

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311698

线性调频激光自混合干涉双通道微位移测量方法研究*

樊毓臻,寇科,王 晔,焦明星

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘要:为了满足工程中一些特殊二维位移测量需求或提高位移测量效率,建立了结构简单紧凑的激光自混合干涉双通道位移测量系统。首先,基于三镜法-珀腔模型给出自混合干涉系统的数学方程。其次,在弱反馈条件下施加线性电流调制,依据自混合信号频率和外部物体距离的线性关系,当两个物体到激光器距离不同时,频域会呈现两个独立的谱峰,分别对其进行相位解算,从而实现自混合双通道位移测量。然后,数值模拟生成了双通道激光自混合信号,根据全相位频谱分析技术对自混合信号两个谱峰的相位进行估算,重构了两个物体位移曲线,给出了仿真验证。最后,搭建了实验系统,进行了自混合干涉双通道位移测量实验,并给出实验测量结果。实验结果表明,该系统可以完全区分两个运动物体,位移测量相对误差优于8.42%。线性调频激光自混合干涉可以实现任意运动规律的双通道位移测量,通过继续分光其测量通道数仍可进一步增加。

关键词:激光自混合干涉;全相位频谱分析;双通道位移测量

中图分类号: TH741 TH822 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460. 40

Study on the dual-channel displacement measurement method using linearly tuned laser self-mixing interference

Fan Yuzhen, Kou Ke, Wang Xian, Jiao Mingxing

(School of Mechanical and Precision Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To meet some special requirements of 2D displacement measurement in engineering or improve the efficiency of displacement measurement, a simple and compact dual-channel displacement measurement system utilizing laser self-mixing interference is established. Firstly, mathematical equations of the self-mixing interference system are given, which are based on the three-mirror Fabry-Perot cavity model. Then, under the condition of weak feedback, linear current modulation is applied. According to the linear relationship between the frequency of the self-mixing signal and the distance between the external object, when the distance between the two objects and the laser is different, the frequency domain will present two independent spectral peaks, and the phase is solved respectively. Therefore, the self-mixing dual-channel displacement measurement is realized. Then, the dual-channel self-mixing signal is generated by numerical simulation. The phase of two spectral peaks of the self-mixing signal is extracted according to the all-phase spectrum analysis technique, and the displacement curves of the two objects are reconstructed accordingly. Finally, an experiment system is established, the dual-channel displacement measurement experiments are carried out, and the measurement results are exhibited subsequently. The experimental results show that the system can completely distinguish two moving objects, and the relative error of displacement measurement is better than 8.42%. The linear frequency modulated laser self-mixing interferometry can realize the dual-channel displacement measurement of arbitrary motion, and the number of measuring channels can be further increased by more beam splitting.

Keywords: laser self-mixing interference; all-phase spectral analysis; two-channel displacement measurement

0 引言

激光自混合干涉 (self-mixing interference, SMI) 是指激光器输出的光被外部物体反射或者散射后,部分光返回至激光器的谐振腔内,与腔内的光混合产生类干涉的作用。随着半导体激光的问世,利用激光自混合干涉是一种新型的测量方式,该系统改变了传统光学干涉系统,并且有着和传统干涉系统相同的相位灵敏度^[1]。其结构简单只有一个干涉通道、性能更稳定、准直效果好。自 20 世纪 80 年代以来,SMI 已被广泛应用在各个领域中。研究人员可以利用激光自混合干涉技术测量距离^[2]、速度^[3]、振动^[4]等物理量。近些年来自混合干涉双通道测量引起了许多研究者的关注^[5-8],通过处理激光自混合干涉信号来获取两个物体的外部信息,可应用在一些特殊领域例如垂直和水平管道泄漏和多向医疗定位等。

在研究激光自混合干涉双通道测量的过程中,已经建立其双通道自混合模型,并在时域和频域中验证了自混合双通道在弱反馈下是两个独立信号的叠加^[9]。弱反馈水平下,利用希尔伯特变换原理实现了两路合成信号相位的重构,并对合成信号相位分解得到了两路外腔反射体位移的波形,最大误差小于 1.5 rad,但在实验中对两路外腔物体相位提取不够理想^[10]。利用经验模式分解 (empirical mode decomposition, EMD) 算法可实现双外腔分离和同时测量,两物体的误差分别为 6.6% 和 1.25%,测量条件需要两路外腔物体频率不同^[11]。

本文提出全相位频谱分析算法的双通道位移测量方法,采用锯齿波注入电流对激光器进行线性调制,利用全相位谱分析法来估计自混合干涉信号相位,根据两个物体与激光器的距离和自混合信号频率呈线性关系,经过全相位谱处理,在频域中将呈现两个独立的谱峰,分别对两个反射物体进行谱峰搜索,来重构两个物体位移曲线。该算法对外部两个物体运动条件不作严格要求,测量条件为两个物体的与激光器距离的不同。同时全相位频谱分析算法相比较传统的 FFT 处理方法,有着更好地抑制频谱泄露的性能^[12]。

