

正弦相位调制型激光自混合干涉仪的 实时位移测量技术

刘 强 王 鸣 夏 巍 李春成 郝 辉 郭冬梅

(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 210023)

摘要 采用正弦相位调制技术与时域解调相位方法相结合, 提高激光自混合干涉仪在大量程位移测量中实时测量的准确度和速度。通过在激光器外腔中放置的电光晶体调制器对光束进行正弦相位调制, 采用时域解调相位方法解调干涉信号相位。同时满足了大量程位移测量过程中的速度要求以及实现干涉仪位移测量的实时性。实验上, 用 PI 公司高分辨率的商用电动位移平台标定的结果验证了该正弦相位调制激光自混合干涉仪在百毫米级大尺度位移测量中可达到小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的位移测量误差。对干涉仪在实时位移测量中的影响测量速度的因素进行了分析, 得出了本干涉仪的测速上限。

关键词 测量; 自混合干涉; 相位调制; 时域相位解调; 实时精密测量; 测速上限

中图分类号 O436; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0612011

Implementation of Real-Time Displacement Precision Measurement Technology for Sinusoidal Phase-Shifting Laser Self-Mixing Interferometer

Liu Qiang Wang Ming Xia Wei Li Chuncheng Hao Hui Guo Dongmei

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology of Jiangsu Province, College of Physics Science and Technology,
Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract In order to improve the measurement accuracy and realize the real-time measurement speed of the laser self-mixing interferometer in a large range of displacement, advanced sinusoidal phase-shifting technique and the time-domain phase demodulation method are adopted. The electro-optic crystal modulator is used to realize the sinusoidal phase-shifting on the laser beam in the external cavity and the interference signal's phase will be demodulated by the time-domain phase demodulation method. By combining the two together, it can meet the speed requirement in a wide range of displacement measurement process and implement the interferometer's real-time measurement requirement at the same time. Experimentally, PI's high-precision commercial electric displacement platform calibration results verified the sinusoidal phase modulation laser self-mixing interferometer's displacement measurement precision can reach less than $0.5 \mu\text{m}$ in the hundred mm large-scale displacement measuring process. In addition, the factors affecting the interferometer's measurement speed in the real-time displacement measurement process is analyzed and the maximum speed of our system is obtained.

Key words measurement; self-mixing interference; phase modulation; time-domain phase demodulation; real-time precision measurement; speed limit

OCIS codes 120.3180; 120.4640; 280.4788

收稿日期: 2013-12-19; 收到修改稿日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(91123015, 61178044)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX13_389)

作者简介: 刘 强(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光自混合干涉微纳测量及光纤传感等方面的研究。

E-mail: 789aiqiang@163.com

导师简介: 王 鸣(1950—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光自混合有源集成传感微纳测量技术、光纤 MEMS 器件的制作和光纤传感技术等方面的研究。E-mail: wangming@njnu.edu.cn (通信联系人)

1 引 言

在信息技术、超精密加工产业、生物医学等研究领域飞速发展的今天,很多应用场合需要高灵敏度、高分辨率测量和大范围测量的位移测量仪器。例如,大规模集成电路的光刻控制,集成电路芯片的表面轮廓测量及微纳机电系统中零部件的制造和加工等。因此研究具有大范围高分辨率的位移测量仪器具有重要的意义。

激光自混合干涉(SMI)^[1-4]技术是一种区别于常规双光束干涉的一种新颖的大范围高分辨率的位移测量技术,它是指激光器的输出光被外部物体反射或散射后,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,与腔内光相混合后,调制激光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。

随着对激光自混合研究的深入,正弦相位调制^[5-6]被引入到激光自混合干涉中,随之而来的各种解调算法也被提出:如时域载波相移技术、快速傅里叶变换(FFT)^[7]等。每种方法都各有其优势,在不同的应用场合内适用,但对实时性的位移测量实现较难。对激光自混合效应及相关的调制解调技术的深入和广泛研究,对相位调制型激光自混合干涉仪用于大尺度位移精密测量的实时性和速度等需求

