

文章编号: 0253-2239(2006)06-0845-6

正弦相位调制自混合干涉微位移测量精度分析*

郭冬梅 谈苏庆 王 鸣**

(南京师范大学物理科学与技术学院 江苏省光电技术重点实验室, 南京 210097)

摘要: 为了提高自混合干涉仪的位移测量精度, 提出将正弦相位调制技术引入自混合干涉中。相位调制由置于自混合干涉仪外腔中的电光晶体实现, 相位解调由傅里叶分析的方法得到。对位移测量过程中各种可能的误差来源如电光晶体调制不稳定性、光在外腔中的二次反馈效应等对测量精度的影响进行了模拟分析, 从理论上得到了这种新的信号处理方法可以达到纳米级的测量精度。实验上, 用高精度的商用压电陶瓷标定的结果验证了这种正弦相位调制自混合干涉仪在普通实验室噪声环境中可以达到纳米级的位移测量精度。

关键词: 激光技术; 微位移测量; 自混合干涉; 误差分析

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Analysis of Micro-Displacement Measurement Accuracy in Self-Mixing Interferometer Based on Sinusoidal Phase Modulating Technique

Guo Dongmei Tan Suqing Wang Ming

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology of Jiangsu Province, College of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097)

Abstract: Sinusoidal phase modulating technique is introduced in to the self-mixing interference in order to improve the displacement measurement accuracy of the self-mixing interferometer. Phase modulation is obtained by an electro-optic crystal in the external cavity and phase demodulation is achieved by Fourier analysis method. Error sources that can influence the displacement measurement accuracy such as modulating instability of the electro-optic crystal (EOM) and the multiple feedbacks effect in the external cavity have been simulated and the measurement accuracy of the new signal processing method is obtained theoretically. Experimentally, calibration results with a high precision commercial PZT show that a displacement measurement accuracy of nanometers scale is achieved in the common laboratorial environment.

Key words: laser technology; micro-displacement measurement; self-mixing interference; error analysis

1 引 言

激光反馈效应是指入射在外反射表面的光部分返回, 并耦合到激光腔内。重新注入的激光与激光腔内的光相混合, 引起输出功率和频率的变化, 形成外光学反馈效应。激光自混合干涉(SMI)就是这种外光反馈效应产生的干涉。在自混合干涉信号中, 相位和振幅的变化与外腔的光程及外反射表面有关, 这个性质被用于各种传感应用, 如测量微小位

移、速度和面形^[1~4]。自混合干涉信号常用条纹峰值计数法分析, 但是位移测量精度仅在 $\lambda/2$ 。为了提高测量精度, 一些调制解调方法被引入自混合干涉信号的分析中。电流调制是半导体激光自混合干涉仪最常用的一种调制方法^[5~7], 通过改变注入电流来调制半导体激光器的输出频率。但电流调制以其固有的缺点, 如温漂大、边模抑制比低、波长连续调制范围小等, 制约了其应用的范围。而且使用电

* 国家自然科学基金(50375074)资助课题。

作者简介: 郭冬梅(1980~), 女, 江苏连云港人, 南京师范大学博士研究生, 主要从事激光自混合干涉进行微纳米测量方面的研究。E-mail: guo80china@yahoo.com.cn

** 通信联系人。wangming@pine.njnu.edu.cn

收稿日期: 2005-06-14; 收到修改稿日期: 2005-09-23

流注入调制光频时,会导致输出光强较大的波动,产生较大的测量误差。

基于对激光束在外腔中相位的正弦调制,我们提出了一种新型的正弦相位调制自混合干涉仪^[8]。相位调制由置于自混合干涉仪外腔中的电光晶体实现,相位解调由傅里叶分析得到。本文简要阐述了正弦相位调制自混合干涉仪测量微位移的原理;详细分析了微位移测量过程中各种可能的误差来源,及其对位移测量精度的影响进行了数值模拟;用PI公司高精度的压电陶瓷(PZT)对正弦相位调制自混合干涉仪位移测量实验系统进行了标定。从理论上和实验上验证了提出的正弦相位调制自混合干涉仪及相位解调算法可实现对微小位移的纳米精度测量。最后用该自混合干涉仪对一只普通国产压电陶瓷在20 Hz时的迟滞特性进行了测量。