1 激光自混合干涉模型

在激光自混合干涉领域中使用最普遍的模型的当属三镜法-珀 (fabry-perot, F-P) 腔模型,其适用范围是激光器谐振腔主输出端到外部靶目标 (即反射体) 的距离小于激光器相干长度的 1/2^[13]。

图 1 为等效的三镜 F-P 腔模型,图中 A、B 为激光器两端面, M 为外部反射物体。AB 之间的长度 l 称为激光器内腔, BM 之间的长度 L 称为激光器外腔, r_1 、 r_2 和 r_3 分别为 A、B 和 M 的反射系数。

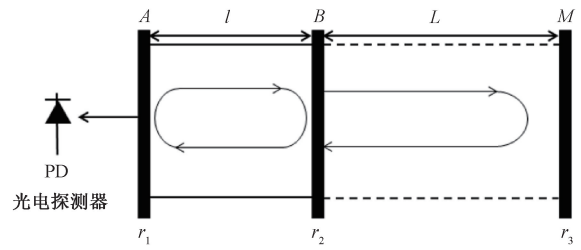


图 1 三镜法-珀腔模型

Fig. 1 The self-mixing interference

由此自混合干涉的数学模型可以总结为:

$$v_F = v_0 - \frac{C}{2\pi\tau_L} \sin[2\pi\tau_L v_F + \arctan a] \quad (1)$$

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

式中: P 、 P_0 、 v_F 、 v_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, τ_L 为光在外腔往返一次的时间; $\tau_L = 2L/c$, 其中 L 为外腔长度, c 为光速, α 为激光器线宽展宽因子, m 为激光器的调制系数 ($m \approx 10^{-3}$), C 为光反馈水平因子。

$$C = \frac{(1 - |r_2|^2) r_3 \tau_L}{r_2 \tau_l} \sqrt{1 + a^2} \quad (3)$$

式中: τ_l 为光在内腔中往返的时间, $\tau_l = \frac{2l}{c}$, l 为激光器内腔长度。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。根据 C 的不同大小可以为 3 种情况, $C < 1$ 时, 自混合干涉系统处于弱反馈水平, 激光器单模稳定运行, 初始光频率 v_0 与反馈光频率 v_F 存在一一对应解关系, 光功率 P 是时间的单值函数; $1 < C < 4.6$ 时, 系统为适度反馈, 激光器工作于多模方式, v_0 与 v_F 处于一对多关系, 信号出现滞回现象; $C > 4.6$ 时, 系统为强反馈水平, 激光器处于不稳定状态。由此, 本文自混合干涉测量工作在弱反馈条件下进行。

2 双通道位移测量原理

线性电流调制会引起激光器输出光频率和功率产生变化, 两个反射体的位移信息与激光器出射光的外腔相位存在着对应关系^[14]。当存在光反馈时, 激光器的输出功率会随着注入电流和外腔长度的变化而变化, 最终表现为激光自混合干涉相位的变化^[15]。

$$\phi_F = 2\pi v_F \frac{2L}{c} \quad (4)$$

当激光器线性调制时, 考虑到在弱反馈条件下 $C \ll 1$, 则 $v_F \approx v_0$ 、 $\phi_F \approx \phi_0$ 。激光器的输出光频率可以表示为:

$$v_F(t) = v_0 + \gamma \text{tr}(t) \quad (5)$$

式中: v_0 为激光器在恒流源驱动下的初始光频率, γ 为频率调制系数, 单位为 Hz/mA, $tr(t)$ 为激光器调制电流波形函数。自混合功率信号可以表示为:

$$P = [P_0 + \eta tr(t)] [1 + m \cos(\phi_F)] = P_0 + P_0 m \cos(\phi_F) + \eta tr(t) + \eta tr(t) m \cos(\phi_F) \quad (6)$$

$$\phi_F = 2\pi [v_0 + \gamma tr(t)] \frac{2L_0}{c} \quad (7)$$

当外腔长度从 L_0 偏移到 $L(t) = L_0 + d$ 时, 则:

$$\phi_F = 2\pi [v_0 + \gamma tr(t)] \frac{2(L_0 + d)}{c} \approx \frac{4\pi}{c} [\gamma tr(t) L_0 + v_0 L_0 + v_0 d] = 2\pi f_m t + \varphi_0 + \varphi \quad (8)$$

$$P = [P_0 + \eta tr(t)] [1 + m \cos(2\pi f_m t + \varphi_0 + \varphi)] \quad (9)$$

