

高分辨率光纤加速度计

林 巧 李 书 潘建彬 吴兴坤 陈柳华 倪 玮

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 设计、研制了一种新型小体积,低成本,易于批量生产的高分辨率光纤加速度计。该加速度探头为全光纤结构,采用相位生成载波(PGC)技术对光纤干涉信号进行调制和解调,获得高精度相位信号。对样机测试结果表明,该高分辨率光纤加速度计在 $0\sim 100\text{ g}$ 的大动态范围内可分辨 $3\times 10^{-4}\text{ g}$,最高分辨率可达 10^{-6} 。其结构采用了一种新颖的由加速度产生位移干涉信号的圆网状弹性结构和硅微镜装置,用 Cosmosworks 工程软件对该弹性结构进行了应变分析并与实验测试进行对比。整体设计结果与实验测量符合较好。

关键词 光纤光学; 光纤加速度计; 法布里-珀罗干涉; 相位生成载波技术; 相位调制

中图分类号 TN365 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2374

High-Resolution Optical Fiber Accelerometer

Lin Qiao Li Shu Pan Jianbin Wu Xingkun Chen Liuhua Ni Wei

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

Abstract A novel high-resolution optical fiber accelerometer is developed, featuring compact-size, low-cost and easy to be mass produced. The accelerometer probe has an all-fiber structure. Phase-generated carrier (PGC) technology is adopted to modulate and demodulate the interference signals to obtain a high-resolution phase signal. Measurement of prototype shows the high-resolution optical fiber accelerometer can resolve an acceleration up to $3\times 10^{-4}\text{ g}$ in $0\sim 100\text{ g}$ dynamic range and the maximum resolution reaches 10^{-6} . The probe consists of a circular mesh flexture and silicon micro-mirror, capable of generating the displacement interference signal under acceleration. Strain analysis of the structure by Cosmosworks and experimental measurement is carried out. The result of the overall design agrees reasonably well with experimental measurement.

Key words fiber optics; optical fiber accelerometer; Fabry-Pérot interference; phase generated carrier technology; phase modulation

1 引 言

目前,加速度计作为重要的传感元件已广泛地应用于交通、航天和医疗等领域。在各类微型加速度计中,光纤型加速度计由于具有抗电磁干扰能力强、重量轻以及能在恶劣环境下工作等优点,已经成为国内外研究的重点^[1~3]。现有的各类光纤型加速度计中,光弹效应加速度计结构相对比较复杂,而光波导加速度计存在光纤与波导耦合效率相对较低的

困难^[4,5]。如何在小体积要求下,设计高分辨率和大动态范围的光纤型加速度计,始终是一项具有挑战性的研究课题。

本文介绍了一种新颖的高分辨率光纤加速度计的设计。通过对加速度变化引起的位移干涉信号施加音频调制,并采用相位生成载波(PGC)技术实现了光干涉信号的微量相位差的解调和信号处理一体化^[6,7]。与同类光纤型加速度计相比,其结构紧凑、动

收稿日期: 2008-11-10; 收到修改稿日期: 2008-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(60577025)资助课题。

作者简介: 林 巧(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: linqiao@yahoo.com.cn

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

态范围大、分辨率高且易于集成多路(高维数)。实验结果表明,该光纤加速度计分辨率满量程可达 10^{-6} 。

2 结构设计

图 1 (a)所示为加速度计的三维测量模块,其整体尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,可同时测量三个方向互相垂直的加速度分量^[8,9]。一维加速度传感模块的结构如图 1(b)所示,加工后的 0.1 mm 厚的不锈钢膜片固定于基座上,两片 0.8 mm 厚的不锈钢质量块对称地贴在该膜片中心两侧。此对称结构大幅度地降低了固定于其中一个质量块上的硅微反射镜 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.27\text{ mm}$ 与平行镜面方向的加速度的敏感性,有效地提高了正交方向加速度传感的分离度。V 型槽座确保了光纤出射头垂直于微反射镜镜面,使两者形成法布里-珀罗干涉腔^[10,11]。陶瓷压电振动片安装于 V 型槽座和光纤支架之间,该振动片在 30 kHz 音频信号驱动下带动光纤末端沿光纤轴向振动,产生与微反射镜之间的相对往复运动,由此产生相位(光程差)调制信号。

