

基于激光自混合效应的加速度传感器

杨 颖^{1,2} 李醒飞^{1,2} 李洪宇³ 王 错^{1,2} 寇 科^{1,2}

¹ 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072
² 天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072
³ 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590

摘要 提出一种基于激光自混合效应的加速度传感器,并介绍了该系统结构及工作原理,分析了分辨率的影响因素及影响机理。该传感器利用双挠性梁支撑的摆片作为第一级敏感元件。有加速度输入时,摆片在惯性力作用下产生与加速度成比的位移信号,引起激光器外腔长度变化,使得被锯齿波电流调制的激光器输出相位差随加速度变化的自混合干涉信号;采用全相位谱分析算法进行自混合干涉信号相位解调,重构位移曲线,进而获得加速度值。通过系统仿真模型验证了加速度传感系统的可行性。对加速度传感系统进行测试。实验结果表明,加速度传感器分辨率为 $0.19 \mu\text{g}$ 。实验结果和理论分析相吻合,基于激光自混合效应的加速度传感器可实现高分辨率。

关键词 测量;加速度传感器;激光自混合干涉;垂直腔面发射激光器;全相位快速傅里叶变换

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0228003

Acceleration Sensor Based on Laser Self-Mixing Interference

Yang Ying^{1,2} Li Xingfei^{1,2} Li Hongyu³ Wang Cuo^{1,2} Kou Ke^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Ministry of Education Key Laboratory of Micro-Opto-Electro-Mechanical System Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

³ College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

Abstract A novel acceleration sensor based on laser self-mixing interference is proposed. The structure and principle of the accelerometer are introduced. The influence of different factors on its resolution and their influencing mechanism are analyzed. The pendulous reed supported by dual flexible beam is used as the first step sensing unit. When an inertial force due to acceleration is applied in the pendulous reed, a displacement proportional to the acceleration occurs to the pendulous reed, which changes the length of external cavity. The phase of self-mixing interference signals generated by laser which is modulated by sawtooth-wave current is a function of acceleration. All-phase spectrum analysis is applied to detect the phase of self-mixing interference signals to reconstruct the displacement of the pendulous reed and the acceleration. A simulation model of the acceleration sensor is established. The simulation results show that the scheme is feasible. Its performances are measured through experiments. Experimental results show that the resolution of the acceleration sensor is $0.19 \mu\text{g}$, which consistent with the retical analysis. The acceleration sensor based on laser self-mixing interference can achieve a high resolution.

Key words measurement; acceleration sensor; laser self-mixing interference (SMI); vertical cavity surface emitting laser (VCSEL); all-phase fast Fourier transformation (apFFT)

OCIS codes 130.6010; 120.3180; 120.5050

收稿日期: 2012-08-30; 收到修改稿日期: 2012-10-15

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20110032110052)、一院 CALT 创新基金(S2012-1-7)、精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(PIL1006)和机电工程与控制国家级重点实验室科研基地科技支撑计划资助课题。

作者简介: 杨 颖(1983—),女,博士研究生,主要从事精密测控与测试技术等方面的研究。E-mail: yangying@tju.edu.cn

导师简介: 李醒飞(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事精密测控与测试技术等方面的研究。E-mail: lixf@tju.edu.cn

1 引 言

作为惯性导航、制导和控制系统中的关键测量元件,加速度传感器的分辨率直接影响整个系统的测量精度,并最终影响导航精度。高分辨率加速度传感器已经广泛地应用于航空、航天等领域中,如航天器导航、卫星轨道控制和空间微重力环境监测等。常用的电容式加速度传感器中,由于电容的变化量正比于位移的平方,为实现高分辨率,需增大传感器结构尺寸,限制了其应用范围。随着激光、光纤传感等技术的不断发展,光电式加速度传感器以其分辨率高、抗电磁干扰能力强、体积小和质量轻等优点^[1],逐渐成为国内外研究的热点。目前研究的类型主要有光强调制型^[2,3]、偏振态调制型^[4]、波长调制型^[5~7]及干涉型^[8~11]。光强调制型加速度传感器结构简单,但稳定性较差,体积较大;偏振态调制型加速度传感器一般基于光弹效应,结构复杂,不易实现,测量范围较小;波长调制型研究较多的是光纤布拉格光栅(FBG)加速度传感器,光路简单,但精度低,信号分析系统较复杂。干涉型加速度传感器可实现较高的分辨率,如 Peng 等^[8]提出的 Michelson 干涉型加速度传感器,但双光路干涉结构庞大,光路复杂,不易准直;Gerges 等^[10]设计的法布里-珀罗(F-P)干涉型加速度传感器分辨率为 $5 \mu\text{g}$ ^[10],但其传感器头不易制作。