其中, c 表示为光速, 由于实际测量中的外部目标物体的位移通常远小于初始外腔长度 L_0 , 故 $\gamma tr(t) d$ 可为忽略。 L_0 为初始外腔长度, φ_0 为初始相位, f_m 为信号基频, η 为所选激光器功率电流斜率比, 单位为 mW/mA。

$$f_m = \frac{2\gamma tr(t)}{ct} L_0 = \frac{2\gamma L_0}{c} \cdot \frac{dtr(t)}{dt} \quad (10)$$

$$\varphi_0 = 4\pi v_0 \frac{L_0}{c} \quad (11)$$

$$\varphi = 4\pi v_0 \frac{d}{c} \quad (12)$$

为了保证信号基频 f_m 处于稳定, $tr(t)$ 可选择锯齿波电流, 则激光器的调制电流为时间的线性函数, 则自混合干涉信号的基频 f_m 与外腔长度 L_0 呈对应线性关系, 在设计激光自混合干涉双通道位移测量, 所测得功率信号含有两个外部物体运动信息并呈叠加关系, 依据两个外部反射物体外腔长度的不同, 从而各自的信号基频不同, 通过信号处理在频域图上表现为两个独立的谱峰, 对其进行分离从而进行两个物体的微位移重构。

在大部分的相位测量方法中都是采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation FFT) 变换进行相位的估计, 而 FFT 需要对信号进行截断再周期延拓, 这会导致信号存在跳变, 在频谱中表现频谱泄露而引入了相位测量误差, 从而降低相位测量精度。与之相比, 全相位 (all-phase FFT) 具有良好地抑制频谱泄露的特点, 相位测量精度相比 FFT 更高, 该技术具有“相位不变性”的优良特性^[14], 无需引入额外的频谱校正措施, 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。故本文采用全相位频谱分析法估计自混合干涉信号相位。全相位 FFT 谱分析技术相比传统 FFT 谱分析技术的不同之处在于进行 FFT 变换前对数字信号进行了预处理。具体流程如图 2 所示: 首先用长度为 $2N - 1$ 的卷积窗 w_c 对信号中心样点 $x(0)$ 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

的结果^[16]。

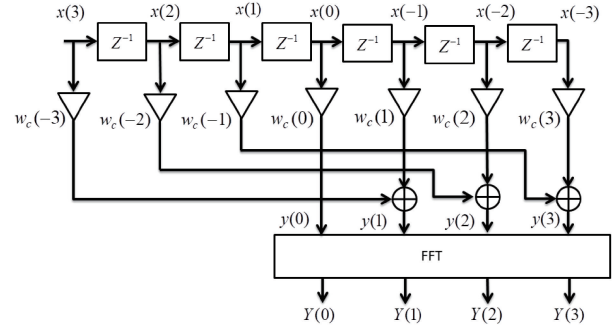


图 2 apFFT 谱分析流程 ($N=4$)

Fig. 2 Data flow of apFFT spectral analysis ($N=4$)

式(6)中自混合干涉信号 P 归一化后得到信号 G 经过全相位频谱处理后, 在频域中可以明显看出有两个谱峰, 第 1 个谱峰为外腔长度较短的反射物体, 第 2 个谱峰为外腔长度较长的反射物体, 提取所有周期第 1 个峰值谱线和第 2 个峰值谱线所对应的相位。

$$\theta = \arctan \frac{\text{Im}G(f_m)}{\text{Re}G(f_m)} \quad (13)$$

由式(13)此时直接求解反正切函数所得到的相位值被限制在正切函数的一个最小的单调区间 $-\pi \sim \pi$ 中, 需要对相位进行解包裹处理^[17-18], 具体过程为: 在每个调制周期所得到的一个相位值, 连续得到的两个相位值后将二者进行相减得到差值 z , 需要保证让 z 的绝对值始终小于 π , 当相减的差值 $z < -\pi$ 时, 需给后一个相位值加上 2π , 直到差值 $z > -\pi$; 当相减的差值 $z < \pi$ 时, 需给后一个相位值减去 2π , 直到差值 $z < \pi$, 始终保证差值 z 在 $-\pi \sim \pi$ 中, 从而保证了相位变化的连续性^[19]。

位移引起的相位变化为:

$$\varphi_i = \theta_i - \varphi_0 \quad (14)$$

$$d = \frac{c\varphi}{4\pi v_0} \quad (15)$$

由式(15)可求出该点的位移值 d_i , 分别连接两个物体各自的位移点, 即可重构出两个反射物体的位移曲线。

3 双通道位移测量数值仿真

3.1 信号生成

依据双通道位移测量原理, 建立自混合干涉双通道位移测量系统仿真模型。在 Guy Plantier 所建立的弱反馈条件下的自混合干涉函数信号^[20], 构建了双通道自混合干涉信号, 仿真条件如下: 激光中心波长 $\lambda = 850$ nm, 第 1 个物体的初始外腔长度 $L_1 = 13$ cm, 以三角波曲线运动, 频率 3.5 Hz, 峰峰值为 4 μm , 第 2 个物体的初始外腔

长度 $L_2 = 16 \text{ cm}$, 以正弦曲线运动, 频率 6 Hz , 峰峰值为 $2 \text{ }\mu\text{m}$ 。调制锯齿波频率 $f_m = 250 \text{ Hz}$, 幅值 $I_m = 4 \text{ mA}$, 如图 3 所示。经过调制的自混合信号如图 4 所示。