2 测量原理

对于自混合干涉这里引入两个假设:一个是整个系统工作在弱反馈条件下,光在外腔多重反馈效应可以忽略;另一个是对于氦氖激光器,当它的增益曲线和色散曲线均匀分布时,光反馈导致的激光器输出光频的变化很小,可忽略光反馈带来的光频变化,仅对反馈造成的光强变化进行分析。在弱反馈条件下,氦氖激光自混合干涉的光强可以简化为^[9]

$$I = I_0(1 + m \cos \phi), \quad (1)$$

其中 I_0 为无光反馈时的初始光强, m 为条纹可见度, ϕ 为发生干涉的两相干光波之间的相位差。对于自混合干涉来说, ϕ 和自混合干涉仪的外腔长度 L 之间的关系为 $\phi = 4\pi L/\lambda$, 其中 λ 为激光波长。为了从(1)式中高精度地解调出相位 ϕ , 可在外腔中放置一个电光晶体, 对激光束的相位进行正弦调制, 电光晶体主轴方向和氦氖激光器发出的线偏光的偏振方向一致。调制函数为

$$\psi(t) = a \sin(2\pi f_m t + \beta), \quad (2)$$

其中 a 为调制深度, f_m 为调制频率, β 为调制的初始相位。考虑到自混合干涉时光在外腔中两次经过电光晶体, 经过调制后的干涉光强可以表示为

$$I(t) = I_0 \{1 + m \cos[\phi(t) + 2a \sin(2\pi f_m t + \beta)]\}, \quad (3)$$

(3)式可以展开为 n 次谐波的形式, 一次谐波和二次谐波振幅分别为

$$A_1(t) = -2mI_0 \sin \phi(t) J_1(2a), \quad (4)$$

$$A_2(t) = -2mI_0 \cos \phi(t) J_2(2a). \quad (5)$$

其中 J_1, J_2 为贝塞尔函数。从(4)式, (5)式中可以

解调出相位 $\phi(t)$ 的值

$$\phi(t) = \arctan \left[\frac{A_1(t)}{A_2(t)} \cdot \frac{J_2(2a)}{J_1(2a)} \right]. \quad (6)$$

我们提出了傅里叶分析的方法确定 $A_1(t)$, $A_2(t)$ 的值, 再依据相位 ϕ 和外腔长度之间的关系计算出外反射靶的位移值。

3 实 验

正弦相位调制自混合干涉仪实验装置如图1, 主要包括一个1 mW的线偏振氦氖激光器(632.8 nm, TEM₀₀)、可调衰减片(ND)、电光晶体(EOM)、偏振片、压电陶瓷及固定在其上面的一个靶镜, 信号采集和控制等。激光腔由一个平面镜(前镜)和一个半径为1 m的凹面镜(后镜)组成, 它们的反射率分别为0.98和0.99, 腔长为180 mm。自混合干涉仪外腔反射靶面为一个反射率约0.4的硅片, 外腔长度为200 mm。实验时, 由激光器的前端面发出的相干光经一个可调衰减片, 电光晶体(New Focus, 4002), 一个偏振片, 然后由外腔反射镜反射回激光器的内腔。可调衰减片是用来控制光反馈量, 使整个系统处于弱反馈状态下。激光器发出的线偏光振动方向、电光晶体的主轴方向和偏振片的透射方向必须调整一致, 使得电光晶体对激光束进行纯相位调制, 而无任何幅度调制。外腔反射镜被固定在一个置于二维微动平台上的压电陶瓷上, 干涉信号由置于激光器后端面的光电探测器(PD)接收, 经电流电压转换并交流放大, 由数据采集卡(National Instrument 6024E)采集后送入计算机, 由专用的数据分析软件进行分析处理(National Instrument Labview)。实验中, 从驱动电光晶体的高压放大器的信号发生器上引入TTL电平作为数据采集卡采集信号的触发信号, 在Labview程序中设置触发端遇到第一个上

