

文章编号 1004-924X(2024)03-0357-09

基于卡尔曼滤波的激光外差干涉 位移测量误差补偿

周志鹏, 楼盈天*, 王升帆, 陈宇, 陈本永
(浙江理工大学 信息科学与工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对激光外差干涉仪测量过程中测量镜随被测对象旋转而导致的位移测量误差,提出了一种基于卡尔曼滤波的激光外差干涉位移测量补偿方法。根据测量镜转角和测量光束光斑位置变化对应关系,利用位置敏感探测器(PSD)和位置电压信号卡尔曼滤波方法测得降噪后的光斑位置变化,从而获得更为准确的转角测量结果,最后根据转角与位移的解耦数学模型利用测得的转角进行位移补偿。为验证滤波算法和位移补偿方法的可行性和有效性,搭建激光外差干涉测量实验装置,分别进行光斑位置稳定性测量实验、角度测量验证实验和激光外差干涉位移测量补偿实验。实验结果表明:经卡尔曼滤波降噪后系统装置测得的光斑位置抖动标准差从 $0.52\text{ }\mu\text{m}$ 降至 $0.18\text{ }\mu\text{m}$,测量的转角与索雷博六自由度转台的转角偏差在 $\pm 1.38\times 10^{-4}^{\circ}$ 内,对 M-531. DD 线性导轨 200 mm 量程内的位移和转角进行测量,将测得的转角进行位移补偿后,系统的位移测量结果与 M-531. DD 线性导轨位移的标准差从 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $0.29\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词:激光外差干涉;位移测量;误差补偿;卡尔曼滤波

中图分类号:TH741 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20243203.0357

Error compensation for laser heterodyne interferometric displacement measurement based on Kalman filter

ZHOU Zhipeng, LOU Yingtian*, WANG ShengFan, CHEN Yu, CHEN Benyong

(School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University,
Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: louyt@zstu.edu.cn

Abstract: In laser heterodyne interferometry, displacement measurement errors arise from the rotation of the measuring mirror alongside the measured object. To address this, the paper introduces a compensation technique using a Kalman filter for laser heterodyne interferometric displacement measurements. By analyzing the correlation between the measuring mirror's rotational angle and the measuring beam spot's position shift, a position sensitive detector (PSD) is employed to gauge the rotational angle. Enhancing angle measurement precision, the Kalman filter method is utilized to diminish the noise in the PSD's position voltage signal, thereby accurately determining the spot's position shift. Subsequently, displacement is compensated based on the measured rotational angle, utilizing a decoupling mathematical model that separates rotational angle from displacement. To assess the proposed filtering algorithm and displacement measurement

收稿日期:2023-10-19;修订日期:2023-11-14.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52005449);浙江理工大学科研业务费专项资金资助(No. 23222133-Y)

compensation method's viability and efficiency, an experimental laser heterodyne interferometric setup was established. Experiments conducted included spot position stability measurement, rotational angle measurement verification, and laser heterodyne interferometric displacement measurement and compensation. Results demonstrate a reduction in the standard deviation of spot position drifts from $0.52\text{ }\mu\text{m}$ to $0.18\text{ }\mu\text{m}$ post-Kalman filter denoising. Moreover, the discrepancy between measured angles and the Thorlabs 6-DOF motion stage's rotational angles remain within $\pm 1.38 \times 10^{-4}^\circ$. Displacement and rotational angle of the M-531.DD linear stage over a 200 mm range are measured. Following compensation with the measured angle, the standard deviation between the displacement measurement results and the M-531.DD linear stage's positionings decreases from $1.55\text{ }\mu\text{m}$ to $0.29\text{ }\mu\text{m}$.

Key words: laser heterodyne interferometry; displacement measurement; error compensation; Kalman filtering

1 引 言

激光外差干涉测量具有分辨率高、抗干扰能力强等优点,被广泛应用于超精密测量、工业制造等领域,是生产精密零部件和检测的关键技术^[1-3]。在激光干涉位移测量中,可采用角锥棱镜或者平面镜作为测量镜。由于测量镜与被测对象刚性连接,位移测量结果存在多自由度运动误差。以角锥棱镜为测量镜,位移测量结果与偏摆、俯仰和滚转三个转角误差以及垂直、水平直线度误差两个平移误差耦合。角锥棱镜随被测对象旋转时,转角虽然不改变反射光束方向,但会带来测量光轴上的线位移测量误差,且转角和直线度误差耦合而产生光束平移,导致波前相位移动而产生额外的位移测量误差。相较于角锥棱镜,平面镜因其特性,其位移测量结果不受滚转误差、垂直与水平直线度误差的影响,只与偏摆、俯仰两个转角误差耦合。平面镜随被测对象旋转时,转角会引入测量光轴上的位移测量误差与反射光束方向变化而产生的位移测量误差。平面镜位移测量相对容易实现转角误差解耦^[4-5]。

为消除上述平面镜旋转带来的位移测量影响,需先测出测量镜转角^[6],再根据转角与位移的解耦数学模型对位移进行补偿。相比于偏振泄露等因素造成的非线性误差,测量镜转角误差会给位移测量结果带来更大的影响^[7-8]。目前,激光外差干涉仪转角测量有激光准直方法^[9-11],该方法在测量位移的同时,用位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)等辅助工具探测光

