

文章编号: 0253-2239(2010)05-1473-05

基于光栅平移的大量程光学加速度计

陈柳华 林 巧 李 书 倪 玮 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出一种新颖的基于光栅 ± 1 级干涉和相位载波(PGC)调制解调的光学加速度传感方案,并进行了样机制作和测试,其分辨率达到 $4 \times 10^{-5} g_n$ 量级以上,动态范围在光学结构中不受限制,仅与惯性传感中机械结构线性范围有关。与其他类型微加速度计相比,该光学加速度传感器不但在分辨率和动态范围上均获得较大的提高,而且利用光栅干涉进行加速度传感能很好地保证干涉的稳定性,从而提高工作稳定性,降低对安装精度的要求。该方案还可以应用到微电子机械系统(MEMS)技术中,为设计高分辨率大量程微光机电系统(MOEMS)型加速度计,提供了新的思路。

关键词 传感器;加速度计;光栅干涉;相位载波调制解调;加速度传感器

中图分类号 TN365 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1473

Large Dynamic Range Micro Optical Accelerometer Based on Grating Translation

Chen Liuhua Lin Qiao Li Shu Ni Wei Wu Xingkun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A novel optic accelerometer based on grating interference and phase generated carrier (PGC) modulation has been fabricated and tested. The reported prototype has sensitivity of above $4 \times 10^{-5} g_n$. Its dynamic range, which is relative with cantilevers of inertia system, is completely free from the limit of optical structure. In comparison with piezoelectricity and capacitive micro-electro-mechanical systems (MEMS) accelerometers, this device achieves an improvement both in resolution and dynamic range. Applying interference between ± 1 refraction beams from a grating to acceleration sensing can also enhance stability and reduce the requirements on the installation of precision. The scheme proposed can also be applied to MEMS technique, which supplies a new thought for the design of high resolution and large dynamic range micro-opto-electromechanical systems (MOEMS) accelerometers.

Key words sensors; accelerometer; grating interference; PGC modulate and demodulate; acceleration sensor

1 引 言

微加速度计广泛用于振动检测、姿态控制、安防报警和导航定位等领域,应用范围日益扩大。在日新月异的微加速度传感器领域,为了达到更高的性能,各种新型的产品不断出现。随着产品的小型化,出现了各种新的影响因素^[1~3]。然而,在多数情况下,受制于高灵敏度的传感方法如隧道效应或 Mach-Zehnder 干涉法,微加速度计的高分辨率和大量程在设计中通常难以同时获得。对此,提出一种新颖的基于光栅 ± 1 级干涉并结合相位载波(PGC)

调制解调的光学加速度传感方案,并进行了样机制作和测试。

2 结构和工作原理

加速度传感器原理如图 1 所示。当有外界加速度作用在传感器上的时候,惯性质量块(图 1 中的光栅)会产生一个与该加速度相对应的位移量。位移传感器感知惯性质量块的位移,输出受位移调制的电信号。通过信号的解调可以获得位移值,进而获得加速度的值。加速度传感器的性能主要受惯性传

收稿日期: 2009-06-02; 收到修改稿日期: 2009-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(60577025)资助课题。

作者简介: 陈柳华(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: clh.osk@gmail.com

导师简介: 吴兴坤(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事集成波导通信器件应用方面的研究。

E-mail: xingkunwu@163.com

感和位移传感两部分性能的影响,因此,高灵敏度的惯性系统和高精度位移传感系统的设计显得尤为必要。设计由优化的四悬臂梁惯性传感结构和基于光栅干涉和PGC调制解调的高分辨率微位移传感器组成。图中PZT为锆钛酸压电振荡器。

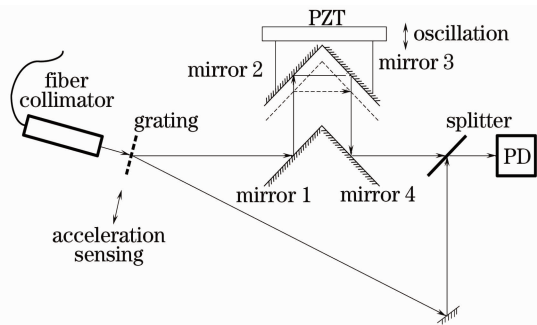


图 1 加速度传感器原理图
Fig. 1 Accelerometer schematic

2.1 惯性传感结构:

加速度传感器的惯性传感结构如图 2(a)所示。将两片厚度为 0.05 mm 的黄铜膜片加工成直角形作为悬臂梁,质量框和光栅作为质量块 ($m = 0.408\text{ g}$),组成四悬臂梁系统。如图 2(a)所示,4 条悬臂梁长 10.2 mm、宽 1 mm、厚 0.05 mm。4 条悬臂梁按方向分成两组,分别限制质量块沿光轴方向的位移,和质量块在竖直方向的位移。悬臂梁在图 2(a)所示方向上,随加速度的变化而产生形变,其形变的位移量与加速度大小具有线性关系。通过测量光栅的位移(即悬臂梁形变产生的位移)可准确地推算出加速度的大小。

为了测量惯性传感结构的性能,采用Cosmosworks工程软件对该悬臂梁结构上的质量块的位移与加速度的关系进行了应变分析,并与实验测试结果比较。

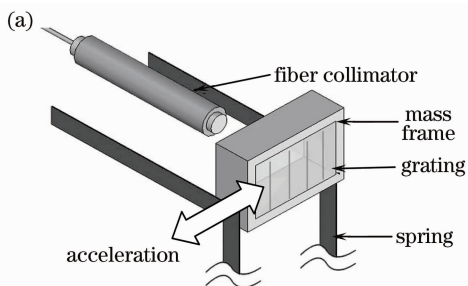


图 2 (a)惯性传感结构图;(b)惯性传感结构形变模拟图

Fig. 2 (a) Inertial sensing structure; (b) inertial sensing structural deformation analog chart

图 2(b)的灰度等级表示模拟分析得到的惯性传感结构在加速度方向上的整体形变情况。模拟仿真时同时在四条悬臂梁的一端施加约束,当沿着图 2(a)所示的方向施加 g_n 加速度时,惯性传感结构中质量块具有最大位移量,大小为 $7.586 \times 10^{-5}\text{ m}$ 。在 $0 \sim 30\text{ g}_n$ 范围内,经过反复实验测试发现,实验测试和模拟仿真所得的位移与加速度关系曲线基本一致。图 3 为模拟仿真所得的位移量与加速度值关系曲线和某一次测试所得的实验曲线图。从图中可知。当加速度在 $0 \sim 30\text{ g}_n$ 范围内时,模拟分析得位移量和加速度值近似成线性关系 $a = (k/m)\Delta d$, 式中 $k/m = 1.318 \times 10^4\text{ g}_n/\text{m}$ 。由此可知,当位移量改变 1 nm 时,对应的加速度变化为 $1.318 \times 10^{-5}\text{ g}_n$ 。图中有两处微小的偏差,在多次测试中发现,中间的偏差主要是由人为操作抖动和周围环境影响等因素造成,右端的偏差主要是由于在大加速度作用下,惯性结构接近非线性区域造成。

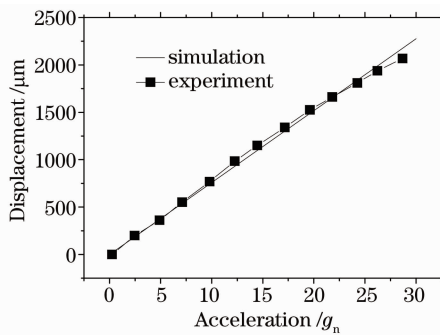


图 3 惯性传感结构位移量与加速度关系
实验曲线和仿真计算对比

Fig. 3 Comparison between simulated and experimental data for the displacement as a function of acceleration of inertial sensing structure

以上分析只考虑了一个方向的受力情况,实际上,在加速度其他方向分量作用下,悬臂梁系统在相应方向也会产生形变,从而影响系统的精确度。在本设计中,由于 4 条悬臂分别处于两个方向,能很好

地限制相应方向的形变,将非传感方向加速度分量的影响减至最小。

2.2 大量程光学位移传感:

如图 1 所示,激光束从光纤准直器出射并垂直入射到正弦振幅光栅,经光栅衍射分光后形成 +1 级和 -1 级两束衍射光束。+1 级光束入射到由压电振荡器(PZT)和 4 块小镜片组成的干涉相位差调制部分,其相位被该部分调制。-1 级光束经过一块反射镜片反射。从干涉相位差调制部分出射的 +1 级光束和经反射镜反射的 -1 级光束由分光镜汇聚产生干涉。由 PD 接收干涉信号。

干涉相位差调制部分的工作原理是这样的: +1 级光束依次以 45° 入射角入射到 4 片按图 1 所示结构安装的反射镜上。其中第二片和第三片反射镜安装在压电振荡器上,随着压电振荡器振动,从而达到调制 +1 级光束光程的目的。

