

文章编号 1004-924X(2012)08-1740-07

## 全相位谱分析在自混合干涉位移测量中的应用

杨 颖, 李醒飞\*, 寇 科, 王 错

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**提出基于全相位谱分析的自混合干涉信号处理方法,用于减小激光自混合干涉位移测量的误差。首先,基于三镜法布里-珀罗腔模型介绍了自混合干涉系统的数学模型,分析了自混合干涉信号的产生机理和特性。然后,研究了弱反馈条件下自混合干涉位移测量方法,采用全相位谱分析算法进行相位测量,重构外部反射体位移曲线;讨论了信号处理算法原理并进行了算法仿真。最后,进行自混合干涉位移测量实验,并给出压电陶瓷位移测量实验结果。结果表明,全相位谱分析算法可将自混合干涉位移测量误差减小到 4.4 nm;应用全相位谱分析算法分析自混合干涉信号,可在不增加外部光学元件的前提下将位移测量误差减小到纳米量级。

**关键词:**自混合干涉;全相位谱分析;位移测量;压电陶瓷

**中图分类号:**TH744.3;TH822 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1740

## Application of all-phase spectral analysis to self-mixing interferometry for displacement measurement

YANG Ying, LI Xing-fei\*, KOU Ke, WANG Cuo

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

\* Corresponding author, E-mail:lixif@tju.edu.cn

**Abstract:** A signal processing technique based on all-phase spectral analysis was proposed to reduce the displacement measurement error of a self-mixing interferometer. Self-mixing interference principle and signal processing technique were analyzed. First, the mathematical model and signal characteristics for the self-mixing interferometer were presented based on the model of laser oscillation cavity with three mirrors. Then, the displacement principle based on self-mixing interference was introduced. A all-phase spectral analysis was used to extract the phase of self-mixing interference signal to reconstruct the displacement of a reflective target and the signal processing algorithm was investigated with arithmetic simulation. Finally, an experiment system was established and the calibration result of bimorph PZT was presented. Experimental results indicate that the displacement error can be decreased to 4.4 nm by using all-phase spectral analysis. It concludes that the all-phase spectral analysis can reduce the displacement error of the self-mixing interferometer to nanometer level without increasing the number of optical elements.

**收稿日期:**2012-04-13;**修订日期:**2012-05-14.

**基金项目:**高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20110032110052);精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金资助项目(No. 2006A10401006)

**Key words:** self-mixing interference; all-phase spectral analysis; displacement measurement; piezo-electric ceramics

## 1 引言

激光自混合干涉是指在激光应用系统中,激光器的输出光被外部物体反射或散射后,携带外部反射体运动信息的反馈光重新注入激光器谐振腔内与腔内光相混合,调制激光器输出功率和频率<sup>[1]</sup>。King于1963年首次报道了自混合干涉现象,实验中发现外部反射镜每移动 $\lambda/2$ ,激光器输出功率对应变化1个干涉条纹,波动深度与双光束干涉相当<sup>[2-3]</sup>。因此,自混合干涉与传统的双光束干涉具有相同的相位灵敏度,加上其测量系统仅有1个干涉通道、易准直、结构简单,目前已广泛应用于位移、距离、速度、振动及角度等的测量<sup>[4-10]</sup>。

自混合干涉位移测量的方法主要有条纹计数法、外差干涉法和相位测量法等。条纹计数法简单,量程大,但分辨率低(仅 $\lambda/2$ )<sup>[11]</sup>;外差干涉法要求激光器产生2个稳定频率来构成外差方案,结构较复杂<sup>[12]</sup>;相位测量法引入调制技术对反馈光相位进行调制,通过信号处理恢复原始位移信号,位移测量精度较高。Servagent N等在外腔内放置电光晶体,位移测量精度为65 nm<sup>[13]</sup>。王鸣等采用正弦相位调制技术,并利用快速傅里叶变换(FFT)进行相位解调,获得 $\lambda/60$ 的分辨率<sup>[14]</sup>。然而,由于截断引入的频谱泄露降低了FFT相位测量精度,且光学元件的引入增加了系统的复杂度,不利于测量系统的小型化设计。

