

相位调制型激光自混合干涉仪的动态特性分析及测试

夏 巍 郝 辉 王 峰 王 鸣 郭冬梅 郭文华

(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, 江苏 南京 210046)

摘要 为了提高激光自混合干涉仪在位移测量中的精度, 将相位调制技术引入激光自混合干涉系统中, 通过在激光器的外腔中放置的电光调制器对光束进行正弦相位调制, 采用傅里叶变换在频域中重构自混合干涉信号的相位。采用截止阶数的方法对系统的动态测量范围上限进行了理论分析, 获得了正确解调相位所需的电光晶体的最低调制频率与被测振动的频率和振幅的关系。将系统应用于高精度商用压电陶瓷的振动过程的测量, 测量数据与 Agilent 5529A 动态校准仪的同步测量结果进行比对, 结果表明, 相位调制型激光自混合干涉仪适合于动态信号的实时测量, 位移测量精度可达 20 nm。

关键词 测量; 自混合干涉; 动态范围; 正弦相位调制

中图分类号 TN249; TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1208003

Analysis and Test for the Dynamic Performance of Laser Self-Mixing Interferometer Based on Phase Modulation

Xia Wei Hao Hui Wang Feng Wang Ming Guo Dongmei Guo Wenhua

(Key Laboratory of Opto-Electronic Technology of Jiangsu Province, College of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract In order to ameliorate the performance in vibration measurement, sinusoidal phase modulating technique is introduced into a conventional laser self-mixing interferometer. An electro-optic modulator is placed in the external cavity of the light source to yield sinusoidal phase modulation. The self-mixing interference signal is processed in frequency-domain to retrieve a vibration waveform. The dynamic range of the system is analyzed by proposing the stop-order theory and a relationship between the lowest modulating frequency of the electro-optic modulator, and the parameters of a vibration are obtained to guarantee the validity of a measurement result. Experimental vibration measurement results of a commercial piezoelectric transducer are compared with simultaneous measurement results from Agilent 5529A dynamic calibrator, and an accuracy of 20 nm is achieved. It is shown that the phase-modulated laser self-mixing interferometer is suitable for real-time continuous vibration measurement.

Key words measurement; self-mixing interference; dynamic range; sinusoidal phase modulation

OCIS codes 120.3180; 120.3930; 120.5050; 120.7280

1 引 言

近年来, 随着微机械、微纳机电系统的飞速发展及大量应用, 有关物体的微位移和微小振动的精确测量研究引起人们广泛的重视^[1~3]。激光自混合干

涉(SMI)技术是一种新型的相干计量技术^[4~7], 它是指激光器的输出光被外部物体反射或者散射后, 其中一部分光反馈回激光器的谐振腔, 反馈光携带了被测物体的信息, 与腔内的光相混合后, 调制激光

收稿日期: 2011-07-12; **收到修改稿日期**: 2011-09-15

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上资助项目(11KJB510006)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX10B_400Z)资助课题。

作者简介: 夏 巍(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事激光自混合干涉微纳米测量技术方面的研究。

E-mail: marksman_xz@163.com

导师简介: 王 鸣(1950—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光精密测量方面的研究。E-mail: wangming@njnu.edu.cn (通信联系人)

器的输出功率和输出频率。由于激光自混合干涉仪与传统的干涉仪具有相同的相位灵敏度,而且结构简单、紧凑、易准直,适合于小器件的微小位移和振动的测量^[8,9]。

由于自混合干涉信号是外腔相位的周期函数,外腔长半波长的改变,会引起自混合信号波动一个周期,因此自混合信号的分析方法常采用条纹峰值计数法,可以获得 $\lambda/2$ 的位移测量精度。为了提高测量精度,有研究者采用复合腔模型分析自混合干涉系统,对自混合信号的相位进行严格求解,可以将位移测量精度提高至 10 nm ^[10],但每次进行实验之前,需要对自混合干涉系统的特征参数如 C 、 α 进行估计,降低了系统的实用性,制约了其在工业领域的应用。此外,一些调制解调方法被引入自混合信号的分析中,有研究人员将相移技术与条纹峰值计数法相结合,获得了 $\lambda/12$ 的位移测量精度^[11],但是这种解调方法需要配合复杂的采样和数据处理技术,限制了测量精度的进一步提高。

