

# 混合集成光学加速度计的信号处理和总体灵敏度\*

恩 德<sup>1</sup> 陈才和<sup>1</sup> 李 岷<sup>1</sup> 崔宇明<sup>1</sup>

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

(2 内蒙古民族大学数学与计算机学院, 通辽 028043)

**摘 要** 混合集成光学加速度计是一种实用型的实时加速度传感器, 在信号处理过程中采用了光相位调制和交流相位跟踪零差补偿技术(PTAC). 综合考虑光路和电路部分进行系统设计, 以使系统总体灵敏度为 4.7 V/g. 实际测量时系统可以实时、线性地跟踪到加速度信号, 并且系统的总体灵敏度可以达到 4.59 V/g. 混合集成光学加速度计已经达到了实用的要求.

**关键词** 加速度; 灵敏度; 交流相位零差补偿

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A

## 0 引言

加速度计广泛地应用于导弹的制导、飞机的导航、人造卫星的姿态控制、刹车控制系统、大型电器设备的振动遥测以及石油的地震勘探等多个领域<sup>[1]</sup>, 正朝着小型化、集成化方向发展<sup>[2,3]</sup>. 本文研究的混合集成光学加速度计属于波导型传感器, 具有频带宽、失真度小、灵敏度高、不受电磁干扰、无火花、能在易燃和温差较大的环境中使用等优点<sup>[4]</sup>. 本文以交流相位跟踪零差补偿技术为基础讨论了实用型混合集成光学加速度计系统的信号处理过程<sup>[5]</sup>, 给出了对系统的总体灵敏度的计算方法, 并对总体灵敏度的影响因素和实际测量结果进行了分析.

## 1 概述

混合集成光学加速度计由集成光学芯片和光纤质量块简谐振子和处理电路组成, 如图 1 所示. 该集成光学芯片是由铌酸锂 LiNbO<sub>3</sub> 基底上单片集成的钛扩散铌酸锂 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 双 Y 分支波导、波导偏振器和波导相位调制器所构成, 并与 LD、PIN 混合集成. 当外部施加振动时, 简谐振子把加速度变化转化为光纤中光信号的相位变化, 经迈克尔逊干涉仪将相位变化转化为光的强度变化, 并由 PIN 接收将光强度信号转化为电信号送至处理电路解调出一个与外部加速度信号成线性比例的电压信号. 由于采用交流相位零差跟踪补偿技术(PTAC)<sup>[4,5]</sup>, 处理电路同时还要将高频调制信号和补偿信号送到设置于干涉仪参考臂的波导相位调制器上, 对光 110 载波的相位进行调制.

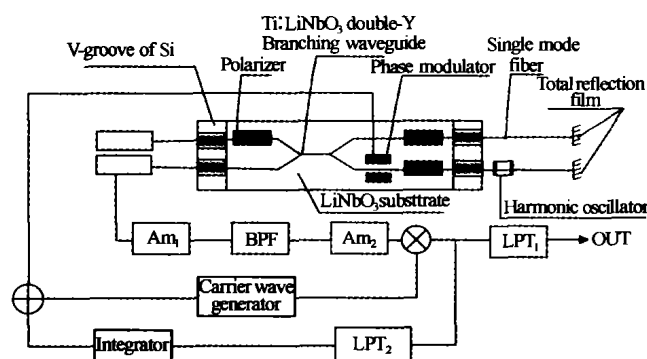


图 1 混合集成光学加速度计的工作原理图

Fig. 1 The principle diagram of the hybrid-integrated optical accelerometer

## 2 信号处理

### 2.1 信号调制

混合集成光学加速度计的信号调制即对光载波的相位的调制, 主要由简谐振子<sup>[8]</sup> (如图 2 所示) 振动时引起的光纤振动和波导相位调制器两部分产生.

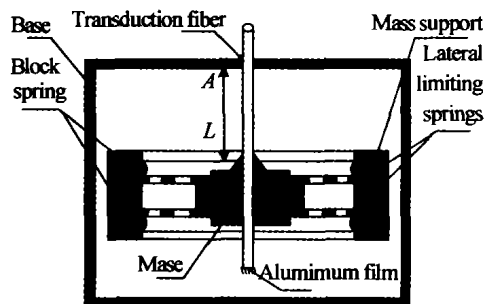


图 2 简谐振子的机械结构图

Fig. 2 Mechanical schematic diagram of the harmonic oscillator

#### 2.1.1 简谐振子引起的相位调制

简谐振子引起的相位调制是有加速度信息的有用信号. 光纤振动的时候引起的光载波相位调制的效应可分为由应变效应、光弹效应和泊松效应. 经计算分析表明泊松效应引起的相位变化远小于前两种效应, 因此我们只考虑应变效应和光弹效应引起的相位调制<sup>[9]</sup>.