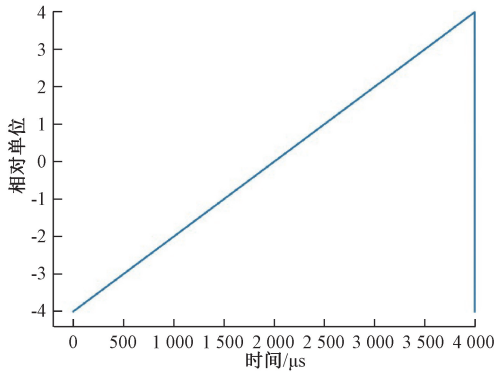


图 3 一个锯齿电流周期仿真

Fig. 3 One sawtooth current period simulation

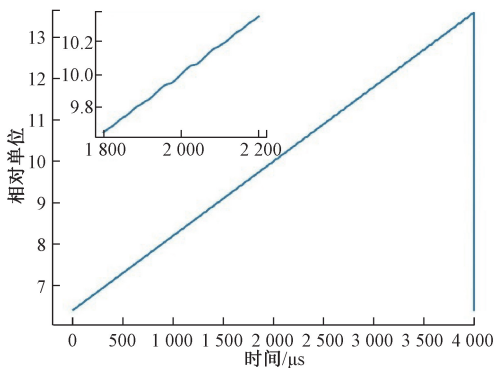


图 4 一个锯齿电流周期内的自混合信号仿真

Fig. 4 Self-mixing signal simulation in one sawtooth current period

3.2 信号处理

在所获得的自混合干涉信号 P 中包含着外部两个物体位移信息的叠加, 也含有调制电流锯齿波 $tr(t)$, 获取信号目标为有光反馈的相位 $\cos(\phi_f)$, 利用对信号 P 和锯齿波 $tr(t)$ 分别做 FFT 变换, 求出各自 FFT 的峰值进行相除得到一个比值, 从而求出约等于激光器功率电流斜率比 η , 此操作的目的是去除幅度调制的干扰, 根据式(6)得到自混合干涉信号如图 5 所示。

将每一周期的自混合干涉信号来进行全相位频谱分析, 如图 6 所示, 在频域图上会出现两个独立谱峰。第 1 个谱峰表示为外腔距离近的外部物体, 第 2 个谱峰表示为外腔距离远的外部物体。将每个周期进行处理后可得到两个外部物体的位移信息。

在图 7 仿真的结果中, 外腔距离较短的反射物体(通道 1)的最大误差达到了 2.997 nm , 外腔距离较长的反射

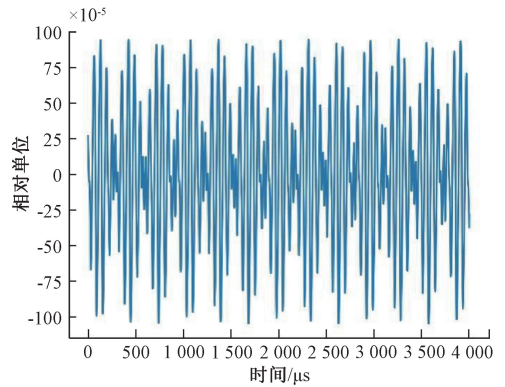


图 5 去除锯齿波电流的自混合信号仿真

Fig. 5 Self-mixing signal simulation after subtracting injection sawtooth current signal

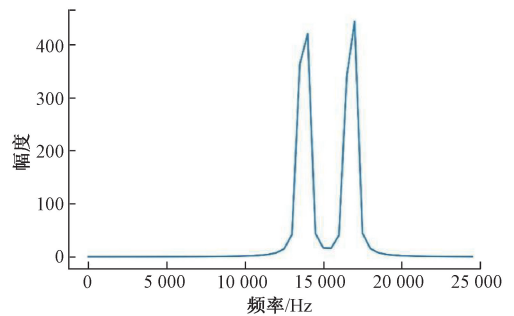


图 6 基于 apFFT 双通道频谱图

Fig. 6 Spectrum diagram of dual-channel base on apFFT

物体(通道 2)的最大误差达到了 3.907 nm 。由此全相位谱分析法是可以将自混合干涉信号还原出两个物体的原始位移曲线, 测量精度较高。本文基于全相位谱分析法的自混合干涉双通道位移测量原理上是可行的。