本课题组提出了一种正弦相位调制自混合干涉仪^[12],由置于外腔中的电光晶体实现干涉信号的正弦相位调制,采用傅里叶变换的方法在频域中解调外腔相位,并且通过位移测量结果与压电陶瓷(PZT)运动参数的一致性验证了测量方法的可行性。但是在位移测量过程中,PZT 的实际运动波形和软件设定的运动参数之间总会存在一定的误差,因此,采用 PZT 的运动参数作为位移测量结果的评判标准具有一定的局限性:一方面,只有 PZT 处于稳定的振动时,软件设定的振幅和频率才具有参考价值;另一方面,不能实时给出 PZT 的位移,无法对干涉仪的瞬时测量结果提供一个可靠的测量标准。为了获得 PZT 的真实运动波形,更全面地评价相位调制型自混合干涉仪的动态特性,本文设计了基于 Agilent 5529A 动态校准仪的相位调制型激光自混合干涉仪的校准装置,实现了对待测物体微小位移的同步测量。

系统的动态范围是最大可测信号与最小可测信号之间的范围,是干涉仪实用化的主要性能指标,因此提高系统的动态范围也是一项重要课题,文献^[12]已经对位移测量过程中各种可能的误差来源对测量精度的影响进行了理论分析,得到了系统的最小可测信号。本文根据 Bessel 函数的性质,频谱的主要成分集中在有限范围内^[13],对系统的最大可测信号进行了理论分析,给出了决定系统动态范围的关键因素,为扩大系统的动态范围提供了理论基础。

2 测量原理

假设自混合干涉系统工作于弱反馈条件下,忽略光在外腔中的多重反馈效应,经过正弦相位调制后的激光器输出的自混合干涉信号可以表示为^[14]

$$I(t) = I_0 \{1 + m \cos[\Phi(t) + A \sin(\omega_0 t + \beta)]\}, \quad (1)$$

式中 I_0 为无光反馈时激光器的输出光强, m 为光强调制系数, $\Phi(t)$ 为光束在外腔中的相位延迟, A 为相位调制幅度, ω_0 为调制频率, β 为调制信号的初相。

将(1)式按 Bessel 函数展开,得到

$$I(t) = I_0 + mI_0 \cos \Phi(t) J_0(A) + 2mI_0 \cos \Phi(t) \times \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(A) \cos(2n)(\omega_0 t + \beta) - 2mI_0 \sin \Phi(t) \times \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(A) \cos[(2n+1)(\omega_0 t + \beta)], \quad (2)$$

式中 $J_n(A)$ 为自变量为 A 的第 n 阶 Bessel 函数。从(2)式可以看出,正弦调制的自混合干涉信号可以展开成调制频率 ω_0 的 n 次谐波的形式,且一次谐波和二次谐波的振幅分别为

$$A_1(t) = 2mI_0 \sin \Phi(t) J_1(A), \quad (3)$$

$$A_2(t) = 2mI_0 \cos \Phi(t) J_2(A). \quad (4)$$

因此,外腔相位 $\Phi(t)$ 可由(3)式和(4)式中解调得到

$$\Phi(t) = \tan^{-1} \{ [A_1(t) J_2(A)] / [A_2(t) J_1(A)] \}. \quad (5)$$

运用傅里叶分析的方法来确定 $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 的值,然后用(5)式计算 $\Phi(t)$ 的值,具体步骤为:1)对数据采集卡得到的自混合干涉信号进行傅里叶变换;2)用两个矩形窗 $\omega_0/2 < \omega < 3\omega_0/2$ 和 $3\omega_0/2 < \omega < 5\omega_0/2$ 从得到的频谱中分别滤出一次谐波 $I(\omega_0)$ 和二次谐波 $I(2\omega_0)$;3)对滤出的一次谐波和二次谐波分别进行傅里叶逆变换,用 $I_{\omega_0}(t)$ 、 $I_{2\omega_0}(t)$ 表示;4)由下列关系得到 $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$:

$$A_1(t) = \text{Im} \{ I_{\omega_0}(t) / \exp[j(\omega_0 t + \beta)] \}, \quad (6)$$

$$A_2(t) = \text{Re} \{ I_{2\omega_0}(t) / \exp[j(2\omega_0 t + 2\beta)] \}. \quad (7)$$

