

文章编号: 0258-7025(2007)09-1267-04

消除正弦相位调制干涉仪中光强调制影响的全光纤干涉仪

李中梁^{1,2}, 王向朝¹, 刘英明¹, 步扬¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 在激光二极管(LD)正弦相位调制(LD-SPM)干涉仪中,通过注入电流调制激光二极管波长的同时,光源输出的光强也被调制,成为测量误差的主要来源之一。提出一种新的消除激光二极管正弦相位调制干涉仪中光强调制影响的干涉仪,给出了具体的理论分析。该干涉仪采用全光纤结构,有效减小外界干扰对干涉测量的影响;采用容易实现的前置信号处理电路和实时相位检测器对干涉信号进行处理,消除了激光二极管光强调制产生的测量误差;同时实现了物体微小位移的高精度实时测量,测量的重复精度达到1 nm。实验结果与其他消除光强调制影响的方法测得的结果基本一致,验证了该方法的实用性。

关键词 测量;干涉仪;正弦相位调制;实时测量

中图分类号 TH 744.3 **文献标识码** A

All Fiber-Optic Sinusoidal Phase-Modulating Interferometer Insensitive to Intensity Modulation of Light Source

LI Zhong-liang^{1,2}, WANG Xiang-zhao¹, LIU Ying-ming¹, BU Yang¹

¹Laboratory for Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract In a laser-diode (LD) sinusoidal phase-modulating (SPM) interferometer, the wavelength of the LD is modulated by varying its injection current, but at the same time the intensity of the LD is modulated too, which causes a major measurement error. To decrease the effect of the intensity modulation of the LD on measurement accuracy, a novel LD-SPM fiber-optic interferometer is presented, and the theory of the interferometer is analyzed. The all fiber-optic structure decreases the influence of external perturbation on interference measurement effectively. Using this interferometer with simple pre-signal process circuit and real-time phase detector, the measurement error caused by LD intensity modulation is eliminated, and the displacements are measured with a higher accuracy (a few nanometers). And the measurement repeatability is less than 1 nm. The experimental results are consistent with those with other methods to eliminate influence of intensity modulation. The validity of the new interferometer is proved.

Key words measurement; interferometer; sinusoidal phase-modulating; real-time measurement

1 引言

随着高精度机械加工和微机械技术的发展,对机械部件的微小位移进行精确的测量变得越来越重

要。光学干涉测量方法作为一种重要的非接触式无损探测方法,具有结构简单、精度高、易于实现等优点,因而得到了广泛的应用。

由于激光二极管(LD)具有稳定的单模输出、波

收稿日期:2006-12-15;收到修改稿日期:2007-03-20

基金项目:国家自然科学基金(60578051)资助项目。

作者简介:李中梁(1982—),男,辽宁人,博士研究生,主要从事纳米精度位移与振动激光测量、光电信号处理的研究工作。

E-mail: lizhongliang@siom. ac. cn

导师简介:王向朝(1957—),男,辽宁人,研究员,博士生导师,研究领域为信息光电子技术。E-mail: wxz26267@siom. ac. cn

长可调谐、尺寸小、价格低等优点,在光学干涉仪中被广泛地用作光源。利用激光二极管的波长可调谐性对它的输入电流进行直接调制,很容易实现精度较高的光外差干涉测量。相对于传统的外差干涉仪,激光二极管正弦相位调制(LD-SPM)干涉仪具有体积小、结构紧凑、相位调制简单、测量精确等优点^[1~5]。在激光二极管正弦相位调制干涉仪中,通过注入电流调制激光二极管波长的同时,激光二极管的输出光强也被调制,从而带来了一定的测量误差,对于如何消除激光二极管光强调制产生的影响文献[6~8]中提出了光热调制激光二极管波长的方法,由于使用两个激光二极管,使得干涉仪结构比较复杂;文献[9]中采用的信号处理方法难以实现实时测量。为此本文提出的全光纤干涉仪采用一种新的信号处理方法,可以消除激光二极管光强调制对位移测量的影响,同时干涉仪结构简单,可实现物体微小位移的高精度实时测量。