本文提出基于全相位谱分析算法的自混合干涉位移测量方法,采用锯齿波注入电流对激光器进行线性调制,利用全相位谱分析算法提取自混合干涉信号相位,重构外部反射体位移曲线。与传统的FFT处理方法相比,全相位谱分析算法具有良好的抑制频谱泄露的性能,且具有“初始相位不变性”,相位测量精度较高<sup>[15-16]</sup>。应用该算法分析自混合干涉信号,可在不增加外部光学元件的前提下,将位移测量误差减小到纳米量级。文中研究了自混合干涉位移测量原理及信号处理算法,并进行了算法仿真及位移实验研究。

## 2 自混合干涉模型

当被测物距激光器的距离小于激光相干长度的一半时,自混合干涉系统可看作为复合腔激光器,等效为三镜法布里-珀罗腔模型,如图1所示。

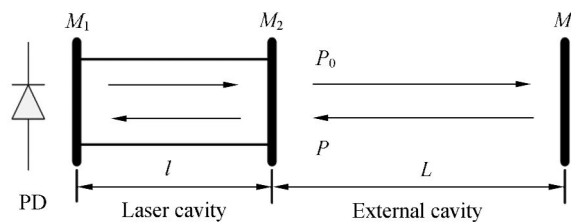


图1 三镜法布里-珀罗腔模型

Fig. 1 Schematic diagram of self-mixing interference

图中 $M_1$ 、 $M_2$ 为激光器两端面, $M_3$ 为外部反射体。自混合干涉数学模型:

$$\nu_F = \nu_0 - \frac{C}{2\pi\tau_L} \sin[2\pi\nu_F\tau_L + \arctan \alpha], \quad (1)$$

$$P = P_0 [1 + m \cos(2\pi\nu_F\tau_L)], \quad (2)$$

式中: $P$ 、 $P_0$ 、 $\nu_F$ 、 $\nu_0$ 分别为有光反馈和无光反馈时激光器的输出光功率及频率, $\tau_L$ 为光在外腔往返一次的时间; $\tau_L = 2L/c$ , $c$ 为光速, $L$ 为激光器外腔长度, $\alpha$ 为激光器线宽展宽因子, $m$ 为激光器调制系数( $m=10^{-3}$ ), $C$ 为光反馈水平因子。

$$C = \frac{\tau_L}{\tau_I} \zeta \sqrt{1 + \alpha^2}, \quad (3)$$

其中: $\tau_I$ 为光在内腔的往返时间, $\tau_I = 2l/c$ , $l$ 为激光器内腔长度, $\zeta$ 为外腔耦合系数。光反馈水平因子 $C$ 是影响激光器动态特性和输出功率的重要参数。 $C < 1$ 时,自混合干涉系统处于弱反馈水平,激光器单模稳定运行,对应于初始光频率 $\nu_0$ ,反馈光频率 $\nu_F$ 有唯一解,光功率 $P$ 是时间的单值函数,此时利用相位检测方法处理信号较好; $C = 1$ 时,谱线剧烈展宽,引入很强的强度噪声,可作为反馈水平测量的校准点; $1 < C < 4.6$ 时,系统为适度反馈,激光器工作于多模方式, $\nu_0$ 、 $\nu_F$ 不再一一对应,信号出现滞后现象,如图2所示; $C > 4.6$ 时,系统处于强反馈状态,激光器处于不稳定状态,干涉测量不能进行。本文工作中,激光器工作

在弱反馈条件下。

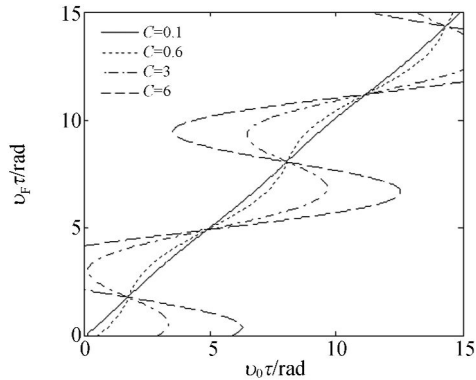


图 2 C 值不同时的频率解

Fig. 2 Frequency solution versus different values of C

由自混合干涉模型可以看出激光器输出功率是外腔长度的非线性函数,周期为  $\lambda/2$ 。图 3 为不同光反馈水平下输出功率随外腔长度  $L$  变化的曲线。可以看出,  $C$  值较小时,自混合干涉信号接近正弦变化,波动深度较小;随着  $C$  值增大,波动深度变大,功率的变化曲线由类余弦信号向类锯齿波渐变,主要是由于反馈强度增大时,相位的非线性变化增强,从而使信号曲线的倾斜程度增大。因此,  $C$  值越小,所得到的自混合干涉信号质量越好,更利于相位检测方法处理信号。