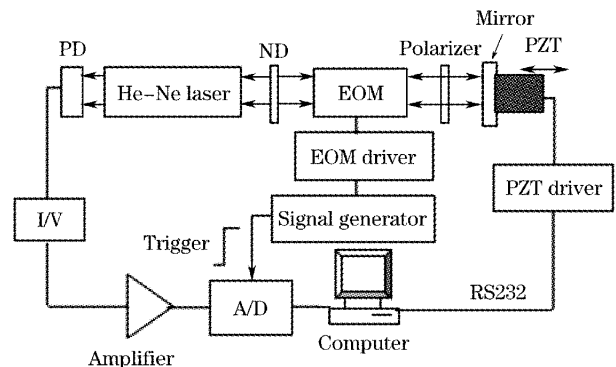


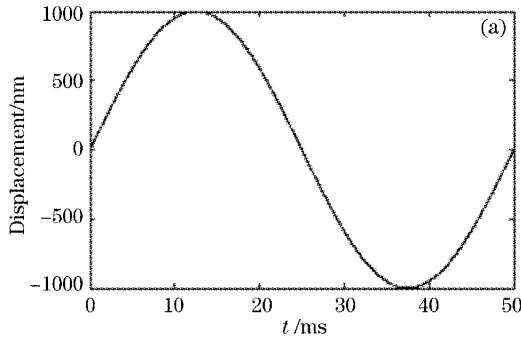
图1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

升沿便开始采集,这样就可以得到初始相位为 $\pi/2$ 的正弦调制。

4 位移测量精度模拟分析

为了评价提出的正弦相位调制自混合干涉仪及相位解调方法,我们对几种可能的误差来源及其对位移测量精度的影响进行了数值模拟,从理论上分析该实验系统及相位解调方法可达到的测量精度。



假设受到调制的自混合干涉信号经后续处理电路得到的交流分量表示为

$$s(t) = s_0 \cos[\phi + 2a \sin(2\pi f_m t + \beta)], \quad (7)$$

图 2(a)为用计算机模拟的外反射靶面的正弦抽运,图 2(b)为相应的受正弦调制的自混合干涉信号,调制深度幅度 a 为 1.1 rad,调制频率为 2 kHz,调制初始相位为 $\pi/2$ 。

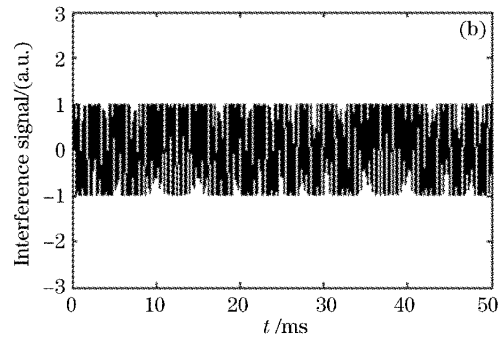


图 2 模拟的外反射靶位移曲线(a),相应的受调制的自混合干涉信号曲线(b)

Fig. 2 Simulated displacement of the external target (a) and corresponding modulated SMI signal (b)

当使用图 1 所示的正弦相位调制自混合干涉仪进行位移测量时,误差主要来源于以下几个方面。

4.1 由有限个点的傅里叶变换和逆傅里叶变换计算导致的截断误差

用傅里叶分析的方法,解调出位移值如图 3(a)所示,图 3(b)为由计算导致的位移测量误差。解调出的相位的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_m - d_r)^2 / (n-1)}, \quad (8)$$

其中 d_r 是第 i 个点的实际位移值, d_m 为第 i 个点解调出的位移值, n 为采样点数。图 3(b)中的最大误差为 1.3×10^{-11} nm,标准差为 3.2×10^{-12} nm。可见由截断误差引入的位移解调误差是非常小的,可以忽略不计。

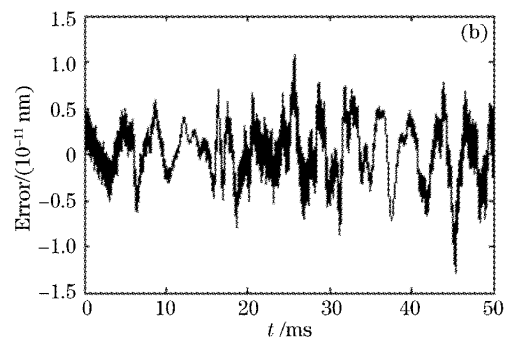
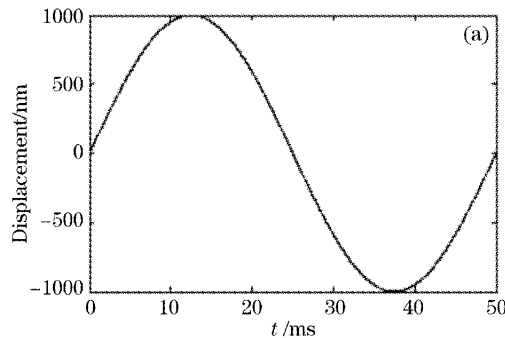