2 原 理

图 1 为激光二极管正弦相位调制全光纤斐索干涉仪示意图。该干涉仪采用激光二极管作为光源,光源发出的光经过隔离器后由 3 dB 耦合器分成两路。其中一路经过一个光纤端面(APC)出射,该端面能够使反射回去的光透过包层泄漏出去,不会和干涉臂的光形成干扰;另一路的一部分光在光纤准直器和空气交界的端面被反射,另一部分光经过准直器准直后以平行光出射,经被测物体垂直反射后经过光纤准直器进入光纤。被光纤准直器端面反射回去的参考光与被测物体反射的物体光产生的干涉信号经过 3 dB 耦合器后,在另一端由光电二极管(PD)检测,经放大器 1(AMP1)后与经过放大器 2(AMP2)的调制信号通过乘法器(MUL)相乘,再通过低通滤波器(LPF),最后通过实时相位检测器后获得相位信号,由相位信号可实时得到物体振动的

振幅和频率。

信号发生器输出信号为 $A\cos\omega_c t$, 经过激光二极管调制器(LM)后,得到正弦交流调制电流 $I_m(t) = a\cos\omega_c t$, 其中 $a = K_{LM}A$, K_{LM} 为激光调制器的转换系数。激光二极管在调制电流 $I_m(t)$ 和直流电流 I_0 的驱动下,波长和强度分别为

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \beta I_m(t), \quad (1)$$

$$g(t) = \beta_1 [I_0 + I_m(t)], \quad (2)$$

式中 λ_0 为激光二极管输出光的中心波长,由 I_0 决定; β 为激光二极管的波长调制系数; β_1 为激光二极管的输出强度与注入电流的比值,为常数。光电二极管检测到的干涉信号为

$$\begin{aligned} S(t) &= g(t) \{S_0 + S_1 \cos[z\cos\omega_c t + \alpha(t)]\} = \\ &= \beta_1 (I_0 + a\cos\omega_c t) \{S_0 + S_1 \cos[z\cos\omega_c t + \alpha(t)]\} = \\ &= S(1 + \beta_2 \cos\omega_c t) \{S_0 + S_1 \cos[z\cos\omega_c t + \alpha(t)]\}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $S = \beta_1 I_0$ 为激光二极管输出强度的直流分量; S_0 和 S_1 均为由参考光和物光的振幅比决定的常数; $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_d(t)$, 其中 $\alpha_0(t) = (4\pi/\lambda_0)D_0$ 为由光程差 $2D_0$ 决定的初始相位, $\alpha_d(t) = (4\pi/\lambda_0)d(t)$ 为由光纤准直器端面与被测物体之间的相对位移 $d(t)$ 引进的干涉信号的相位变化; $z = 4\pi a\beta D_0/\lambda_0^2$ 为正弦相位调制深度; $\beta_2 = a/I_0$ 为激光二极管的调制电流 $I_m(t)$ 的幅度和直流电流 I_0 的比值。(3) 式展开得到

$$\begin{aligned} S(t) &= S(1 + \beta_2 \cos\omega_c t) \{S_0 + \\ &= S_1 \cos\alpha(t) [J_0(z) - 2J_2(z)\cos 2\omega_c t + \dots] - \\ &= S_1 \sin\alpha(t) [2J_1(z)\cos\omega_c t - 2J_3(z)\cos 3\omega_c t + \dots]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $J_n(z)$ 为 n 阶贝塞尔函数。由光电二极管检测到的干涉信号 $S(t)$ 经过放大器 1 后,与经过放大器 2 的调制信号 $A\cos\omega_c t$ 通过乘法器相乘,再通过低通滤波器,其中低通滤波器的截止频率小于 $\omega_c/10$, 可得到探测信号

$$P(t) = P'(t) + P''(t), \quad (5)$$

其中

$$P'(t) = \frac{1}{2} K_1 K_2 K_m K_L S S_0 A \beta_2, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P''(t) &= K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A J_1(z) \sin\alpha(t) + \\ &= \frac{1}{2} K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A \beta_2 [J_2(z) - J_0(z)] \cos\alpha(t), \end{aligned} \quad (7)$$

式中 K_1 和 K_2 分别为放大器 1 和放大器 2 的增益, K_m 为模拟乘法器的系数, K_L 为低通滤波器的增益。 $P'(t)$ 为直流项,探测信号 $P(t)$ 除掉直流项后为