不锈钢膜片圆网状弹性结构由 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 步长的精密雕刻机加工而成,与质量块一起构成质量块弹性 ($m-k$) 系统,硅微反射镜贴于其中一质量块上。该系统形成微位移传感结构^[12],如图 2(a)所示。当方向沿垂直于该膜片面的加速度发生变化时,质量块在此方向上将产生相应的位移,改变光纤出射端面与微反射镜镜面的距离(即法布里-珀罗干涉腔的腔长)^[13~15]。采用 Cosmosworks 工程软件对该弹性结构上的微反射镜的位移与加速度的关系进行了应变分析,并与实验测试相比较。图 2 (b)的灰度等级表示模拟分析得到的不锈钢膜片在加速度方向

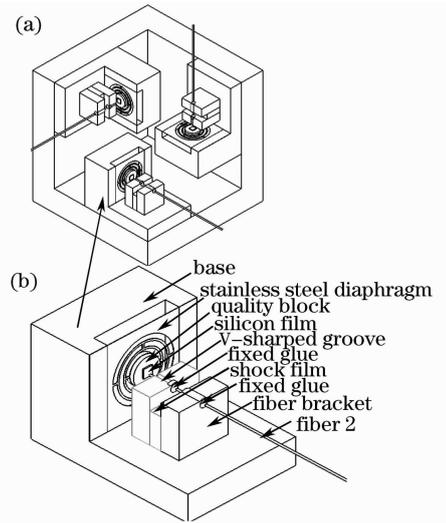


图 1 高分辨率光纤加速度计的结构图。(a)三维加速度测量模块;(b)一维加速度传感模块的具体结构
Fig. 1 The structural of high-resolution fiber optical accelerometer. (a) three-dimensional acceleration measurement module;(b) the specific structure of one-dimensional acceleration module

上的整体变形情况^[16]。当沿垂直于膜片面的方向施加 0.1 g 的加速度时,微反射镜片所在的膜片中央处位移最大,为 1160 nm 。当加速度在 $0\sim 100\text{ g}$ 范围内时,模拟分析得到位移 Δd 和加速度 a 成简单线性关系 $a = (k/m)\Delta d$,其中 $k/m = 86200\text{ g/m}$, k 为微位移圆网结构的弹性系数, m 为位于网状结构中心部分的质量,如图 2 (c)中线条所示。由此可知,当位移改变 1 nm 时,对应的加速度变化为 $8.62 \times 10^{-5}\text{ g}$ 。图 2(c)中点表示实验测得的加速度与相应的微反射镜位移的关系。实验结果与模拟分析存在一定的差别,主要是由实验测试时,人为操作抖动和周围环境影响等因素造成。

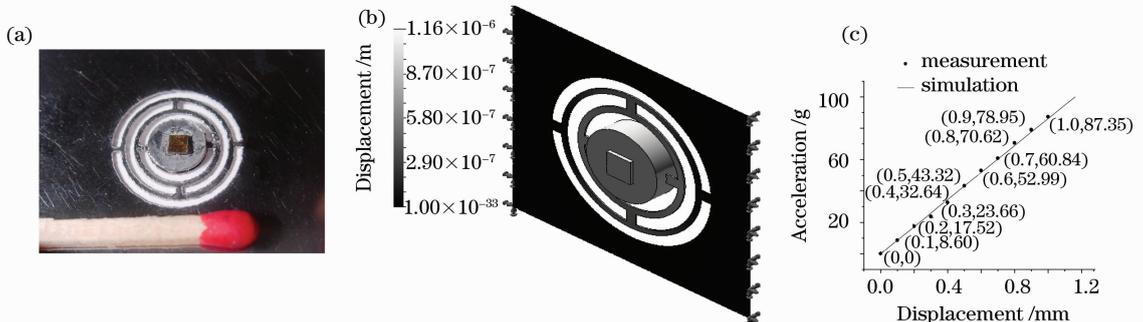


图 2 微位移传感结构及弹性测试结果

Fig. 2 Micro displacement sensing structure and the result of flexibility test

3 解调原理

采用相位生成载波技术对光干涉信号进行调制

和解调^[17,18]。该方法用于分辨干涉信号的相位差具有极为强大的能力,分辨率可高达 10^9 ^[19,20]。压

电陶瓷振动片引入相位调制信号 $M\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ 后,发生干涉的两束光信号 E_1 和 E_2 表示为:

$$E_1 = E_{dc} + E_{ac} \cos(\omega t + \varphi_1), \quad (1)$$

$$E_2 = E_{dc} + E_{ac} \cos[\omega t + \varphi_2 + M\sin(\omega_0 t + \varphi_0)], \quad (2)$$

其中 E_{dc} 为直流分量幅值, E_{ac} 为交流分量幅值, ω 为光束的角频率, φ_1 和 φ_2 分别为两信号的初始相位 M 为调制深度。(1)式和(2)式所表示的光束在光纤耦合器中发生干涉,产生的干涉信号经低通滤波器后,其表达式如下

$$E = 2E_{dc} + 2E_{ac} \cos\left[\frac{\Delta\varphi + M\sin(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}\right], \quad (3)$$

其中干涉光的相位差 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, ω_0 为交变振荡频率。由(3)式可知,只有 $\Delta\varphi = 4\pi d/\lambda$ 为未知量,其中 d 为干涉腔腔长, λ 为干涉光的波长。因此,只要获得 $\Delta\varphi$ 的值,即可得到干涉腔腔长 d 的值。将(3)式中的余弦信号展开得

$$E = 2E_{dc} + 2E_{ac} \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \cos\left[\frac{M\cos(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}\right] - 2E_{ac} \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \sin\left[\frac{M\cos(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}\right] = 2E_{dc} + 2E_{ac} \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) E_e + 2E_{ac} \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) E_o, \quad (4)$$

分析(4)式知,该干涉信号由一个偶函数分量 $2E_{ac} \cos(\Delta\varphi/2) E_e$ 和一个奇函数分量 $2E_{ac} \sin(\Delta\varphi/2) E_o$ 相加而成。因此,只要分解出偶函数分量幅值 $2E_{ac} \cos(\Delta\varphi/2)$ 和奇函数分量幅值 $2E_{ac} \sin(\Delta\varphi/2)$, 即可解出相位角 $\Delta\varphi$ 。据此编写解调算法,可获得换算加速度值的应用程序。

4 实验及结果分析

测试该加速度计的其中一维加速度传感模块的

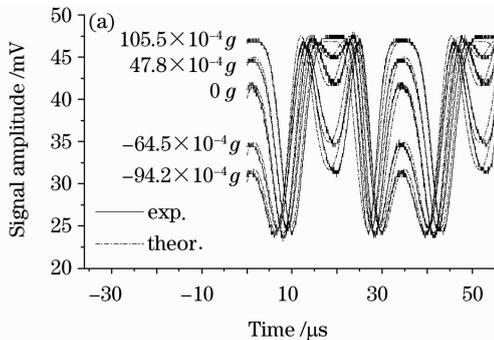


图 4 干涉信号实验曲线与理论曲线对比图

Fig. 4 Experimental curve of interference signal compared with the theoretical curve

为验证程序算法精确度,将实验结果代入干涉信号理论公式(3),然后比较理论曲线与实验曲线。

平台原理如图 3 所示^[21,22]。将一已加工好的一维加速度传感模块作为探头置于垂直转动平台上。该平台可使探头旋转,改变膜片与水平面的夹角 θ ,而垂直于膜片面方向的加速度 $a = g \cos \theta$ 将随 θ 变化。单模激光器发出波长为 1550 nm 的光束经光纤 1 到达 3 dB 光纤耦合器,光纤耦合器将光束耦合到光纤 2,光束在光纤 2 的出射端面处部分被反射,形成反射光束 E_1 ,另一部分光束从光纤 2 出射。出射光束被探头中的微反射镜反射,反射光束到达光纤 2 出射端面时,部分光束透射进入光纤 2 形成光束 E_2 ,光束 E_2 与光束 E_1 在光纤耦合器内产生干涉,干涉光通过光纤 3,经光电二极管转换为电信号,最后进入数据处理单元^[23,24]。