也亟需解决,本文提出了一种正弦相位调制激光自混合干涉仪,由置于外腔中的电光晶体^[8]实现自混合干涉信号的正弦相位调制,采用硬件在时域解调外腔相位,位移测量结果与PI公司精密导轨运动参数一致。对干涉仪在实时位移测量中的影响测量速度的因素进行了分析,得出了本干涉仪的测速上限。实验表明该干涉仪可以实现在百毫米级大尺度位移测量过程中,保证测量的速度和实时性,并获得了小于0.5 μm量级的测量误差。

2 测量原理

2.1 时域解调相位原理

假设激光自混合干涉仪工作于弱反馈条件下,忽略光在外腔中的多重反馈效应,由置于外腔中的电光晶体对激光束进行正弦调制,调制函数为 $\varphi(t) = a\sin(\omega_m t + \beta)$,其中 a 为调制深度, ω_m 为调制角频率($\omega_m = 2\pi f_m$), β 为调制的初始相位。考虑到光在外腔中两次经过电光晶体,所以由电光晶体调制引起的相位变化为 $2\varphi(t)$,调节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光强信号可以表示为^[9]

$$P(t) = P_0 \{1 + m\cos[\varphi(t) + 2a\sin(\omega_m t + \beta)]\}, \quad (1)$$

将(1)式按贝塞尔展开可得

$$P(t) = P_0 [1 + m\cos \varphi(t) J_0(2a)] + 2mP_0 \cos \varphi(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(2a) \cos[(2n)(\omega_m t + \beta)] - 2mP_0 \sin \varphi(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(2a) \sin[(2n-1)(\omega_m t + \beta)], \quad (2)$$

式中的 $J_{2n-1}(2a)$ 和 $J_{2n}(2a)$ 分别为奇数阶和偶数阶的贝塞尔函数,由展开式可以发现光强信号的零次谐波分量和一次谐波分量分别为

$$P(0, t) = mP_0 \cos \varphi(t) J_0(2a) = A_0(t), \quad (3)$$

$$P(\omega_m, t) = -2mP_0 \sin \varphi(t) J_1(2a) \sin(\omega_m t + \beta) = A_1(t) \sin(\omega_m t + \beta), \quad (4)$$

式中 $A_0(t)$ 、 $A_1(t)$ 分别为零次谐波分量和一次谐波分量的振幅, $A_1(t)$ 受到相位 $\varphi(t)$ 的正弦函数调制,而 $A_0(t)$ 受到相位 $\varphi(t)$ 的余弦函数调制。 $A_0(t)$ 、 $A_1(t)$ 的具体表达式为

$$A_0(t) = P(0, t) = mP_0 \cos \varphi(t) J_0(2a), \quad (5)$$

$$A_1(t) = -2mP_0 \sin \varphi(t) J_1(2a), \quad (6)$$

由(5)、(6)式可以发现, $A_0(t)$ 、 $A_1(t)$ 还分别受到零阶、一阶贝塞尔函数的调制,可以从 $A_0(t)$ 和 $A_1(t)$ 中解调出相位。

具体方法如下:

$$\tan[\varphi(t)] = -\frac{1}{2} \cdot \frac{J_0(2a)}{J_1(2a)} \cdot \frac{A_1(t)}{A_0(t)}, \quad (7)$$

$$\varphi(t) = \arctan\left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{J_0(2a)}{J_1(2a)} \cdot \frac{A_1(t)}{A_0(t)}\right], \quad (8)$$

得到的相位被包裹于 $-\pi$ 和 π 之间,为了得到真正的相位值,必须对 $\varphi(t)$ 进行去包裹处理,再依据相位 $\varphi(t)$ 和自混合干涉仪外腔长度之间的关系,就可以得到外反射物体的位移情况,即

