

基于强度解调的低成本光纤悬臂式加速度计

吴明泽^{1,2,3}, 洪连进^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 工业和信息化部, 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:该文研究了一种基于强度解调的低成本光纤悬臂式加速度计。该加速度计由接收光纤、发射光纤、陶瓷插芯和陶瓷套管组成,接收光纤和发射光纤均为单模光纤(SMF)。对该加速度计的灵敏度进行理论分析并制作了一个光学加速度计,搭建了实验系统。实验结果表明,在工作频带 30~1 000 Hz,该加速度计具有 71.5 mV/g ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)的灵敏度和良好的相频特性。

关键词:强度解调;光纤;悬臂梁;加速度计

中图分类号:TN25;TN384;TN929.3;TP212.1 **文献标志码:**A

Low-cost Fiber Cantilever Accelerometer Based on Intensity Demodulation

WU Mingze^{1,2,3}, HONG Lianjin^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Acoustic Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: A low-cost fiber cantilever accelerometer based on intensity demodulation is proposed in this paper. The accelerometer consists of receiving fiber, emitting fiber, ceramic ferrule and ceramic sleeve, both the receiving fiber and emitting fiber are single-mode fiber (SMF). The sensitivity of the proposed accelerometer is analyzed theoretically. A prototype of the accelerometer is fabricated, and the experimental system is set up. The experimental results show that the accelerometer has a sensitivity of 71.5 mV/g and good phase frequency characteristic at the working bandwidth from 30 Hz to 1 000 Hz.

Key words: intensity demodulation; fiber; cantilever; accelerometer

0 引言

加速度计在各行业中扮演着重要角色,如航空航天、地质勘测、导航和水声领域^[1-4]。光学加速度计因其质量小,耐腐蚀,抗电磁干扰,强复用能力等优点,近年来备受学者青睐。Li等提出了一种基于Fabry-Perot(F-P)干涉仪^[5]的光纤振动传感器。F-P干涉仪由单模光纤端面和聚乙烯薄膜组成,质量负载附于聚乙烯膜片上,以提高传感器的灵敏度。虽然该加速度计具有较高的灵敏度和加速度分辨率,且传感器的体积也较小,但其优异的性能依赖于正交工作点的选择,这增加了操作难度。Yan等演示了一种新型光纤布喇格光栅(FBG)加速度计^[6],它由两个平行连接的直圆形柔性铰链组成,其灵敏度为 54 pm/g ($g=9.8 \text{ m/s}^2$),频率为 10~200 Hz,但光纤光栅对温度和应力的交叉敏感限制了该传感

器在户外的应用,同时光纤光栅的波长解调系统较复杂且价格较高。Su等研究了一种全光纤微悬臂振动传感器^[7],该传感器采用最简单的强度解调,通过使用微光纤尖端接收来自单模光纤发出的光以实现振动传感。该传感器结构简单,分辨率可达 0.2 nm,但需要 CO₂激光器制作光纤尖端,这增加了制作成本。在某些特定的应用中需要成本低,且易于生产的加速度计。本文提出了一种结构简单、易于制作的新型光学加速度计,一方面对其传感结构进行理论分析,另一方面搭建实验系统对所制作的加速度计进行实验研究。

1 理论分析

光纤悬臂式加速度计的原理图如图 1 所示。它由陶瓷插芯、陶瓷套管和一对单模接收、发射光纤组成。发射光纤在加速度计中作为一个悬臂质量-弹

收稿日期:2022-04-26

作者简介:吴明泽(1992-),男,黑龙江省齐齐哈尔市人,博士生,主要从事矢量水听器的研究。通信作者:洪连进(1965-),女,黑龙江省哈尔滨市人,教授,博士生导师,主要从事矢量水听器的研究。

簧系统。当光束从光纤悬臂发出时,部分能量被接收光纤接收。接收能量的大小取决于光纤悬臂梁和接收光纤的相对位置。当传感器受到振动激励时,通过直接监测传感器的输出能量即可直接测量加速度。该加速度计的谐振频率取决于光纤悬臂梁的谐振频率,其表达式为

$$f_0 = \frac{3.516}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho A_s}} \quad (1)$$

式中: ρ 为光纤的密度; A_s 为光纤横截面的面积; L 为光纤悬臂梁的长度; J 为惯性矩; E 为光纤的杨氏模量。



图1 光纤加速度计结构原理图

单模光纤中模场的分布可以近似为高斯分布,由光纤悬臂梁端面发出的光,经一段间隙 l 后到达接收端面,如图2所示。根据高斯光束的特性,距发射端 l 处的光强度分布^[8]可表示为

$$I(r, l) = \frac{I_0}{1 + (\theta_0 l / u_0)^2} \exp\left\{-\frac{2r^2}{\omega_0^2 [1 + (\theta_0 l / u_0)^2]}\right\} \quad (2)$$

