

## 三通道调频连续波激光干涉位移测量系统

盛启明<sup>1</sup>, 郑刚<sup>2\*</sup>, 张雄星<sup>2</sup>, 孙彬<sup>2</sup>, 井李强<sup>2</sup>, 韩园<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;

<sup>2</sup>西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 针对传统调频连续波激光干涉位移传感器存在谐波串扰和动态测量范围较小的问题, 研制一种具有三个独立法布里-珀罗干涉仪探测光路的三通道位移测量系统, 该系统包含三个芯片, 使用多芯片处理可以提高运算速度。通过信号线等长和软件来控制各芯片的同步测量, 可以解决各独立通道测量不同步的问题。实验结果表明, 各通道对速度为 1 mm/s 的运动目标的同步性测量误差仅为 0.46 nm, 600 mm 行程的位移测量误差的标准差小于 3 nm, 线性拟合系数在 0.99997 以上, 说明该系统可以实现三维运动目标的位移测量。

**关键词** 测量; 调频连续波; 位移测量; 三通道; 同步采样; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0312004

### Three-Channel Frequency-Modulated Continuous-Wave Laser Interferometric Displacement Measurement System

Sheng Qiming<sup>1</sup>, Zheng Gang<sup>2\*</sup>, Zhang Xiongxing<sup>2</sup>, Sun Bin<sup>2</sup>, Jing Liqiang<sup>2</sup>, Han Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

<sup>2</sup>School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** Aiming at the problems of harmonic crosstalk and small dynamic measurement range in traditional frequency modulation continuous wave laser interferometer displacement sensors, a three-channel displacement measurement system with three independent Fabry-Perot interferometer detection optical paths is developed. The system includes three chips, and the operation speed can be improved by using multi-chip processing. The simultaneous measurement of each chip is controlled by the equal length of the signal line and software, which can solve the problem of non-synchronization of the independent channel measurement. The experimental results show that the synchronization measurement error of each channel for a moving target with a velocity of 1 mm/s is only 0.46 nm, the standard deviation of the displacement measurement error of a 600 mm stroke is less than 3 nm, and the linear fitting coefficient is above 0.99997, indicating that this system can achieve the displacement measurement of three-dimensional moving targets.

**Key words** measurement; frequency-modulated continuous-wave; displacement measurement; three-channel; synchronous sampling; Fabry-Perot interferometer

**OCIS codes** 120.3180; 120.2230; 120.3930; 120.5050

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-07-06; 录用日期: 2020-07-15

\*E-mail: zhengg@xatu.edu.cn

## 1 引言

高精度的位移测量是研发数控机床和光刻机等高端装备的重要环节之一,激光干涉位移测量是高精度位移测量的一种方式,在数控机床检测和精密加工等领域有着广泛的应用范围<sup>[1-2]</sup>。调频连续波(FMCW)激光干涉测量技术是一种新型的相干探测技术,能够在光源的相干范围内实现高精度和高分辨率的位移测量<sup>[3-6]</sup>,此外该测量技术还可以实现绝对距离、温度、压力和振动等物理量的高精度测量<sup>[7-10]</sup>。

单光路的 FMCW 激光干涉测量系统无法进行多维多点的目标测量,而多通道的位移测量系统利用其阵列分布的优势可以探测空间内多维多点的物理量,则多通道的位移测量系统具有广阔的应用前景。日本学者 Ula 等<sup>[11]</sup>使用了高精度 FMCW 系统来实现三维轮廓的测量。天津大学的 Shi 等<sup>[12]</sup>使用了辅助干涉仪来提高 FMCW 系统的测量精度。郑刚等<sup>[13-14]</sup>提出了一种基于频分复用结构的三路 FMCW 干涉位移传感器,使用带通滤波器来分离各光路频域中的拍频信号,并且在测量范围内可以获得较高的测量精度,但该结构中的各测量通道共用一个光电探测器,所以会在各光路之间引入谐波串扰,从而影响测量精度,为此限制了传感器的动态测量范围。

为了避免谐波串扰对测量精度和动态测量范围的影响以及提高各通道的处理速度,本文设计一种具有独立探测光路和处理器的三通道 FMCW 激光干涉位移测量系统,各探测光路的相互独立可以避免光路间的谐波串扰。各测量通道均使用独立的处理器以提高处理速度,采用软硬件控制的多通道同步采样控制方法解决各光路测量不同步的问题,采用相位检测算法实现位移增量的解算。实验结果表明,该系统能够实现三通道位移的同步测量,且测量精度和动态范围明显优于传统的频分复用测量系统。