图 3 (a)傅里叶分析方法解调的位移曲线,(b)位移重构误差

Fig. 3 (a) Demodulated displacement by FFT analysis method, (b) displacement reconstruction error

4.2 由电光晶体的调制不稳定性带来的相位解调误差

这部分的噪声受到正弦调制的自混合干涉信号可以表示为

$$s(t) = s_0 \{ \cos \phi + [a \sin(2\pi f_m t + \beta) + n_a(t)] \}, \quad (9)$$

假设 $n_a(t)$ 为均值为 0,方差为 σ_a^2 的高斯噪声,即电

光晶体调制的信噪比(SNR)为

$$\rho_a = (a^2/2)/\sigma_a^2. \quad (10)$$

图 4 模拟了电光晶体调制的信噪比在 100~1000 之间时的位移解调标准差。在实验系统中使用的 New Focus 4002 型的电光调制器及其驱动器具有很高的信噪比($\text{SNR} > 1000$),所以由这部分因素引入的位移测量误差一般可控制在纳米量级。

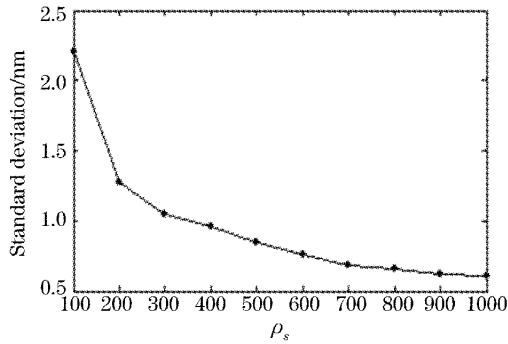


图 4 位移测量标准差和电光晶体调制信噪比之间的关系

Fig. 4 Standard deviation of displacement measurement versus signal-noise-ratio (SNR) of electro-optic modulation

4.3 由光电转换部分(包括光电探测器及后续处理电路)引入的电子噪声

这部分的噪声受到正弦调制的自混合干涉信号可以表示为

$$s(t) = s_0 \cos[\phi + 2a \sin(2\pi f_m t + \beta)] + n_s(t), \quad (11)$$

假设 $n_s(t)$ 为均值为 0, 方差为 σ_s^2 的高斯噪声, 则光电转换部分的信噪比为

$$\rho_s = (s_0^2/2)/\sigma_s^2. \quad (12)$$

图 5 模拟了光电转换部分信噪比在 100~1000 之间的位移解调标准差。从图中可以看出提出的相位解调算法对叠加在干涉信号上的噪声有很大的抑制作用, 这是由于在解调相位的过程中只有一阶谐波和二阶谐波被提取, 而其他的谐波均被隔绝。

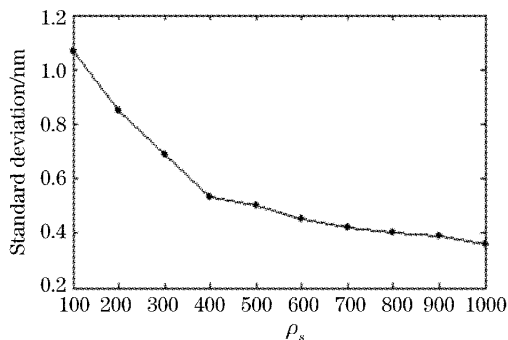


图 5 位移测量标准差和光电转换部分信噪比之间的关系

Fig. 5 Standard deviation of displacement measurement versus signal-noise-ratio of (SNR) photoelectric conversion fraction

4.4 由数据采集卡导致的电光晶体调制的初始相位误差

由电光晶体的调制初始相位误差导致的位移测量误差, 模拟结果见图 6。可以看出, 该相位解调算

法对电光晶体调制的初始相位精度不是很敏感, 当调制初始相位误差达到 0.1 rad 时, 位移测量标准差小于 0.3 nm。

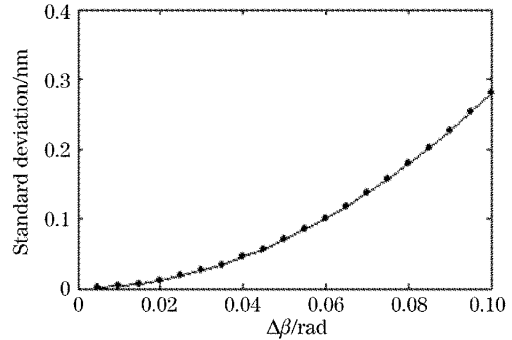


图 6 位移测量标准差的调制初始相位之间的关系

Fig. 6 Standard deviation of displacement measurement caused by initial phase of the modulation