当在光栅平面内有垂直栅线方向(如图 1 所示)的加速度作用在光栅上时,光栅产生相应位移。而光栅位移引起 PD 端干涉相位差的改变^[6,7]。因此通过测量干涉信号,可以得到光栅位移量(即加速度)的信息。

假设激光束经光栅衍射分光后(1 级衍射光可表示为

$$E_{\pm 1} = E_0 \cos(\omega t + kz_{\pm 1}), \quad (1)$$

式中 E_0 为干涉时 ± 1 级光的振幅,由于 ± 1 级光束振幅的微小差异对计算结果的影响不大,所以可近似认为振幅都是 E_0 ; ω 是光源的角频率; $z_{\pm 1}$ 是 ± 1 级光束各自经过的光程。

当压电振荡器(PZT)以正弦规律振动时, ± 1 级光之间引入的光程差为

$$\Delta = 2A \sin(\omega' t), \quad (2)$$

式中 A 和 ω' 分别为振荡器(PZT)振幅和角频率。

当光栅在光栅平面内沿着与栅线垂直方向移动 x_0 时, ± 1 级光之间引入光程差为 $-4\pi x_0/d$ 。此时 PD 端干涉信号为

$$I(x_0) = E_0^2 + E_0^2 \cos\left[\varphi - 4\pi \frac{x_0}{d} + \Delta\right], \quad (3)$$

式中 $\varphi = k(z_{+1} - z_{-1})$ 为原始干涉信号的相位差, $-4\pi x_0/d$ 为光栅位移产生的相位差, $\Delta = 2A \sin(\omega' t)$ 为调制信号。

从分光镜出射的干涉信号被 PD 接收。接收部分结构为一装有光阑的光电二极管,光阑开有极小的小孔(直径约为 0.1 mm),用于接收干涉信号。光电二极管把干涉信号转变为电信号,电信号经过

信号放大器连接到信号处理电路。

干涉信号 $I(x_0)$ 实际上是一个调相波,利用相位生成载波(PGC)解调技术对该调相波进行解调,便可获得精度极高的相位信息,也就是光栅位移信息 x_0 。

由以上分析可知,与传统的由光栅 +1 级和 0 级光产生的光栅干涉相比,本结构由光栅 ± 1 级光产生干涉,对光栅的横向位移更加灵敏。相同的光栅位移产生的相位变化是传统 $(2\pi x_0/d)$ 的两倍 $(4\pi x_0/d)$ 。 ± 1 级光光强大小相等,故干涉条纹衬比度比较大,便于安装和测试。干涉相位差调制部分中,安装在压电振荡器(PZT)上的两块相互垂直的镜片(见图 1),对光路有自调整的能力。即使 PZT 安装位置与理论位置有微小偏差,也能通过调节 PZT 的振动幅度,达到同样的调制效果。

3 实验结果分析

图 4 为该加速度传感器测试样机的实际安装图,传感器整体大小约为 $40 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,其中光栅的光栅常数 $d = 500 \text{ lp/mm}$,光源波长为 632.8 nm ,PGC 调制压电陶瓷采用 100 Hz 的正弦信号驱动,并调整其振幅使得 $2A \approx \pi$,即 PGC 调制深度为 π ^[4~6]。

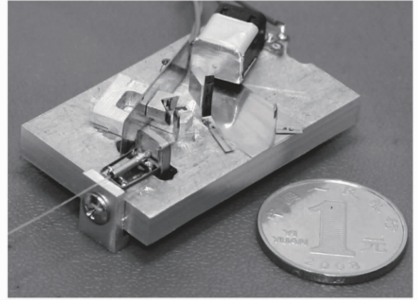


图 4 加速度传感器的实际安装图

Fig. 4 Installation diagram of acceleration sensor

安装时,先用六维精密调节架使各零部件处于适当位置,形成干涉信号。然后用激光点焊机在零件固定支架上打第一个点,以初步固定其位置。移除调节架,进一步修正光路,然后在零件上打第二、三点使其固定。实验时,将加速度传感器安置在测试平台上,将输出信号接至数字示波器,记录不同加速度情况下的波形。

图 5(a)为示波器提取的干涉信号,图 5(b)为局部放大图。曲线分别对应加速度值为 $0, 1.60796 \times 10^{-3} g_n, 2.89960 \times 10^{-3} g_n, 3.61132 \times 10^{-3} g_n$ 和 $4.11216 \times 10^{-3} g_n$ 时的干涉信号波形。不同的干涉

