{B1} = \lambda_{B1} - \lambda_{01}$, $\Delta\lambda_{B2} = \lambda_{B2} - \lambda_{02}$ 分别为 FBG_1 , FBG_2 的波长偏移量, λ_{B1} , λ_{B2} 为布拉格中心波长, λ_{01} , λ_{02} 为平衡位置时的中心波长, β 为应变传递系数, (5) 式中的负号表示 FBG_2 的波长移动方向与 FBG_1 的波长移动方向相反。由于两只光栅温度特性相同, 基底材料相同, 则(4), (5) 式中第二项相同, 两式相减得

$$\Delta\lambda_B = \frac{3(1 - P_e)L\beta}{2Ebd^2} ma (\lambda_{01} + \lambda_{02}) + (\lambda_{01} - \lambda_{02}). \quad (6)$$

可见, 两光纤布拉格光栅中心波长差与加速度呈线性关系。式中 $\Delta\lambda_B = \lambda_{B1} - \lambda_{B2}$, 在振动时, 假设加速度 $a = A\sin(\omega t + \theta)$, 若质量块经过平衡位置向上运动, 则光栅 FBG_1 区域发生缩应变, 使 FBG_1 的中心波长从平衡位置处对应的波长向短波移动, FBG_2 区域发生伸应变, 使 FBG_2 的中心波长从平衡位置处对应的波长向长波移动; 若经过平衡位置向下运动, 则 FBG_1 的中心波长向长波移动, FBG_2 的中心波长向短波移动, 由(4), (5) 式得

$$\lambda_{B1} = [M_e A \sin(\omega t + \theta)] + M_T \Delta T + \lambda_{01}, \quad (7)$$

$$\lambda_{B2} = [M_e A \sin(\omega t + \theta + \pi)] + M_T \Delta T + \lambda_{02}, \quad (8)$$

式中 ω 为加速度的角频率, t 为时间, M_e , M_T 分别

$$\text{为: } M_e = \frac{3(1 - P_e)L\beta}{2Ebd^2} \lambda_{01} m, M_T = [(\alpha_f + \xi) + (1 -$$

$P_e)(\alpha_s - \alpha_f)]\lambda_{02}$, 则由振动理论知 FBG_1 和 FBG_2 的中心波长在振动过程中状态相差 π 相位, 两个光栅波长的移动方向始终相反, 即 FBG_1 的中心波长红移(或蓝移), 则 FBG_2 的中心波长蓝移(或红移)。由于 λ_{01} , λ_{02} 分别为 FBG_1 和 FBG_2 在平衡位置时的中心波长, 封装结构和光栅一旦确定, λ_{01} , λ_{02} 均为定值, 所以 $(\lambda_{01} + \lambda_{02})$ 应为常量, 同时 $(\lambda_{01} - \lambda_{02})$ 也应为常量。则由(6)式知两光栅的中心波长的差值不受温度影响, 实现加速度的精确测量。

由(6)式知当质量块 m 在垂直于两面的方向作加速度为 a 运动时, 加速度与波长的变化量呈线性关系, 进一步可得加速度的响应灵敏度 S (单位加速度对应的波长漂移量)

$$S = \frac{3(1 - P_e)L\beta}{2Ebd^2} (\lambda_{01} + \lambda_{02}) m, \quad (9)$$

由(9)式则可以得到加速度灵敏度系数的理论值。

3 实验及结果分析

图 3, 4 为光栅加速度传感系统和实验装置图, 将双光栅加速度传感器固定于标准振动系统的振动台面上, 同时确保振动方向垂直于梁面, 接入光栅解调仪的其中一个通道, 解调仪由计算机控制, 并将采集到的信息送到计算机, 由于该解调系统是基于波长解调的, 采集到的信息均为某时刻对应的波长, 后文中涉及到的相关曲线图 5, 6, 9 和 10 则是由采集到的波长信息绘出的。振动系统也由计算机控制, 通过标准加速度传感器控制振动系统的输出。该实验中采用的解调仪为四通道, 扫描频率为 1 kHz, 波长范围为 1510~1590 nm, 波长重复误差 0.05~1 pm, 振动系统为小型精密振动台 WS-Z30, 最大加速度为 $\pm 10 g$, 最大位移为 ± 5 mm. FBG_1 , FBG_2 为传感光栅, FBG_3 为温度检测光栅, 用来检测传感器所处温度场的温度, 该实验传感器的结构参数分别为: 梁厚 $d = 0.5$ mm, 宽度为 $b = 10$ mm, 长度为 $L = 60$ mm, 杨氏