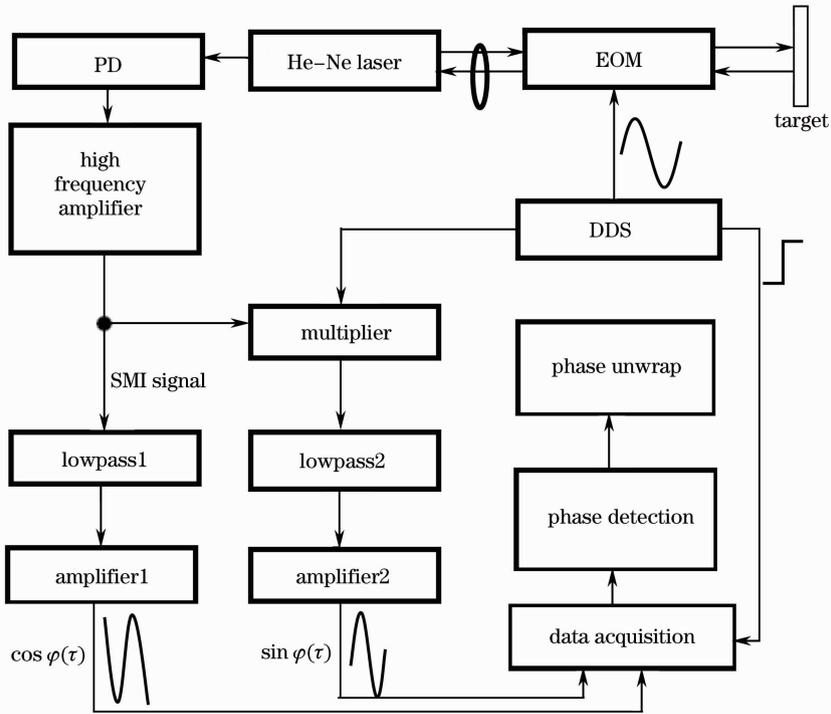


图 1 SMI 时域正交解调方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of SMI orthogonal demodulation method based on time domain

$$L(t) = \frac{\varphi(t)}{4\pi n} \lambda_0, \quad (9)$$

式中 λ_0 为激光器的波长, n 为空气的折射率, $L(t)$ 为外反射物体的位移。

2.2 时域解调相位方法

由以上原理可知, 只要获得激光自混合干涉光强信号的零次谐波分量和一次谐波分量的振幅, 就可以恢复出物体的位移。

具体来说, 时域实现相位解调的原理框图及步骤如下:

1) 用直接数字频率合成(DDS)信号源产生一路正弦波信号 $U(t) = 2a\sin(\omega_m t + \beta)$ 以及与此正弦波同频同相的方波信号, 正弦波用于调制电光晶体(EOM), 方波信号用于后面的同步触发采集;

2) 将 DDS 信号源产生的正弦波信号与光电探测器(PD)输出的激光 SMI 相乘, 将一阶谐波分量变换到零频处, 再经低通滤波后可以得到其一阶谐波分量的振幅 $B_1(t)$;

详细推理如下:

$$W(t) = P(t) \cdot U(t) = \left\{ P_0 [1 + m \cos \varphi(t) J_0(2a)] + 2mP_0 \cos \varphi(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(2a) \cos[(2n)(\omega_m t + \beta)] - 2mP_0 \sin \varphi(t) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(2a) \sin[(2n-1)(\omega_m t + \beta)] \right\} \cdot [2a \sin(\omega_m t + \beta)], \quad (10)$$

从频域来看, 原来的直流项及零次谐波分量被变换到 ω_m 频率处, 而一次谐波分量与正弦调制载波相乘后为

$$P_1(\omega_m, t) = P(\omega_m, t) \cdot U(t) = -2mP_0 \sin \varphi(t) J_1(2a) \sin(\omega_m t + \beta) \cdot 2a \sin(\omega_m t + \beta) = 2aA_1(t) \cdot \frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega_m t + 2\beta)] = aA_1(t) - aA_1(t) \cos(2\omega_m t + 2\beta), \quad (11)$$

