

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0340-04

顺变柱体型全光纤加速度检波器^{*}

丁桂兰 刘振富 崔宇明 张德龙 陈才和

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)
(光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 介绍了顺变柱体型全光纤加速度检波器的工作原理及结构设计。该检波器包括两个顺变柱体和一个质量块, 两顺变柱体上都紧紧地绕着单模光纤, 形成了迈克耳孙干涉仪的两个臂。两干涉臂的端面镀有高反铝膜。初步测试结果表明, 检波器在共振频率以上有较好的频率响应, 输入信号与输出信号吻合得较好。

关键词: 全光纤加速度检波器; 迈克耳孙干涉仪; 顺变柱体; 敏感元件

中图分类号: TH74 文献标识码: A

1 引 言

加速度计是建筑、车辆等抗冲击、抗振动测量、地震监测、惯性导航与制导系统中常用的重要传感器, 其基本原理是用惯性空间中的质量为 m 的质量块感知外界加速度, 测出此惯性力或位移即可测量出相应的加速度。而光纤加速度计是用光纤测出距离的变化, 光纤起到位移检测器的作用。与传统的加速度计相比, 光纤加速度计具有独特的优越性: 抗电磁干扰, 灵敏度高, 频带宽, 动态范围大, 是无源器件, 可以在易燃易爆的环境下完全可靠地工作, 体积小, 重量轻。这使得光纤加速度计的发展前景日益广阔, 各种实用的光纤加速度计越来越受到军事和商业领域的青睐。

航空、航天、惯性导航与制导系统、石油勘探及地震监测等领域需要实现被测量的实时精确定位。块簧式的光纤加速度检波器^[1,2]仅适用于垂直方向加速度的检测, 而利用顺变柱体有可能实现空间加速度的测量^[3,4], 从而实现并行、实时、高分辨率及高灵敏度检测, 并具有抗电磁干扰等优点。本文对单分量顺变柱体型的加速度检波器的工作原理、结构设计、参数计算进行了详细阐述。该检波器横向限振性能好, 理论上的横向灵敏度为零。样机在丹麦的 PM Vibration Exciter 4808 型振动台上进行了实测, 结果表明, 在共振频率以上有较好的频率响应, 检波器输出信号与振动台的振动信号相一致, 从而为今后三分量的设计提供了实验依据。

2 工作原理及结构设计

我们研制出的单分量顺变柱体型全光纤加速度检波器系统如图 1 所示, 该检波器采用迈克耳孙干涉系统, 包括激光二极管光源、3 dB 光纤耦合器、敏感元件、PIN 光探测器及信号处理系统。

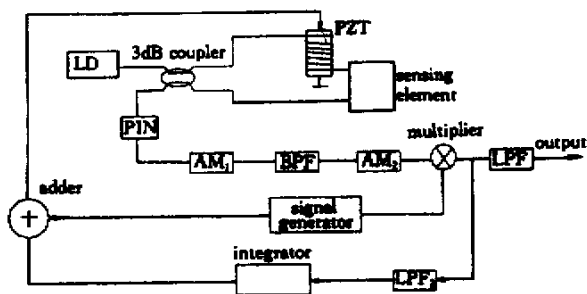


Fig.1 Schematic representation of all-fiber optic accelerometer based on compliant cylinders. AM: amplifier; BPF: band pass filter; LPF: low pass filter

如图 1 所示, 由带尾纤的激光二极管发出波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的光, 经适配器连接耦合后被 3 dB 光纤耦合器分成两束, 分别在两干涉臂中传输。两干涉臂的光纤端面镀上高反射铝膜, 光经端面反射后, 按原路返回, 在 3 dB 耦合区处发生干涉。输出的干涉光信号由 PIN 探测, 将光信号转变为电信号提供给信号处理系统。待测加速度信号引起的相位变化为:

$$S(t) = \phi_s \sin(\omega_s t + \delta), \quad (1)$$

信号处理系统采用交流相位跟踪零差补偿 (PTAC) 技术^[5]将待测信号从诸多噪声中提取出来。输出电压的变化为:

$$V_{\text{out}}(t) = 2KA_m G J_1(\phi_s) J_1(\phi_m) \sin(\omega_s t + \delta), \quad (2)$$

式中, A_m 为调制信号的振幅, G 为乘法器的增益, K

^{*} 国家自然科学基金(49974010)资助课题。

收稿日期: 2001-07-25; 收到修改稿日期: 2001-09-24

是一个与干涉仪的输入光功率、PIN 光电二极管的光电转换效率及所使用的放大器的参数有关的常数 J_1 为一阶贝塞尔函数, ϕ_m 和 ϕ_s 分别表示调制信号和光纤中响应外界加速度信号而产生变化的相位振幅, ω_s 为待测信号的角频率, 而 δ 为初相位。