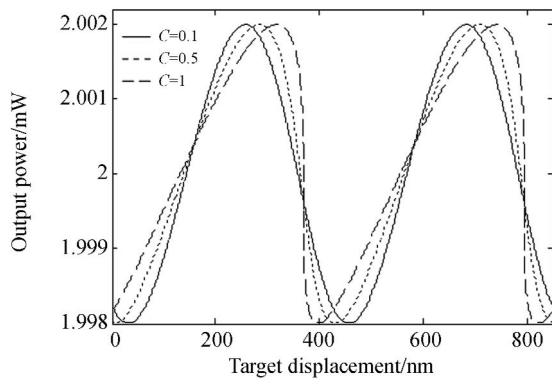


图 3 输出功率随外腔长度的变化

Fig. 3 Output power versus length of external cavity

### 3 位移测量原理

反馈光存在时,激光器输出功率不仅随注入电流变化,而且随外腔长度变化,最终表现为自混合干涉信号相位的变化。

$$\phi_f = 4\pi \frac{\nu_f L}{c} \quad (4)$$

当激光器线性调制时,激光器输出光频率满足:

$$\nu(t) = \nu_0 + \gamma \text{tr}(t), \quad (5)$$

式中:  $\text{tr}(t)$  为激光器调制电流,  $\gamma$  为频率调制系数。此时自混合信号:

$$P = P_0 \left\{ 1 + m \cos \left[ 2\pi \left( \nu_0 + \gamma \text{tr}(t) \right) \frac{2L_0}{c} \right] \right\} = P_0 [1 + m \cos(\phi_0 + 2\pi f_m t)], \quad (6)$$

式中:  $L_0$  为外腔初始长度,  $\phi_0$  为初始相位,  $f_m$  为信号基频。

$$f_m = \frac{2\beta L_0}{c}, \phi_0 = 4\pi \frac{\nu_0}{c} L_0, \beta = \gamma \frac{\text{tr}(t)}{t}. \quad (7)$$

为保证信号基频稳定,  $\beta$  应为恒定值,则激光器调制电流应为时间的线性函数,此处采用锯齿波对激光器进行线性调制。

当外腔长度由  $L_0$  偏移到  $L(t) = L_0 + d$  时,

$$P = P_0 \left\{ 1 + m \cos \left[ 2\pi \left( \nu_0 + \gamma \text{tr}(t) \right) \frac{2(L_0 + d)}{c} \right] \right\} = P_0 [1 + m \cos(\phi_0 + 2\pi f_m t + \phi)]. \quad (8)$$

由于  $L_0 \gg d$ ,  $4\pi d \frac{\beta t}{c}$  项可忽略。则由外腔运动引起的相位变化  $\phi$  满足:

$$\phi = 4\pi \frac{\nu_0 d}{c}, \quad (9)$$

则位移  $d$  为:

$$d = \frac{c\phi}{4\pi\nu_0}. \quad (10)$$

由式(10)可以看出自混合干涉信号相位的测量精度直接决定了位移测量精度,实现相位的准确测量是自混合干涉位移测量研究的关键问题之一。一般的相位测量方法中采用 FFT 变换进行相位提取,该方法的前提条件是输入的数字序列必须是周期内的等间隔采样点的值,否则截断后周期延拓的信号将存在跳变,频谱上表现为频谱泄露,降低相位测量精度。然而,实际系统中等间隔采样不可能实现,则由频谱泄露而引入的相位测量误差不可避免。全相位谱分析(apFFT)具有良好的抑制谱线泄露的性能,相位测量精度较高,且具有“初始相位不变性”,可直接提取主谱线对应的相位值作为中心采样点的瞬时相位值,无噪声时全相位谱分析法的相位测量精度可达到  $(10^{-9})^\circ$ <sup>[16]</sup>。此处,即采用全相位谱分析法测量自混合干涉信号相位。

全相位谱分析流程如图 4 所示。首先用长为

2N-1 的卷积窗  $\omega_c$  对中心样点  $x(0)$  前后 2N-1 个数据进行加权叠加,然后对叠加后的数据进行 FFT 变换,即可得到全相位谱分析结果。