而二次及以上的高次谐波分量与载波相乘后的结果是被变换到 $n\omega_m$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) 处, 这样就可以通过低通滤波(lowpass2)滤出含有一阶谐波分量 $B_1(t) = aA_1(t)$ (其中含有运动相位的正弦信息), 而滤除其他频率分量;

3) 将激光 SMI 直接通过低通滤波后, 就可以得到零阶谐波分量的振幅 $B_0(t)$ (其中含有运动相位的余弦信息);

具体来说, 由自混合干涉光强信号 $P(t)$ 的贝塞尔展开(2)式可知, 将其隔直放大后, 就可以通过低

通滤波(lowpass1)直接滤出其零阶谐波分量,即 $B_0(t) = A_0(t)$;

4) 通过数据采集卡采集 $B_1(t), B_0(t)$ 后,在数字域进行数字信号处理后,可以得到包裹于 $[-\pi, \pi]$ 的相位,需要对解调得到的相位进行去包裹运算,并根据自混合干涉外腔长度与相位之间的关系换算,从而得到物体的位移。

值得注意的是,零阶谐波分量的振幅和一阶谐波分量的振幅受到零阶贝塞尔函数和一阶贝塞尔函数的调制,因此需特别选取调制深度即调制载波的幅值 α ,使得零阶和一阶谐波分量的幅度较大而二阶及以上的谐波分量的幅度较小,便于信号的后续处理及减少误差。

2.3 Matlab 仿真

因为当外腔中的物体做匀速直线运动时,在弱反馈条件下,激光自混合干涉仪输出的信号是标准的正弦波,其频率 f' 正比于物体的运动速度 v ,即多

普勒频率^[8]

$$f' = 2v/\lambda, \quad (12)$$

式中 λ 为 He-Ne 激光器的输出光波长。

如图 2 所示,在 Matlab 仿真时,先通过一段 1 mm 匀速运动的位移[图 2(a)]和因运动而引起的调制激光自混合干涉 SMI 信号[图 2(b)],根据时域正交解调思想,将 SMI 和载波相乘并滤波以及将 SMI 信号直接滤波,得到的两路正交信号 $A_0(t)$ 和 $A_1(t)$ [图 2(c)],再解调得到物体的相位[图 2(d)]并解包裹得到位移[图 2(e)],并将恢复的位移与标准位移进行比较,得到误差曲线[图 2(f)]。仿真结果表明基于时域的正交解调方法理论上是可行的,可以达到 10^{-14} m 的准确度。因为 1 mm 位移产生的数据量很大,仿真图中的中间三幅为了清晰看到波形特征,截取的是原仿真图在 0.5 s 位置处横向放大的结果。