式中: I_0 为 $r=0$ 即光束中心处的光强; u_0 为光纤的模场半径; r 为空间点到光轴的距离; $\theta_0 = \sin^{-1} NA$ 为高斯光束的发散角, NA 为光纤的数值孔径。

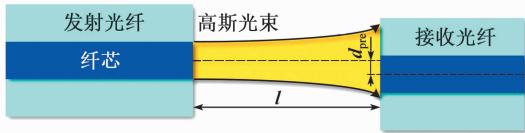


图2 单模光纤端面射出高斯光束示意图

接收光纤接收的能量 W 可通过对接收光纤纤芯表面分布的光强积分获得:

$$W = \iint_S I(r, l) r dr d\theta \quad (3)$$

式中 S 为接收光纤纤芯的面积,如图3所示。图中,

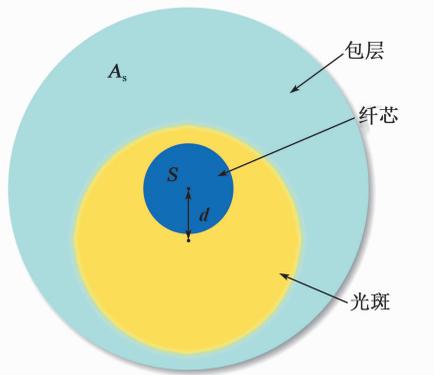


图3 接收端面示意图

d 为高斯光束光轴与接收光纤芯轴的相对距离。

接收光纤在 l 分别为 $20 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m}$ 、 $80 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 处所接收能量的计算结果如图4所示。由图可以看出,当两光纤正对,即无轴位移($d=0$)时,接收的能量最大;随着 d 的增加,接收的能量逐渐减小并经历一段线性变化区域;当 d 增加到某一距离 d' 时,传感器将接收不到能量,随着 l 的不断增大, d' 也不断增大,这是由于高斯光束随着传播距离的增加而发生展宽所导致。当传感器受到被测加速度作用时,光纤悬臂梁在某一初始位置做往复振动,若在保证传感器的线性输出,则需要使光纤悬臂的初始轴偏移 d_{pre} 位于图中的线性变化区域。

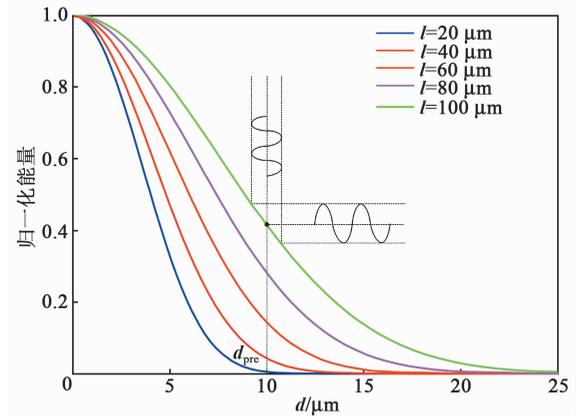


图4 不同 l 处 W 随轴偏移 d 的变化曲线

当悬臂梁在外界均布载荷 P 作用时,在自由端处,梁的挠度和斜率^[9]可以表示为

$$\delta_l = \frac{PL^4}{8EJ} \quad (4)$$

$$\theta_l = \frac{PL^3}{6EJ} \quad (5)$$

若预偏置 d_{pre} 位于图4中曲线的线性变化区域,设该线性区域的斜率为 k_l ,则接收能量的微小变化 ΔW 可表示为

$$\Delta W = \frac{I_0}{1 + (\theta_0 l / u_0)^2} \cdot k_l \cdot \Delta d \quad (6)$$

根据图5中的几何关系, Δd 可以表示为

$$d = d_{\text{pre}} + \frac{PL^4}{8EJ} + \frac{PL^3 l}{6EJ} \quad (7)$$

$$\Delta d = \frac{\Delta PL^4}{8EJ} + \frac{\Delta PL^3 l}{6EJ} \quad (8)$$

而 ΔP ^[10]为

$$\Delta P = \frac{\pi}{2} r_0 \rho \Delta a \quad (9)$$

式中: r_0 为光纤半径; Δa 为加速度的微小变化。将式(7)~(9)代入式(6)可得

$$\frac{\Delta W}{\Delta a} = \frac{\pi}{2} r_0 \rho k_l \frac{I_0}{1 + (\theta_0 l / u_0)^2} \cdot$$

$$\frac{L^3}{2EJ} \left(\frac{L}{4} + \frac{l}{3} \right) \quad (10)$$

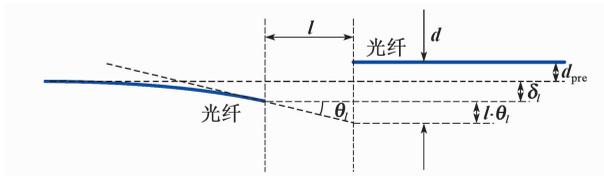


图 5 小偏转角条件下发射光纤与接收光纤的几何关系

在传感器的设计中,由于 $\frac{l}{L} \ll 1$,故加速度计的灵敏度变量可以表示为

$$\frac{\Delta W}{\Delta a} \approx \frac{\pi}{2} r_0 \rho k_l \frac{I_0}{1 + (\theta_0 l / \omega_0)^2} \cdot \frac{L^3}{2EJ} \cdot \frac{L}{4} \quad (11)$$