## 2 测量原理

光学 FMCW 是频率受到连续调制的光波,两个

经过锯齿波调制的相干光源沿着不同的路径进行传播,在空间中一点会合并发生干涉<sup>[4]</sup>。两个经过锯齿波调制的相干光波和拍频信号的角频率波形如图 1 所示,其中实线代表参考波的角频率,虚线代表信号波的角频率,点划线代表干涉形成拍频信号的角频率, $\tau$  表示信号波相对于参考波的延迟时间, $\omega_0$  表示调制周期中心角频率, $T_m$  表示调制信号的周期。

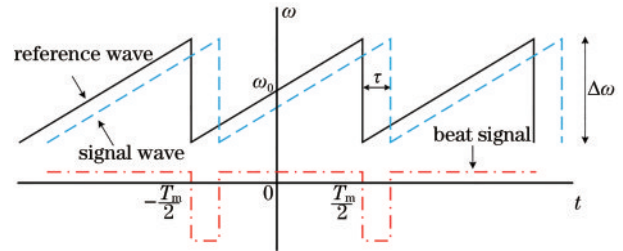


图 1 不同信号的角频率波形

Fig. 1 Angular frequency waveforms of different signals

在一个调制周期 $(-T_m/2 + \tau, T_m/2)$ 内,参考波和信号波的波函数可分别表示为

$$E_1(t) = E_{01} \exp [j(\alpha t^2/2 + \omega_0 t + \varphi_0)], \quad (1)$$

$$E_2(\tau, t) =$$

$$E_{02} \exp \{j[\alpha(t - \tau)^2/2 + \omega_0(t - \tau) + \varphi_0]\}, \quad (2)$$

式中: $E_{01}$  表示参考波的电场振幅; $E_{02}$  表示信号波的电场振幅; $\alpha$  表示角频率的调制率; $t$  表示时刻; $\varphi_0$  表示光源的初相位。当这两个光波发生干涉时,合成场的光强  $I(\tau, t)$  可表示为

$$I(\tau, t) = |E_1(t) + E_2(\tau, t)|^2 =$$

$$I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\alpha \tau t + \omega_0 \tau - \alpha \tau^2/2) =$$

$$I_0 [1 + V \cos(\alpha \tau t + \omega_0 \tau - \alpha \tau^2/2)], \quad (3)$$

式中: $I_1$  和  $I_2$  分别表示参考波和信号波的光强,即  $I_1 = E_{01}^2, I_2 = E_{02}^2$ ;  $I_0$  表示拍频信号的平均光强,即  $I_0 = I_1 + I_2$ ;  $V$  表示拍频信号的对比度,即  $V = 2\sqrt{I_1 I_2}/(I_1 + I_2)$ 。通常使用频率、波长和光程差(OPD)来描述光波的干涉现象,因此每个调制周期内的拍频信号可表示为

$$I(x_{\text{OPD}}, t) = I_0 \left[ 1 + V \cos \left( 2\pi \Delta \nu v_m x_{\text{OPD}} t / c + 2\pi x_{\text{OPD}} / \lambda_0 \right) \right] = I_0 [1 + V \cos(2\pi \nu_b t + \phi_{b0})], \quad (4)$$

式中: $\Delta \nu$  表示光学频率调制范围; $v_m$  表示调制信号的频率,即  $v_m = 1/T_m$ ;  $c$  表示真空中的光速; $\lambda_0$  表示中心光波长; $\nu_b$  和  $\phi_{b0}$  分别表示拍频信号的频率和初相位。由于  $x_{\text{OPD}} = 2nd$ , 其中  $n$  表示空气的折射率,

即  $n \approx 1$ ,  $d$  表示部分反射镜表面与待测物体表面之间的距离。 $\phi_{b0}$  可写为

$$\phi_{b0} = 2\pi x_{\text{OPD}} / \lambda_0 = 4\pi nd / \lambda_0. \quad (5)$$

测量拍频信号的相对相位  $\Delta \phi_{b0}$ , 就能够得到目

标的相对位移  $\Delta d$ , 表达式为

$$\Delta d = \lambda_0 \Delta \phi_{b0} / 4\pi n_0 \quad (6)$$

### 3 系统设计

#### 3.1 光路与硬件设计

构建的三通道 FMCW 激光干涉位移测量系统<sup>[15]</sup>如图 2 所示, 该测量系统由一个 DFB (Distributed Feedback) 半导体激光器、一个 1×3 的光纤分束器、三个光纤环形器、三个光纤准直器和三个光电探测器组成。半导体激光器发射频率连

续调制的激光, 激光通过一个 1×3 的光纤分束器后分别入射至三个光纤环形器的入射端口 (端口 1), 并从端口 2 出射至光纤准直器。准直器出射的一部分激光由参考镜 (部分反射镜) 反射成参考光, 另外一部分激光透过参考镜出射至待测目标后反射回去形成信号光。参考光和信号光在端口 2 发生干涉以产生拍频信号, 信号由准直器耦合进光纤中, 从环形器端口 2 入射至端口 3 后被光电二极管检测, 最后光电二极管将光信号转换为电信号并传送至电路系统。各探测光路互相独立, 不存在谐波串扰。