将获得的 $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 代入(5)式就可以获得包裹于 $-\pi$ 至 π 之间的外腔相位,通过解包裹处理,再依据相位 $\Phi(t)$ 与外腔腔长 $s(t)$ 的关系 $\Phi(t) = 4\pi s(t) / \lambda_0$,其中 λ_0 为无光反馈时激光器的输出波长,就可以获得激光器的外腔腔长 $s(t)$ 的变化。

3 动态振动测量范围的理论分析

为了从相位解调方法中不失真地获得待测相位 $\Phi(t)$ 的正弦和余弦值,对电光晶体的调制频率有一定的要求。为简化起见,考虑物体做简谐振动 $s(t) = d_0 \sin(\omega_s t) + s_0$,其中, d_0 为物体做简谐振动的振幅, ω_s 为振动频率, s_0 为初始腔长,待测物体的相位可以表示为 $\Phi(t) = a \sin(\omega_s t) + \Phi_0$,其中 $a = 4\pi d_0 / \lambda_0$, $\Phi_0 = 4\pi s_0 / \lambda_0$,将 $\cos \Phi(t)$ 用 Bessel 函数展开,得到

$$\begin{aligned} \cos \Phi(t) = & \cos[a \sin(\omega_s t) + \Phi_0] = \cos \Phi_0 J_0(a) + \\ & \cos \Phi_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n}(a) \cos(2n\omega_s t) - \\ & \sin \Phi_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_{2n+1}(a) \cos[(2n+1)\omega_s t]. \end{aligned} \quad (8)$$

利用 Bessel 函数的性质: n 为奇数时, $J_{-n}(a) = -J_n(a)$; n 为偶数时, $J_{-n}(a) = J_n(a)$,可以得到

$$\cos \Phi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(a) \cos(n\omega_s t + \Phi_0), \quad (9)$$

同理可得

$$\sin \Phi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(a) \sin(n\omega_s t + \Phi_0). \quad (10)$$

结合(9)、(10)和(2)式可以得到自混合干涉信号的频谱如图 1 所示。

由图 1 可以看出,自混合干涉信号中调制频率的谐波成分均由无穷多个待测正弦信号的高次振动频率分量所组成,且第 n 次边频的分量幅值为 $J_n(a)$ 。图 2 给出了第一类 Bessel 函数随自变量 a 和阶数 n 的变化关系曲线,对于某一阶 Bessel 函数,函数值随着自变量 a 的增大呈现振荡衰减的特性;而对于某一自变量 a ,Bessel 函数随着阶数的增加趋于 0,并且在达到某一阶后迅速衰减。若定义 $J_n(a) \geq 0.001$ 的最大阶数为截止阶数,忽略更高的边频对测量结果的影响,发现截止阶数 n 与 a 呈现近似线性的关系,如图 2 中箭头所指的直线所示。

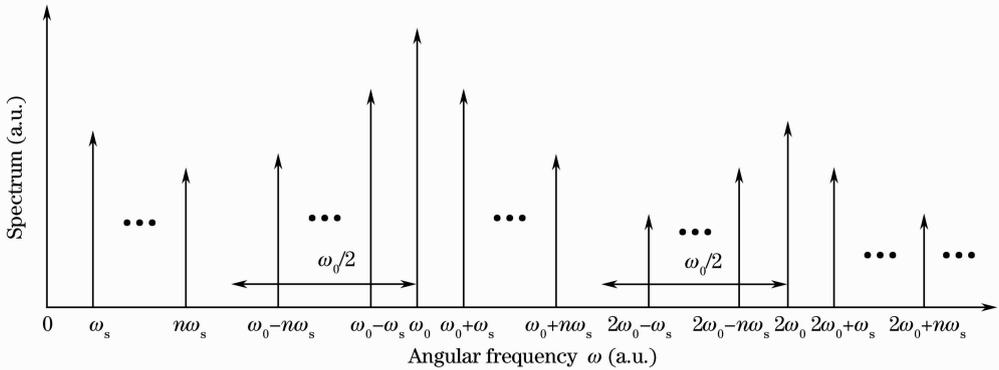


图 1 相位调制的自混合干涉信号频谱

Fig. 1 Spectrum of phase-modulated self-mixing interference signal

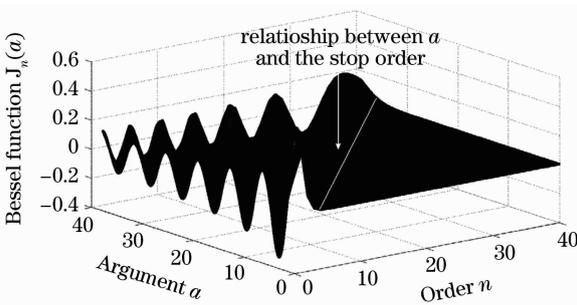


图 2 第一类 Bessel 函数 $J_n(a)$ 随自变量 a 和阶数 n 的变化

Fig. 2 Bessel function $J_n(a)$ of the first kind changing with argument a and order n