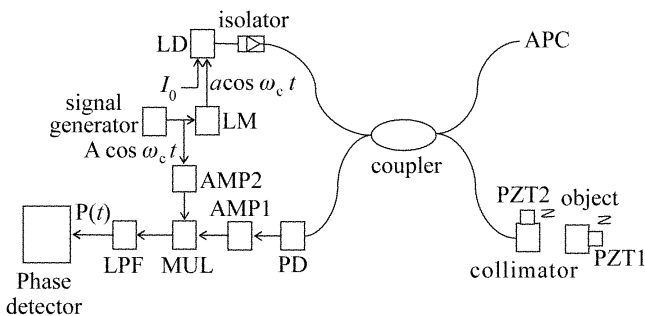


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

$P''(t)$ 。令

$$P_1 = K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A J_1(z) \sin \alpha(t), \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A \beta_2 [J_2(z) - J_0(z)] \cos \alpha(t), \quad (9)$$

而 P_2 为正弦调制电流对激光二极管光强调制所产生的附加项。为了消除这种强度调制的影响,对信号 $P''(t)$ 进行整理得

$$\begin{aligned} P''(t) &= K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A J_1(z) \sin \alpha(t) + \\ &\frac{1}{2} K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A \beta_2 [J_2(z) - J_0(z)] \cos \alpha(t) = \\ &K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A \times \\ &\sqrt{J_1(z)^2 + \left\{ \frac{1}{2} \beta_2 [J_2(z) - J_0(z)] \right\}^2} \sin[\alpha(t) + \phi] = \\ &K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A \times \\ &\sqrt{J_1(z)^2 + \left\{ \frac{1}{2} \beta_2 [J_2(z) - J_0(z)] \right\}^2} \sin \alpha'(t), \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$\phi = \arctan \frac{\beta_2 [J_2(z) - J_0(z)]}{2J_1(z)}, \quad (11)$$

$$\alpha'(t) = \alpha(t) + \phi = \alpha_0 + \alpha_d(t) + \phi, \quad (12)$$

定义

$$\begin{aligned} K_s &= K_1 K_2 K_m K_L S S_1 A \times \\ &\sqrt{J_1(z)^2 + \left\{ \frac{1}{2} \beta_2 [J_2(z) - J_0(z)] \right\}^2}, \quad (13) \end{aligned}$$

由于 ϕ 和初始相位 α_0 均为直流项,在实验中可以不考虑,当光纤准直器端面固定时,由(10)式可得到被测物体的位移为

$$d(t) = (\lambda_0/4\pi) \arcsin[P''(t)/K_s]. \quad (14)$$

由于存在一些难以获得准确数值的工作参数,较难利用(13)式精确地计算 K_s 。为了求得 K_s 的值,可以调节位于光纤准直器上的压电陶瓷 2(PZT2)上所加的正弦电压信号,使光纤准直器端面与被测物体之间产生振幅大于 $\lambda_0/8$ 而小于 $\lambda_0/4$ 的相对振动,此时信号 $P''(t)$ 的幅度即为 K_s 。

因为当光纤准直器端面与被测物体之间相对振动的幅度小于 $\lambda_0/8$ 时,(10)式中的 $\alpha'(t)$ 的值不能达到 $\pm\pi/2$,此时信号 $P''(t)$ 的峰峰值不能达到 $2K_s$;而当光纤准直器端面与被测物体之间相对振动的幅度大于 $\lambda_0/8$ 时, $\alpha'(t)$ 的值能够达到 $\pm\pi/2$,此时信号 $P''(t)$ 的峰峰值即为 $2K_s$ 。求得 K_s 后,利用(14)式可以高精度地求得被测物体的位移。

在压电陶瓷 2 上附加正弦电压信号(使光纤准直器端面与被测物体之间产生振幅大于 $\lambda_0/8$ 而小于 $\lambda_0/4$ 的相对振动)时测得的 K_s 值是在压电陶瓷 2