由式(11)可以看出,当确定传感器参数后,其加速度灵敏度为常数,该加速度计具有线性的响应。

2 实验结果

加速度计的实物图如图 6(a)所示,首先将光纤去除涂敷层,将裸光纤插入陶瓷插芯中,选取合适长度作为悬臂梁,用紫外线固化胶对其进行固定;接收光纤经过同样处理,将裸光纤插入陶瓷插芯中并略微露出些,便于测量传感器的参数。将两陶瓷插芯用陶瓷套筒相连接,并在连接处插入垫片以得到合适的初始预偏置,其内部结构如图 6(b)所示。

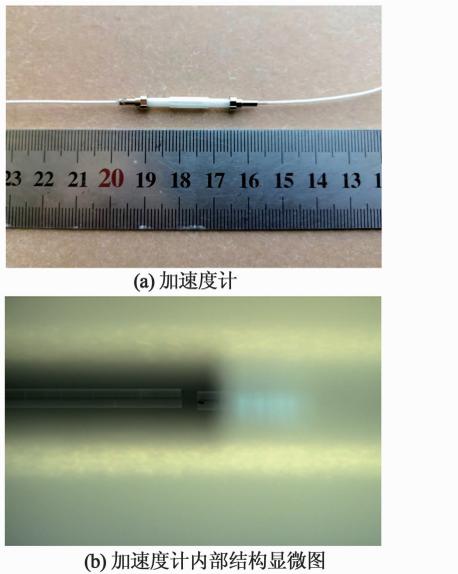


图 6 实物图

按上述方法制作了一个传感器,其 $L=4.6 \text{ mm}$ 、 $l=100 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_{\text{pre}}=10 \text{ }\mu\text{m}$,实验测试系统如图 7 所示。实验系统由 SLD 光源(THORLABS)、信号发生器(Agilent 33522A)、功率放大器(B&K 2719)、振动台(B&K 4809)、参考加速度计(B&K 8305)、电荷电压转换器(B&K 2647)、Pulse(B&K 3109)

和光电探测器组成。其中光源的工作电流为 300 mA,工作温度为 25 °C,光电探测器的增益为 25 dB,转换系数为 0.52 V/mW。采用比较法测量,将制作的加速度计和参考加速度计以背靠背的形式固定在振动台上,以提高测量的准确性。

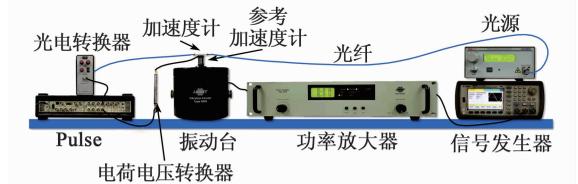


图 7 实验系统

在 500 Hz 正弦信号下,改变振动台的加速度,测量传感器的输出信号,结果如图 8 所示。加速度计的输出与所施加的加速度呈良好的线性关系,与理论分析一致。图 9(a)为传感器在 30~5 000 Hz