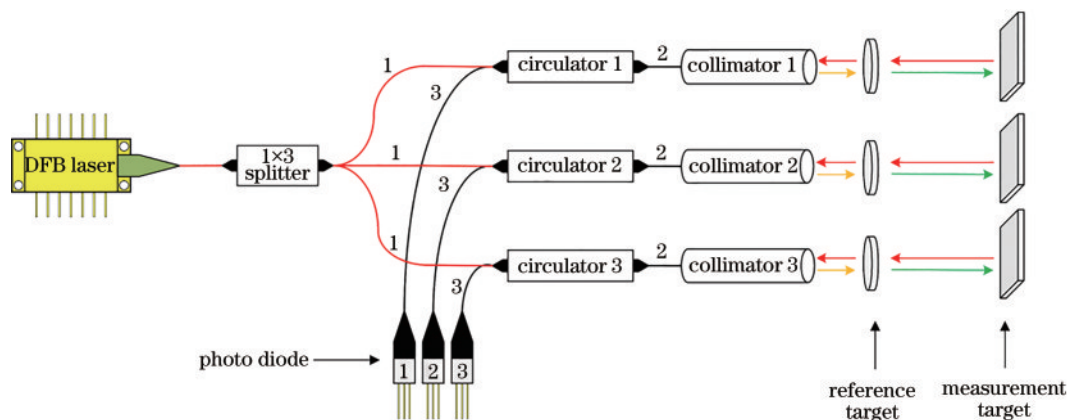


图 2 三通道 FMCW 激光干涉系统示意图

Fig. 2 Schematic of three-channel FMCW laser interference system

三通道 FMCW 激光干涉系统的控制电路如图 3 所示, 包括激光器驱动电路、温控电路和信号处理电路等。主控模块以三个微处理器 (MCU) 为核心, 为了提高算法的效率, 每个 MCU 处理一个通道的拍频信号。第一路 MCU 为主控制芯片 (MCU-1),

负责产生激光器驱动信号并通过同步信号来控制 MCU-2 和 MCU-3 进行同步采样。

激光器驱动电路由集成运算放大器 (OPA) 的 OPA551 和 OPA2277 构成, 如图 4 所示, 其中 GND 表示电线接地端, DA 表示 MCU1 的模拟电压输出引