\*国家自然科学基金(项目号:49874031)

Tel:022-27401615 Email:tlende@sina.com

收稿日期:2003-09-30

应变效应是由于振动时光纤的长度变化引起的,利用牛顿第二定律对简谐振子分析可得应变效应引起的光波相位调制

$$\Delta\phi_L = \beta\Delta L = -\frac{2\pi}{\lambda_0}n \frac{Lma}{EA + KL} \quad (1)$$

式中

$$\Delta L = -\frac{Lma}{EA + KL} \quad (2)$$

式中  $E$ 、 $A$  和  $n$  分别为光纤的杨氏模量、横截面积和光纤芯层折射率,  $K$  为横向限振片的总刚度系数,  $L$ 、 $\Delta L$  和  $m$  分别为简谐振子内传感光纤的长度和长度变化和简谐振子质量块质量,  $\beta$ 、 $\lambda_0$  分别为光纤中的光传播常数和光波长,  $a$  为外部加速度速度.

在光纤振动的时候,光纤芯层的折射率也将发生变化,即光弹效应,其引起光波相位的调制为

$$\Delta\phi_n = L\Delta\beta = L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n = -\frac{1}{2}n^3 \frac{2\pi}{\lambda_0} L [(P_{11} + P_{12})\varepsilon_1 + P_{12}\varepsilon_3] \quad (3)$$

式中  $P_{11}$ 、 $P_{12}$  为光弹系数,  $\mu$  为光纤的泊松比,  $\varepsilon_3$  为纵向应变,  $\varepsilon_1 = -\mu\varepsilon_3$  为横向应变.

载有加速度信息的有用信号为

$$\Delta\phi_s = \Delta\phi_L + \Delta\phi_n \quad (4)$$

### 2.2.2 波导相位调制器引起的相位调制

由外部处理电路加载到波导相位调制器上的高频调制信号和补偿信号分别引起的光载波的相位调制为

$$\Delta\phi_m(t) = \phi_m \sin(\omega_m t) \quad (5)$$

$$\phi_n(t) = \Delta\phi_q(t) + \Delta\phi_T(t) = \Delta\phi_b(t) \quad (6)$$

$\Delta\phi_q(t)$ 、 $\Delta\phi_T(t)$ 、 $\Delta\phi_b(t)$  分别为迈克尔逊干涉仪的两干涉臂长度不绝对相等、温度变化、反馈信号分别引起的光波相位调制信号.

$\Delta\phi_b(t)$  是交流相位零差补偿系统的反馈信号,用来将补偿信号  $\phi_n(t)$  补偿到零,系统原理框图如图 3 所示. 由框图得到以下关系式

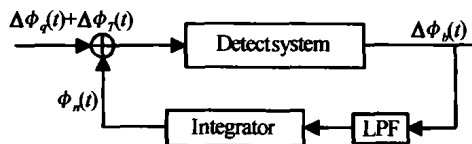


图 3 交流相位零差补偿系统框图

Fig. 3 Block diagram of PTAC system

$$\Delta\phi_b(t) = K_\phi \int \sin \phi_n(t) dt = \Delta\phi_q(t) + \Delta\phi_T(t) - \phi_n(t) \quad (7)$$

式中  $K_\phi$  为反馈系数.

对式(7)两边同时进行微分得到

$$\dot{\phi}_n(t) = -K_\phi \sin(\phi_n(t)) \quad (8)$$

根据式(8)绘制交流相位零差补偿系统的相平面图,如图 4 所示. 从图中可以看到系统可以稳定

在  $\phi_n(t) = 0, 2\pi, \dots, 2n\pi$  处,可以利用限压的方法使系统稳定于  $\phi_n(t) = 0$  处,即实现零差补偿,这是保证解调出有用信号和减少噪声得保障.