激光自混合效应近年来被广泛应用于位移、速度和振动等物理量的测量^[12~17],该方法与传统的双光路干涉有着同样的相位灵敏度,且其测量系统仅有一个干涉通道,结构简单、易准直、体积小。本文提出了一种基于激光自混合效应的加速度传感器。该传感器利用双挠性梁支撑的摆片作为第一级敏感元件。当垂直摆片方向有加速度输入时,摆片产生与加速度成比例的位移信号,引起激光器的外腔长度变化,使得被锯齿波注入电流调制的激光器输出相位差随加速度变化的自混合干涉(SMI)信号;采用全相位谱分析算法(apFFT)进行 SMI 信号相位解调,重构摆片位移曲线,进而获得加速度值。研究了加速度传感系统结构及其工作原理,建立了系统数学模型,分析了分辨率的影响因素及影响机理,并对加速度传感系统进行了测试。

2 加速度传感器结构及其工作原理

加速度传感器结构如图 1 所示,包括敏感元件、光学传感模块及信号处理模块。利用敏感元件将输

入的加速度 a 转化为位移 d ;基于激光自混合效应将位移 d 转化为激光器(LD)输出功率变化,通过光电检测元件(PD)检测 SMI 信号并将其转化为电信号 I ;通过信号处理模块提取 SMI 信号中的加速度信息 a 。

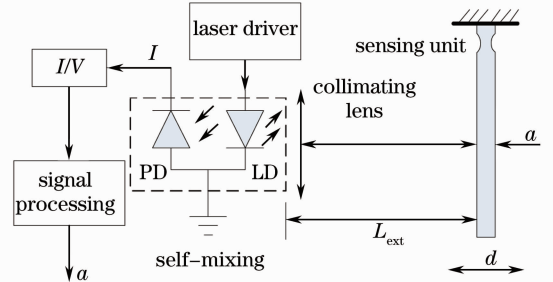


图 1 加速度传感器结构图

Fig. 1 Configuration of the acceleration sensor

2.1 敏感元件的静态力学分析

敏感元件为双挠性梁支撑的摆片,其单梁结构如图 2(a)所示,图 2(a)中 F 为摆片重心处的作用力。其等效模型如图 2(b)所示,图 2(b)中 M 为力 F 在挠性梁自由端的等效力矩, $M = Fl$ 。

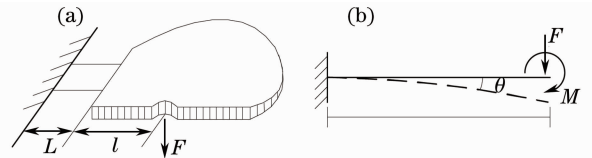


图 2 敏感元件。(a) 敏感元件结构;

(b) 敏感元件等效模型

Fig. 2 Sensitive unit. (a) Configuration of the sensitive unit; (b) equivalent model of the sensitive unit

根据挠曲线方程可知,挠性梁最大角位移 θ_{\max} 满足

$$\theta_{\max} = \frac{FL^2}{2EI} + \frac{ML}{EI} = \frac{FL}{EI} \left(\frac{L}{2} + l \right), \quad (1)$$

式中 E 为弹性模量, I 为梁的惯性矩, L 为挠性梁长度, l 为梁末端到摆片中心的距离,则双挠性梁的角刚度

$$k = 2 \times \frac{FL + M}{\theta_{\max}} = \frac{bh^3 E(L + l)}{6L(l + L/2)}, \quad (2)$$

式中 b 为梁宽度, h 为梁厚度。当系统处于近似的常加速度输入下的稳态时,挠性梁角位移 θ 与输入加速度 a 成近似线性关系:

$$\frac{\theta}{a} \approx \frac{P}{J\omega_n^2} = \frac{m(L + l)}{k}, \quad (3)$$