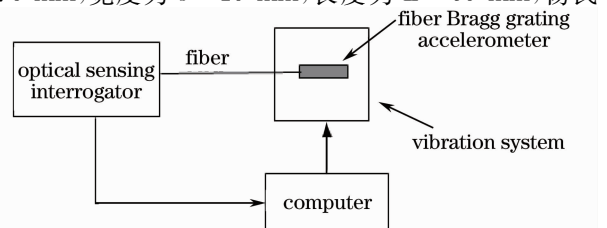


图 3 加速度传感实验系统

Fig. 3 Acceleration sensing system of experiment

模量 $E=1.9 \times 10^{11}$ Pa, 质量块 $m=0.035$ kg。FBG₁ 的初始波长 $\lambda_{01}=1551.557$ nm, FBG₂ 的初始波长 $\lambda_{02}=1548.051$ nm, 若传递系数 $\beta=1$, 则由(5)式计算得加速度灵敏度的理论值为 16.01 pm/(m·s⁻²)。

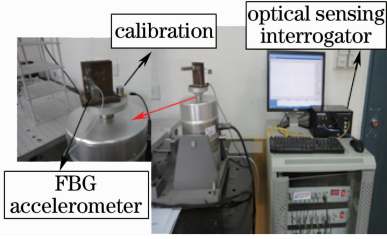


图 4 加速度传感系统实验装置

Fig. 4 Experimental setup of the acceleration sensing system

3.1 双光栅相位特性

由 2 节的理论分析知, 在振动过程中, 两光栅的相位差严格保持 π 相位是该光栅加速度传感器精确测量的关键, 在两光栅封装时准确地粘贴在双悬梁的对称位置处, 保证传感器在工作时, 两光栅的波长漂移方向始终相反, 且相位差准确地保持为 π 相位。图 5, 6 为环境温度为 27.5 °C, 频率为 20 Hz 的正

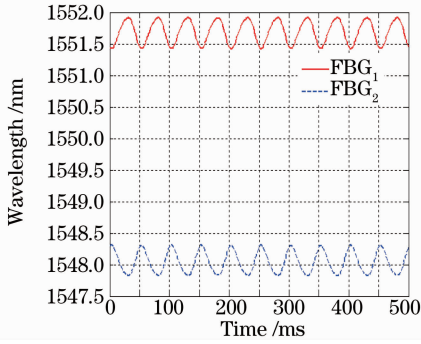


图 5 加速度为 30.73 m/s² 时的双光栅 π 相位差
Fig. 5 π out of phase response of two FBGs when applied acceleration is 30.73 m/s²

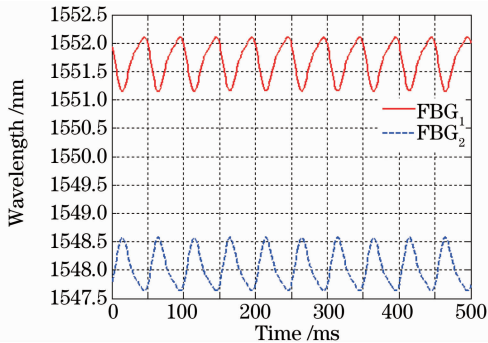


图 6 加速度为 58.82 m/s² 时的双光栅 π 相位差
Fig. 6 π out of phase response of two FBGs when applied acceleration is 58.82 m/s²

弦、加速度分别为 $30.73, 58.82$ m/s² 时的相位关系, 由图 5, 6 知双光栅在工作时的相位差严格保持 π 相位, 证明了理论分析的正确性。

3.2 双光栅的温度特性

传感器的工作原理是基于两光栅的相位差为 π 相位检测中心波长的差值实现加速度的准确测量, 这要求两光栅具有相同的温度特性, 即具有相同的温度灵敏度, 否则, 会由于两光栅的灵敏度的差异, 导致加速度的测量误差增大, 降低系统的测量精度。所以, 实验时采用温度参数相同的光栅 FBG₁, FBG₂ 和 FBG₃, 其中 FBG₃ 仅仅在实验中用来检测环境温度, 实际应用时并不需要。图 7 为在环境温度为 27.5 °C 时 FBG₁ 和 FBG₂ 的光谱图, 图 8 为 FBG₁, FBG₂ 和 FBG₃ 的温度响应曲线, 3 只光栅具有好的线性, 线性度均为 99.9% , 温度灵敏度分别为 $25.6, 25.7$ 和 25.6 pm/°C, 图 9 为加速度保持在 12.29 m/s² 时温度、波长响应关系曲线, 温度从 67.5 °C 变化到 27.5 °C 的过程中, 两光栅的中心波长同步变化, 从而保证了测量过程中加速度测量的准确性。