a 与截止阶数 n 的关系如图 3 所示,对数据进行拟合,可以得到 a 与 n 的关系为

$$n = 3.7 + 1.18a. \quad (11)$$

根据(11)式拟合 a 与 n 的关系,可以得到自混

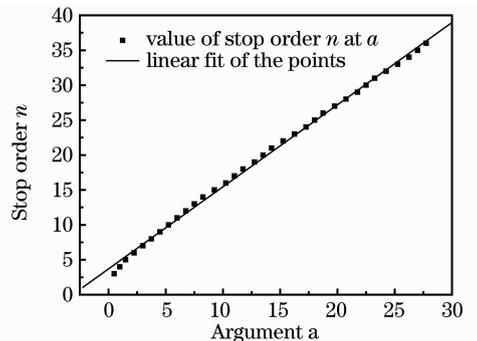


图 3 a 和截止阶数 n 的关系曲线

Fig. 3 Relationship between a and the stop order n

合干涉信号中由待测物体做简谐振动引入的调制频率的一次和二次谐波的频谱展宽为 $W_B = (3.7 + 1.18 \times 4\pi d_0 / \lambda) \omega_s$,为了避免自混合干涉信号中调制频率 ω_0 的各阶谐波在频域中发生频谱重叠,应有 $W_B \leq \omega_0 / 2$ 。因此,通过截止阶数的方法获得正确解

调相位所需的最小调制频率为

$$\omega_0 = 2(3.7 + 1.18 \times 4\pi d_0 / \lambda)\omega_s, \quad (12)$$

(12)式为实验中调制频率的选取提供了合理的选择依据。此外,在调制频率一定的条件下,系统的最大可测信号的幅度可以表示为

$$d_0 = [\lambda / (4\pi)] [\omega_0 / (2\omega_s) - 3.7] / 1.18. \quad (13)$$

图 4 给出了根据(13)式计算出的系统最大解调的简谐振动幅度与信号频率和调制频率比值的关系。由图可以看出,在调制频率一定的情况下,物体振动频率越低,一个调制频率的间隔中可以有更高的振动频率的阶次,所以低频信号的动态范围上限较大,系统的动态范围上限随振动频率的增加而减小。调制频率越大,解调方法中采用的矩形滤波器的带宽就越宽,系统解调振动的振幅也相应地越大。因此,在保证测量系统的电路部分的测量带宽以及数据采集卡的采样频率满足测量需求的前提下,可以采用增大调制频率的方法提高系统动态测量范围的上限。实验中受到数据采集卡采样频率的限制,在被测振动频率为 100 Hz 的情况下,最大可测的振幅可以达到 85 μm 。

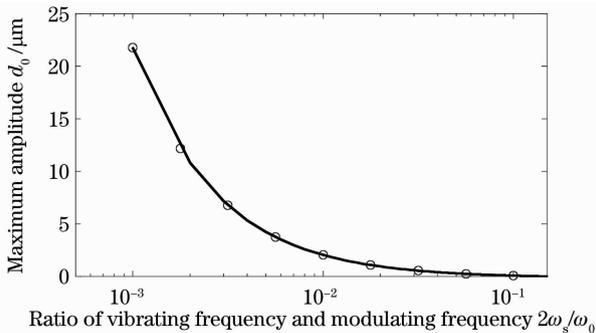


图 4 系统最大可解调信号幅度随信号频率与调制频率比值的变化关系

Fig. 4 Relationship between the maximum measurable amplitude and the ratio of vibrating frequency and modulating frequency