上附加电压信号之前的 K_s ;而在测量物体位移时去掉了压电陶瓷 2 上的电压信号。在压电陶瓷 2 上附加电压信号前后光纤准直器端面可能产生一个小于 $\lambda_0/4$ 的位置误差,使正弦相位调制深度 z 发生变化,进而导致 K_s 的值变化为 K'_s ,给测量结果带来一定的误差。假设激光二极管的中心波长 λ_0 为 1304 nm,波长调制系数 β 为 3.0×10^{-2} nm/mA,激光二极管的调制电流为 2 mA,在调制深度 $z \approx 2.35$ 的条件下,光纤准直器端面产生的位置误差对 K_s 的影响如图 2 所示。

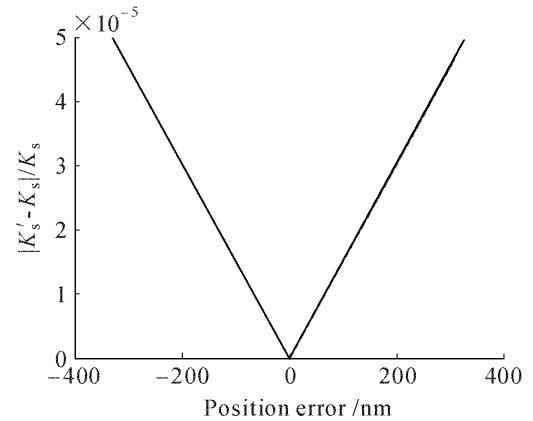


图 2 光纤准直器端面的位置误差对 K_s 的影响曲线
Fig. 2 Position error of the fiber collimator end face versus K_s

由图 2 可见,光纤准直器端面产生的小于 $\lambda_0/4$ (326 nm) 的位置误差给 K_s 带来的相对误差 $|K'_s - K_s|/K_s$ 小于 4.95×10^{-5} ,可忽略不计。

3 实验与结果

实验装置如图 1 所示,光源采用带尾纤的分布反馈激光二极管,其中心波长 λ_0 ,最大出纤功率和波长调制系数 β 分别为 1304 nm, 1 mW 和 3.0×10^{-2} nm/mA。光纤端面具有 8° 斜角,因此反射回去的光能够透过包层而泄漏出去,不会和干涉臂的光干涉形成干扰。实验中调制信号的频率为 5 kHz^[10],激光二极管调制器的转换系数为 0.01 mA/mV,放大器 1 的增益 K_1 为 62.2,放大器 2 的增益 K_2 为 86.7,模拟乘法器的系数 K_m 为 5×10^{-5} (mV)⁻¹。选用一个二阶的低通滤波器,其截止频率为 400 Hz,增益 K_L 为 10。实验中,将一个反射镜粘在压电陶瓷 1 上作为被测物体。调节压电陶瓷 2 上的驱动电压信号,使光纤准直器端面与被测物体之间产生振幅大于 $\lambda_0/8$ 而小于 $\lambda_0/4$ 的相对振动,测量此时低通滤波器的输出信号 $P(t)$ 中交流信

号 $P'(t)$ 的幅度,将其作为 K_s 的值。去掉压电陶瓷 2 上的驱动电压信号,给压电陶瓷 1 一个 100 Hz 的正弦电压信号,使被测物体产生位移,此时可高精度地测得被测物体的位移。

压电陶瓷 1 上的正弦电压信号如图 3(a)所示,图 3(b)~(f)为压电陶瓷 1 工作条件不变时被测物体振动的测量结果。其中,图 3(b)是采用文献[9]中的方法测得的结果,图 3(c),(d),(e)是用本文提出的测量系统在交流调制电流的幅度分别为 1 mA, 1.5 mA 和 2 mA 时(三种情况下对激光二极管的光强调制不同)测得的振动结果。与图 3(b)相比,图 3(c),(d)和(e)三种情况下测量结果的振幅均方根(RMS)误差分别为 1.18 nm, 0.96 nm 和 1.45 nm。图 3(f)是调制电流为 2 mA 时与图 3(e)相隔几分钟后的测量结果,两曲线的均方根差为 0.78 nm。结果表明,利用本文提出的方法进行 20 次测量的重复精度达到 1 nm,可消除光强调制产生的影响。