式中 P 为摆性, $P = m(L + l)$, m 为质量, J 为转动惯量, ω_n 为加速度计活动的自然角频率, $\omega_n = (k/J)^{1/2}$, 摆片位移为

$$d = D\theta = \frac{m(L+l)D}{k}a, \quad (4)$$

式中 D 为挠性梁固定端到摆片末端的距离。由(4)式可知,位移 d 与输入加速度 a 成比例,通过检测摆片位移可实现加速度测量,则敏感元件灵敏度为

$$S_1 = \frac{m(L+l)D}{k}. \quad (5)$$

由(5)式可知,敏感元件灵敏度决定于摆片质量、结构尺寸及角刚度,通过减小弹性结构角刚度增大敏感元件质量可提高敏感元件的灵敏度。由(2)式分析可知,挠性梁厚度 h 是决定角刚度的主要参数,应尽量减小。考虑当前加工水平,在敏感元件结构设计中 $h = 0.03 \text{ mm}$,其他结构参数经过优化设计为 $L = 2.55 \text{ mm}$, $l = 5.3 \text{ mm}$, $b = 3.8 \text{ mm}$, $D = 15.15 \text{ mm}$ 。经过计算灵敏度理论值为 $2.88 \times 10^{-3} \text{ m/g}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

2.2 光学传感原理

基于激光自混合效应的光学传感模块是整个加速度传感器的核心,由光源、光电探测器及反射镜(摆片)组成。系统中光源选用垂直腔面发射激光器(VCSEL),该类型的激光器出射光圆对称且无象散,其内部封装光电探测器,可进一步减小传感器体积。VCSEL 发出的光被摆片表面反射后,部分反馈光重新注入谐振腔内与腔内光干涉,通过干涉函数 $F(\phi_{\text{ext}})$ (ϕ_{ext} 为外腔相位)调制 VCSEL 输出光功率 P 。干涉函数 $F(\phi_{\text{ext}})$ 的波形由反馈系数 C 决定,其中

$$C = \frac{\tau_{\text{ext}}}{\tau_{\text{int}}} \cdot \frac{r_{\text{ext}}}{r_2} (1 - |r_2|^2) \sqrt{1 + \alpha^2}, \quad (6)$$

式中 τ_{ext} 、 τ_{int} 分别为光在外腔、内腔往返一周时间, $\tau_{\text{ext}} = 2L_{\text{ext}}/c$, $\tau_{\text{int}} = 2L_{\text{int}}/c$, L_{ext} 、 L_{int} 分别为 VCSEL 的外腔及内腔长度, c 为光速, r_{ext} 、 r_2 分别为外反射镜及 VCSEL 输出端面镜反射率, α 为线宽展宽因子。当 $C < 1$ 时, $F(\phi_{\text{ext}})$ 为余弦函数,忽略外腔多重反馈,激光器输出功率满足

$$P = P_0[1 + m'F(\phi_{\text{ext}})] = P_0(1 + m' \cos \phi_{\text{ext}}), \quad (7)$$

式中 P_0 为 VCSEL 无反馈时的光功率, m' 为调制系数,近似等于 10^{-3} 。

$$\phi_{\text{ext}} = \frac{4\pi\nu L_{\text{ext}}}{c} = \frac{4\pi\nu(L_0 + d)}{c}, \quad (8)$$

式中 ν 为反馈光存在时的光频率, L_0 为外腔初始腔长。图 3 为不同光反馈水平下输出功率随外腔长度 L_{ext} 改变的曲线。由图 3 可知,1)激光器输出功率是外腔长度的非线性周期函数,周期为 $\lambda/2$ ($\lambda = 850 \text{ nm}$);2) C 值较小时,SMI 信号按余弦变化,波动