4 实验装置及结果

实验采用 PI 公司生产的高精度二维 PZT (P762. 2L) 驱动的角锥棱镜作为振动源,用 LabVIEW 软件设计了虚拟仪器,在采集信号的同时,重构目标物体的振动波形,结合 Agilent 5529A 动态校准仪来综合评价正弦相位调制型自混合干涉仪的性能。实验装置如图 5 所示,主要包括线偏振 He-Ne 激光器(632. 8 nm)、可调节衰减器、电光晶体 EOM(New Focus 4002)、待测物体(PZT 驱动的角锥棱镜 2)以及 Agilent 5529A 动态校准仪。开始

实验前调节 He-Ne 激光器出射光束的偏振方向与电光晶体的主轴方向一致,保证电光调制器对外腔中的光束进行纯相位调制,调节衰减器使系统工作于弱反馈状态。通过软件设置 PZT 的运动进而驱动角锥棱镜 2 沿自混合干涉系统的光轴方向产生位移。一方面,He-Ne 激光器的出射光束被角锥棱镜 2 反射并耦合入激光器的谐振腔,产生自混合干涉信号,被外部光电探测器(PD)接收,经滤波和放大后由数据采集卡(NI 6251)采集并送入计算机,由专用的数据分析软件(LabVIEW)进行位移测量;另一方面,Agilent 5529A 动态校准仪激光头输出双频正交线偏振光入射到偏振分光棱镜(PBS)上,垂直于纸面的线偏振光和平行于纸面的线偏振光分别经角锥棱镜 1 和 2 反射回 Agilent 5529A 动态校准仪的光电探测器上,从而对角锥棱镜 2 的位移进行实时监测。

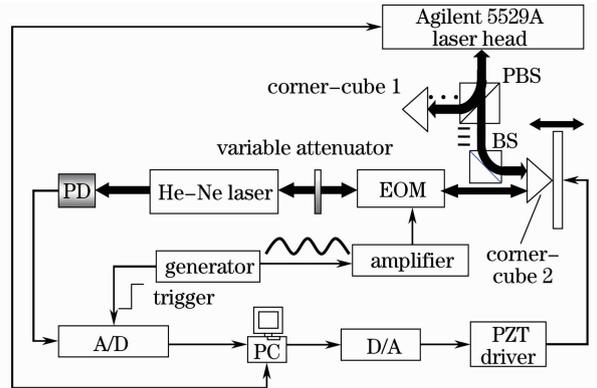


图 5 带有 Agilent 5529A 校准装置的相位调制型激光自混合干涉仪实验装置

Fig. 5 Experimental setup of phase-modulated laser self-mixing interferometer with Agilent5529A calibrator

采用 PI 公司提供的专用软件,利用压电陶瓷驱动模块自带的信号发生器控制 PZT 做不同的运动,在进行的 3 组实验中,相位调制幅度采用 $A = 2.45 \text{ rad}$,以减少激光束偏振态损失带来的测量误差^[14]。

首先,控制 PZT 做频率为 10 Hz,振动峰峰值 A_{pp} 从 200 nm 递增至 1800 nm 的稳定正弦运动,根据(12)式选择相应的调制频率,相位调制的自混合干涉仪在时域中重构的振动波形如图 6 所示,干涉仪测得的振动峰峰值与 PZT 设定的振动峰峰值的最大偏差为 19.3 nm。

接着,固定 PZT 的振动峰峰值为 2000 nm,改变 PZT 的振动频率,根据(12)式决定系统的调制频率,重构的 PZT 正弦振动波形如图 7 所示,频率分

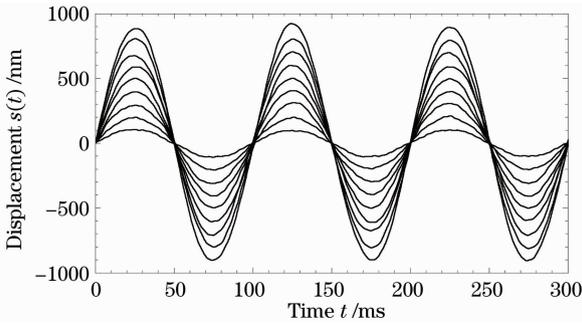


图 6 不同振幅条件下重构的 PZT 振动波形

Fig. 6 Reconstructed vibration waveforms of PZT in time-domain at different amplitudes