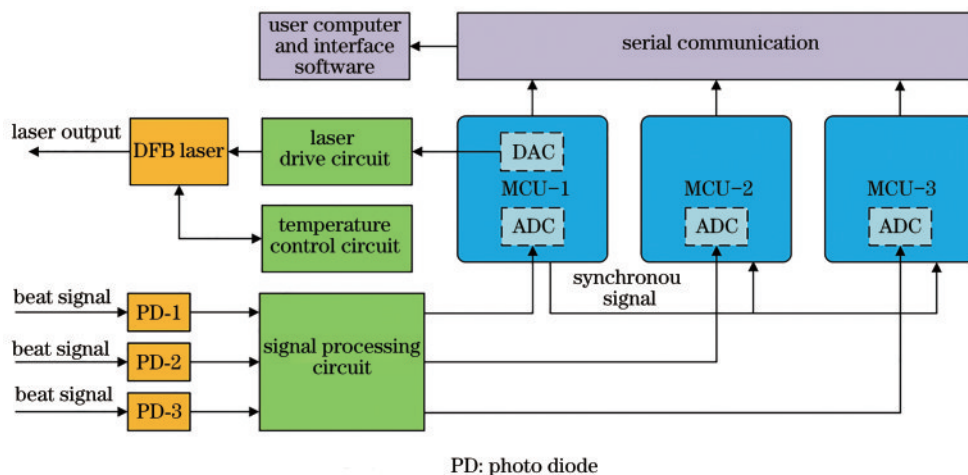


图 3 三通道 FMCW 激光干涉仪的控制电路

Fig. 3 Control circuit of three-channel FMCW laser interferometer



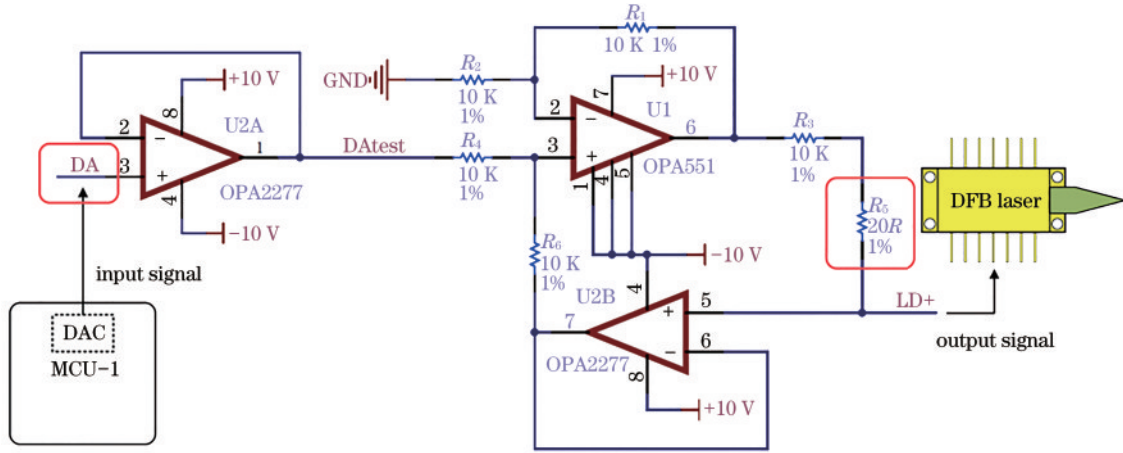


图 4 激光器驱动电路的原理图  
Fig. 4 Schematic of laser drive circuit

脚,DAtest为表示信号测试接口,LD+表示激光器驱动正端,U1为表示OPA551,U2A表示OPA2277双通道运算放大器的第一通道,U2B表示OPA2277双通道运算放大器的第二通道。由OPA551构成同相求和运算电路,由OPA2277构成电压跟随电路,输出的负载为半导体激光器。激光器驱动电路是一种实用的电压转电流驱动电路,输出电流 $I = U_{DAC}/R_5$ ,即将DAC(Digital-to-Analog Converter)的输出电压 $U_{DAC}$ 转换成激光器的驱动电流, $R_5$ 为精密低温漂电阻,值为 $20\ \Omega$ 。MCU通过12 bit的DAC采用线性插值的方法生成幅值为 $1.2\sim 1.4\text{ V}$ 的锯齿波电压,即产生 $60\sim 70\text{ mA}$ 的激光器驱动电流。理论上,电流的控制精度为 $0.037\text{ mA}$ ,实测的电流误差为 $0.07\text{ mA}$ 。

由于半导体激光器的输出光功率受温度的影响较大,因此通过集成温度控制芯片MAX1978来设计激光器温控电路,该芯片通过外部模拟电路来控制激光器的热电冷却器(TEC)以实现温度的闭环控制。使用光功率计测试激光器输出的平均光功率为 $9.8\text{ mW}$ ,3 h内最大变化量为 $0.0171\text{ mW}$ 。使用光谱仪测试激光器输出的平均波长为 $1550.1109\text{ nm}$ ,最大波长变化量为 $0.003\text{ nm}$ ,所以造成的位移测量误差可以忽略不计。

信号处理电路中的集成运算放大器AD822可以对拍频信号进行放大和低通滤波操作,从而将微弱的拍频信号放大到适合ADC(Analog-to-Digital Converter)采集的范围,这可以减少光电二极管中的高频噪声对拍频信号的干扰。

为了实现三通道同步测量,则各MCU的采样与处理过程必须同步进行。当设计电路时,同步信号线和时钟线均采用等长处理以减少由上电时序

与信号线长度差异造成的各芯片处理延时,各控制芯片相关信号线的走线长度如表1所示。

表 1 各芯片信号线的走线长度  
Table 1 Routing length of each chip signal line

MCU	Wire length of clock /mm	Wire length of synchronous signal /mm
MCU 1	49.529	0
MCU 2	49.535	22.276
MCU 3	49.531	22.294

从表1可以看到,芯片启动时序的时钟线长度差异不超过 $0.01\text{ mm}$ ,各芯片间同步信号线的长度差异不超过 $0.02\text{ mm}$ 。MCU 1发出的同步信号到达MCU 2和MCU 3的信号延时不超过 $0.1\text{ ps}$ ,可以忽略不计,这可以最大程度地保证硬件信号流的一致。三通道FMCW激光干涉位移测量系统的电路板如图5所示。

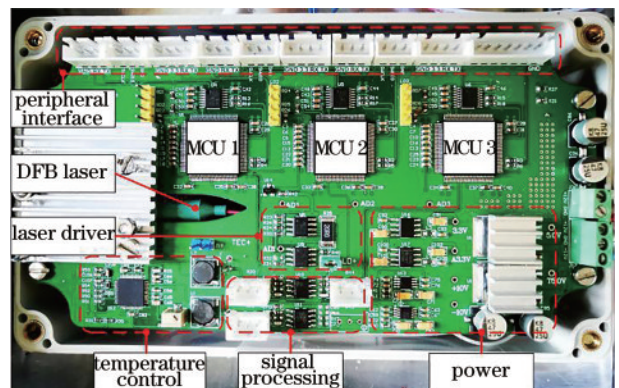


图 5 三通道FMCW激光干涉系统的电路板  
Fig. 5 Circuit board for three-channel FMCW laser interference system