敏感元件如图 2 所示, 该元件包含两个顺变柱体和一个质量为 M 的质量块, 顺变柱体采用橡胶材料, 质量为 m_k , 每一柱体上都紧密地缠有单模光纤 (3 dB 光纤耦合器的干涉臂), 构成迈克耳孙光纤干涉系统, 该系统的机械特性可近似地看成阻尼简谐振子系统, 其中缠着光纤的顺变柱体可以看成弹簧, 其复合刚度系数为 K_m 。顺变柱体的作用是把外壳与质量块间的相对轴向运动转变为光纤张力, 即起到换能元件的作用。

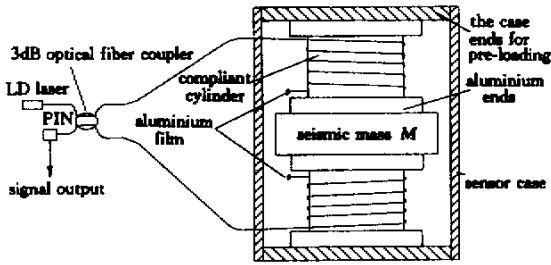


Fig. 2 The sensing element of all-fiber optic accelerometer based on compliant cylinders

当该系统受到振动冲击时, 质量块由于惯性而保持静止, 从而迫使一顺变柱体缩短, 另一顺变柱体拉长, 形成了推挽式结构, 引起光相位的变化。推挽式结构可以用来消除温度和压力变化对检波器的影响, 因为环境变化在两个完全相同的顺变柱体上产生相同的影响而相互抵消。而迈克耳孙干涉仪结构则使该检波器的灵敏度得到进一步提高, 因为光通过每一个干涉臂光纤两次。如果两顺变柱体相同, 那么这种传感器对横向振动的灵敏度理论上为零。

3 参数设计与计算

我们制作的是传感型检波器^[6], 光纤既传光又作敏感元件。采用单模阶跃型 SiO_2 光纤。裸光纤的外径为 $260 \mu\text{m}$, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$, 其芯半径为 $4.5 \mu\text{m}$, 芯层折射率为 1.458, 相对折射率差为 0.0045, 工作波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 。

该检波器中顺变柱体这一换能元件起着非常重要的作用。它的转换效率及其频率响应将直接影响检波器的性能。本实验中, 主要利用橡胶的体积不变性, 在选择材料时, 要尽量考虑减少外界环境(如

温度等)的影响。硫化硅橡胶比一般的橡胶稳定, 因此, 选用硫化硅橡胶浇铸。为了给橡胶顺变柱体加预紧力并有利于质量块与顺变柱体固接在一起, 在顺变柱体的两端各加了一个铝帽, 且将铝帽与顺变柱体浇铸在一起。在浇铸过程中, 橡胶需要搅拌脱气, 并由模具保证上下铝端帽的平行度。

基于单模光纤最小弯曲半径应不小于 11.5 mm , 检波器体积不宜过大等因素, 取顺变柱体直径为 23 mm , 高 15 mm , 铝端帽直径为 32 mm ; 质量块选用比重较大的铜, 边长为 35 mm 的立方体。经计算, 绕此顺变柱体一圈所需的光纤长度 $l = 72 \text{ mm}$, 绕满一层光纤所需的光纤长度(即光纤的有效长度) $L = Nl = 4104 \text{ mm}$, 式中, $N = 57$ 为所绕的光纤圈数。

为了便于计算, 定义光纤硬度长度之乘积为:

$$K_{fn} = E_f A, \quad (3)$$

其中, $E_f = 7.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 为光纤杨氏模量, A 为光纤包层横截面积。

假定顺变柱体本身无能量损耗, 可以推出缠有光纤的顺变柱体的复合刚度系数为:

$$K_m = \frac{N\pi D}{4h^2} K_{fn}, \quad (4)$$

式中, h 为顺变柱体的高度, D 为顺变柱体的直径。

在 DSS-25T 电子万能实验机上对浇铸的橡胶顺变柱体的弹性模量进行了测试, 结果是:

未缠光纤时: $E_1 = 2.24 \times 10^6 \text{ N/m}^2$; 缠满光纤时: $E_2 = 4.74 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ 。