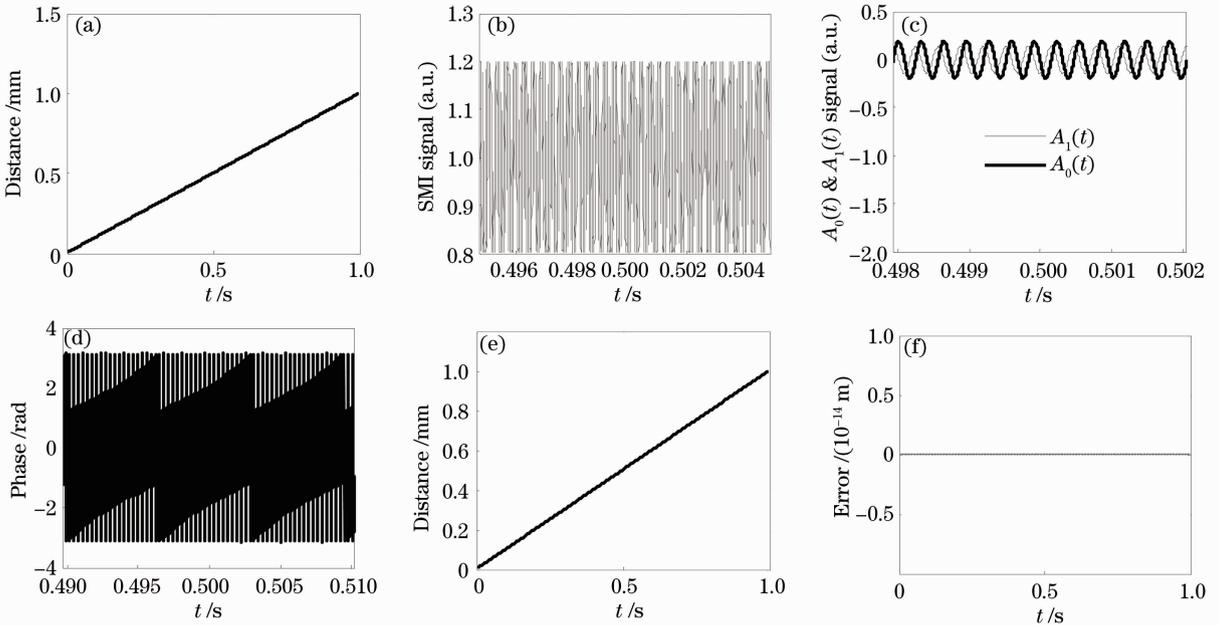


图 2 时域解调 Matlab 仿真图

Fig. 2 Schematic of Matlab simulation diagram of demodulation based on time domain

3 实验装置

3.1 激光自混合干涉仪的光路系统

光路系统部分主要是由 He-Ne 激光管(632.8 nm, TEM₀₀), EOM, 可调光衰减片以及 PD 等组成,在实验前需调节 He-Ne 激光管出射光束的偏振方向与电光晶体的主轴方向一致,从而保证电光调制器对外腔中的光束进行纯相位调制,并通过调节衰减片使系统工作于弱反馈状态,使得调制前激光自混合干涉信号

的正弦度很好。

3.2 激光自混合干涉仪的信号处理系统

信号处理系统如图 3 所示,信号处理系统包括 DDS 信号源、高频放大器、乘法器及低通滤波器及电源模块。高频放大器用来放大 PD 出来的激光 SMI 进行高通去直流并进行放大处理。乘法器和滤波器组合成混频器用于提取一阶谐波成分即含有运动相位的正弦分量;另一个滤波器直接提取零阶

谐波分量即含有运动相位的余弦分量。利用 NI 数据采集卡 USB-6251 对得到的两路正交信号进行采

集,用 PC 编写 Labview 程序进行后续相位解调处理及位移实时显示等。

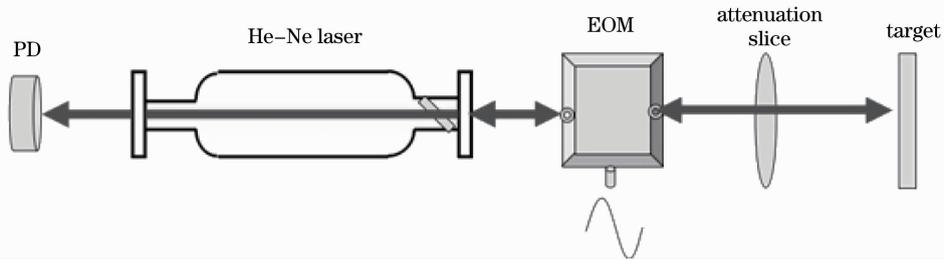


图 3 激光自混合干涉仪的光路系统示意图

Fig. 3 Diagram of the laser self-mixing interferometer's optical system

4 实验结果

4.1 PI 精密导轨标定实验

4.1.1 实验方法

PI 公司的 M-521, DD 型二维精密电控平移台(直流电机驱动)单向重复定位分辨率达 $0.1 \mu\text{m}$, 直线度参数为 $1 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$, 最高运行速度 50 mm/s , 量程为 200 mm 。