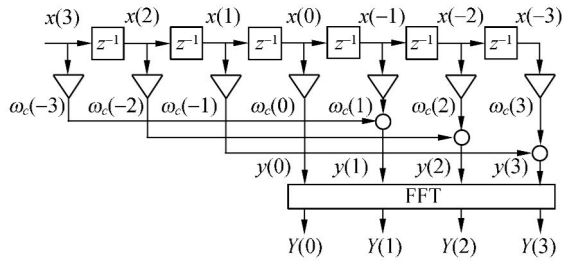


图 4 apFFT 谱分析流程图 (N=4)

Fig. 4 Data flow of apFFT spectral analysis (N=4)

卷积窗  $\omega_c$  由长度为 N 的前窗  $f$  和翻转的后窗  $b$  卷积而成。

$$\omega_c(n) = f(n) * b(-n) = \sum_k f(k) * b(k+n) - N+1 \leq n \leq N-1. \quad (11)$$

## 4 自混合干涉信号处理算法

### 4.1 信号处理算法原理

自混合干涉信号相位测量流程如图 5 所示。

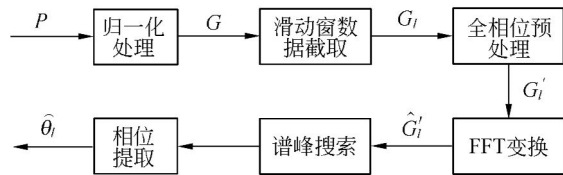


图 5 apFFT 相位测量流程

Fig. 5 Flow of measuring phase based on apFFT

首先,对自混合干涉信号  $P$  进行归一化处理,得到归一化信号  $G$ :

$$G = \left( \frac{P}{P_0} - 1 \right) / m. \quad (12)$$

然后,利用滑动矩形窗在每个锯齿波周期截取一段数据  $G_l (l=1, 2, 3, \dots)$ ;之后,对序列段  $G_l$  分进行全相位预处理;最后进行 FFT 变换,并进行峰值搜索,提取峰值谱线对应的相位,即中间采样点对应的瞬间相位值  $\hat{\theta}_l$ :

$$\hat{\theta}_l = \arctan \frac{\text{Im} \hat{G}_l'(f)}{\text{Re} \hat{G}_l'(f)}. \quad (13)$$

位移引起的相位变化为:

$$\phi_l = \hat{\theta}_l - \phi_0. \quad (14)$$

由式(10)可求出该点的位移值  $d_l$ ,连接各位移点即可重构出外部反射体的位移曲线。

### 4.2 信号处理算法仿真

依据算法原理,建立自混合干涉位移测量系统仿真模型,分别采用 FFT 法和全相位谱分析法对自混合信号进行相位测量,仿真结果如图 6 所示。仿真条件如下:光中心波长  $\lambda=850 \text{ nm}$ ,初始外腔长度  $L_0=2 \text{ cm}$ ,光反馈水平因子  $C=0.6$ ,调制锯齿波频率  $f_m=100 \text{ Hz}$ ,幅值  $I_m=0.4 \text{ mA}$ ,外部反射体以正弦曲线运动,频率为  $1 \text{ Hz}$ ,峰峰值为  $1 \mu\text{m}$ ,如图 6(a)。图 6(b)为自混合干涉信号相位测量结果,相位被控制在  $\pm\pi$  之间,需对相位进行解卷积处理,恢复原则为:相邻两点的相位差大于  $\pi$  或小于  $-\pi$ ,则加或减  $2\pi$  直到两者相位差在  $\pm\pi$  范围内。图 6(c)、6(e)、(d)、6(f)分别为全相位谱分析算法、FFT 算法重构出的位移曲线及相应的误差曲线。