深度较小;随着 C 值增大,波动深度变大,功率的变化曲线由类余弦信号向类锯齿波渐变。当 $C > 1$ 时,系统将出现多种非线性现象。

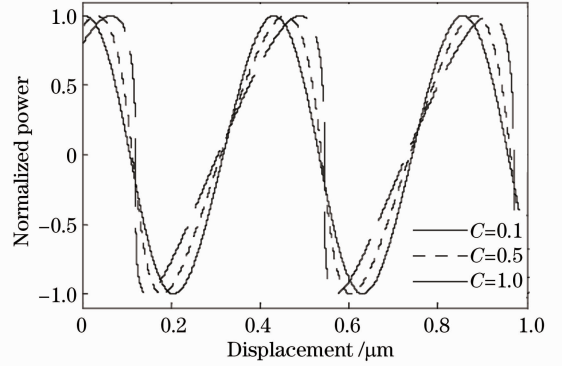


图 3 输出功率随外腔长度的变化

Fig. 3 Output power versus length of external cavity

因此,通过光电探测器测量 SMI 信号可得到敏感元件位移(即加速度)信息。为减小反馈强度不当引入的测量误差,需对参数 C 进行调整。由(6)式可知,当激光器参数一定时,通过调整外腔初始长度 L_0 及摆片表面反射率 r_{ext} 可改变 C 值的大小。经过计算,外腔初始长度 $L_0 = 1 \text{ cm}$ 时,摆片表面反射率 $r_{\text{ext}} < 0.02$,故在摆片表面镀低反射率金属膜,使光学传感系统工作在 $C < 1$ 的弱反馈条件下,可实现加速度的可靠测量。

2.3 信号处理算法原理

信号处理模块的主要作用是从 SMI 信号中提取被敏感元件位移调制的相位差,重构敏感元件位移曲线,实现加速度测量。常用的条纹计数法分辨率较低,仅为 $\lambda/2$ 。采用锯齿波注入电流对激光器进行线性调制,通过相位解调算法恢复位移信号,可实现更高的分辨率。此时,光频率满足

$$\nu_0 = \nu_{\text{th}} + \beta t, \quad nT \leq t \leq (n+1)T, \quad (9)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots,$$

式中 ν_{th} 为激光器阈值频率, $\nu_{\text{th}} = c/\lambda_0$, λ_0 为激光波长, β 为调制系数, t 为时间, T 为激光器输出光频率变化周期。由于系统为弱反馈,忽略反馈光对光频率的影响, $\nu \approx \nu_0$, 则外腔相位

$$\phi_{\text{ext}} = \frac{4\pi(\nu_{\text{th}} + \beta t)(L_0 + d)}{c} = 2\pi f_m t + \phi + \phi_0, \quad (10)$$

式中 ϕ_0 为初始相位, f_m 为信号基频, ϕ 为敏感元件位移 d 引入的相位变化:

$$f_m = \frac{2\beta L_0}{c}, \quad \phi_0 = \frac{4\pi L_0}{\lambda}, \quad \phi = \frac{4\pi d}{\lambda_0}. \quad (11)$$

由(11)式可知,干涉信号的相位变化与位移 d

成比例,相位的测量精度直接决定了敏感元件位移的测量精度,实现相位的准确测量是该加速度传感系统研究的关键问题。一般相位测量方法中采用快速傅里叶变换(FFT)进行相位解调,但该方法的前提条件是输入的数字序列必须是周期内的等间隔采样点,否则截断后的周期延拓信号将存在跳变,频谱上表现为频谱泄露,降低相位测量精度^[18]。而实际系统中,等间隔采样不可能实现,则由频谱泄露引入的相位测量误差不可避免。为此,在数据进行FFT变化前首先进行全相位预处理^[19,20],抑制截断引入的频谱泄露,以减小相位测量误差。信号处理流程如图4所示。

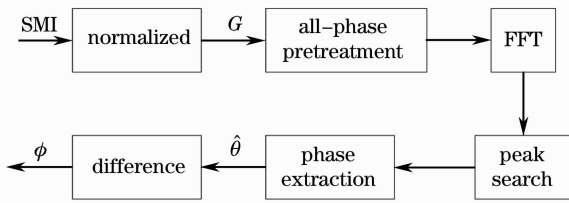


图4 apFFT 相位解调流程

Fig. 4 Flow chart of phase modulation based on apFFT

对采集到的 SMI 信号进行归一化处理,得到归一化信号 G ;进行全相位预处理及 FFT 变换;通过峰值搜索,提取峰值谱线对应的相位,即为中间采样点对应的瞬间相位值 $\hat{\theta}$:

$$\hat{\theta} = \arctan \left[\frac{\text{Im} \hat{G}(f)}{\text{Re} \hat{G}(f)} \right]. \quad (12)$$

则系统加速度为

$$a = \frac{\lambda_0}{4\pi S_1} \phi = \frac{\lambda_0}{4\pi S_1} (\hat{\theta} - \phi_0). \quad (13)$$