用电动平移台导轨(PI)驱动靶镜猫眼^[10]运动, 电动平移台的移动范围设置为 100 mm , 每次匀速步进 10 mm , 移动速度设置为 10 mm/s , 步进 10 次, 每次位移作为标准; 该运动过程由电机自动完成, 同时自混合干涉仪对每次的步进位移进行自动测量记

录并给出实时误差, 连续做几十组, 并将数据保存, 选择其中的四组实验数据进行分析, 其中 No. 1、No. 2 和 No. 3 在相同的测量环境条件[恒温($20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), 恒湿($50\% \pm 3\%$)], 激光器预热 2 h 后, 激光波长 632.8334 nm 下进行的, 而 No. 4 是在其他测试现场得到的结果。

4.1.2 数据分析

实验所得到的四组(No. 1、No. 2、No. 3、No. 4)数据如表 1 所示, P_D 为 PI 导轨位移, M_D 为实测位移, 根据 No. 1 结果绘制的标定曲线和误差曲线图如图 4 所示, 对每组数据进行的分析如表 2 所示。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

P_D	M_{D1}	Error Δ_1	M_{D2}	Error Δ_2	M_{D3}	Error Δ_3	M_{D4}	Error Δ_4
0.0	-0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.0	-0.0
10000.0	9999.9	-0.1	9999.7	-0.3	9999.9	-0.1	10000.0	0.0
20000.0	19999.8	-0.2	19999.9	-0.1	20000.0	0.0	19999.9	-0.1
30000.0	29999.6	-0.4	29999.8	-0.2	29999.8	-0.2	30000.0	0.0
40000.0	39999.9	-0.1	39999.9	-0.1	39999.8	-0.2	40000.1	0.1
50000.0	49999.8	-0.2	49999.8	-0.2	49999.8	-0.2	49999.9	-0.1
60000.0	60000.0	0.0	59999.8	-0.2	59999.9	-0.1	60000.0	0.0
70000.0	69999.6	-0.4	69999.8	-0.2	69999.8	-0.2	70000.1	0.1
80000.0	79999.8	-0.2	80000.1	0.1	79999.8	-0.2	79999.9	-0.1
90000.0	90000.1	0.1	90000.1	0.1	90000.1	0.1	89999.9	-0.1
100000.0	99999.9	-0.1	99999.8	-0.2	99999.9	-0.1	99999.8	-0.2

表 2 干涉仪相对 PI 精密导轨位移测量比对结果

Table 2 Interferometer & PI precision rail displacement measurement alignment results

Number of Trials	Standard deviation / μm	Mean error / μm	Max error / μm	Fit of the Linear	Linearity /%
No. 1	0.2	-0.2	-0.4	1.0000	-0.0004
No. 2	0.2	-0.2	-0.3	1.0000	-0.0002
No. 3	0.2	-0.2	-0.2	0.9999	-0.0002
No. 4	0.1	-0.1	-0.2	0.9999	-0.0002

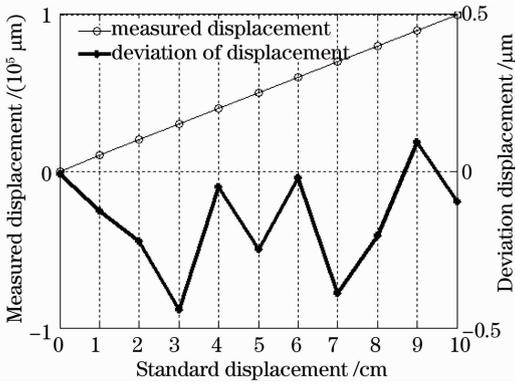


图 4 标定曲线和误差曲线

Fig. 4 Schematic of calibration curve and error curve

由表 2 可知,干涉仪相对于 PI 公司精密导轨的最大标准差为 $0.2 \mu\text{m}$,最大误差为 $-0.4 \mu\text{m}$,线性拟合度最差也达到了 0.9999,说明干涉仪在百毫米级大尺度位移具有实时测量的功能,并获得了小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的测量误差,并且测量的重复性和复现性较好。