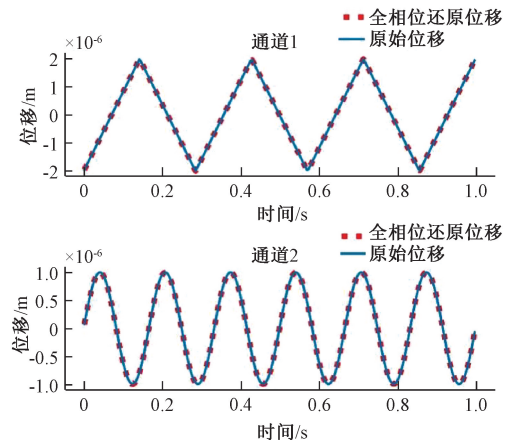


图 7 双通道位移测量仿真结果

Fig. 7 Simulation results of dual channel displacement measurement

4 测量实验与结果分析

如图8所示,为激光自混合干涉双通道位移测量系统。实验系统放置在精密气浮光学平台上,可以避免振动、电磁干扰等影响。

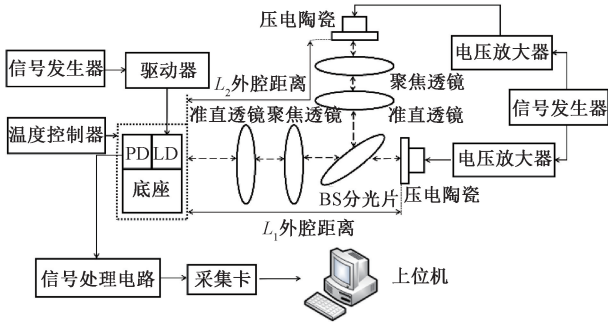


图8 实验装置

Fig. 8 Experimental device

实验所采用的光源为半导体激光器,型号为L850P010,波长为850 nm,阈值电流为20 mA。激光器驱动电源提供恒流模式,范围控制为0~100 mA,精度可达10 μ A。信号发生器提供调制电流。半导体激光器的温度控制器型号为TED200C,其内部IC传感器的分辨率为0.01 $^{\circ}$ C,精确度为 $\pm 0.1^{\circ}$ C,能够有效地抑制激光器温漂。实验光路如下:安装在底座的激光器发射光束经过准直透镜和聚焦透镜汇聚,经过BS分光片将光束分为两路,一路直接照射在近处的压电陶瓷,另一路再经过准直透镜和聚焦透镜汇聚光束照射在远处压电陶瓷以保证两路外腔距离的不同,光束照射在两路压电陶瓷,两路回馈光以叠加形式返回至激光器腔内与腔内光相混合,影响激光器输出功率,通过功率探测获取两个外部物体运动信息,激光功率波动由封装在激光器内部PD接收探测。PD接收的信号十分微弱且易受噪声影响,需经过信号处理电路转换为适当幅值、噪声较小的模拟电压信号再转换为数字信号做进一步的处理,信号处理电路包括有I/V转换电路、放大电路、滤波电路、电源电路。实验所采用的采集卡为简仪科技的USB-61210,其特点是具备4个模拟输入通道,每个通道提供高达2 MS/s的同步采样率。压电陶瓷(PZT)选用的型号为THORLABS的PK4DLP2,驱动电压为0~150 V,最大位移为5.2 μ m。位移运动信息由信号发生器设置并传输至放大器,经过放大之后连接至压电陶瓷。

图9为实验所测得一个周期经过处理的调制锯齿波,图10为一个锯齿电流周期内的自混合干涉信号。分别对调制自混合信号和锯齿波信号进行FFT,求出两个FFT峰值,相除得到一个比值,将调制自混合信号与乘以比值之后锯齿波信号相减,再使用带通滤波器过滤可得

