

微振动四路平衡测量法

陈 博 甄胜来 黎 珉 王保三 张成梅 张 波 江 超 俞本立

(安徽大学光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

摘要 基于传统的迈克尔逊干涉仪,提出了微振动的四路平衡测量法。该方法无需 PZT 外加高频载波调制,通过在光路上获得的四路正交信号来取代常见的由相位载波零差解调法在电路上获得的两路正交信号,克服了 PZT 高频调制下的非线性效应,并简化了解调电路。同时,四路平衡法也降低了光源的强度噪声。通过合成利萨如图形,验证了四路信号的正交特性。实验结果表明,该方法能实现微振动信号的测量,对微振动位移的测量范围可以达到 5~775 nm。

关键词 传感器; 微振动; 四路平衡; 相位载波(PGC); 利萨如图形

中图分类号 TB92 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0309

Four-Channel Balancing Method for Micro-Vibration Measurement

Chen Bo Zhen Shenglai Li Min Wang Baosan Zhang Chengmei

Zhang Bo Jiang Chao Yu Benli

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Acquisition and Manipulation, Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)

Abstract Based on the traditional Michelson interferometer, the four-channel balancing method for micro-vibration measurement system is built. The method without using PZT to generate high frequency carrier wave realizes four orthogonal signals by using four-channel-balancing detection instead of using PGC demodulation circuit. This method overcomes the nonlinearity of PZT, simplifies the demodulation circuit, and reduces the intensity noise of laser source, simultaneously. Through the Lissajou figure which is synthesized by the four signals, the four signals are proved to be orthogonal. The experimental results show that this method can realize the measurement of micro-vibration, and the micro-vibration displacements measuring range can be up to 5~775 nm.

Key words sensors; micro-vibration; four-channel-balancing; phase generated carrier (PGC); Lissajou figure

1 引 言

随着精密机械加工技术的高速发展,人们迫切需要在微米甚至纳米量级对微小振动信号进行测量,同时对测量技术的要求也日益提高。如在远距离、高温、高压、放射性条件下的测量技术,要求测量向着实时、远距离、非接触、高灵敏度、智能化的方向发展。

目前对微振动测量的方法很多,其中光学干涉测量法以其高分辨力、高灵敏度、非接触测量等优点得到了广泛应用。但传统的光学测量法测量距离

近,多为单路探测,无法消除光源的附加强度噪声^[1~3]。在实现信号正交和信号解调方面,传统的方法大多采用压电陶瓷(PZT)外加高频载波,利用相位载波(PGC)零差解调法^[4~6],通过电路获得两路正交信号,进而通过乘法器、微分器、积分器等电子元器件最终实现信号的解调。由于高频调制下 PZT 具有非线性效应^[7,8],会降低系统的灵活性和频响范围,影响信号测量;此外,PGC 解调由于所用电子元器件过多,解调电路过于复杂,会给系统带来电路噪声,降低系统的信噪比和灵敏度,而且电路调

基金项目: 安徽省优秀青年科技基金(08040106903)资助课题。

作者简介: 陈 博(1984—),男,硕士研究生,主要从事光学干涉传感方面的研究。E-mail: doucoutsan@126.com

导师简介: 俞本立(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光电技术和光传感等方面的研究。

整起来精度不高,会使解调出来的信号出现失真现象。基于此,本文使用实验室自制的全保偏窄线宽光纤激光器^[9],提出了不需要利用 PZT 外加高频载波调制的微振动四路平衡测量法,对微振动位移的测量范围可以达到 5~775 nm。