4.2 波长稳定性及测速上限的分析与讨论

在干涉仪中,激光器作为测量光路的一部分而不能成为一个独立的、波长稳定的光源,因此其稳定性对测量准确度有很大的影响。实验中的氦氖激光器输出光在空气中传播的中心波长为 632.8334 nm ,短期频率稳定性为 1.5×10^{-6} ^[11],因此,在没有反馈时,激光器波长稳定性为 $\delta\lambda = \lambda_0 \delta\nu/\nu \approx 0.9492 \times 10^{-6} \mu\text{m}$,可见其性能是很好的^[12]。

当激光器用于自混合干涉测量时,由自混合干涉效应的频率方程:

$$(\omega_0 - \omega)\tau = C \sin(\omega\tau - \arctan \alpha). \quad (13)$$

如图 5 所示,当反馈系数 C 很低时,所引起的频率波动很小,实验中调节光路中的可调节衰减器使得系统的反馈水平极低,即频率方程中的 C 值很低,可以使频率波动很小,理论计算表明,外腔长在

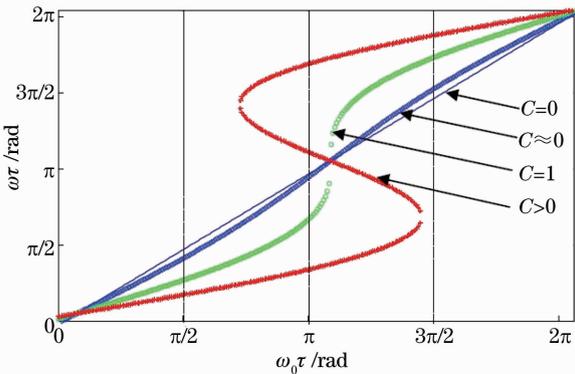


图 5 自混合干涉的频率波动示意图

Fig. 5 Diagram of the self-mixing interference's frequency fluctuation

百毫米量级时,波长稳定性可以达到 10^{-8} 的测量准确度。

基于 He-Ne 激光器的正弦相位调制型激光自混合干涉仪从理论上讲也可以达到千米每秒的测量速度^[13]。但是受限于以下几个因素,实际实现的测量速度小于理论结果。

1) 电光晶体的调制带宽

虽然选用的 New Focus 4002 型电光晶体的调制带宽可以达到 100 MHz,但是实际上受驱动电源的限制,最大只能进行 1 MHz 的调制。调制带宽对干涉仪的测速范围有决定性影响,因此 1 MHz 带宽对应的最大测量速度即为测速上限。

2) 光电探测器的响应带宽

PD 的响应带宽与调制后激光自混合干涉信号的频谱带宽必须保证一致,PD 响应带宽与外接电阻和结电容的关系为

$$f_{\text{BW}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{LOAD}} \times C_j}, \quad (14)$$

式中 R_{LOAD} 为光电探测器的负载电阻, C_j 光电探测器的结电容。调制后激光自混合干涉信号的频谱带宽也选定于 1 MHz,在光电探测器的响应带宽内。

3) 数据采集与处理系统的采样率

为了能够很好地滤出所需的含有运动相位信息的零阶谐波分量和一阶谐波分量,调制频率要大于激光自混合频率。此外,NI 数据采集卡的最高采样率为 $1.25 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$,因为需要双通道同时采集,因此每通道的采样率为 $6.25 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$,根据奈奎斯特采样定理,能够满足对双通道的含有运动相位信息的 $3 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 正交信号的采集。由(12)式可知,运动速度理论上是可以接近 100 mm/s。

4) 电路中的实际噪声水平

不可忽视的是当对电光晶体以高频率信号进行调制时,噪声水平将会变得很敏感,对测量速度的影响很大。需要合理设计电路系统来降低电路的噪声水平,并采用高性能的光电探测器及数据采集和处理系统来减小噪声的影响。