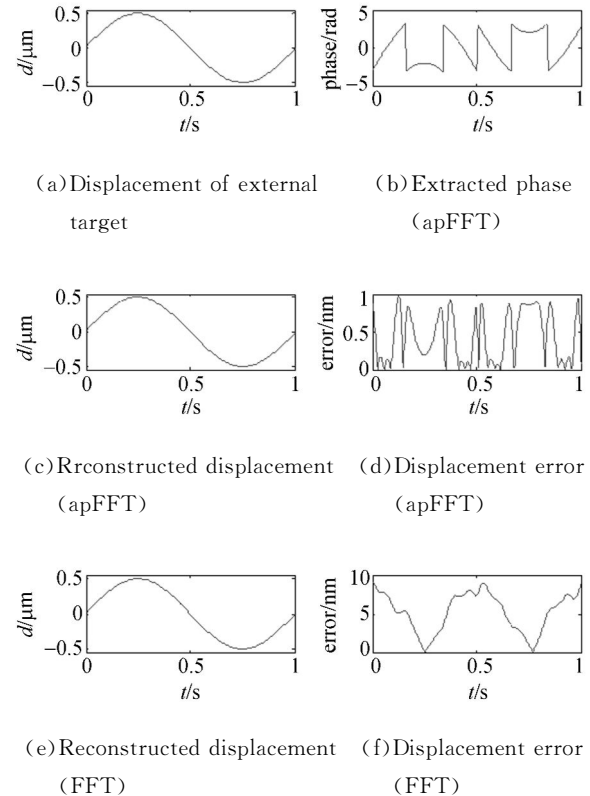


图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulated displacements of external target

仿真结果显示,全相位谱分析法可以由自混合干涉信号中重构出原始位移曲线,位移测量精度较高。文中提出的基于全相位谱分析算法的自

混合干涉位移测量方法可行。

## 5 位移测量实验系统

实验系统如图 7 所示,为消除振动、电磁干扰等的影响,实验系统放于电磁屏蔽室内的精密气浮光学平台上进行相关实验。

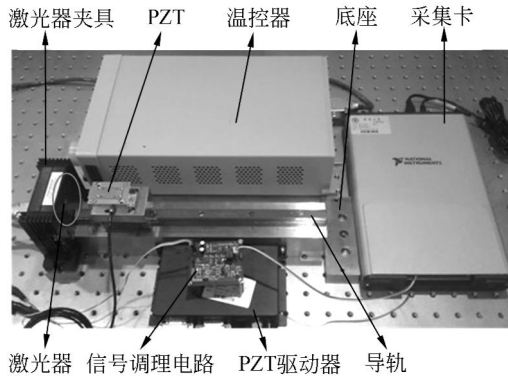


图 7 实验系统图

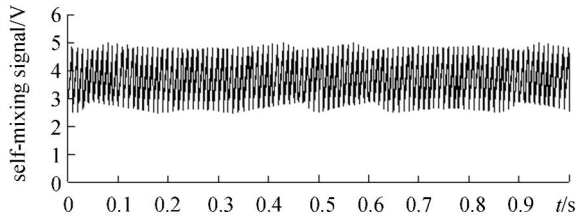
Fig. 7 Schematic of experimental setup

实验中光源为垂直腔面发射激光器,且出射端集成准直透镜,可发射圆对称且无像散的高品质光束,波长为 850 nm,波长调制系数为 0.25 nm/mA,温度漂移为 0.06 nm/°C。激光器驱动电源由 5 mA 直流分量和调制电流分量组成,调制电流为幅度 0.4 mA、频率 100 Hz 的锯齿波,驱动电源稳定在  $\pm 0.000 2$  mA 内,对于波长的影响可以忽略不计。温度变化对于激光器输出特性的具有极大的影响,实验中为减小温度变化所带来的激光器输出特性的变化,采用 LDT 系列温控器对夹具进行恒温控制,温度稳定性为  $\pm 0.004$  °C,则温度对于波长的影响可以忽略不计。实验中光反射面为 PZT 表面,为使系统工作在弱反馈状态下,对其表面进行处理,反射率为 0.4;PZT 由驱动器进行闭环控制,位移分辨率为 0.05 nm、闭环线性度为 0.03% (1  $\mu$ m 范围内位移误差为 0.3 nm),量程 15  $\mu$ m;PZT 安装在精密直线导轨的上,通过调整滑块位置可改变初始外腔长度,精密导轨安装在精密底座上;PZT 反射面与光轴的垂直度直接影响测量结果的准确性。决定 PZT 反射面与光轴垂直度的主要因素有:导轨行走平行度、导轨安装误差及底座的加工误差;其中,导轨滑块相对于直线导轨在 100 mm 内的行走平行度为 12  $\mu$ m,由此引入的位移测量误差约为 1.8