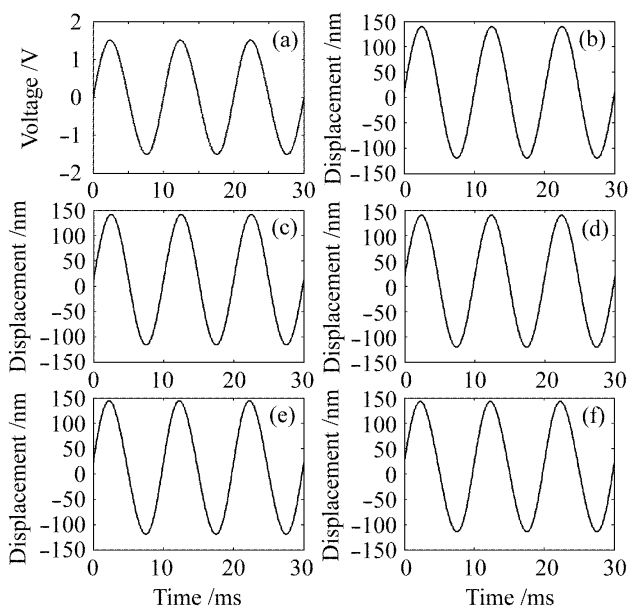


图 3

(a) 在压电陶瓷 1 上所加的电压信号;(b) 利用文献[9]中的方法测得的位移曲线;(c),(d),(e) 在调制电流的幅度分别为 1 mA, 1.5 mA 和 2 mA 时利用本方法测得的物体位移曲线;(f) 调制电流为 2 mA 时与(e)相隔几分钟后的测量曲线

Fig. 3

(a) driving signal of PZT1; (b) displacement curve obtained with the method in Ref. [9]; (c), (d), (e) displacement curves obtained with the method in this paper corresponding to 1 mA, 1.5 mA, and 2 mA injection currents, respectively; (f) displacement curve corresponding to 2 mA injection current after several minutes

由于光纤准直器的透镜直径为 1.8 mm,出射的平行光束的直径约为 0.1 mm,因此该方法可以用于

测量如微机电系统(MEMS)器件等微物体的微振动和微位移。

4 结 论

提出了一种激光二极管全光纤干涉仪,使干涉仪的结构更加紧凑,在减小外界干扰对干涉仪影响的同时,消除了激光二极管光强调制对位移测量产生的影响。该方法采用简单的电路构成实时相位检测器,通过一种新的信号处理方法对干涉信号进行处理,实现物体微小位移的高精度实时测量,测量的重复精度达到 1 nm。

参 考 文 献

- 1 T. Suzuki, O. Sasaki, K. Higuchi *et al.*. Real time displacement measurement in sinusoidal phase modulating interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(24):5270~5274
- 2 D. Guo, M. Wang, S. Tan. Self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(5):1537~1543
- 3 Xuefeng Wang, Xiangzhao Wang, Feng Qian *et al.*. Photothermal modulation of laser diode wavelength; application to sinusoidal phase-modulating interferometer for displacement measurements [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(8):559~564
- 4 Xiangzhao Wang, O. Sasaki, T. Suzuki *et al.*. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface by an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25):4593~4597
- 5 Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Real-time micro-vibration measurement using synchronous phase detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):753~756
宋 松,王向朝,王学锋等. 采用同步相位检测的微小振动实时测量[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):753~756
- 6 Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Qian Feng *et al.*. Photothermal wavelength modulation of a laser diode for decreasing interferometric error [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, **26**(5):1~3
王学锋,王向朝,钱 锋等. 光热调制半导体激光波长降低干涉测量误差[J]. *光电工程*, 1999, **26**(5):1~3
- 7 Lu Hongbin, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Study on photo-thermal intensity-modulation characteristics of laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):969~972
卢洪斌,王向朝,王学锋等. 半导体激光器光强光热调制特性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11):969~972
- 8 Li Dailin, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Composite-light-source interferometer for real-time micro-vibration measurements [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):350~353
李代林,王向朝,王学锋等. 复合光源实时微振动干涉测量仪[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):350~353
- 9 Xuefeng Wang, Xiangzhao Wang, Yingming Liu *et al.*. A sinusoidal phase-modulating fiber-optic interferometer insensitive to the intensity change of the light source [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**(3):219~222
- 10 Liu Yingming, Wang Xiangzhao. Analysis of modulation frequency in sinusoidal phase modulating interferometry for displacement measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1574~1579
刘英明,王向朝. 正弦相位调制位移干涉测量技术中调制频率的优化选择[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1574~1579