别为 5, 10, 20 和 40 Hz, 最大的振动峰峰值测量误差为 15.7 nm。

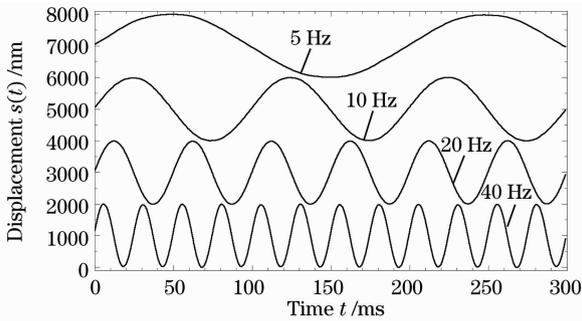


图 7 不同频率条件下重构的 PZT 振动波形。

PZT 的位移峰峰值为 2000 nm

Fig. 7 Reconstructed vibration waveforms of PZT in time-domain at different frequencies. The amplitude of vibration was fixed at 2000 nm

精密的位移传感器常常用于工业现场的测量中, 在这种工作场合下, 待测物体的运动状态常常会受到外界环境振动的影响, 所以实际应用场合中待测物体的运动状态比 PZT 的稳定振动要复杂得多。为了测试相位调制型自混合干涉仪对复杂运动的测量效果, 通过压电陶瓷驱动软件控制 PZT 运动, 由自混合干涉仪测量 PZT 由瞬间启动过渡到平稳振动的过程。软件设置 PZT 的振动频率和位移峰峰值分别为 10 Hz 和 500 nm, 驱动模块突然施加给 PZT 一个正弦信号, 根据(12)式设定调制频率, 实

表 1 PZT 振动频率为 10 Hz 时的正弦运动测量结果

Table 1 Measurement results of the sinusoidal vibration of PZT at fixed frequency of 10 Hz

Pre-set peak-to-peak amplitude of PZT /nm	Modulating frequency /Hz	Measured peak-to-peak amplitude by interferometer /nm	Measured peak-to-peak amplitude by 5529A /nm	Root mean square errors /nm
200	165	228.037	217.524	11.601
400	256	417.048	415.273	7.294
1000	530	1016.497	1018.409	8.4199
1600	805	1621.983	1621.544	12.326
2000	986	2024.477	2026.930	13.012

验中获得的激光自混合干涉仪与动态校准仪同步测量得到的结果对比见图 8(a), 实线为 Agilent 5529A 动态校准仪给出的物体的实际振动波形, 离散点图表示的是自混合干涉仪测量得到的振动结果, 图 8(b)为两组信号间的残差, 可以看出, 干涉仪重构的振动波形与动态校准仪测量得到的结果符合得比较好, 启动阶段由于 PZT 的运动不稳定, 振动波形的频谱变化较丰富。图 8 显示的测量结果表明, 由(12)式给出的调制频率即使在振动波形未稳定之前依然可以较好地恢复出待测物体的动态振动, 在振动开始阶段的最大误差为 20 nm; 当 PZT 由启动阶段过渡到稳定的正弦运动之后, 最大误差进一步减小为 17.58 nm。

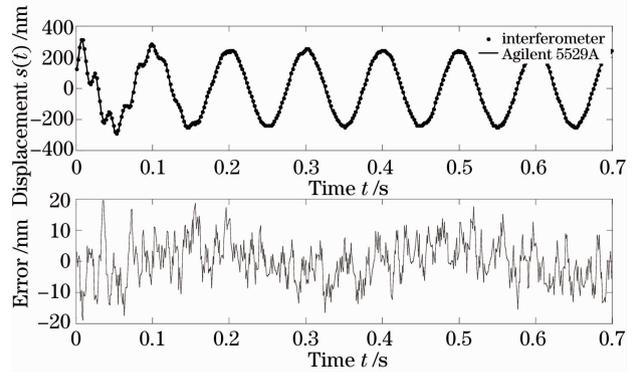


图 8 PZT 由瞬间启动至稳定振动的测量结果。(a) 相位调制自混合干涉仪重构的位移波形与 Agilent 5529A 测量结果的对比; (b) 测量误差

Fig. 8 A measurement result of PZT from an instant start-up to steady state vibration. (a) A result comparison between self-mixing interferometer and Agilent 5529A; (b) simultaneous error

表 1 为 PZT 的振动频率为 10 Hz 时, 改变 PZT 正弦振动峰峰值, 对 PZT 起振过程的测量结果。表 2 为 PZT 的振动峰峰值为 500 nm, 不同振动频率条件下, PZT 由瞬间启动至稳定振动的测量结果。实验结果表明, 采用理论分析得到的最低调制频率已经可以获得较好的测量结果, 实现正确的相位解调, 获得纳米级的动态测量精度。