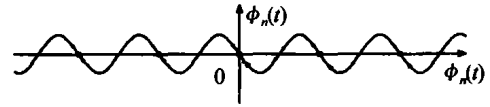


图 4 补偿系统的相平面图

Fig. 4 The phase plan of PTAC system

综合 2.2.1、2.2.2,光载波的总的相位调制为

$$\Delta\phi(t) = \Delta\phi_s(t) + \Delta\phi_m(t) + \phi_n(t) \quad (9)$$

### 2.2 信号解调

迈克尔逊干涉仪输出的光为

$$I(t) = \frac{1}{2}I_0(1 + \cos \Delta\phi) = \frac{1}{2}I_0(\phi_s \sin(\omega_s t + \delta) + \phi_m \sin(\omega_m t) + \phi_n(t)) \quad (10)$$

式中  $I_0$  为 LD 输出的光强.

如图 1 所示,经 PIN 探测、前级放大和隔直以后,  $A$  点的电位可表示为

$$V_A(t) = K_A \left[ \cos \left( \phi_s \sin(\omega_s t + \delta) + \phi_m \sin(\omega_m t) + \phi_n(t) \right) \right] \quad (11)$$

式中  $K_A = K_1 I_0$ ,  $K_1$  为 PIN 转换系数和前级放大电路增益决定的常数.

设  $\omega_m = 16\omega_s$ ,并代入式(11)中离散化

$$V_A(n) = K_A \cos \left( \phi_s \sin(\omega_s T_c n + \delta) + \phi_m \sin(16\omega_s T_c n) + \phi_n(nT_c) \right) \quad (12)$$

式中  $n = 0, 1, 2, \dots, N_c$ ,  $N_c$  为数据长度,  $T_c$  为步长.

取  $T_c \cdot N_c$  为一常数时,并考虑成功完成交流相位零差补偿的情况,即  $\phi_n(t) = 0$  时,对式(12)进行 FFT 变换得

$$V(t) = K_A \left\{ \begin{aligned} & [J_0(\phi_s) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_s) \cos 2n(\omega_s t + \delta)] \\ & \times [J_0(\phi_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_m) \cos 2n(\omega_m t)] \\ & - [2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\phi_s) \sin(2n+1)(\omega_s t + \delta)] \\ & \times [2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\phi_m) \sin(2n+1)(\omega_m t + \delta)] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中  $J_n(\phi)$  为  $n$  阶贝塞尔函数.

经过 BPF<sup>[10,11]</sup> (增益为 1)和二级放大(放大系数为  $K_2$ )并用  $\phi_m \sin \omega_m t$  做本地波解调后,可得到  $2K_A K_2 \phi_m J_1(\phi_s) J_1(\phi_m) \sin(\omega_s t + \delta)$  信号,由于  $\phi_s$  很小  $J_1(\phi_s) = K_3 \phi_s$ ,它同载有加速度信号的有用信号  $\Delta\phi_s(t) = \phi_s \sin(\omega_s t + \delta)$  成线性关系. 同时可以得到信号  $2K_A K_2 \phi_m J_3(\phi_s) J_1(\phi_m) \sin^3(\omega_s t + \delta)$ ,不易滤除,是检波器不可避免的的噪声.

最后经过 LPF 后最后输出的有用信号为

$$V_{out}(t) = 2K_A K_2 K_4 \phi_m J_1(\phi_s) J_1(\phi_m) \sin(\omega_s t + \delta) \quad (14)$$

式中  $K_4$  为 LPF 的增益和末级放大决定的系数.

把  $J_1(\phi_s) = K_3\phi_s(t)$  代入式(14)并进行整理得

$$\frac{V_{out}(t)}{\Delta\phi_s(t)} = 2K_1K_2K_3K_4\phi_m J_1(\phi_m) \quad (15)$$

### 3 总体灵敏度计算

本文所研究的混合集成光学加速度计系统的光路参数为  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $n = 1,458$ ,  $P_{11} = 0.126$ ,  $P_{12} = 0.27$ ,  $\mu = 0.27$ ,  $K = 1.5 \text{ N/m}$ ,  $A = 12.3 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$  和  $E = 7.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ , 由式(1)、(2)、(3)、(4)可得

$$\frac{\Delta\phi_s(t)}{a(t)} = -8.57 \times 10^6 \frac{Lm}{897.9 + 1.5L} \quad (16)$$

本文所研究的混合集成光学加速度计系统的电路参数为  $K_1 = 5.50$ ,  $K_2 = 15.00$ ,  $K_3 = 0.05$ ,  $K_4 = 5.00$ ,  $\phi_m = 2.00 \text{ V}$ , 代入式(15)中得到

$$\frac{V_{out}(t)}{\Delta\phi_s(t)} = 47.67 (\text{V/rad}) \quad (17)$$

结合式(16)和(17),可以得到混合集成光学加速度计系统的总灵敏度

$$\left| \frac{V_{out}}{a} \right| = \left| \frac{V_{out}}{\Delta\phi_s} \frac{\Delta\phi_s}{a} \right| = 408.53 \times 10^6 \frac{Lm}{897.9 + 1.5L} \quad (18)$$