信号波形对应不同的加速度值,用的微位移平台(M-410DG, Physik Instrument GmbH, Germany)对该加速度计进行粗定标。该位移平台加速度精度可达 $5 \times 10^{-4} g_n$ 。将加速度计置于位移平台上,当加速度改变时(增大或减小),干涉波形以($g = 1.318 \times 10^{-2} g_n$ 为一个周期不断变化。通过对波形周期数的计数,可以获得精度为 $1.318 \times 10^{-2} g_n$ 的粗分干涉的分辨率。而对一个周期内的干涉信号波形采用 PGC 进行细分,可以获得比 $1.318 \times 10^{-2} g_n$ 更高的分辨率,其细分能力主要受信噪比,采样时间和采样芯片的有效位数等因素限制。噪声的大小主要受安装精度和 PD 灵敏度的影响,根据信号的噪声大小,实验中测得本加速度传感器的分辨率约为 $3.9 \times 10^{-5} g_n$ 。在 $0 \sim 30 g_n$ 加速度范围内时,本实验器件最小能分辨 $4.0 \times 10^{-5} g_n$ 的加速度变化。对此若采用低噪声放大和 16 bit 以上芯片采样将能进一步提高分辨率。由于采用光栅来传感,而光栅在垂直其栅线方向上可以制作得很长,因此本加速度传感器的动态范围在光学结构中不受限制,仅与惯性传感中机械结构的线性范围有关。

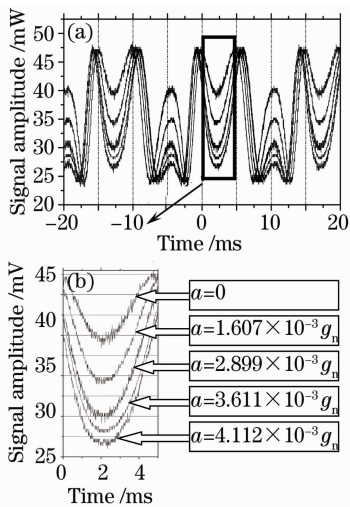


图 5 加速度计 PGC 干涉实验数据

Fig. 5 Experimental PGC Interference signal of accelerometer

为验证解调算法精确度,将实验结果代入干涉信号理论公式,然后比较理论曲线与实验曲线。图 6 所示为加速度为 $1.39840 \times 10^{-2} g_n$ 和 $1.09262 \times 10^{-2} g_n$ 时干涉信号实验曲线和对应理论曲线的对比。由图可知,两者基本吻合,但形状上,特别在 PGC 干涉图形的对称性上存在一定的偏差。产生偏差的主要原因是反射镜安装具有一定误差,调制光程差的 4 块镜片安装位置与理论位置有微小差异,导致调制的光程差不是严格地按 $\Delta =$

$2A \sin(\omega' t)$ 规律变化。另外,调制深度不是精确地等于 π ,对于干涉信号的波形也有一定影响。

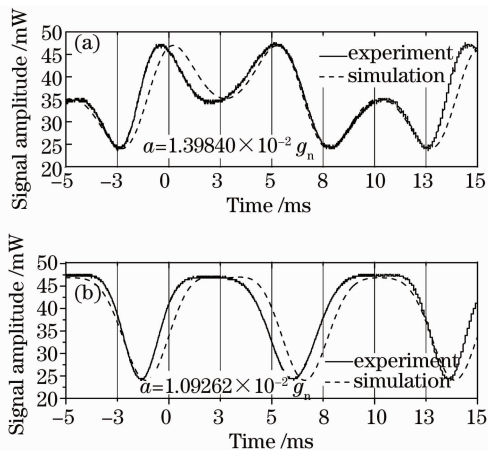


图 6 实验数据与理论数据对比

Fig. 6 Comparison between experimental results and theoretical dates

由以上分析可知,惯性机械结构的精度为 $1.318 \times 10^{-5} g_n/nm$,而光学位移传感器的精度为 3 nm,综合两层面得该加速度传感器的分辨率为 $4 \times 10^{-5} g$ 。另一方面,加速度传感器动态范围由于光学位移传感部分对光栅位移的动态范围没有限制,所以加速度传感器的动态范围可由机械弹性连接机构决定,对于本结构动态范围可达到 $30 g_n$,而若更改为移动柔性光栅带类型,则动态范围基本不受限制。

4 系统误差分析

本加速度计的测量误差主要来源于弹簧机构中位移量与加速度值比值的测量误差和 PGC 解调算法误差^[8,9]。由加速度计的测量原理[(3)式]可得输出电压 V 与所测加速度 a 的关系

$$V(a) = G \{ E_0^2 + E_0^2 \cos[\varphi - 4\pi \frac{y(a)}{d} + 2A \sin(\omega' t)] \}, \tag{4}$$