值得提出的是,要追求更高的测量速度,可以选用更高的调制频率和宽带宽、高灵敏度的光电探测器以及设计出分辨率和采样率更高的数据采集与处理系统。如果电光晶体的调制频率能达到吉赫兹量级,那么测速上限是可以达到千米每秒的。此外,将干涉仪用于棱镜的曲率半径的测量中,在棱镜的手动移动过程中,成功测量出了棱镜的曲率半径,说明干涉仪也能用于非匀速低速运动物体位移的实时测量。

5 结 论

实现了一种正弦相位调制型激光自混合干涉仪用于大量程位移实时高速精密测量技术。在用高分辨率的PI公司精密导轨进行标定的实验中实现了干涉仪 500 kHz 的载波调制,当外部物体以 10 mm/s的速度运动时,能够对物体的位移大小及方向进行实时监测并实现了小于 $0.5 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ 的线性度及 $0.5 \mu\text{m}$ 的测量误差。对于干涉仪在实时测量中的影响测量速度的因素进行了分析,得出了本干涉仪的测速上限。实时位移测量技术对于百毫米级位移的实时高速精密测量是十分有效的。

参 考 文 献

- 1 M Wang, G Lai. Self-mixing microscopic interferometer for the measurement of microprofile [J]. *Opt Commun*, 2004, 238(4): 237—244.
- 2 M Norgia, S Donati. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2003, 52(6): 1765—1770.
- 3 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Optical feedback interference and its sensing applications of the laser diode [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
- 4 P A Roos, M Stephens, C E Wieman. Laser vibrometer based on optical-feedback-induced frequency modulation of a single-mode laser diode [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(34): 6754—6761.
- 5 T Suzuki, T Yazawa, O Sasaki. Two-wavelength laser diode interferometer with time-sharing sinusoidal phase modulation [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(10): 1972—1976.
- 6 T Suzuki, X Zhao, O Sasaki. Phase-locked phase-shifting laser diode interferometer with photothermal modulation [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(13): 2126—2131.
- 7 Guo Dongmei, Tan Suqing, Wang Ming. Micro displacement measurement accuracy analysis for a sinusoidal phase-shifting self-mixing interferometer [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.
- 8 Yu Xiao, Hong Guanglie, Ling Yuan, *et al.*. Energy centrobaric correction method applied in velocity accuracy enhancement in doppler laser radar system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 091201.
于 啸, 洪光烈, 凌 元, 等. 能量重心校正法在提高激光多普勒测速精度中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 091201.
- 9 Wei Xia, Zhenyu Yang, Qiang Liu, *et al.*. Development of a sinusoidal phase-shifting self-mixing interferometer for realtime displacement measurement with nanometer accuracy [J]. *Meas Sci & Technol*, 2013, 24(5): 055011.
- 10 Wu Dongsheng, Bai Tingzhu, Liu Bingqi, *et al.*. Dynamic imaging detection and target recognition for cat-eye effect echo [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0811003.
武东生, 白廷柱, 刘秉琦, 等. 猫眼效应回波的动态成像探测与目标识别[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0811003.
- 11 Yang Zhenyu, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Testing and analysis of large-range displacement measurement precision in sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412007.
杨振宇, 王 鸣, 夏 巍, 等. 正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量精度测试与分析 [J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412007.
- 12 Wei Xia, Ming Wang, Zhenyu Yang, *et al.*. High-accuracy sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer using an electro-optic modulator; development and evaluation [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(4): B52—B59.
- 13 Zhang Zhaoyun, Gao Yang, Zhao Xinghai, *et al.*. The theoretical study of measurement speed limit of the diode laser's self-mixing effect [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 211—214.
张照云, 高 杨, 赵兴海, 等. 二极管激光自混合测速上限的理论研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 211—214.

栏目编辑: 何卓铭