2 测量原理

2.1 光路部分

图 1 所示为本实验光路部分。Laser 为实验室自制的全保偏窄线宽单频光纤激光器,线宽小于 0.5 kHz,相干长度达到 190.8 km;PZT 为压电陶瓷,用来产生微振动模拟信号; $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 为四分之一和二分之一波片,分别用来改变光的偏振态和调整光强;D1~D4 为四个相同型号的光电探测器;PBS 和 BS 分别为偏振分束器和非偏振分束器,它们的分束比均为 50:50。T 为待测目标物,所在的支路为信号臂;M 为反射镜,所在的支路为参考臂。从光源发出的激光经准直器、 45° 放置的 $\lambda/2$ 波片和 PBS1 后,变为偏振态相互垂直、强度相等的 P 方向偏振的透射光束和 S 方向偏振的反射光束。P 方向线偏振光经 $\lambda/4(1)$ 波片后变成左旋圆偏振光,遇到 PZT 调制的被测物 T 反射后,变成右旋圆偏振光,再经 $\lambda/4(1)$ 波片后,偏振态旋转 90° ,变为 S 方向线偏振光,从 PBS1 反射后作为信号光;同样,S 方向线偏振光经 $\lambda/4(2)$ 波片后变成左旋圆偏振光,遇 M 反射后变成右旋圆偏振光,再经 $\lambda/4(2)$ 波片后,偏振态旋转 90° ,变为 P 方向线偏振光后经由 PBS1 透射后作为参考光,与上述 P 偏振信号光叠加。这两束光由于偏振态相互垂直,不发生干涉,经分束器 BS 后,一路入射到适当放置的 PBS2 后发生干涉,分成相位差为 180° 的两路信号,分别由探测器 D1、D2 接收,产生相位相差 180° 的两路光电流;同样,另

一束经 $\lambda/4(3)$ 波片后,相位比第一束光延迟 90° ,经 PBS3 发生干涉后分成两路,一路由探测器 D3 接收,一路由探测器 D4 接收,产生相位差为 180° 的两路光电流。

2.2 电路部分

如图 2 所示为本实验的解调电路部分,主要由减法器(subt)、微分器(d/dt)、乘法器(mix)、高通滤波器(HPF)、积分器(\int)等组成。由上面的光路分析可知,四个探测器 D1、D2、D3、D4 产生的光电流分别为

$$\begin{aligned} I_1 &= A_1 + B_1 \cos[\phi(t) + \phi_1], \\ I_2 &= A_2 - B_2 \cos[\phi(t) + \phi_2], \\ I_3 &= A_3 + B_3 \sin[\phi(t) + \phi_3], \\ I_4 &= A_4 - B_4 \sin[\phi(t) + \phi_4], \end{aligned} \quad (1)$$

式中, A_1, A_2, A_3, A_4 为与输入光功率有关的直流项; B_1, B_2, B_3, B_4 为与输入光功率和干涉效率有关的交流项系数; $\phi(t)$ 为包含待测信号和外界环境扰动项; $\phi_1 \sim \phi_4$ 为初始相位。通过调节,使得 $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = \phi$ 。由于实验中 PBS 和 BS 的分束比均为 50:50,所以有 $A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = A, B_1 = B_2 = B_3 = B_4 = B$,则(1)式中的四个方程通过减法器后可以得到两路正交且强度相等的信号:

$$\begin{aligned} Q_x &= I_1 - I_2 = 2B \cos \phi(t), \\ Q_y &= I_3 - I_4 = 2B \sin \phi(t), \end{aligned} \quad (2)$$

分别对(2)式中的两路信号进行微分然后交叉相乘可得:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_x Q_y &= -4B^2 \dot{\phi}(t) \sin^2 \phi(t), \\ \dot{Q}_y Q_x &= 4B^2 \dot{\phi}(t) \cos^2 \phi(t), \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式中的两式经减法器并积分后得

$$I = 4B^2 \phi(t), \quad (4)$$

通过高通滤波器滤除低频干扰后,待测信号 $\phi(t)$ 便可被真实地还原出来。

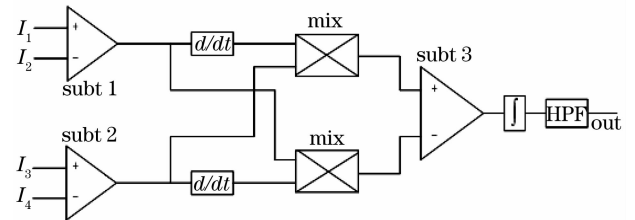


图 2 四路平衡解调电路

Fig. 2 Demodulation circuit of four-channel balancing detection

图 1 微振动四路平衡测量光路图

Fig. 1 Four-channel-balancing method for micro-vibration measurement

3 四路探测降噪原理

对(1)式进行变换,可得以下四个方程:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{\eta e}{h\nu} \left\{ \frac{1}{4}(p_{lo} + p_{sb}) + \frac{1}{2}(p_{lo} p_{sb})^{1/2} \cos[\phi(t) + \phi] \right\}, \\
 I_2 &= \frac{\eta e}{h\nu} \left\{ \frac{1}{4}(p_{lo} + p_{sb}) - \frac{1}{2}(p_{lo} p_{sb})^{1/2} \cos[\phi(t) + \phi] \right\}, \\
 I_3 &= \frac{\eta e}{h\nu} \left\{ \frac{1}{4}(p_{lo} + p_{sb}) + \frac{1}{2}(p_{lo} p_{sb})^{1/2} \sin[\phi(t) + \phi] \right\}, \\
 I_4 &= \frac{\eta e}{h\nu} \left\{ \frac{1}{4}(p_{lo} + p_{sb}) - \frac{1}{2}(p_{lo} p_{sb})^{1/2} \sin[\phi(t) + \phi] \right\},
 \end{aligned} \tag{5}$$