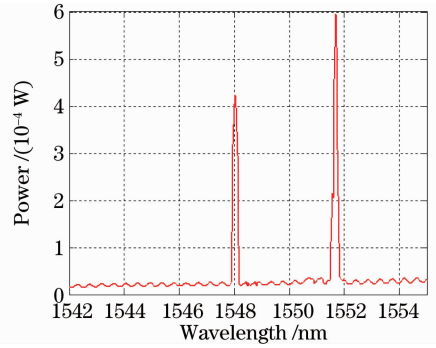


图 7 27.5 °C 时两光栅的反射光谱
Fig. 7 Reflection spectra of the FBG under 27.5 °C

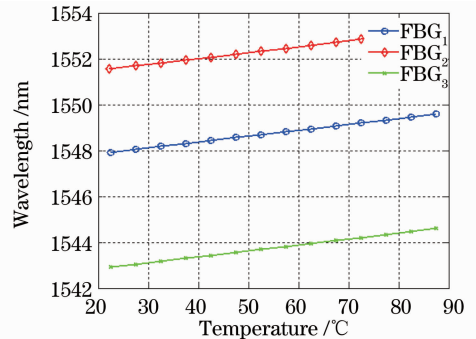


图 8 3 只光栅的温度响应

Fig. 8 Temperature response of three FBGs

3.3 加速度的线性响应及平坦区

为了测量光栅加速度传感器的线性响应, 保持加速度的频率为 20 Hz, 已固定步长改变加速度的大

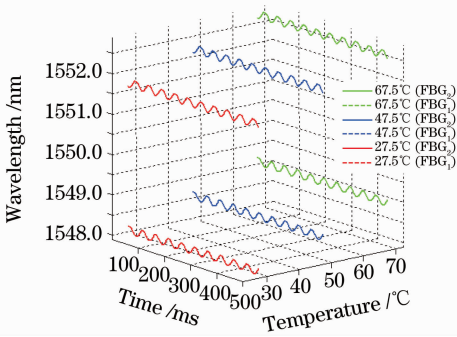


图 9 加速度为 12.29 m/s^2 时不同温度的波长响应
Fig. 9 Wavelength response of different temperatures when applied acceleration is 12.29 m/s^2

小。实验中,通过振动台给加速度传感器施加正弦激励,图 10 为温度为 $27.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时光栅中心波长对不同加速度的响应,图 11 为两光栅中心波长差与加速度的线性关系,求得响应灵敏度为 $15.52 \text{ pm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$,理论值与实验值的相对误差为 3.06% 。

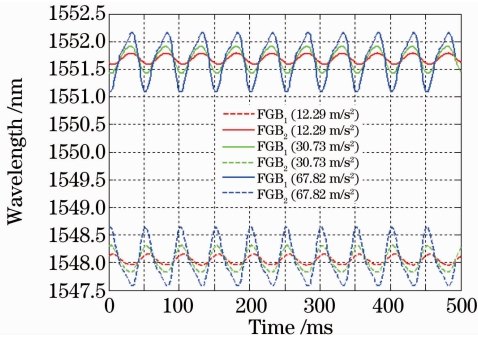


图 10 加速度与光栅波长的线性响应
Fig. 10 Linear response of wavelength versus applied acceleration

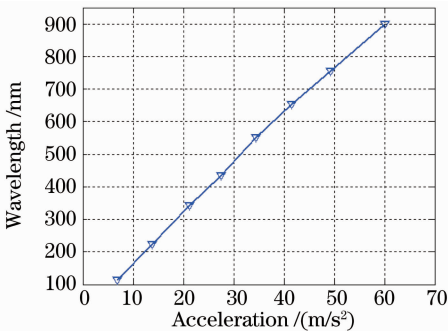


图 11 加速度与光栅波长变化量的线性响应
Fig. 11 Linear response of wavelength versus applied acceleration

对于加速度传感器而言,平坦区域是衡量加速度传感器实用性的一个参量,使用振动台的控制信号使激励器产生从直流(DC)到 100 Hz 间的不同频率的正弦波驱动振动台。从 $4 \sim 100 \text{ Hz}$ 范围内对每种频率下光栅加速度传感器的灵敏度响应进行测

量,然后对 3 次测量结果取平均,作为传感器在不同频率的响应,其响应曲线如图 12 所示,由该图知在 $0 \sim 20 \text{ Hz}$ 为线性区, $20 \sim 50 \text{ Hz}$ 为共振区,大于 50 Hz 为衰减区。系统频率在 41 Hz 附近灵敏度急剧放大,对应的频谱分布如图 13 所示,超过该频率灵敏度迅速衰减,该低频传感器具有较好的平坦响应区,还可通过调节传感器的结构参数来改变平坦区的范围。