两者的比率约为 1:21, 从而, 实验上证明了紧密地缠绕着光纤的顺变柱体, 其硬度主要取决于光纤的硬度, 而不是顺变柱体本身。

在共振频率 f_n 以下, 该传感器相当于一个加速度计; 而在共振频率以上, 其工作频带范围是从

$$f_n = (2K_m/M_s)^{1/2} / (2\pi), \quad (5)$$

到

$$f_{\max} = \pi f_n (M_s/m_k)^{1/2}, \quad (6)$$

M_s 为质量块及上下两端连接铝板和铝端帽质量之和。由(5)式和(6)式可看出, 质量块的质量 M 增大, 频率变化范围的下限 f_n 将减小, 而顺变柱体的质量 m_k 减小时, 上限将增大, 因而频率范围可拓宽。

$M_s = 430 \text{ g}$ 时, 可以计算出 $K_{fn} = 896 \text{ N}$, $K_m = 4.10 \times 10^6 \text{ N/m}$, $f_n = 695 \text{ Hz}$, $f_{\max} = 15614 \text{ Hz}$ 。所以, 该检波器的工作频率范围为 $695 \text{ Hz} \sim 15614 \text{ Hz}$ 。

由(3)式~(6)式可以看出,共振频率除受质量块的质量 M 影响外,还和所选用的光纤包层直径及顺变柱体的尺寸有很大的关系。为拓宽频带范围,必须适当选用较重的质量块和包层直径较小的光纤,并要合理设计顺变柱体。

3 dB 光纤耦合器探测到的光相移是光程差的函数,一个顺变柱体变化产生的光相移为:

$$\delta\phi_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda_0} \delta L, \quad (7)$$

其中 $\delta\phi_1$ 为单个顺变柱体引起的光相移, λ_0 为真空中的光波长, n_1 为光纤的芯层折射率, δL 是一个干涉臂光纤长度的总变化量。考虑到采用的是迈克耳孙干涉仪和推挽式结构,则总的光相移是 $\delta\phi_1$ 的 4 倍。利用顺变柱体的体积不变性,位移灵敏度表示为:

$$\frac{\delta\phi}{\delta h} = \frac{4n_1\pi^2 ND}{\lambda_0 h}, \quad (8)$$

计算结果位移灵敏度为 $3868 \text{ rad}/\mu\text{m}$ 。

由牛顿第二定律和虎克定律,有

$$F = Ma = 2K_m \delta h, \quad (9)$$

检波器对加速度的灵敏度为

$$\frac{\delta\phi}{a} = \frac{8\pi n_1 h M}{\lambda_0 K_m}, \quad (10)$$

理论计算得到加速度灵敏度为 $1.99 \times 10^3 \text{ rad/g}$ (g 为重力加速度 9.8 m/s^2)。

4 测试结果与讨论

在丹麦的 PM Vibration Exciter 4808 型振动台上对加速度检波器进行了测试,在固有频率以上,检波器的输出信号与振动台信号一致,能较好地反应实测信号的特性。图 3 是 HP54645D 惠普型示波器显示采集并直接输出打印的实验曲线。