式中 η 为光电探测器的量子效率, e 为电子电量, h 为普朗克常量, ν 为激光频率, p_{lo}, p_{sb} 分别为参考光和信号光的光功率。则四路信号经减法器后变为两路正交信号:

$$\begin{aligned}
 I_x &= I_1 - I_2 = \frac{\eta e}{h\nu} (p_{sb} p_{lo})^{1/2} \cos \phi(t), \\
 I_y &= I_3 - I_4 = \frac{\eta e}{h\nu} (p_{sb} p_{lo})^{1/2} \sin \phi(t),
 \end{aligned} \tag{6}$$

本实验中由于参考光强和信号光强相等, 所以有 $p_{lo} = p_{sb} = \bar{P} - \Delta P$, 其中 \bar{P} 为不含噪声的光功率, ΔP 为光源附加强度噪声功率。则(6)式可改写为

$$\begin{aligned}
 I_x &= \frac{\eta e}{h\nu} (\bar{P} + \Delta P) \cos \phi(t), \\
 I_y &= \frac{\eta e}{h\nu} (\bar{P} + \Delta P) \sin \phi(t),
 \end{aligned} \tag{7}$$

同样, 对于单路探测, 输出光电流:

$$I_s = \frac{\eta e}{h\nu} (\bar{P} + \Delta P) + \frac{\eta e}{h\nu} (\bar{P} + \Delta P) \sin(\Delta\omega t + \theta), \tag{8}$$

θ 为单路探测时的初始相位。计算信噪比时, 由于 $\sin[\phi(t) + \Delta\phi_x], \cos[\phi(t) + \Delta\phi_y]$ 和 $\sin(\Delta\omega t + \theta)$ 的平均值均为 $1/2$, 则单路探测时, 第一项中的 \bar{P} 被隔直电路滤除而 ΔP 不能被滤除, 其信噪比:

$$f_{SNR_s} = \left(\frac{1}{2} \bar{P} \right)^2 / \left(\frac{1}{2} \Delta P + \Delta P \right)^2 = \frac{1}{9} \left(\frac{\bar{P}}{\Delta P} \right)^2, \tag{9}$$

四路平衡探测时, (5)式中的四路信号经减法器变为(6)式中的两路信号后, 它们的直流项中的噪声被消除了, 其信噪比:

$$f_{SNRF} = (\bar{P} / \Delta P)^2, \tag{10}$$

从(9)式、(10)式可以看出, 采用四路平衡探测后信噪比提高了9倍, 约9.5 dB。

4 实 验

为了验证四路平衡探测法产生的四路信号的正交特性, 把(2)式中的两路信号 Q_x 和 Q_y 分别接到示波器的两个输入端并合成利萨如图形, 以利萨如图

形的形状来判断信号是否正交。如图3(a)~图3(d)所示为 Q_x 和 Q_y 合成后的利萨如图形。从图可见, 当 Q_x 和 Q_y 的幅度相等时合成的利萨如图形为一个圆; 当它们的幅度不相等时合成的利萨如图形为一个正椭圆。图3(c)、图3(d)为偏椭圆, 这是因初始相位 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ 不全部相等造成的。这些图形充分证明了四路探测法所获得的信号是正交的。

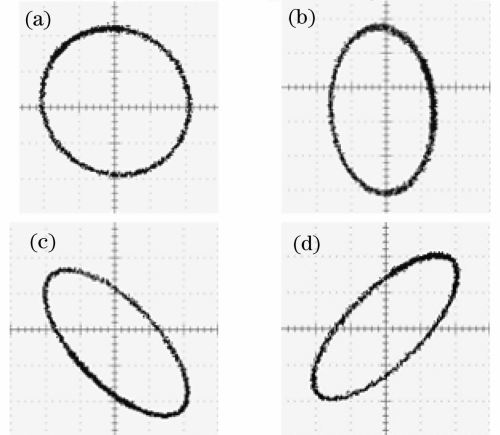


图 3 利萨如图形

Fig. 3 Lissajous figure

为了验证四路探测法对信号的解调效果, 实验时在 PZT 上施加一幅度为 C 、频率为 $\omega = 1$ kHz 的余弦模拟信号 $C \cos \omega t$ 。经减法器 subt1 和 subt2 后, (2)式中的光电流 Q_x 为图4上方的曲线1, 而由