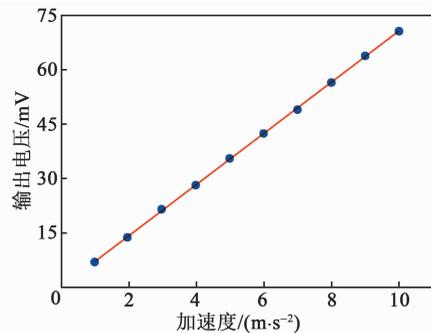


图 8 500 Hz 频率下传感器的输出随被测加速度的变化

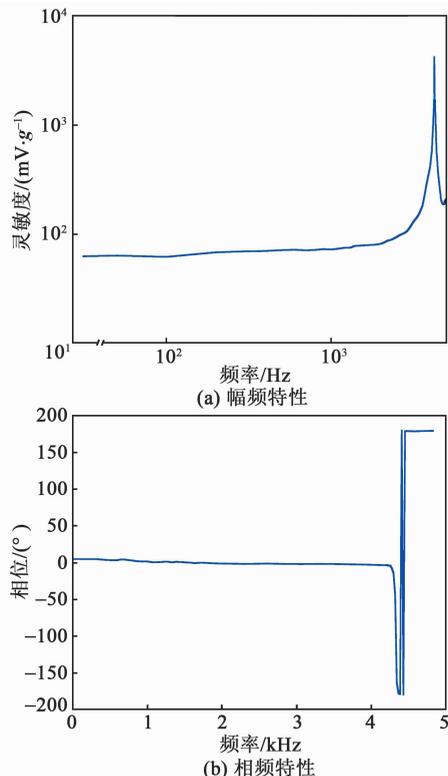


图 9 传感器的动态特性

的幅频特性曲线。该传感器的谐振频率为 4 244 Hz,传感器在 30~1 000 Hz 的响应几乎不变,该频段为传感器的工作频带,其灵敏度为 71.5 mV/g。同时对该加速度计的相频特性进行测量,结果如图 9(b)所示。在工作频带内,传感器输出信号与被测信号的相位差在 5°内,该加速度计具有良好的相频特性。

3 结束语

本文研制了一种基于强度解调的低成本光纤悬臂式加速度计。该光纤加速度计由陶瓷插芯、陶瓷套管、接收光纤和发射光纤组成。陶瓷插芯和陶瓷套管均为商用标准件,降低了光学对准的难度和制作成本。利用简单的模型分析了传感结构的灵敏度,分析结果与实验现象相吻合。制作了参数 $L=4.6\text{ mm}$ 、 $l=100\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_{\text{pre}}=10\text{ }\mu\text{m}$ 的加速度计,并进行了实验。实验结果表明,该加速度计的谐振频率为 4 244 Hz,工作频率为 30~1 000 Hz,灵敏度为 71.5 mV/g,在工作频带内输出信号与被测信号的相位差在 5°内,具有良好的相频特性。

参考文献:

- [1] MAHISSI M, TONG X, ZHANG C, et al. Study on the vibration performances for a high temperature fiber F-P accelerometer [J]. *Opt Fiber Technol*, 2021, 62 (24):102471.
- [2] XUE Q, ZHIHUA S, WEIJIA B, et al. Fiber Bragg grating sensors for the oil industry[J]. *Sensors*, 2017, 17(3):429.
- [3] MAHMOOD M, CELIK-BUTLER Z, BUTLER D. Wafer-level packaged flexible and bendable mems accelerometer for robotics and prosthetics [C]//Mullica Hill Road, Glassboro, NJ, United States; Proc SAS-IEEE Sens Appl Symp, 2017:1-5.
- [4] PENG C, ZHANG X, MENG Z. Bearing estimation for optical fiber vector hydrophone with in-band resonance [J]. *Appl Acoust*, 2020, 158:107055.
- [5] LI S, YU B, WU X, et al. Low-cost fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometer based on a polyethylene diaphragm for vibration detection [J]. *Opt Commun*, 2009, 457:124332.
- [6] YAN B, LIANG L. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on parallel double flexible hinges[J]. *IEEE Sens J*, 2020, 20(9):4713-4718.
- [7] SU L, ELLIOTT S. All-fiber microcantilever sensor monitored by a low-cost fiber-to-tip structure with subnanometer resolution [J]. *Opt Lett*, 2010, 35 (8): 1212-1214.
- [8] MARCUSE D. Loss analysis of single-mode fiber splices[J]. *Bell System Tech J*, 1977, 56(5):703-718.
- [9] GERE J, GOODNO B. *Mechanics of materials*[M]. 9th ed. Boston, Massachusetts, USA: Cengage Learning, 2018.
- [10] CRANCH G, NASH P. High-responsivity fiber-optic flexural disk accelerometers[J]. *J Lightwave Technol*, 2000, 18(9):1233-1243.
- (上接第 376 页)
- HUANG Yi, LIU Shujie, LIU Hexing, et al. Design and implementation of underwater acoustic communication receiver machine based on single vector hydrophone[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2021, 16(7):674-683.
- [6] 生雪莉,阮业武,殷敬伟,等.单矢量时自适应多通道误差反馈的判决反馈均衡技术[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(12):1894-1901.
- SHENG Xueli, RUAN Yewu, YIN Jingwei, et al. The equalization technology of adaptive multi-channel decision-feedback equalization using error feedback with time reversal based on single vector [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39 (12): 1894-1901.
- [7] GORDIENKO V A. 声矢量-相位技术[M]. 贾志富,译.北京:国防工业出版社,2014.
- [8] 杨德森,洪连进.矢量水听器原理及应用引论[M].北京:科学出版社,2009
- [9] 洪连进,杨德森,时胜国,等.中频三轴向矢量水听器的研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(3):79-84.
- HONG Lianjin, YANG Desen, SHI Shengguo, et al. Study on a medium three dimensional co-oscillating vector hydrophone[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(3):79-84.