### 3.2 软件设计

直接内存访问(DMA)可以直接将处理器的内/寄存器与 DAC 和 ADC 等外设相连,并不需要中央处理器(CPU)通过总线来干预。因此,使用 DMA 可以实现锯齿波信号的调制与拍频信

号的采集,而 CPU 只进行算法处理可以提高程序的执行效率。信号解算出的结果通过通用异步收发器(UART)经 RS232 串口发送给计算机的应用程序,各芯片程序的执行时序如图 6 所示。

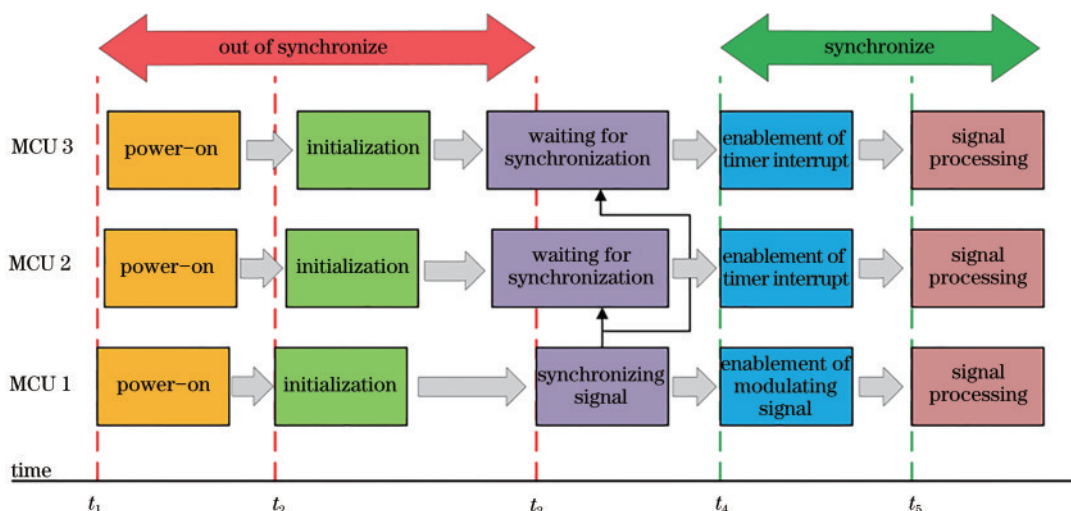


图 6 各芯片程序执行时序

Fig. 6 Execution sequence of each chip program

各芯片在  $t_1$  时刻同时上电并在  $t_2$  时刻开始程序的初始化,MCU 1 在  $t_3$  时刻发出同步信号,MCU 2 和 MCU 3 在  $t_2$  时刻后一直等待该同步信号。尽管采用硬件信号线等长处理,但各芯片的上电时间和启动时序也会存在较小偏差, $t_3$  时刻前各芯片都无法保持同步。MCU 1 产生同步信号后在  $t_4$  时刻开启定时器以产生周期性调制信号,MCU 2 和 MCU 3 收到同步信号后在  $t_4$  时刻开启,并且此时中断 MCU 1 定时器,保证各 MCU 在同一时刻触发定时器中断以同步对数据进行处理,从而同步解算目标的位移信息。

拍频信号的相位检测流程如图 7 所示。首先使

用 MCU 对采集的原始拍频信号进行滑动滤波和幅值校正,得到近似余弦的拍频信号;然后找到各极值点的大小和位置并通过 18000 点反余弦查表法解算该周期内拍频信号的相位大小;最后累计得到相位的增量<sup>[16]</sup>并根据(6)式计算被测目标的位移量。该算法的理论相位分辨率为  $0.088^\circ$ ,位移分辨率为  $0.2 \text{ nm}$ ,实际测量中会受到 ADC 量化误差以及调频非线性的影响。

### 4 实验与结果分析

为了减少空气扰动以及振动等外界因素对测量的干扰,将实验装置固定在气浮光学平台上并使用防尘防风罩来保护。使用 Thorlabs 公司的 DDS600/M 直驱线性平移台进行实验,该线性平移台的行程为  $0\sim 600 \text{ mm}$ ,分辨率为  $100 \text{ nm}$ ,轴向精度为  $\pm 12 \mu\text{m}$ 。使用图 2 的光学干涉结构,将一个全反镜安装在平移台的滑轨上并作为待测目标,将参考目标(反射率为 20% 的部分反射镜)粘贴在光纤准直器前端并置于金属管内作为光纤探头,将光纤探头与各通道的法兰接口连接,实验装置如图 8 所示。由于使用的是反射式测量结构,系统的理论测量范围是激光光源相干长度的  $1/2$ ,但受到噪声以及光源信号衰减的影响,实际的最大测量范围为