4.5 由光在外腔中多重反馈效应导致的位移测量误差

当多重反馈效应不可以完全忽略时, 氦氖激光自混合干涉信号光强公式为

$$I = I_0 \left[1 + m \cos \phi \sum_{j=0}^{\infty} (-\eta)^j \cos j\phi \right], \quad (13)$$

其中当激光器一定时, m/η 为一个定值, 与外部光反馈无关。参于实验系统中所使用的氦氖激光器, m/η 约为 0.5。(13) 式是(1) 式在 $j = 0$ (仅一次反馈) 时的特殊形式。当光在外腔中的多重反馈效应不能完全忽略时, (13) 式中的 $j = 1, 2, 3 \dots$ 等项就会带来位移重构误差。由于整个实验系统工作在弱反馈机制下, 自混合干涉时光在外腔中的多重反馈效应并不明显, 所以仅考虑光在外腔中二次、三次反馈导致的相位解调误差 (即 $j = 1, 2$ 项)。图 7 模拟了在 $m/\eta = 0.5$ 时, 光在外腔中的二次反馈 ($j = 1$) 导致

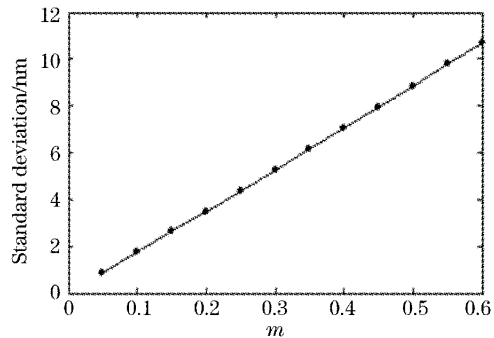


图 7 二次反馈导致的位移测量标准差和条纹可见度之间的关系

Fig. 7 Standard deviation of displacement measurement caused by secondary feedback with respect to fringe visibility m

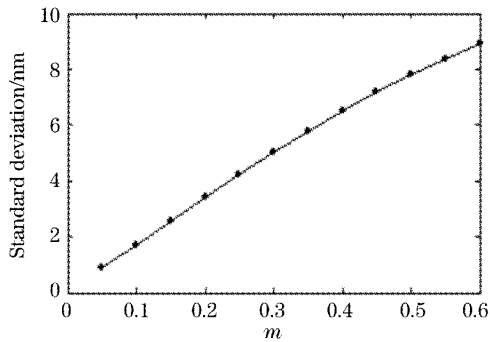


图 8 三次反馈导致的位移测量标准差和条纹可见度之间原关系

Fig. 8 Standard deviation of displacement measurement caused by third the feedbacks with respect to fringe visibility m

的位移测量标准差和条纹可见度 m 之间的关系。图 8 模拟了在 $m/\eta = 0.5$ 时,由于光在外腔中 3 次反馈 ($j = 1, 2$) 导致的位移测量标准差和条纹可见度 m 之间的关系。实验中首先不给电光晶体加电压,用示波器来观察一般的自混合干涉信号,通过光路中的可调衰减器来控制外部光反馈量,继而控制干涉条纹可见度 m 。一般将 m 控制在 0.1 左右,便可达到较好的位移重构效果。

5 实验结果

我们用 PI 公司生产的高精度的压电陶瓷 (P-841.10) 来评价正弦相位调制自混合干涉仪及相位解调算法。采用了 PI 公司提供的 PI Control V2.1