2.4 加速度传感系统分辨率分析

由(13)式推出系统最小分辨加速度

$$a_{\min} = \frac{\lambda_0}{4\pi S_1} \phi_{\min}. \quad (14)$$

由(14)式可知,加速度传感器分辨率主要决定于敏感元件灵敏度及光学传感模块位移分辨率。要提高系统分辨率有两种途径:1)提高敏感元件灵敏度,然而敏感元件灵敏度反比于敏感元件固有频率,高灵敏度的同时会降低传感器测量频带;2)提高光学传感模块的位移分辨率,即减小波长及相位噪声。相位噪声主要来源于波长稳定性、光电检测器噪声、电路系统噪声及相位解调算法误差。其中,光电检测器自身噪声相对于后续电路噪声要小得多,可以忽略。则提高波长稳定性,减小电路系统噪声及相位解调算法误差可提高系统分辨率。

3 加速度传感系统模型仿真

建立加速度传感系统仿真模型,分别采用 FFT、apFFT 算法进行 SMI 信号的相位解调。

仿真条件为 $S_1 = 2.88 \times 10^{-3} \text{ m/g}$, $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$, $L_0 = 2 \text{ cm}$, $C = 0.1$, 锯齿波频率 $f = 500 \text{ Hz}$ 、幅值 $I_m = 0.1 \text{ mA}$ 。加速度 a 以正弦曲线变化,幅值为 1 mg ,频率为 1 Hz ,如图5(a)所示。图5(c)、(d)为解调出的相位。由图5(c)、(d)可知,解调相位被控制在 $\pm\pi$ 之间,需进行解卷处理,恢复原则为相邻两点的相位差大于 π 或小于 $-\pi$,则加或减 2π 直到两者相位差在 $\pm\pi$ 范围内。图5(e)~(h)分别为二者重构出的加速度曲线及相应的误差。仿真结果表明,apFFT 算法能够准确、实时地从 SMI 信号中提取出加速度信息,且误差明显小于 FFT 计算误差。产生误差的原因包括频谱泄露及算法原理误差。因此,文中提出的加速度测量方案具有可行性。

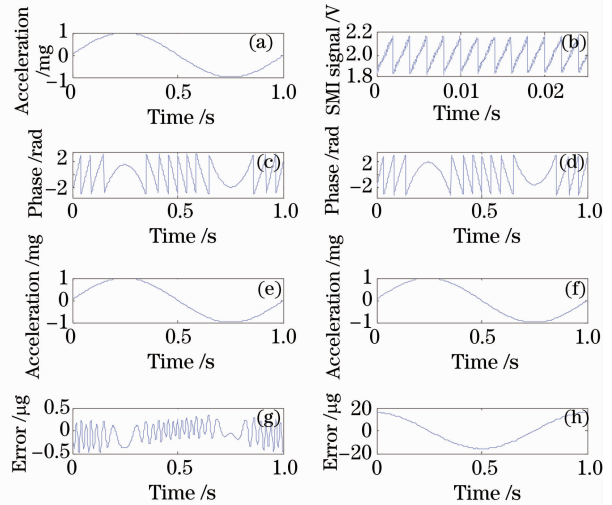


图5 仿真结果。(a)输入加速度;(b) SMI 信号;(c) apFFT 解调相位;(d) FFT 解调相位;(e) apFFT 加速度测量结果;(f) FFT 加速度测量结果;(g) apFFT 算法误差;(h) FFT 算法误差

Fig. 5 Simulated displacement of external target. (a) Acceleration curve; (b) SMI curve; (c) demodulated phase curve through apFFT; (d) demodulated phase curve through FFT; (e) reconstruction of the acceleration curve through apFFT; (f) reconstruction of the acceleration curve through FFT; (g) error curve through apFFT; (h) error curve through FFT

4 加速度传感器性能分析及测试

由于光学模块的分辨率是制约系统分辨率的根本因素。因此,首先对光学传感模块进行测试。实验系统如图 6 所示,为消除振动、电磁干扰等影响,将实验系统放于电磁屏蔽室内的精密气浮光学平台上进行相关实验。