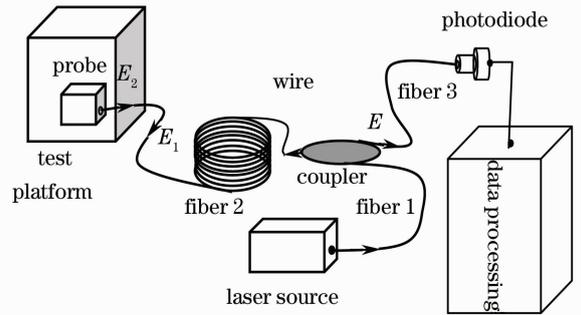


图 3 实验系统原理图

Fig. 3 Schematic of experimental system

在实验过程中,系统记录不同加速度情况下的波形,并根据波形计算出相应的加速度 a 。图 4(a)实线表示对应加速度值分别为 $-94.2 \times 10^{-4} g$, $-64.5 \times 10^{-4} g$, 0 , $47.8 \times 10^{-4} g$ 和 $105.5 \times 10^{-4} g$ 时的干涉信号实验曲线。干涉信号曲线以 $668.05 \times 10^{-4} g$ 加速度值为周期,每改变一个周期对其计数一次。从图 4(b)可知,在 $0 \sim 100 g$ 加速度范围内时,实验器件最小能分辨约 $3 \times 10^{-4} g$ 的加速度变化。

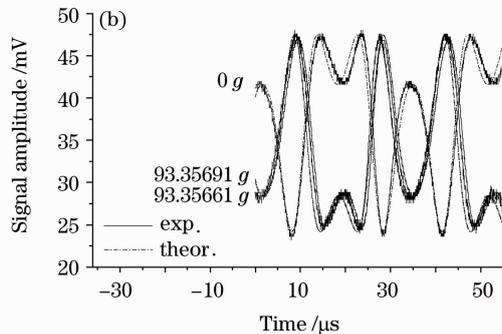


图 4 虚线表示干涉信号实验曲线对应的理论曲线。由图可知,两者基本吻合,但存在一定的偏差。产生

偏差的主要原因: 获取数据时, 信号有相位噪声, 而受限于示波器 A/D 转换精度和响应时间, 导致得到的干涉信号不是精确的三角函数; 信号解调所用的反三角函数得出的是无穷循环小数, 但程序算法只取了有限的位数。