由式(18)可以看出系统的总灵敏度与简谐振子内部的传感光纤长度( $L$ )和质量块( $m$ )相关. 图5所示为  $L$  和  $m$  变化时对总体灵敏度的影响,从图5中得到结论:总体灵敏度随着  $L$  和  $m$  的增加而增大,但是在决定  $L$  和  $m$  的数值时,要综合考虑自然频率和有效频带. 表1给出了几组对应于不同  $L$  和  $m$  值的总体灵敏度、自然频率和有效频带.

为了获得有用频带范围  $0 \sim 1066 \text{ Hz}$ , 本系统选择了  $L = 6 \text{ mm}$  和  $m = 0.3 \text{ g}$  的情况,此时对应的总体灵敏度为  $0.48 \text{ V/m/s}^2$  ( $4.7 \text{ V/g}$ ).

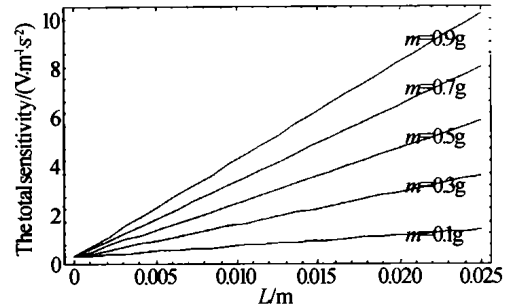


图5 对应不同  $L$  和  $m$  的总体灵敏度  
Fig.5 The total sensitivity for different  $L$  and  $m$

表1 不同  $L$  和  $m$  下的自然频率、有效频带和总体灵敏度

$L$ /mm	$m$ /g	自然频率 /Hz	有效频带 Hz	总体灵敏度 $\text{V/m/s}^2$
4	0.2	5332	0 ~ 1600, 6931 ~ 9011	0.36
6	0.3	3554	0 ~ 1066, 4621 ~ 5332	0.48
10	0.3	2753	0 ~ 826, 3579 ~ 4130	1.36
12	0.4	2176	0 ~ 625, 2828 ~ 3264	2.18
16	0.4	1885	0 ~ 565, 2450 ~ 2827	2.91
18	0.5	1589	0 ~ 476, 2067 ~ 2384	4.09
20	0.6	1377	0 ~ 413, 1790 ~ 2065	5.46

### 4 实验结果

在加速度振动台上检测混合集成光纤加速度计系统的工作情况,比较系统的输出加速度信号和加速度振动台的标准正弦加速度信号,如图6所示为有效加速度为  $a = 0.2g$  时在不同工作频率用示波器采集的外部振动加速度信号和系统输出信号的对比图. 图7为在  $850 \text{ Hz}$  情况下,变换振动台加速度信号得到的  $V_{out} - a$  图.

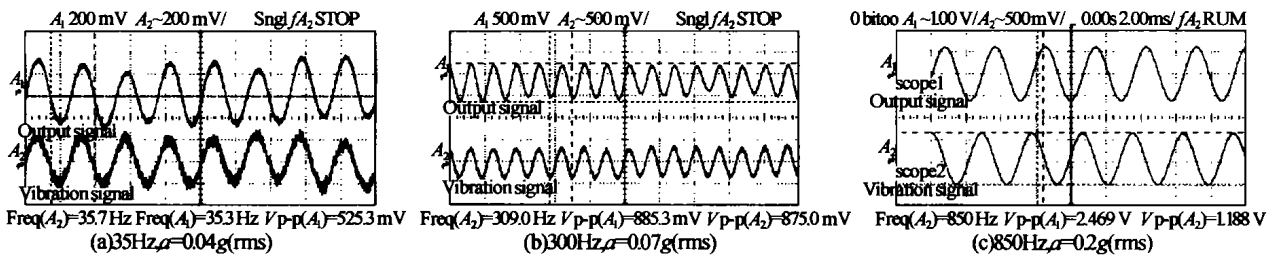


图6 输入、输出波形对比  
Fig.6 Contrast between vibration signal and output signal

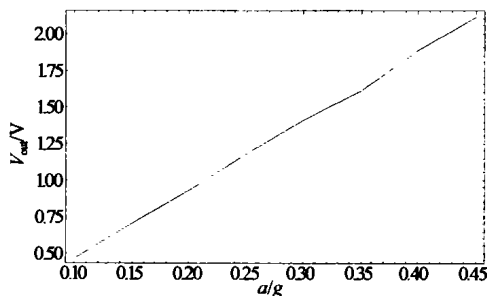


图7  $V_{out} - a$  ( $850 \text{ Hz}$ )  
Fig.7  $V_{out} - a$  ( $850 \text{ Hz}$ )