$\times 10^{-4}$  nm;底座线性尺寸公差等级为 f 级 ( $\pm 0.1$  mm),导轨安装孔位置基准的直线度为 0.05 mm,则导轨安装误差所引起的位移测量误差约为  $1.3 \times 10^{-2}$  nm,底座各面的平面度为 0.05 mm,则由底座加工误差引入的测量误差约为  $3.1 \times 10^{-3}$  nm。以上分析结果可以看出,当前实验系统中 PZT 反射面与光轴的垂直度可以满足实验系统要求,对于位移测量结果的影响基本可以忽略。干涉信号由封装在激光器内部的光电检测器接收,经过信号调理电路转化为可测的电压信号,信号调理电路包括电流/电压转换、放大电路、滤波电路;光电检测器是光电转换电路中的主要器件,其灵敏度和动态响应速度是整个检测电路工作速度和精度的先决条件,实验中所选用的激光器内部光电检测器电流灵敏度为 0.5 A/W,暗电流为 100 nA,光电流上升时间为 10  $\mu$ s;光电检测器自身噪声相对于后续运算放大器的噪声要小得多,因此,光电检测器的探测能力主要受光电转换电路噪声限制。为此,设计了低噪声电流/电压转换电路来提高信噪比;另外,由式(12)可以看出,位移  $d$  引起的相位变化是由光功率的比值计算得出,因此,光电检测及后续信号调理电路中各元件的特性中仅输出漂移特性对位移测量结果有一定的影响,故所选择的运放漂移仅 0.01  $\mu$ V/°C,可满足使用要求。处理后的干涉信号经过数据采集卡耦合至 PC 机,系统采样频率为 50 kHz。最后,进行数字信号处理,提取自混合干涉信号相位,重构 PZT 的位移曲线,同时读取 PZT 内部位移监测模块输出的 PZT 实际位移曲线,对位移测量系统进行评估。实验结果如图 8 所示,其中 PZT 为正弦运动,频率为 1 Hz,振幅为 0.5  $\mu$ m。图 8(a)为采集到的自混合干涉信号;图 8(b)自混合干涉信号经过 apFFT 变换后所提取出的相位值,与仿真结果相符;图 8(c)、8(d)分别为位移测量结果及误差分布曲线。

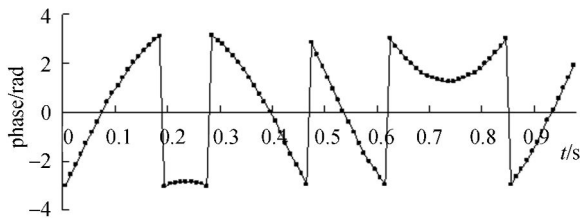
由图 8(d)可以看出,采用全相位谱分析算法进行信号处理的自混合干涉位移测量系统的误差较小,基本分布在 10 nm 以内,其中采用全相位谱分析算法进行自混合干涉信号处理的位移测量误差曲线均方根为 4.4 nm。由于实验室中噪声及系统中非线性因素的影响,该方法的量程较小,仅 6  $\mu$ m,通过调整系统反馈水平可扩大其测量范围。全相位谱分析算法的应用可在不增加外部光