5 结 论

设计了一种高分辨率光纤加速度计, 介绍了其光电结构设计和光学工作原理, 采用相位生成载波技术对干涉信号进行了调制和解调。根据设计制作了实验样机并进行了实验测试。测试结果表明, 该高分辨率光纤加速度计分辨率达 10^{-6} , 具有动态范围大、线性度好、结构紧凑、易于集成多路和批量生产等优点, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Jia Niancao, Wei Xinwang, Ya Binzhang *et al.*. Design of a practical intensity modulated dynamic optical fiber accelerometer [C]. *SPIE*, 2005, **5634**: 548~552
- Luo Hongxiong, Shui Dong, Hu Yongming *et al.*. Research on all polarization-maintaining fiber optic accelerometer [C]. *SPIE*, 2005, **6004**: 60040R-1~60040R-7
- Zeng Fanlin, Zhong Shaolong, Xu Jing *et al.*. Optical fiber accelerometer based on MEMS torsional micromirror [C]. *SPIE*, 2007, **6836**: 62360Q-1~68360Q-8
- Jia Shuhai, Kong Weijun, Yang Jia. Design of optical acceleration sensor based on diffractive micro lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1494~1497
贾书海, 孔维军, 杨佳. 基于衍射微透镜的光学加速度传感器设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1494~1497
- Dae-Hyun Kim, Maria Q. Feng. Real-time monitoring of structural vibration using a novel fiber optic accelerometer system [C]. *SPIE*, 2006, **6178**: 617801-1~617801-1
- Cao Jianian, Lu Shan, Yang Gewen *et al.*. Detection by interferometric fiber-optic accelerometer [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2004, **24**(2): 217~220
曹家年, 卢 山, 杨革文等. 基于 DSP 的干涉型光纤加速度计检测方案的研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2004, **24**(2): 217~220
- 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]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(9): 2634~2640
- 浙江大学高分辨率亚纳量级光学三维加速度计: 中国, 1952665 [P]. 2007-04-25
- Yan Zhigang, Ding Guilan, Chen Caihe *et al.*. Three-component all-fiber acceleration seismometer and digital processing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1413~1417
严志刚, 丁桂兰, 陈才和等. 三分量全光纤加速度检波器及数字处理系统[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1413~1417
- Kang Chong, Zhang Shuquan, Huang Zongjun *et al.*. Influence of mode split upon resonance curve of fabry-pérot optical fiber hydrophone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 0155~0158
康 崇, 张树全, 黄宗军等. 模式分裂对法布里-珀罗型光纤水听器谐振曲线的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 0155~0158
- J. Meyer, S. J. Spammer, P. L. Swart. All fibre fabry-perot interferometer using coherence demultiplexing and fibre loop reflectors [C]. *SPIE*, 1993, **2017**: 169~179
- Y. Morimoto, T. Matsumoto, Fujigaki *et al.*. Nano-meter displacement measurement by phase analysis of fringe patterns obtained [J]. *By Optical Methods, Journal of Experimental mechanics*, 2006, **21**(1): 20~34
- Wang Yongjie, Li Fan, Xiao Hao *et al.*. Sensitivity calculation of disk-type fiber optic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1387~1392
王永杰, 李 芳, 肖 浩等. 盘片式光纤传感器灵敏度计算方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1387~1392
- Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Photonic crystal fiber based fabry-pérot sensor fabricated by using 157 nm laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 255~258
邓洪有, 饶云江, 冉曾令等. 用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤法布里珀罗传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 255~258
- Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic fabry-pérot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
段德稳, 朱 涛, 饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20
- Li Peng, Zhao Zhimin, Hong Xiaoqin. Design and study on a new fiber sensor with self-repairing functions [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 573~576
李 鹏, 赵志敏, 洪小芹. 新型快速自修复光纤传感器的设计与性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 573~576
- Bo Linhou, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1324~1327
柏林厚, 廖延彪, 张 敏等. 干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1324~1327
- Wang Liwei, Zhang Min, Mao Xianhui *et al.*. The arctangent approach of digital PGC demodulation for optic interferometric sensors [C]. *SPIE*, 2006, **6292(6292E)**: 1~10
- Tristan J. Tayag, Edward s. Kolesar, Brandon D. Pitt. Optical fiber interferometer for measuring the in situ deflection characteristics of microelectromechanical structures [J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2003, **42**(1): 105~111
- P. G. Davis, I. J. Bush, G. S. Maurer. Fiber optic displacement sensor [C]. *SPIE*, 1998, **3489**: 18~22
- Li Honnan, Zhou Guandong, Ren Liang. Strain transfer model of fiber sensors under non-axial stress [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 787~783
李宏男, 周广东, 任 亮. 非轴向力下埋入式光纤传感器应变传递分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 787~783
- Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. A J_0 - J_1 method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric fiber sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 105~108
王泽锋, 罗 洪, 熊水东等. 一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 J_0 - J_1 法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 105~108
- Ge Qiang, Xu Changchun, Wu Xuqiang *et al.*. Two noise reduction methods in interferential optical fiber sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 726~728
葛 强, 徐长春, 吴许强等. 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 726~728
- Wang Zefeng, Hu Yongming. A passive method for resolving phase shifting of interferometric fiber-optic sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1417~1421
王泽锋, 胡永明. 干涉型光纤传感器相位漂移的无源解决方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1417~1421