到较为光滑的自混合干涉信号如图11所示。

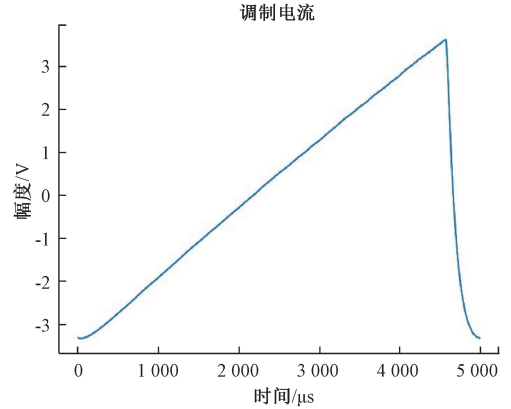


图9 一个锯齿电流周期

Fig. 9 One sawtooth current period

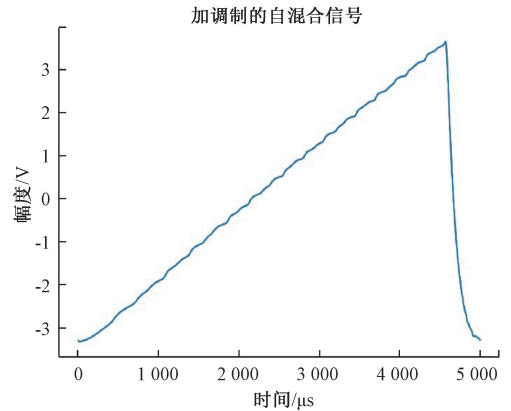


图10 一个锯齿电流周期内的自混合信号

Fig. 10 Self-mixing signal in one sawtooth current period

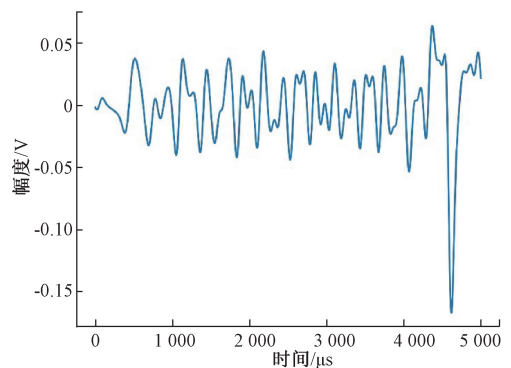


图11 去除锯齿波电流的自混合信号

Fig. 11 Self-mixing signal after subtracting injection sawtooth current signal

将自混合干涉信号经全相位频谱分析,在频域图中可得到两个独立的谱峰如图12所示,对每一个周期的全相位谱频域图进行谱峰搜索,根据式(15)还原两个物体位移。

实验结果如图13~15所示,在图13~15中调制锯齿波频率200 Hz,幅值500 mvpp。在通道一中压电陶瓷驱动电

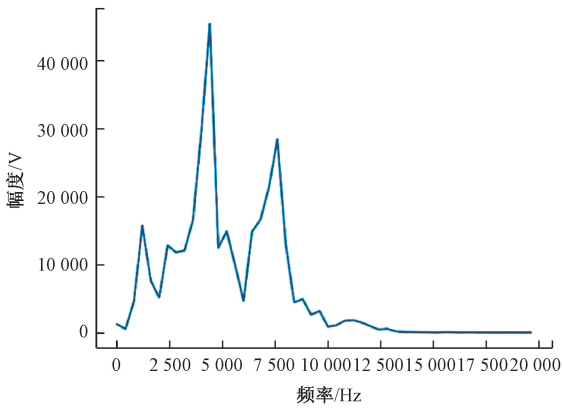
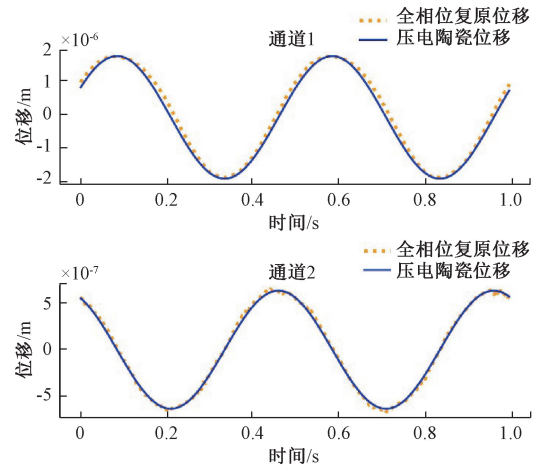
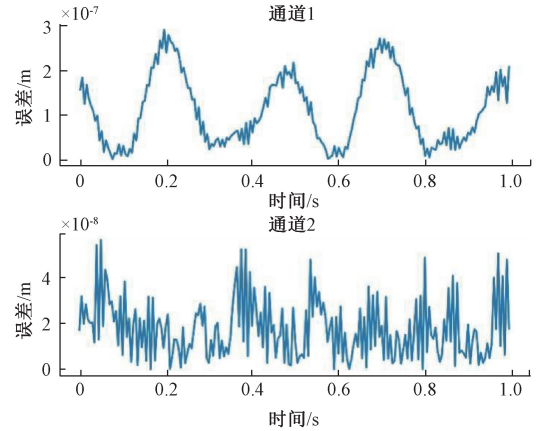


图 12 全相位频谱分析频域图

Fig. 12 All-phase spectrum analysis frequency domain diagram
 压 0~100 V, 振幅为 3.467 μm , 频率为 2 Hz。在通道二中
 压电陶瓷驱动电压 0~50 V, 振幅为 1.733 μm , 频率为
 2 Hz。图 13 中两个通道物体运动相位差为 0°, 图 14 为
 90°, 图 15 为 180°。根据误差曲线中找到最大值除以振幅
 再乘以百分数求得最后的测量误差。



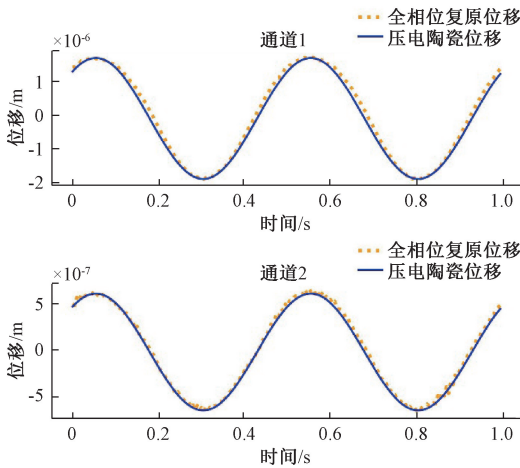
(a) 双通道物体重构结果(相位差90°)
(a) Dual-channel results with phase difference 90°



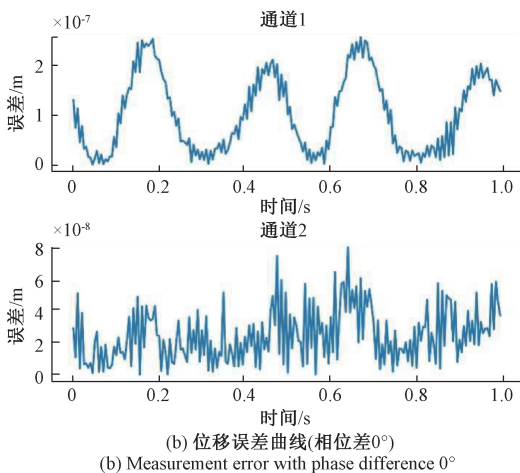
(b) 位移误差曲线(相位差90°)
(b) Measurement error with phase difference 90°