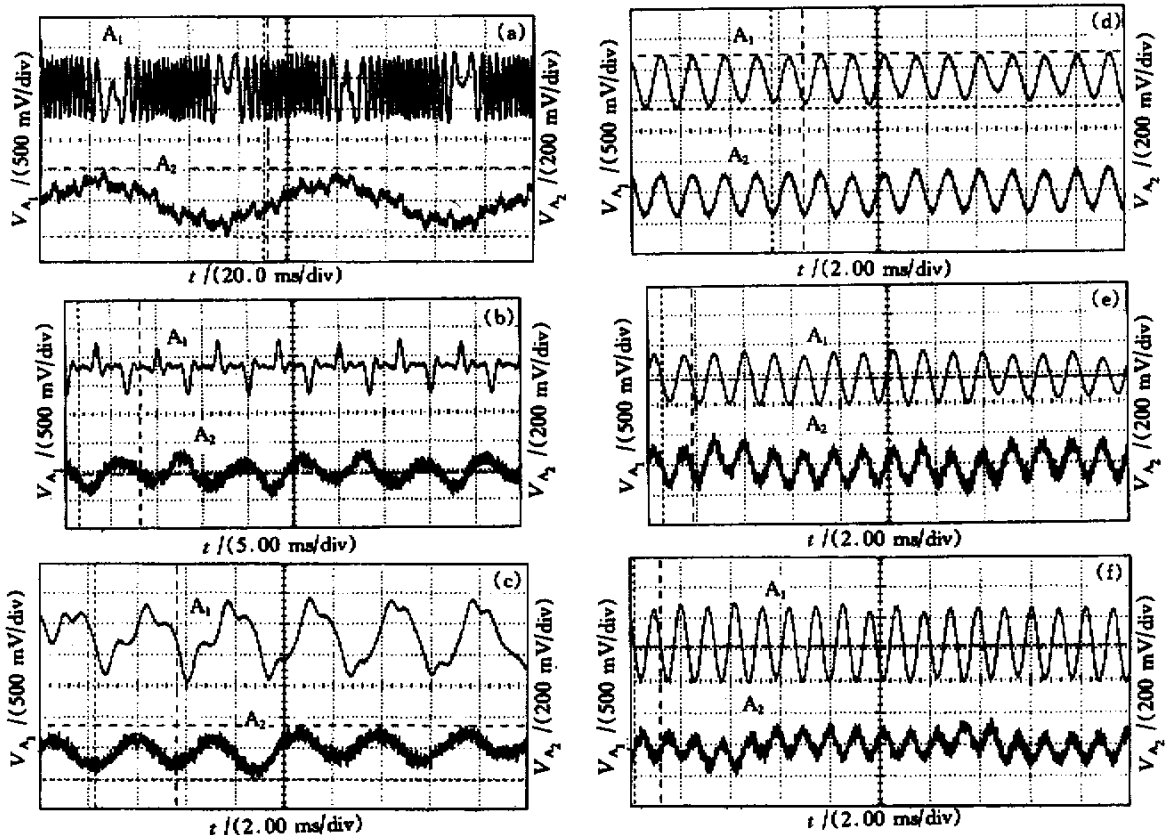


Fig. 3 Test curve of the accelerometer

图 3 中下面的曲线 A_2 为振动台输入信号,上面的 A_1 为检波器经处理电路得到的输出信号,图 3 (a) 图 3 (b) 图 3 (c) 是共振频率 f_n 以下的测试结果,图 3 (d) 图 3 (e) 图 3 (f) 是共振频率以上的测试

结果。可以看出, f_n 以上检波器有较好的频率响应,处理电路输出信号与振动台的基准加速度计的输出信号吻合得较好。而 f_n 以下输出信号虽然也对振动台的输入作出了响应,但失真比较严重,曲线

不理想。从而说明该检波器的应用范围在共振频率以上。

为将尽可能多的低频信号包括在检波器的工作频带范围内,就要求该检波器的共振频率尽可能低。例如,如果 $M = 600 \text{ g}$, 则 $f_n = 588 \text{ Hz}$; 若同时将顺变柱体的高度 h 增至 23 mm , 则 $f_n = 478 \text{ Hz}$ 。同样,若采用小芯径的光纤,也可以降低 K_m , 从而使 f_n 降低。

参 考 文 献

- [1] Chen Caihe , Ding Guilan , Zhang Delong *et al.* . Michelson fiber optic accelerometer. *Review of Scientific Instruments* , 1998 , **69**(9) 3123 ~ 3126
 [2] Chen Caihe , Zhang Delong , Ding Guilan *et al.* .

- Broadband Michelson fiber-optic accelerometer. *Appl. Opt.* , 1999 , **38**(4) 628 ~ 630
 [3] Gardner D L , Garrett S L. Fiber optic seismic sensor. *Proc. SPIE* , 1987 , **838** 271 ~ 278
 [4] Gardner D L , Hoffer T , Baker S R *et al.* . A fiber-optic interferometric seismometer. *J. Lightwave Technol.* , 1987 , **LT-5**(7) 953 ~ 960
 [5] Chen Caihe , Hao Yongjie , Zhang Delong *et al.* . Study on the application of alternate current phase tracking homodyne compensation technique in the all-fiber optic acceleration seismic geophone. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* (地震工程与工程振动) , 2000 , **20**(1) 298 ~ 302 (in Chinese)
 [6] Ding Guilan , Liu Zhenfu , Chen Caihe *et al.* . The sensing element of an all-fiber optic accelerometer based on compliant cylinders. *Acta Photonica Sinica* (光子学报) , 2000 , **29**(Z1) : 171 ~ 174 (in Chinese)

An All-Fiber Optic Accelerometer Based on Compliant Cylinders

Ding Guilan Liu Zhenfu Cui Yuming Zhang Delong Chen Caihe

{ College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering ,
 Tianjin University , Tianjin 300072
 Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science , EMC , Tianjin 300072 }

(Received 25 July 2001 ; revised 24 September 2001)

Abstract : The operation principle and construction design of an all-fiber optic accelerometer based on compliant cylinders are described. The accelerometer is fabricated by supporting a seismic mass between two compliant cylinders , which tightly wrapped with single mode optical fiber and acted as two arms of the optical fiber interferometer. The two arms are coated with Al films to enhance the reflectivity. Preliminary test results indicated that the accelerometer has better frequency response well above the resonant frequency , and the output signal is in correspondence with the input.

Key words : all-fiber optic accelerometer ; Michelson interferometer ; compliant cylinder ; sensing element