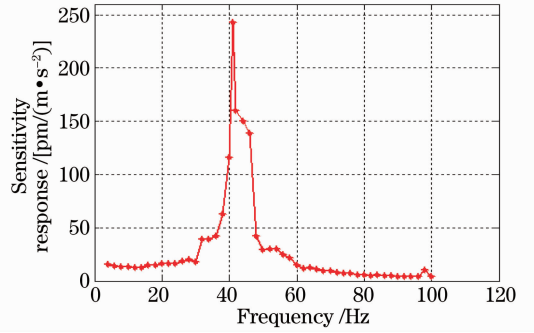


图 12 不同频率的灵敏度响应
Fig. 12 Sensitivity response of different frequencies

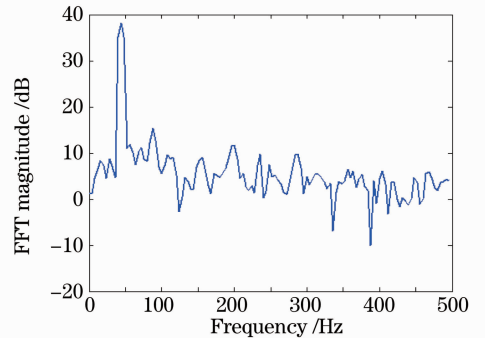


图 13 最大灵敏度时的频率分布
Fig. 13 Frequency distribution of maximal sensitivity

4 结 论

提出了一种新颖的基于 π 相位温度不敏感的双光纤布拉格光栅加速度传感技术,并设计了双光栅加速度传感器,对该加速度传感器的温度的不敏感特性进行了理论分析和实验研究。实验结果表明,在 $67.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 27.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,传感器具有较好的温度不敏感特性,实际应用时,可在更大温度范围内实现温度去敏精确测量,加速度传感器的线性灵敏度为 $15.52 \text{ pm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$,在小于共振时的低频段具有较好的平坦区。由传感器的理论分析知,通过改变传感器的材料参数、结构参数可实现灵敏度、共振频率和平坦区的优化。该加速度传感器可应用于低频振动信号的温度去敏精确测量。

参 考 文 献

- 1 Jia Ziguang, Ren Liang, Li Hongnan *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1298~1303
贾子光, 任亮, 李宏男等. 应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1298~1303
- 2 Yu Dakuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. The fiber Bragg grating temperature and pressure sensing system applied in oil pipeline[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(1): 12~14
禹大宽, 乔学光, 贾振安等. 应用在油气管线的光纤光栅温度压力传感系统[J]. *激光技术*, 2007, **31**(1): 12~14
- 3 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 4 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei *et al.*. Study of optical-fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 686~691
王静, 冯德军, 隋青美等. 基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 686~691
- 5 Y. N. Zhu, P. Shum, C. Lu *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating accelerometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1437~1439
- 6 R. Romero, O. Frazão, D. A. Pereira *et al.*. Intensity-referenced and temperature-in dependent curvature-sensing concept based on chirped fiber Bragg gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(18): 3821~3826
- 7 T. K. Gangopadhyay. Prospects for fiber Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers in fiber-optic vibration sensing[J]. *Sens. Actuators A, Phys.*, 2004, **113**(1): 20~38
- 8 A. Fender, W. N. Macpherson, R. R. J. Maier *et al.*. Two-axis temperature-insensitive accelerometer based on multicore fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Sens.*, 2008, **8**(7): 1292~1298
- 9 T. Guo, L. Shao, H. Tam *et al.*. Tilted fiber grating accelerometer incorporating an abrupt biconical taper for cladding to core recoupling [J]. *Opt. Express.*, 2009, **17**(9): 20651~20660
- 10 Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhen'an *et al.*. High precision optical fiber Bragg grating demodulation system based on the source filtering for seismic detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2219~2223
乔学光, 丁锋, 贾振安等. 基于光源滤波的高精度光纤光栅地震检波解调系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2219~2223
- 11 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Light intensity referred and temperature insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 207~211
郭团, 赵启大, 刘丽辉等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 207~211
- 12 Lan Li, Xinyong Dong, Wenjun Zhou *et al.*. Temperature-independent accelerometer with a strain-chirped fiber Bragg grating[C]. OSA/ACP.2009,TUEFF7
- 13 Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang *et al.*. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 828~834
郭团, 刘波, 张伟刚等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 828~834
- 14 S. R. K. Morikawa, A. S. Ribeiro, R. D. Regazzi *et al.*. Triaxial Bragg grating accelerometer[C]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digestions, 2002, **11**(15): 95~98
- 15 Cai Haichong, Min Xing. Mechanics of Materials[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. 7~296
蔡怀崇, 闵行. 材料力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004. 7~296
- 16 W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn. Fiber optic Bragg grating sensors[C]. *SPIE*, 1989, **1169**: 98~107
- 17 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463