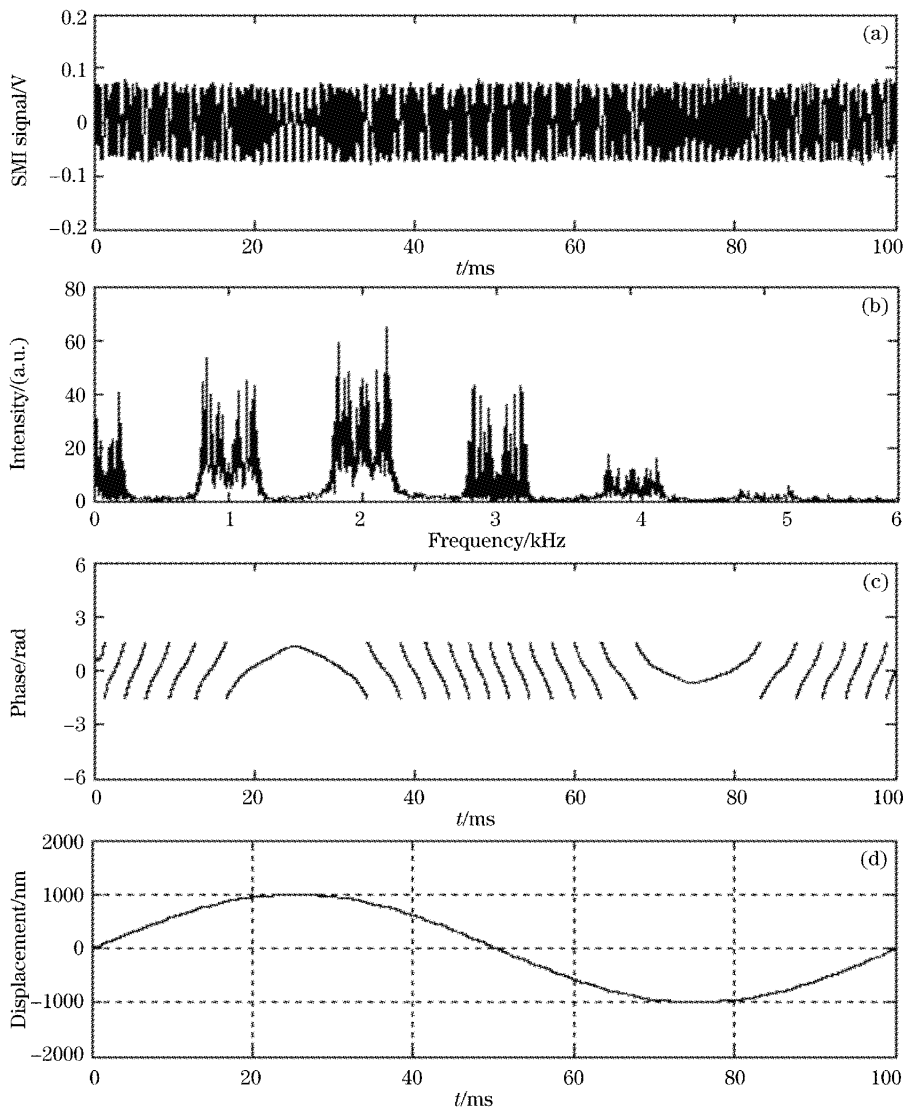


图 9 (a)采集的 SMI 信号,(b)及其傅里叶频谱,(c)解调出相位,(d)位移重构结果

Fig. 9 Captured SMI signal, (b) Fourier spectra of the SMI signal, (c) extracted phase (wrapping), (d) displacement reconstruction result

软件,利用压电陶瓷驱动模块自带的信号发生器对压电陶瓷进行控制,闭环控制时压电陶瓷位移的分辨率为 0.15 nm,绝对位移精度在 1 nm 以下。用 PI Control V2.1 软件自带的波形发生器控制压电陶瓷做频率为 10 Hz,峰-谷值为 2000 nm 的正弦运动,电光晶体的调制频率 f_m 为 1 kHz,调制幅度为 1.2 rad。数据采集卡的采样频率为 50 kHz。图 9(a)为采集到的受到调制的自混合干涉信号。图 9(b)为它的傅里叶频谱,和理论分析一致,干涉信号一次谐波和二次谐波的频谱分别以 f_m 和 $2f_m$ 为中心。用文献[8]中提出的相位解调方法解调出的相位如图 9(c),对图 9(c) 进行去包裹处理之后,利用相位 ϕ 和外腔长度之间的关系,重构了压电陶瓷的微小位移,如图 9(d)所示,其中波形的峰-谷值