表 2 PZT 振动峰峰值为 500 nm 时的正弦运动测量结果

Table 2 Measurement results of the sinusoidal vibration of PZT at fixed peak-to-peak amplitude of 500 nm

Pre-set vibrating frequency of PZT /Hz	Modulating frequency /Hz	Measured peak-to-peak amplitude by interferometer /nm	Measured peak-to-peak amplitude by 5529A /nm	Root mean square errors /nm
10	302	504.374	504.261	6.827
20	604	501.479	519.059	8.543
40	1208	478.964	482.235	12.372

5 结 论

理论分析表明,正弦相位调制型激光自混合干涉仪进行动态的位移测量时,系统的最大可测简谐振动的幅度与待测信号的频率、调制频率、测量电路的带宽和采集卡的采样频率有关,提高调制频率、测量系统电路部分的带宽以及数据采集卡的采样频率,是增大系统动态范围的有效方法;在测量低频微小振动时,根据系统在不同调制频率下的动态范围上限,可以合理降低调制频率以节约数据处理的时间,满足实时性测量的要求。实验结果表明,在对系统进行严格校准的条件下,相位调制激光自混合干涉仪对动态的振动信号取得了较好的测量结果,获得了 20 nm 的动态测量精度,相位调制自混合干涉仪优越的动态测试性能使得系统可应用于航空航天领域中一些结构材料的碰撞过程监测。

参 考 文 献

- 1 Zhang Tao, Leng Changlin, Zhong Ying *et al.*. MEMS dynamic testing technique based on differential laser Doppler effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 63~67
张涛,冷长林,钟莹等.基于激光差动多普勒效应的微机电系统动态测试技术[J].*光学学报*, 2007, **27**(1): 63~67
- 2 H. Martinussen, A. Aksnes, H. E. Engan. Wide frequency range measurements of absolute phase and amplitude of vibrations in micro- and nanostructures by optical interferometry[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 11370~11384
- 3 D. Larsson, A. Greve, J. M. Hvam *et al.*. Self-mixing interferometry in vertical-cavity surface emitting lasers for nanomechanical cantilever sensing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(9): 091103
- 4 Zhang Shulian. Laser feedback technique and progress[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(11): 65~71
张书练,激光回馈技术及发展[J].*激光与光电子学进展*, 2007,

- 44**(11): 65~71
- 5 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Optical feedback interferometry of semiconductor laser for sensing application[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(12): 1122~1126
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, **29**(12): 1122~1126
- 6 Hu Xianfeng. Observation and analysis on self-mixing interference of multi-longitudinal mode laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 433~439
胡险峰.多纵模激光二极管自混合干涉的观察和分析[J].*光学学报*, 2010, **30**(2): 433~439
- 7 Huarui Wang, Jianqi Shen. Size measurement of nano-particles using self-mixing effect[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 871~874
- 8 M. Ruiz-Liata, H. Lamela. Self-mixing technique for vibration measurements in a laser diode with multiple modes created by optical feedback[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(15): 2915~2923
- 9 U. Zabit, R. Atashkhoeei, T. Bosch *et al.*. Adaptive self-mixing vibrometer based on a liquid lens[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1278~1280
- 10 S. Merlo, S. Donati. Reconstruction of displacement waveforms with a single-channel laser-diode feedback interferometer [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(4): 527~531
- 11 N. Servagent, T. Bosch, M. Lescure. Design of a phase-shifting optical feedback interferometer using an electrooptic modulator [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(5): 798~802
- 12 Guo Dongmei, Tan Suqing, Wang Ming. Analysis of micro-displacement measurement accuracy in self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 845~850
郭冬梅,谈苏庆,王鸣.正弦相位调制自混合干涉微位移测量精度分析[J].*光学学报*, 2006, **26**(6): 845~850
- 13 Cao Zhigang, Qian Yasheng. Modern Communication Principle [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. 71~77
曹志刚,钱亚生.现代通信原理[M].北京:清华大学出版社, 1992. 71~77
- 14 B. Ovryn, J. H. Andrews. Measurement of changes in optical path length and reflectivity with phase-shifting laser feedback interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(10): 1959~1967

栏目编辑:何卓铭