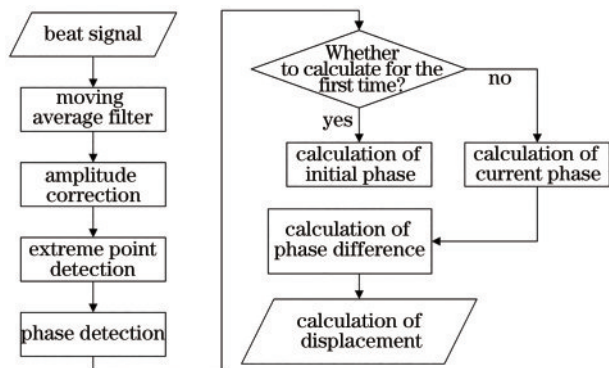


图 7 拍频信号的相位检测流程图

Fig. 7 Flowchart of phase detection of beat signal



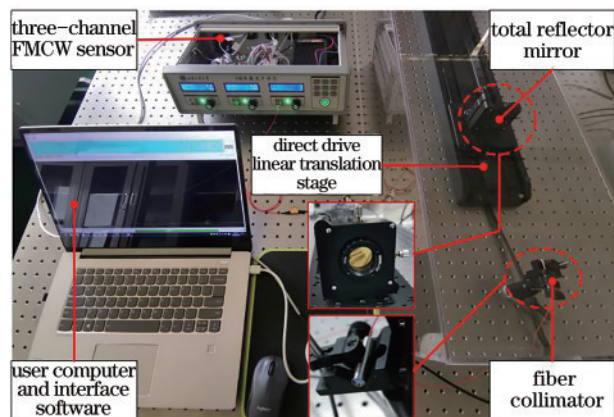


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental device

5 m。受限于平移台的行程,实验过程中的位移范围为 0~600 mm。实验中,对激光器进行 10 kHz 的

频率调制,并在每个调制周期内进行 280 点 ADC 采样,采样率为  $2.8 \times 10^6$ 。

#### 4.1 同步性测试

使用三个通道对同一静止目标进行测量,可以得到两个调制周期内的拍频信号,如图 9 所示。图 9(a)为未加同步信号的拍频信号,图 9(b)为添加同步信号后的拍频信号。

由于各通道同时测量同一静止目标(法布里-珀罗腔长不变),所以采集的拍频信号的相位一致,因此相位检测算法提取的特征点(极值点)位置也应一致。为了验证各通道的同步性,提取各通道中拍频信号的 12 个特征点位置,结果如图 10 所示。图 10(a)为未加同步信号的各通道特征点位置分布,图 10(b)为添加同步信号后的各通道特征点位置分布。

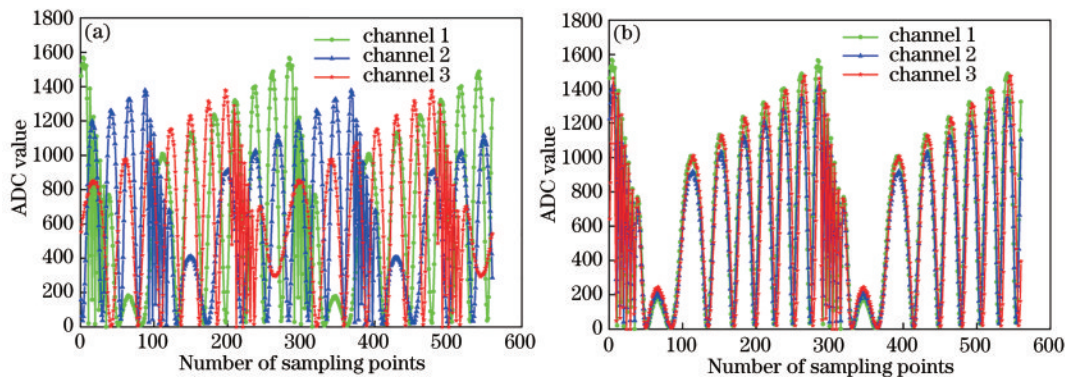


图 9 同步信号添加前后的拍频信号。(a)添加前;(b)添加后

Fig. 9 Beat signal before and after adding synchronization signal. (a) Before adding; (b) after adding

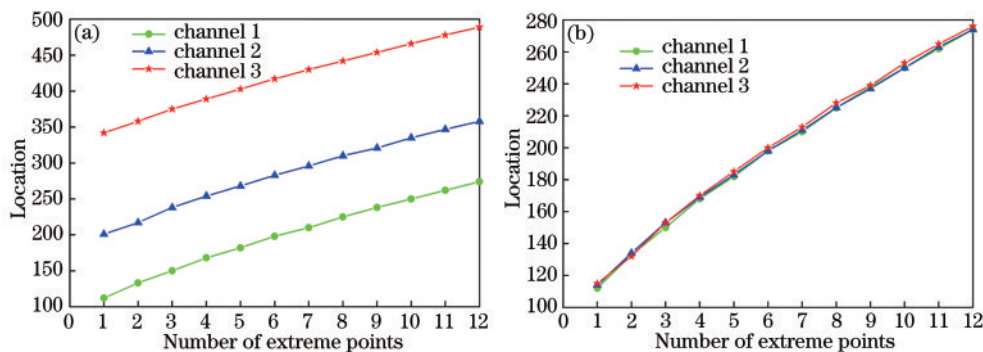


图 10 同步信号添加前后特征点的相关性。(a)添加前;(b)添加后

Fig. 10 Correlation of feature points before and after adding synchronization signal. (a) Before adding; (b) after adding