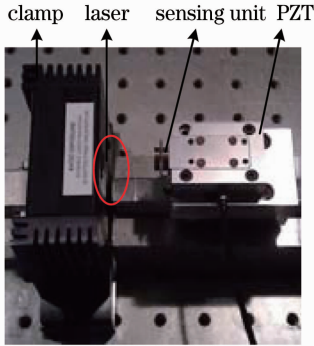


图 6 实验系统图

Fig. 6 Schematic of the experimental setup

实验系统包括光学模块、微位移输出模块及信号处理模块。光学模块包括激光器夹具、温控器、VCSEL 及其驱动电路;VCSEL 输出光波长 $\lambda_0 = 850$ nm,内部集成光电三极管及准直透镜,波长调制系数为 0.25 nm/mA,温度漂移系数为 0.06 nm/°C;驱动电源由 5 mA 直流分量和锯齿波电流分量组成,电流稳定度为 ± 0.00015 mA,驱动电流引入的波长波动可以忽略,调制电流幅度为 0.1 mA、频率为 500 Hz;温控器温度稳定性为 ± 0.004 °C,温度漂移对于波长的影响可以忽略。微位移输出模块包括摆片、压电陶瓷(PZT)及其驱动电路,PZT 位移分辨率为 0.05 nm,量程为 15 μ m,线性度为 0.03% ;摆片安装在 PZT 上,由 PZT 带动产生微位移,其镀膜表面为光学传感模块反射面,通过三维调整机构保证光束垂直于反射面。信号处理模块包括信号调理电路、数据采集卡及数字信号处理模块。信号调理电路又包括低噪声电流/电压(I/V)转换电路、放大电路和滤波电路。I/V 转换电路中所选运放为专用低噪声运放,且漂移仅为 0.01 μ V/°C,可满足低噪声 I/V 转换电路的使用要求。处理后的 SMI 信号经过数据采集卡(16 bit)耦合至 PC 机。最后,由数字信号处理算法进行相位解调,提取 SMI 信号相位差重构位移曲线。

相位噪声是决定光学传感模块位移分辨率的主要因素。保持 PZT 不动,分别采用 FFT、apFFT 进行相位解调,系统输出的相位噪声如图 7 所示。测得 1 s 内的噪声数据均方根分别为 1.1×10^{-2} rad,

5.5×10^{-3} rad,基于 apFFT 算法的相位解调方法减小了系统相位噪声。通过改进电路系统,如低噪声、低漂移放大,可进一步减小相位噪声,提高系统分辨率。

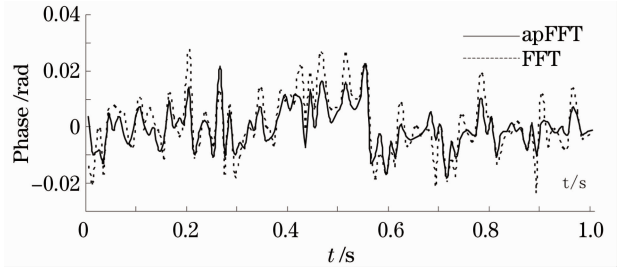


图 7 光学传感模块噪声

Fig. 7 Noise of the optical sensing module

PZT 做频率为 1 Hz、幅值为 10 nm 的锯齿波运动,采样频率为 300 kHz,采样起点为 PZT 运动的零点,采用滑动窗截取数据段,并分别对各段数据进行 apFFT,调整数据段长度使得相邻两次计算过程测量的位移间隔点足够分辨,测得位移分辨率为 0.48 nm。另外,采用敏感元件专用测试设备测得敏感元件角刚度 $k = 3.68 \times 10^{-4}$ N·m/rad,经计算,其灵敏度 $S_1 = 2.51 \times 10^{-3}$ m/g,略小于设计值,主要原因是加工误差的存在。则由(14)式计算得到系统可分辨的最小加速度为 0.19 μ g。

PZT 做频率为 1 Hz,幅值不同的正弦运动,由相位解调算法重构出的位移曲线如图 8(a)所示,重构位移曲线与 PZT 运动曲线之间存在一定的偏差,偏差的均方根随振幅增大而增大,产生偏差的原因包括系统噪声、采样频率的波动、相位测量误差及空气扰动。图 8(b)为设定位移值(峰峰值)同解调相位之间的关系曲线及其最小二乘拟合曲线。半个波长范围内,位移与所测得的相位差呈线性关系,线性度为 0.03% ,斜率为 14.85 ,符合理论推导结果。

控制 PZT 做振幅不变,频率由 1 Hz 增加到 100 Hz 的正弦运动,得到光学传感模块频率响应曲线,如图 9 所示。由图 9 可知低频段的响应平缓衰减,该传感器适用于低频信号测量。