图 14 相位差 90° 实验结果

Fig. 14 Phase difference 90° experimental results



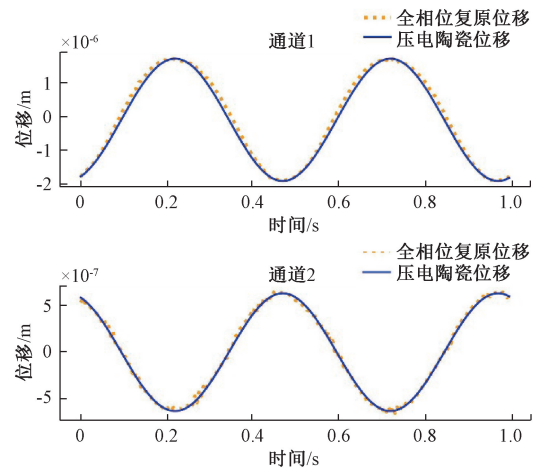
(a) 双通道物体重构结果(相位差0°)
(a) Dual-channel results with phase difference 0°



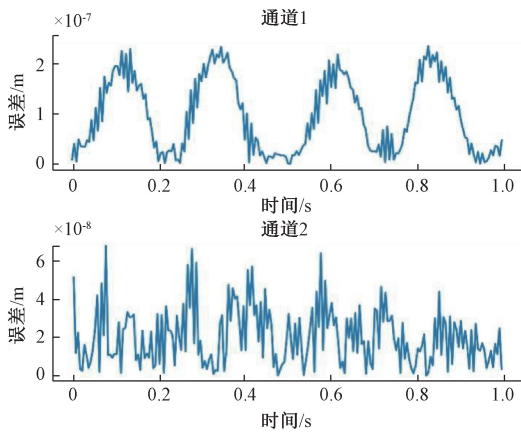
(b) 位移误差曲线(相位差0°)
(b) Measurement error with phase difference 0°

图 13 相位差 0° 实验结果

Fig. 13 Phase difference 0° experimental results



(a) 双通道物体重构结果(相位差180°)
(a) Dual-channel results with phase difference 180°



(b) 位移误差曲线(相位差 180°)
(b) Measurement error with phase difference 180°

图 15 相位差 180° 实验结果

Fig. 15 Phase difference 180° experimental results

最后的测量相对误差如表 1 所示。

表 1 测量相对误差结果

Table 1 Results of measured relative error

相位/ $^\circ$	通道 1 位移相对 测量误差/%	通道 2 位移相对 测量误差/%
0	7.97	5.98
90	8.42	3.27
180	6.71	3.93

根据上文仿真模型,依次给出相位差 0° 、 90° 、 180° 仿真结果与实验结果进行对比,仿真条件:第 1 个物体的初始外腔长度 $L_1 = 13$ cm,以正弦曲线运动,频率 2 Hz,峰峰值为 $4 \mu\text{m}$,第 2 个物体的初始外腔长度 $L_2 = 16$ cm,以正弦曲线运动,频率 2 Hz,峰峰值为 $2 \mu\text{m}$ 。调制锯齿波频率 $f_m = 200$ Hz,幅值 $I_m = 3.6$ mA,仿真结果的相对误差如表 2 所示。

表 2 仿真相对误差结果

Table 2 Results of simulated relative error

相位/ $^\circ$	通道 1 位移相对 测量误差/%	通道 2 位移相对 测量误差/%
0	0.104 8	0.267 7
90	0.107 1	0.266 2
180	0.106 7	0.257 9

经过对比远低于实验所测量的相对误差。具体原因,仿真信号中几乎没有噪声的干扰,在全相位频谱中有着较小的频谱泄露,可以减小最后结果误差,但实际测量中不存在这种情况。实验所用的压电陶瓷装置处于开环

状态,没有补偿措施,压电陶瓷装置本身具有滞回现象,不能严格按照信号发生器所给出的信号进行运动,这对最后的相对误差分析有着一定的影响。

5 结 论

本文基于自混合干涉原理,从自混合干涉通用方程出发,采用线性锯齿波电流调制下的相位测量法进行测量,基于全相位谱分析法对自混合干涉信号的相位进行精确估计,依据两个物体与激光器距离的不同来还原两个物体位移运动。首先基于三镜法-珀腔模型给出了激光自混合干涉模型,并分析反馈系数得出需在弱反馈条件下进行位移测量;然后介绍了双通道位移测量原理及全相位频谱信号处理算法,并进行了仿真验证得出方案可行;最后搭建了实验平台进行双通道位移测量,实验结果表明相对测量误差在 3.26% ~ 8.42% 之间,可以还原外部两个物体的位移信息。实验系统简单,测量条件只需两个物体外腔距离不同,可应用在一些二维测量的条件下,提高了检测效率,为自混合干涉多通道测量奠定一定基础,未来可朝小型化测量仪器和更多通道测量方向发展。