从图 10 可以看到,当未加同步信号时,通道 2 与通道 1 的特征点差异的均值超过 85 点,通道 3 与通道 1 的特征点差异的均值超过 220 点;添加同步信号后,通道 2 与通道 1 的特征点误差的均值不超过 0.9 点,通道 3 与通道 1 的特征点误差的均值

不超过 1.3 点;添加同步信号后,各通道的采样误差减小 98.9%,在  $2.8 \times 10^6$  的采样率下造成的采样误差为  $0.46 \mu\text{s}$ ,对 1 mm/s 运动目标的同步性测量误差仅为 0.46 nm。实验结果表明,各通道的采样同步性较好,可以保证使用三个通道同步测

量结果的准确性。

### 4.2 位移及稳定性测试

通过线性平移台来控制滑轨以 1 mm/s 的速度运动,运动范围为 0~600 mm,记录各通道的位移测

量结果,每秒记录一次,共计 500 s,误差散点如图 11 所示。从图 11 可以看到,各通道测量误差的标准差分别为 2.27, 2.99, 2.81 nm,说明系统各通道在 0~600 mm 动态范围内的测量误差优于 3 nm。

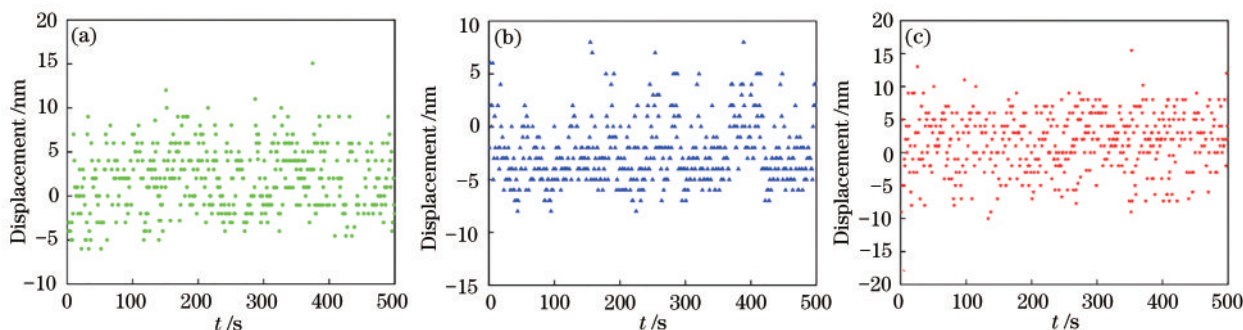


图 11 不同通道的位移误差散点。(a)通道 1; (b)通道 2; (c)通道 3

Fig. 11 Scatter points of displacement errors of different channels. (a) Channel 1; (b) channel 2; (c) channel 3

对固定目标进行稳定性测量实验,将待测目标固定在静止的光学平台上,使用三个通道同时对该目标进行测量,系统每秒输出一次位移测量结果,测量时长为 1 h,重复测量 6 次并记录测量结果的均值和标准差,每次测量均是将三个通道的测量结果取平均,结果如表 2 所示。从表 2 可以看到,当测量固定目标时,系统在 1 h 内输出结果的均值在 0.4 nm 以内,标准差小于 2.2 nm,说明该系统具有良好的稳定性。

表 2 稳定性测试结果

Table 2 Stability test results

Number of experiments	Mean/nm	Standard deviation/nm
1	-0.289650	2.64858
2	0.265550	1.79282
3	-0.609850	2.52146
4	-0.163575	1.75456
5	0.236130	2.15621
6	0.596330	2.02113
Average	0.360180	2.14913

### 4.3 线性度测试

使用直驱线性平移台进行线性度实验,使用三个通道对滑轨上的同一待测目标进行测量。通过线性平移台来控制滑轨以 1mm/s 的速度运动,运动范围为 0~600 mm,以线性平移台的数值为标准,滑轨每移动 100 mm 对各通道测量结果进行记录,结果如图 12 所示。从图 12 可以看到,经过计算各通道测量结果的线性回归  $R^2$  分别为 0.99998、0.99997 和 0.99997,说明各通道具有良好的线性度。