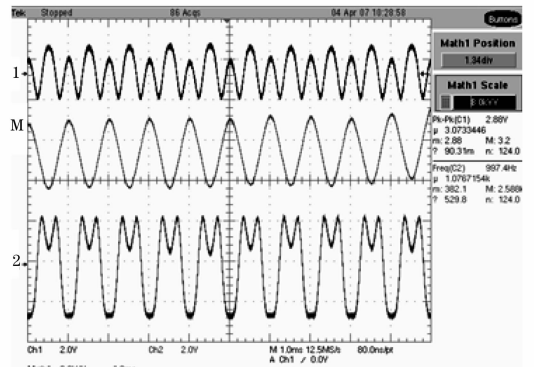


图 4 输入余弦信号后解调结果

Fig. 4 Demodulated result

于在 PBS3 之前多经过了一个 $\lambda/4$ 波片,所以 Q_y 比 Q_x 多 $\pi/2$ 的相位, Q_y 显示为图 4 下方的曲线 2。中间的曲线 M1 就是 Q_x 和 Q_y 经微分器、乘法器、积分器后最终得到的被解调出来到模拟信号。从图中看到该信号是频率为 997.4 Hz 的余弦信号,与已知的模拟信号符合的很好,实验测知本方法对微振动位移的测量范围可以达到 5~775nm。

5 结 论

本系统用实验室自制的单频窄线宽全保偏光纤激光器利用四路平衡测量法实现了微振动信号的测量。与单路探测相比,四路平衡测量法有效地降低了光源的强度噪声,理论上使系统信噪比提高了 9.5 dB。由于利用电路实现信号正交需要外加高频载波,而且电路调整比较麻烦,调整精度不高,不能保证信号严格正交,此外,电子元器件的过多使用还会增加电路噪声。基于此,本文提出了通过四路平衡探测在光路上实现信号正交的方法,这样不但有效地简化解调电路,降低了电路噪声给系统信噪比带来的不利影响,而且本系统不需要利用 PZT 外加高频载波调制,避免了高频条件下 PZT 的非线性失真对待测信号的影响。通过合成利萨如图形,验证了四路平衡探测产生的信号的正交特性。该方法对微振动位移的测量范围可以达到 5~775 nm。

参 考 文 献

- 1 R. Stierlin, R. Battig, P. D. Henchoz *et al.*. Excess-noise suppression in a fiber-optic balanced heterodyne detection system [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1986, (18): 445~454
- 2 Horace P. Yuen, Vincent W. S. Chan. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(3): 177~179
- 3 Gregory L. Abbas, Vincent W. S. Chan, Ting K. Yee. A dual-detector optical heterodyne receiver for local oscillator noise suppression[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(5): 1110~1122
- 4 Anthony Dandrige, Alan B. Tveten, Thomas G. Giallorenzi. Homodyne demodulation schemes for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1647~1653
- 5 A. Dandrige, A. B. Tveten, A. D. Kerskey *et al.*. Multiplexing of interferometric sensors using phase carrier techniques [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **LT-5**(7): 947~952
- 6 Yu Benli, Meng Jun. High-accuracy micro-vibration detector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1): 120~122, 13
俞本立,孟 军. 微振动的高精度测量[J]. *光电工程*, 2006, **33**(1): 120~122, 136
- 7 Zhihong Wang, Weiguang Zhu, Jianmin Miao *et al.*. Measurement of longitudinal piezoelectric coefficient of film with scanning-modulated interferometer[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **128**: 327~332
- 8 Yu Benli, Xu Changchun. A vibration sensor using all polarization-maintaining fiber waveguide modulator[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2007, **24**(1): 118~121
俞本立,徐长春. 基于波导调制器的全保偏光纤微振动传感器[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(1): 118~121
- 9 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong *et al.*. Stable single-frequency fiber ring laser with linewidth less than 0.5 kHz[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(4): 345~348
俞本立,钱景仁,罗家童. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(4): 345~348