参考文献

- [1] DONATI S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(3):393-417.
- [2] KOU K, LI X F, LI L, et al. Injected current reshaping in distance measurement by laser self-mixing interferometry [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27):6280-6286.
- [3] XIANG R, WANG C, LU L. Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a fiber ring laser with ultranarrow linewidth [J]. *Journal of Optics*, 2019, 48(3):384-392.
- [4] JIANG CH L, LI CH W, YIN SH X, et al. Multiple self-mixing interferometry algorithm based on phase modulation for vibration measurement [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, DOI: 10.1007/s11082-017-0951-5.
- [5] OTSUKA K, ABE K, SANO N, et al. Two-channel self-mixing laser Doppler measurement with carrier-frequency-division multiplexing [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(9):1709-1714.
- [6] CHEN P, LIU Y W, GAO B K, et al. Modeling and experimental verification of laser self-mixing interference phenomenon with the structure of two-external-cavity feedback [J]. *Optics Communications*, 2018, 410:690-693.
- [7] LU L, ZHANG W H, YANG B, et al. Dual-channel

- self-mixing vibration measurement system in a linear cavity fiber laser [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(11):4387-4392.
- [8] CUI X Y, LIU Y W, CHEN P, et al. Measuring two vibrations using dual-external-cavity structure in a self-mixing system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, DOI:10.1016/J.OPTLASENG.2021.106557.
- [9] GAO B K, LIU Y W, JIANG C L, et al. Time-and frequency-domain verification of laser self-mixing interference with two-external-cavity feedback [J]. *Optical Engineering*, 2018, DOI: 10.1117/1.OE.57.6.066114.
- [10] 宦海,郭克伦,张雨,等. 两路反馈外腔自混合干涉信号的相位提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6):165-172.
- HUAN H, GUO K L, ZHANG Y, et al. Phase-extracting method of laser self-mixing interference signal with two feedback external cavity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6):165-172.
- [11] 高丙坤,刘径舟,张子超. 基于 EMD 算法的双外腔激光自混合微振动测量[J]. *激光与红外*, 2020, 50(6):675-681.
- GAO B K, LIU J ZH, ZHANG Z CH. Two-external-cavity laser self-mixing micro-vibration measurement based on EMD algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(6):675-681.
- [12] 黄翔东,王兆华. 全相位 DFT 抑制谱泄漏原理及其在频谱校正中的应用[J]. *天津大学学报*, 2007, 40(7):882-886.
- HUANG X D, WANG ZH H. Principle of all-phase DFT restraining spectral leakage and the application in correcting spectrum [J]. *Journal of Tianjin University*, 2007, 40(7):882-886.
- [13] WANG W M, BOYLE W J, GRATAN K T, et al. Self-mixing interference in a diode laser: Experimental observations and theoretical analysis. [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(9):1551-1558.
- [14] KOU K, LI X F, YANG Y, et al. Self-mixing interferometry based on all-phase FFT for high-precision displacement measurement [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(3):356-360.
- [15] 杨颖,李醒飞,寇科,等. 全相位谱分析在自混合干涉位移测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8):1740-1746.
- YANG Y, LI X F, KOU K, et al. Application of all-phase spectral analysis to self-mixing interferometry for displacement measurement [J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, 20(8):1740-1746.
- [16] 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):777-782.
- 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):777-782.
- [17] ZHAO Y, ZHANG B F, HAN L F. Laser self-mixing interference displacement measurement based on VMD and phase unwrapping [J]. *Optics Communications*, 2020, DOI:10.1016/j.optcom.2019.124588.
- [18] BERNAL D O, ZABIT U, BOSCH T. Study of laser feedback phase under self-mixing leading to improved phase unwrapping for vibration sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(12):4962-4971.
- [19] WANG M. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis [J]. *Optics and Laser Technology*, 2001, 33(6):409-416.
- [20] PLANTIER G, BES C, BOSCH T. Behavioral model of a self-mixing laser diode sensor [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(9):1157-1167.

作者简介



樊毓臻, 2021 年于陕西理工大学获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为激光自混合干涉。

E-mail: 944814353@qq.com

Fan Yuzhen received his B.Sc. degree from Shaanxi University of Technology in 2021. He is currently a master student at Xian University of Technology. His main research interest is laser self-mixing interference.



寇科(通信作者), 2010 年于天津大学获得学士学位, 2016 年于天津大学获得硕士和博士学位, 现为西安理工大学讲师, 主要研究方向为激光自混合干涉、激光传感与测量和固体激光技术。

E-mail: kouke@xaut.edu.cn

Kou Ke (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Tianjin university in 2010, and received his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Tianjin University in 2016, respectively. He is currently a lecturer at Xian University of Technology. His main research interests include laser self-mixing interference, laser sensing and measurement and Solid-state laser technology.