通过夹具将封装于密闭套筒中的加速度传感系统固定在 PZT 上,敏感元件框架随 PZT 运动,摆片处于无约束的自由状态,且敏感轴方向与 PZT 位移方向一致,当 PZT 振动时,其位移为 $x(t) = A \sin(2\pi ft)$,则其加速度

$$\ddot{x}(t) = 4\pi^2 f^2 A \sin(2\pi ft). \quad (15)$$

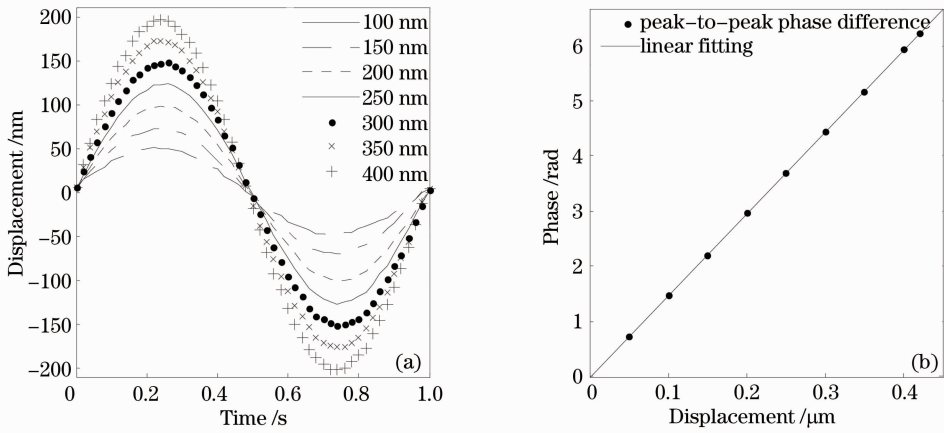


图 8 位移测量结果。(a) PZT 不同振幅时测得的位移曲线;(b)位移峰峰值与解调相位的关系

Fig. 8 Results for displacement measurements. (a) Reconstructed displacements at different amplitudes of PZT; (b) peak to peak value of displacement versus modulated phase

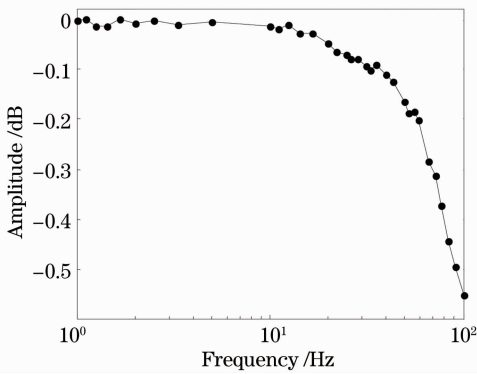


图 9 频率响应曲线

Fig. 9 Frequency response

由于系统噪声及非线性因素的影响,该加速度计的量程较小,减小系统噪声、减少光反馈量、改进相位解调算法可扩大加速度计量程。加速度传感器输入输出关系曲线如图 10 所示,线性度为 0.5%。图 10 可知,随着加速度增大,系统线性逐渐变差。一方面,由于随着输入加速度增大,挠性梁进入非线性区域;另一方面敏感元件位移超过半个波长时,相