为 2002 nm。我们将重构出位移波形和一个标准的频率为 10 Hz,峰-谷值为 2000 nm 的正弦波形相比较,抽取了其中 1000 个点计算二者偏差,得到了这些点的位移测量标准差为 8 nm。从实验上验证了提出的正弦相位调制自混合干涉仪及相位解调算法在普通实验室噪声环境中可以达到纳米级的位移测量精度。

将 PI 公司高精度的压电陶瓷换为一只普通国产压电陶瓷,我们测量了该压电陶瓷在 20 Hz 时的迟滞特性。用一个信号发生器输出频率为 20 Hz、电压 0~3 V 的三角波信号,经一个高电压放大器放大 40 倍后加到压电陶瓷上,位移重构的结果如图 10(a),从而测得该压电陶瓷在频率为 20 Hz 时的迟滞特性,如图 10(b)。

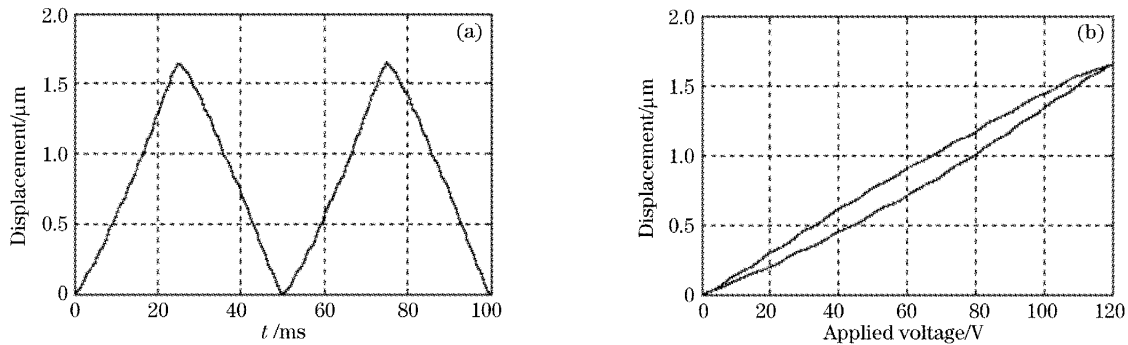


图 10 (a) 压电陶瓷位移重构结果, (b) 迟滞特性测量结果

Fig. 10 (a) Displacement reconstruction result, (b) measurement results of hysteresis of PZT

6 结 论

提出了一种新型的正弦相位调制激光自混合干涉仪,通过对光在外腔中相位的调制和解调提高了自混合干涉仪的抗干扰能力。分析了位移测量过程中各种可能的误差来源,数值模拟的结果与实验结果相吻合,对微小位移的测量精度达纳米级。基于电光晶体对线偏振入射光的要求,采用了线偏振的氦氖激光器作为相干光源,且在测量过程中无需精密的电流源和温控。

参 考 文 献

- 1 Yu Yanguang, Yao Jianquan, Ye Huiying. A self-mixing interference structure with pre-feedback used for measuring displacement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 308~312 (in Chinese)
禹延光,姚建铨,叶会英. 含预反馈的激光自混合干涉型位移测量结构[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 308~312
- 2 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Optical feedback interferometry of semiconductor laser for sensing application[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1122~1126 (in Chinese)
王 鸣,聂守平,李达成. 半导体激光器的光学反馈干涉及传感应用[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12): 1122~1126
- 3 Lu Min, Wang Ming, Hao hui. Measurement of flow velocity using self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 190~194 (in Chinese)
陆 敏,王 鸣,郝 辉. 半导体激光器的自混合散斑干涉测量流体速度[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 190~194
- 4 Yang Xinjian, Zhu Jun, Liu Gang *et al.*. Design and experimental study of laser self-mixing microscopic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 418~422 (in Chinese)
杨新建,朱 钧,刘 刚 等. 激光自混合显微系统的设计及实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 418~422
- 5 M. Wang. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**(6): 409~416
- 6 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Self-mixing interferometry of dual external cavities and its signal analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 729~733 (in Chinese)
王 鸣,聂守平,李达成. 两重外腔的自混合干涉及信号分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 729~733
- 7 T. Suzuki, S. Hirabayashi, O. Sasaki *et al.*. Self-mixing type of phase-locked laser diode interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(3): 543~548
- 8 D. Guo, M. Wang, S. Tan. Self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(5): 1537~1543
- 9 B. Ovrnyn, J. H. Andrews. Phase-shifted laser feedback interferometry[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(14): 1078~1080