机械部分的响应可用通用的拉普拉斯表达式

$$\frac{y}{a} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \tag{5}$$

式中 $\omega_n = \sqrt{k/m}$, G 为放大器增益, ω' 为调制频率, ζ 为阻尼系数, s 为光栅位移的拉普拉斯变换值。

$$\Delta a = a_{\text{measured}} - a_{\text{true}} \approx \Delta a_{\text{mechanical}} + \Delta a_{\text{opto-electrical}}, \tag{6}$$

式中

$$\Delta a_{\text{mechanical}} = \frac{k}{m} \cdot \Delta d + d \cdot \Delta \left(\frac{k}{m} \right), \tag{7}$$

$$\Delta a_{\text{opto-electrical}} = \beta_1 \Delta \omega' + \beta_2 \Delta G + \beta_3 \Delta(E_0^2) + \beta_4 \Delta \varphi, \quad (8)$$

式中 $\beta_1 \Delta \omega'$, $\beta_2 \Delta G$, $\beta_3 \Delta(E_0^2)$ 和 $\beta_4 \Delta \varphi$ 分别表示调制频率、放大电路增益、光强和初始相位引入的误差。分别进行实验测量最后又用(8)式计算可得 $\Delta a_{\text{opto-electrical}} = 1.977 \times 10^{-5} g_n$ 。由图3的实验数据计算出的标准差可得 $\Delta(k/m) = 0.02 \times 10^{-5} g_n/\text{nm}$ 。由图5所得实验数据可以计算出 Δd 和 d 。又 $k/m = 1.318 \times 10^{-5} g_n/\text{nm}$ 。最后由(7)式可得 $\Delta a_{\text{mechanical}} = 2.037 \times 10^{-5} g_n$ 。所以系统误差约为 $\Delta a = 4.014 \times 10^{-5} g_n$ 。

5 结 论

设计了高精度大动态范围的加速度传感器,详细介绍了机械结构和光学原理。特别是提出了一种新颖的基于光栅干涉和 PGC 调制的位移传感结构,不但具有位移传感分辨率高,动态范围在光学结构中不受限制,而且光栅安装精度误差对结果影响有限,系统具有很好的稳定性。最后对加速度系统进行理论分析和实验验证,制作出传感器的实物。测量结果表明其分辨率能达到 10^{-6} ,动态范围可达到 $30g_n$,并具有结构简单、成本低和性能稳定等优点,具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 Li Shengyi, Liu Zonglin, Wu Xuezhong. Developments of micro

- accelerometer research [J]. *National University of Defense Technology*, 2004, **26**(6)
- 李圣怡,刘宗林,吴学忠. 微加速度计研究的进展[J]. 国防科技大学学报, 2004, **26**(6)
- 2 DongSam Park, DaeJin Yun. An experimental study on the fabrication of glass-based acceleration sensor body using Micro powder blasting method[J]. *Sensors*, 2007, **7**: 697~707
- 3 Y. H. Cho. Silicon micromachining technology and industrial MEMS applications [J]. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2000, **17**: 52~58
- 4 Shih Chu Huang, Wu Wen Lin, Mao Hsiung Chen. Phase sensitivity normalization in time-division multiplexing of polarization-insensitive interferometric sensors using phase-generated carrier demodulation[J]. *Opt. Engin.*, 1996, **35**(9): 2634~2640
- 5 Allen C. Cekorich, Ira J. Bush. Demodulator and Method useful for Multiplexed Optical Sensors[P]. U. S. Patent 5, 903, 350. 1999-05-11 [2009-06-02] <http://www.freepatentsonline.com/5903350.html>
- 6 Xiao Gang, Xie Tiebang, Wang Xuanze. A compact phase grating interference (PGI) sensor for micro-displacement [J]. *Measurement Technique*, 2005, **2005**(1): 7~9
- 肖刚,谢铁邦,王选择. 一种小型相位光栅干涉式(PGI)微位移传感器[J]. 计量技术, 2005, **2005**(1): 7~9
- 7 G. Johannesh. Technology and applications of grating interferometers in high-precision measurement[J]. *Precis Eng.*, 1992, **14**(3): 147~154
- 8 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu *et al.*. Dual-grating-based nanometer measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 702~706
- 周绍林,杨勇,陈旺富等. 基于双光栅的纳米测量方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 702~706
- 9 Liang Xun, Xiong Shuidong, Hu Yongming *et al.*. The impact of relative intensity noise on fiber optic hydrophone's PGC scheme [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 716~721
- 梁迅,熊水东,胡永明等. 激光器强度噪声对光纤水听器 PGC 解调影响分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 716~721