### 5 实验结论

实验证明当外部加速度信号有效值不变,在所选的工作频带范围内,系统的输出信号可以线性、可靠地跟踪上振动加速度信号. 计算实际测量得到的系统总体灵敏度为:  $4.59 \text{ V/g}$ , 考虑电路参数的变化,系统达到了预计的灵敏度.

本文中的混合集成光学加速度计可以相当高的准确完成对加速度的稳定、精确、实时的测量,应用

前景广阔.

### 参考文献

- 1 黄继昌,徐巧鱼,张海贵. 传感器工作原理及应用实例. 北京:人民邮电出版社,1998. 5~8  
Huang J C, Xu Q Y, Zhang H G. Sensor's Work Principle and Applied Example. Beijing: Peaple Post and Telecommunication Press, 1998. 5~8
- 2 周再发,泰明. 智能集成传感器系统的研究进展. 微电子学, 2003. 33(5):428~431  
Zhou Z F, Qin M. *Microelectronics*, 2003, 33(5):428~431
- 3 彭图坚. 集成化智能传感器的回顾与展望. 仪表技术, 1990, 44(4):26~28  
Peng T F. *Gauge Technique*, 1990, 44(4):26~28
- 4 刘瑞复,史锦珊. 光纤传感器及其应用. 北京:机械工业出版社,1987. 1~9, 116~121  
Liu R F, Shi J S. The Fiber Optic Sensor and its Application, Beijing:China Machine Press (CMP), 1987. 1~9, 116~121
- 5 Chen Caihe, Ding Guilan, Zhang Delong, et al. Michelson fiberoptic accelerometer. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69(9):3123~3126
- 6 Dandridge A, Tveten A B, Giallorenzi T G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensor using phase generated carrier. *IEEE J Quantun Electron*, 1982, 18(10):1647
- 7 Cole J H, Danver B A, Bucaro J A. Synthetic-heterodyne interferometric demodulation. *IEEE J Quantum Electron*, 1982, 18(4):694
- 8 郁有文,常健. 传感器原理及其工程应用. 西安:西安电子科技大学出版社,2001. 119~121  
Yu Y C, Chang J. Sensor Principle and Its Engineering Application. Xi'an: Xidian University Press 2001. 119~121
- 9 李道华,李玲,朱艳. 传感器电路分析与设计. 武汉:武汉大学出版社,2000. 61~88  
Li D H, Li L, Zhu Yan. Sensor Electric Circuit Analysis and Design, Wuhan: Wuhan University Press, 2000. 61~88
- 10 高西 M S. 电子线路 器件、模型、功能、分析和设计. 北京:人民教育出版社,1981. 182~373  
Ghausi M S. Electronics circuit machine piece, model, function, analysis and design. Beijing: People's Education Press, 1981. 182~373

## The Signal Processing and the Total Sensitivity of the Hybrid-integrated Optical Accelerometer

En De<sup>1,2</sup>, Chen Caihe<sup>1</sup>, Li Min<sup>1</sup>, Cui Yuming<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072

<sup>2</sup> College of Mathematics and Computer, Inner Mongolia University of Nationalities, Tongliao 028043

Received date: 2003-09-30

**Abstract** The hybrid-integrated optical accelerometer is a kind of practical accelerometer, which adopts optical phase modulation and alternating current phase tracking and homodyne compensation scheme (PTAC). The System is designed in view of optical path and processing circuit parts in order to realize the total sensitivity of the system, 4.7 V/g. When practically measured, the hybrid-integrated optical accelerometer can get a real time and linear output signal, and the practical total sensitivity of the system reaches to 4.59 V/g. The hybrid-integrated optical accelerometer achieves the practical standards.

**Keywords** Acceleration; Sensitivity; Alternating current phase tracking and homodyne compensation scheme

**En De** was born in 1962, Inner Mongolia Autonomous region. Now he is a Ph. D. candidate in Tianjin University. His research interests are in the field of integrated optics, optic communication and optic fibre sensor.