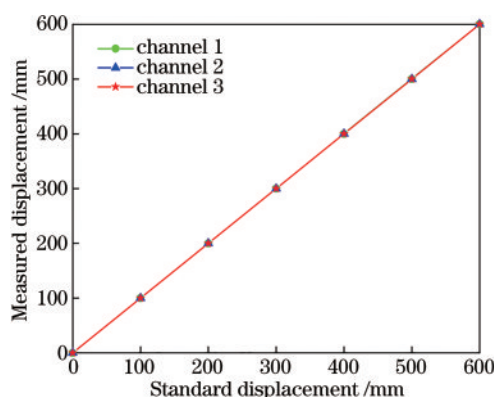


图 12 三个通道的线性度曲线

Fig. 12 Linearity curves of three channels

## 5 结 论

法布里-珀罗干涉仪探测光路可以消除谐波串扰对测量精度和动态测量范围的影响,利用多芯片处理可以提高解算速度,通过信号线等长和软件来控制各芯片的同步测量,各通道的同步测量误差仅为 0.46 nm,各通道测量误差的标准差均小于 3 nm,且线性拟合系数在 0.99997 以上,多次重复实验的稳定性误差小于 2.2 nm。实验结果表明,该系统具有良好的稳定性和线性度,能够同时对三个目标进行一维位移测量,或对同一目标进行三维位移测量,对拓展 FMCW 激光干涉位移测量技术在三维形貌的测量以及精密加工设备的应用具有重要意义。

### 参 考 文 献

[1] Ma L Q, Wang L D, Jin S Y, et al. Traceability

- status and developing trend of industrial large-scale measuring instruments[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2006, 26(6): 1-5.
- 马骊群, 王立鼎, 靳书元, 等. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势[J]. *计测技术*, 2006, 26(6): 1-5.
- [2] Xian Y M. Applications of laser interferometer[J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(2): 79-85.
- 姜一民. 激光干涉仪的应用[J]. *工具技术*, 2015, 49(2): 79-85.
- [3] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(21): 4189-4198.
- [4] Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave (FMCW) interferometry [M]. New York: Springer-Verlag, 2005.
- [5] Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave interferometers[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(12): 2723-2730.
- [6] Zheng J. Reflectometric fiber optic frequency-modulated continuous-wave interferometric displacement sensor[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(12): 124401-124405.
- [7] Zheng W F. Design of a high resolution temperature measurement system based on optic frequency-modulated continuous-wave technology [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2015.
- 郑万福. 基于激光调频连续波技术的高精度温度测量系统[D]. 杭州: 中国计量学院, 2015.
- [8] Wang H, Zheng G, Chen H B, et al. Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180506.
- 王欢, 郑刚, 陈海滨, 等. 调频连续波激光干涉光纤温度传感器[J]. *光电工程*, 2019, 46(5): 180506.
- [9] Jing L Q, Zheng G, Sun B, et al. Measurement of distance to moving target using frequency-modulated continuous-wave interference technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1204001.
- 井李强, 郑刚, 孙彬, 等. 基于调频连续波干涉技术的运动目标距离测量[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1204001.
- [10] Ji N K, Zhang F M, Qu X H, et al. Ranging technology for frequency modulated continuous wave laser based on phase difference frequency measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1104002.
- 吉宁可, 张福民, 曲兴华, 等. 基于相位差测频的调频连续波激光测距技术[J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1104002.
- [11] Ula R K, Noguchi Y, Iiyama K. Three-dimensional object profiling using highly accurate FMCW optical ranging system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(15): 3826-3833.
- [12] Shi G, Wang W, Zhang F M. Precision improvement of frequency-modulated continuous-wave laser ranging system with two auxiliary interferometers[J]. *Optics Communications*, 2018, 411: 152-157.
- [13] Tian Q, Zhang E Y, Zheng G, et al. Multiplexing technique of optical fiber displacement sensor based on heterodyne interference with frequency-modulated semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(6): 771-777.
- 田芊, 章恩耀, 郑刚, 等. 激光调频光纤位移传感器多路复用技术的研究[J]. *光学学报*, 1995, 15(6): 771-777.
- [14] Zheng J. Triple-sensor multiplexed frequency-modulated continuous-wave interferometric fiber-optic displacement sensor [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(12): 2189-2196.
- [15] Zheng G, Gao M, Liu W G, et al. Frequency modulated continuous wave laser interference fiber displacement sensor and its displacement detection method: CN201711418334.0[P]. 2018-05-18.
- 郑刚, 高明, 刘卫国, 等. 一种调频连续波激光干涉光纤位移传感器及其位移检测方法: CN201711418334.0[P]. 2018-05-18.
- [16] Zhang X, Zheng G, Jing L, et al. A novel digital phase detection method for frequency-modulated continuous-wave interferometric fiber-optic displacement sensor[J]. *Optik*, 2019, 183: 742-750.