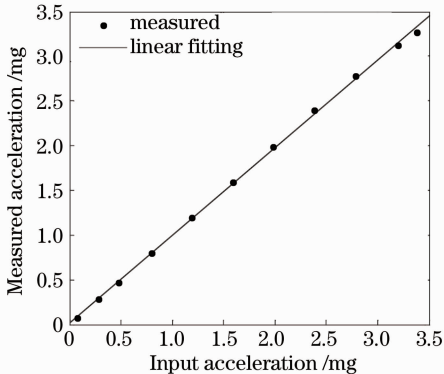


图 10 光学传感模块非线性曲线

Fig. 10 Nonlinearity curve of the optical sensing module

位解调算法的非线性误差增大,光学传感模块非线性误差随之增大。结合力反馈回路,该方法可用于实现闭环高精度加速度传感器设计。

5 结 论

提出一种基于激光自混合效应的加速度传感器。介绍了系统结构及工作原理,建立了系统数学模型,分析了影响分辨率的主要因素及影响机理,利用仿真模型验证了方案的可行性,并对加速度传感系统进行测试。实验结果表明,该加速度计分辨率可达到 $0.19 \mu\text{g}$ 。基于激光自混合效应的加速度传感器可实现亚微克量级的高分辨率,且结构简单、体积小、易集成。该方案可结合微制造技术,用于高分辨率微光机电加速度计设计,在航空航天领域有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Chinese Society of Inertial Technology. Development Report 2009~2010 Inertial Technology Disciplines[R]. China Science and Technology Press, 2010. 69~73
中国惯性技术协会. 2009~2010 惯性技术学科发展报告[R]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010. 69~73
- 2 F. Vallet, J. Marcou. A low frequency optical accelerometer[J]. *J. Optics-Nouvelle Revue D Optique*, 1998, **29**(3): 152~155
- 3 R. A. Soref, D. H. Memahon. Tilting-mirror fiber-optic accelerometer[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(3): 486~491
- 4 W. Holzapfel, S. Neuschaefer-Rube, M. Kobusch. High-resolution, very broadband force measurements by solid-state laser transducers[J]. *Measurement*, 2000, **28**(4): 277~291
- 5 I. Talebinejad, C. Fischer, F. Ansari. Serially multiplexed FBG accelerometer for structural health monitoring of bridges[J]. *Smart Structures and Systems*, 2009, **5**(4): 345~355
- 6 L. Li, X. Dong, L. Shao *et al.*. Temperature-independent acceleration measurement with a strain-chirped fiber Bragg grating[J]. *Optoelectronics and Advanced Materials*, 2010, **12**(8): 1666~1669

- 7 A. Costa, F. Paulo, C. A. Marques *et al.*. Biaxial optical accelerometer and high-angle inclinometer with temperature and cross-axis insensitivity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(7): 2399~2406
- 8 F. Peng, J. Yang, B. Wu *et al.*. Compact fiber optic accelerometer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(1): 011201
- 9 M. Suzuki, T. Takahashi, S. Aoyagi *et al.*. A study of Mach-Zehnder interferometer type optical modulator applicable to an accelerometer[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2011, **50**(4): 04DG14
- 10 A. S. Gerges, T. P. Newson, J. D. C. Jones *et al.*. High-sensitivity fiber-optic accelerometer [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(4): 251~253
- 11 Wang Daihua, Liu Shuxin, Yuan Gang *et al.*. Study on parallel multiplexed Fabry-Pérot fiber optic accelerometers and the signal demodulation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1776~1782
王代华, 刘书信, 袁刚等. 并联复用光纤法-珀加速度传感器及解调方法的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1776~1782
- 12 G. Giuliani, N. Norgia, S. Donati *et al.*. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2002, **4**(6): 283~294
- 13 L. Zhang, S. L. Zhang, L. F. Zhou *et al.*. Nanometer-resolution displacement measurement system based on weak feedback effect of dual-frequency laser[J]. *Frontier Research in Nanoscale Science and Technology*, 2009, **2**(1): 19~26
- 14 F. Chollet, G. M. Hegde, X. M. Zhang *et al.*. Vibration measurement with a micromachined mirror in a very-short external cavity laser[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2004, **116**(2): 232~240
- 15 Lü Liang, Huang Yang, Yu Benli. Cantilever vibration characteristics based on laser self-mixing interference effect[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208008
吕亮, 黄样, 俞本立. 基于激光自混合干涉效应的悬臂梁振动特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0208008
- 16 Xia Wei, Hao Hui, Wang Feng *et al.*. Analysis and test for the dynamic performance of laser self-mixing interferometer based on phase modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1208003
夏巍, 郝辉, 王峰等. 相位调制型激光自混合干涉仪的动态特性分析及测试[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1208003
- 17 Wang Xiuli, Gui Huaqiao, Lu Yihuai *et al.*. Numerical simulation and characteristics analysis of laser self-mixing interference measurement of atmospheric particle parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101003
王秀丽, 桂华侨, 陆亦怀等. 大气颗粒物多参数激光自混合传感的数值模拟与特性分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0101003
- 18 M. Wang. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**(6): 409~416
- 19 Huang Xiangdong, Wang Zhaohua. All-phase time-shift phase difference correcting spectrum method [J]. *J. Tianjin University*, 2008, **41**(7): 815~820
黄翔东, 王兆华. 全相位时移相位差频谱校正法[J]. *天津大学学报*, 2008, **41**(7): 815~820
- 20 Yang Ying, Li Xingfei, Kou Ke *et al.*. Application of all-phase spectral analysis to self-mixing interferometry for displacement measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(8): 1740~1746
杨颖, 李醒飞, 寇科等. 全相位谱分析在自混合干涉位移测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(8): 1740~1746

栏目编辑：何卓铭