学元件的前提下将自混合干涉位移测量误差减小到纳米量级。



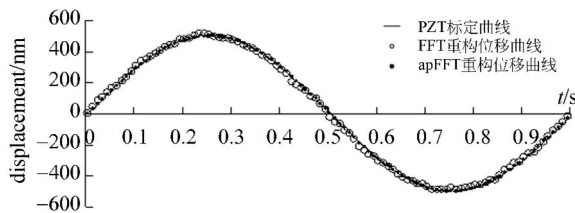
(a) 自混合干涉信号

(a) Signal of self-mixing interferometer



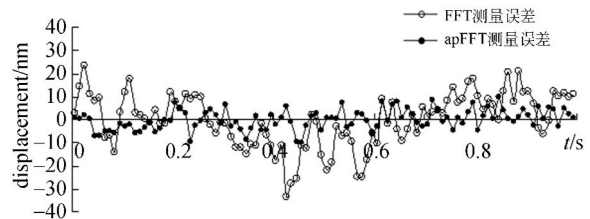
(b) 相位提取结果

(b) Extracted phase



(c) 重构 PZT 位移曲线

(c) Reconstructed displacement of PZT



(d) 位移误差曲线

(d) Displacement measurement error

图 8 实验测量结果

Fig. 8 Experimental results

## 6 结 论

在对自混合干涉位移测量原理研究的基础上,提出了一种基于全相位谱分析法的自混合干涉信号处理方法,采用锯齿波波动的驱动电流对激光器进行线性调制,利用全相位谱分析算法测量自混合干涉信号的相位。首先,基于三镜法布里-珀罗腔模型介绍了自混合干涉系统模型及特性;然后,研究了弱反馈条件下自混合干涉位移测量方法及信号处理算法,并进行了算法仿真,验证了方案的可行性;最后,进行了位移测量实验研究,并给出了 PZT 位移实验结果。结果表明,自混合干涉位移测量系统的位移测量误差减小到了 4.4 nm。应用全相位谱分析算法进行自混合干涉信号处理,可将位移测量误差减小到纳米量级,且系统结构简单,光路易准直,无需附加光学元件,能够发展成为小型化的微位移传感器。

## 参考文献:

- [1] 王鸣,聂守平,李明,等. 自混合干涉微位移传感器[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):428-431.  
WANG M, NIE SH P, LI M, *et al.*. Self-mixing Interferometry for Micro Displacement Measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 428-431. (in Chinese)
- [2] KING P, STEWARD G J. Metrology with an optical maser[J]. *New Sci*, 1963, 17: 180.
- [3] 毛威,张书练,张连清,等. 激光回馈效应及其传感应用研究的进展[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 16-22.  
MAO W, ZHANG SH L, ZHANG L Q, *et al.*. Optical feedback effect and the optical feedback interferometry for sensing application [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 16-22. (in Chinese)
- [4] GIULIANI G, NORGIA N, DONATI S, *et al.*. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(6): 283-294.
- [5] ZHANG L, ZHANG S L, ZHOU L F, *et al.*. Nanometer-resolution displacement measurement system based on weak feedback effect of dual-frequency laser [J]. *Frontier Research in Nanoscale Science and Technology*, 2009, 2(1): 19-26.
- [6] GOUAUX F, SERVAGENT N, BOSCH T. Laser self-mixing interferometry for mechatronics applications[J]. *Applied Optics*, 37(28): 6684-6689.
- [7] OTTONELLI S, DABBICCO M, LUCIA F, *et al.*. Laser-self-mixing interferometry for mecha-

- tronics applications[J]. *Sensors*, 2009, 9(5):3527-3548.
- [8] YU Y G, XI J T, CHICHARO. Measuring the feedback parameter of a semiconductor laser with external optical feedback [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10):9582-9593.
- [9] WANG M, LAI G M. Self-mixing microscopic interferometer for the measurement of microprofile [J]. *Optics Communicationns*, 2004, 238 (4-6): 237-244.
- [10] WANG H, SHEN J, YU B, *et al.*. Laser diode feedback interferometry in flowing Brownian motion system; a novel theory[J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2010, 101(1-2):173-183.
- [11] DONATI S, GIULIANI G, MERLO S. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31 (1): 113-119.
- [12] TAKAHASHI N, KAKUMA S, OHBA R. Active heterodyne interferometric displacement measurement using optical feedback effects of laser diode[J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1996, 35(3):802-806.
- [13] SERVAGENT N, BOSCH T, LESCURE M. Design of a phase-shifting optical feedback interferometer using an electro-optic modulator[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(5):798-802.
- [14] WANG M. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis[J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(6):409-416.
- [15] 王兆华, 黄翔东. 基于全相位谱分析的相位测量原理及其应用[J]. *数据采集与处理*, 2009, 24(6): 777-781.
- WANG ZH H, HUANG X D. Principle of phase measurement and its application based on all-phase spectral analysis[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2009, 24(6):777-781. (in Chinese)
- [16] 黄翔东, 王兆华. 全相位时移相位差频谱校正法[J]. *天津大学学报*, 2008, 41(7):815-820.
- HUANG X D, WANG ZH H. All-phase time-shift phase difference correcting spectrum method [J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41 (7):815-820. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨颖(1983—),女,河北保定人,博士研究生,2007年、2009年于天津大学分别获得学士、硕士学位,主要从事激光测量技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: yangying@tju.edu.cn



寇科(1989—),男,陕西榆林人,硕士研究生,2010年于天津大学获得学士学位,主要从事激光测量技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: kouke881101@163.com



王错(1987—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,2010年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: wangcuock@163.com

#### 导师简介:



李醒飞(1966—),男,湖北天门人,教授,博士生导师,2000年于天津大学获得博士学位,2003赴美国密歇根大学学习和工作,主要从事多传感器融合技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: lixf@tju.edu.cn