斑位置的变化来测量转角。Feng等^[12]提出了一种可进行六自由度同时测量的激光外差干涉装置,采用外差干涉原理测量位移,转角通过位置光电探测器和凸透镜测得的光斑位置偏移量算得。Zhang等^[13]提出了一种带有转角补偿的激光外差干涉仪,改进光路设计用偏振分光镜PBS把测量光另分开一束结合凸透镜和位置敏感探测器进行测量镜的转角测量。Ren等^[14]也是采用位置敏感探测器和凸透镜对二维转角进行测量,建立姿态角测量模型和分析光斑畸变,并且采用样条插值法减小了PSD非线性的影响。Wang等^[15]提出转角测量系统,还分析了透镜和PSD轴向、径向等安装偏离误差并且进行校正,提高了转角测量精度。

这类激光准直方法大多利用凸透镜和位置敏感探测器探测光斑位置变化来进行转角测量,然后根据测得转角对位移进行补偿。因此,位移测量精度取决于转角的测量精度,而转角的测量精度取决于光斑位置变化量的探测精度。但是在实际应用中,探测器噪声等因素限制了光斑位置测量的稳定性和准确性,导致后续转角测量误差,为此需要对光斑位置信号进行降噪处理。

本文利用PSD检测激光外差干涉仪测量镜转角导致的光斑位置变化,通过输入光斑位置信号观测数据,采用卡尔曼滤波对光斑位置状态进行预测,对含噪声的光斑位置信号进行处理,求得误差为最小的真实信号估计值^[16-19],从而对光斑位置信号进行降噪,获得更为准确的转角测量结果,再根据补偿模型对位移测量结果进行补

偿,最终实现高精度的激光外差干涉位移测量。

2 基于卡尔曼滤波算法的光斑位置测量

2.1 测量原理

PSD能够根据探测光斑位置输出4路光电流^[20-21]。将PSD的4个光电流进行运放后,可以得到包括光斑位置水平方向电压信号 V_x 、垂直方向电压信号 V_y 和总电压信号 V_{sum} ,分别表示为:

$$V_x = R \times [(I_A + I_B) - (I_C + I_D)], \quad (1)$$

$$V_y = R \times [(I_B + I_C) - (I_A + I_D)], \quad (2)$$

$$V_{\text{sum}} = R \times (I_A + I_B + I_C + I_D), \quad (3)$$

式中: I_A, I_B, I_C 和 I_D 是二维PSD表面电极产生与光斑位置相关联的4个光电流, R 是运放电路的等效电阻。

通过模数转换器ADC对PSD三路代表光斑位置的直流电压进行采集,FPGA采用卡尔曼滤波算法对ADC采集的直流电压信号进行滤波去噪。以电压信号 V_x 为例,建立卡尔曼预测信号电压模型为:

$$\hat{V}_k = a \cdot V_{k-1} + b \cdot u_{k-1}, \quad (4)$$

式中: $\hat{V}_k$ 为先验电压值, V_{k-1} 为上一时刻滤波后的电压值, u_{k-1} 为控制量, a 和 b 为状态系数。由于信号电压没有控制状态的变量,式(4)可简化为:

$$\hat{V}_k = V_{k-1}. \quad (5)$$

对信号电压 V_x 进行最优状态估计,即此刻滤波后的电压为:

$$V_k = \hat{V}_k + G_k(V_{xk} - \hat{V}_k), \quad (6)$$

式中: V_{xk} 为此时ADC采集到的信号电压 V_x , G_k 为卡尔曼滤波增益。 G_k 可表示为:

$$G_k = \frac{\hat{P}_k}{\hat{P}_k + r}, \quad (7)$$

式中: $\hat{P}_k$ 是先验电压估计误差协方差, r 是电压测量噪声协方差。 $\hat{P}_k$ 可表示为:

$$\hat{P}_k = P_{k-1} + q, \quad (8)$$

式中: P_{k-1} 为上一时刻的电压估计误差协方差, q 为过程噪声协方差,该值反映相信电压信号预测值的程度。最后更新电压估计误差协方差为:

$$P_k = (1 - G_k)\hat{P}_k. \quad (9)$$

根据式(6),可得到卡尔曼滤波降噪后的电

压信号 V'_x ,同理可以得到降噪后的电压信号 V'_y 和 V'_{sum} 。最后对滤波后的三路电压信号进行运算,可得到光斑的二维位置信息为:

$$x = w \times V'_x / V'_{\text{sum}}, \quad (10)$$

$$y = h \times V'_y / V'_{\text{sum}}, \quad (11)$$

式中: w 为位置敏感探测器探测面的横向边长, h 为位置敏感探测器探测面的纵向边长。

综上,基于卡尔曼滤波降噪的光斑位置测量的具体流程如图1所示。首先对PSD三个端口电压信号进行同时采集,然后对这三个电压信号进行卡尔曼滤波;在滤波算法中,先给滤波电压值 V_{k-1} 和电压估计误差协方差 P_{k-1} 赋初值,再修正先验电压值 $\hat{V}_k$ 和先验电压估计误差协方差 $\hat{P}_k$,算出实时采集的电压与先验电压估计值的差,对滤波输出电压 V_k 、卡尔曼增益 G_k 和电压估计误差协方差 P_k 进行预测;预测完再次循环进行修正,不断迭代,最终输出稳定的位置电压信号。对PSD三个端口的电压信号同时进行卡尔曼滤

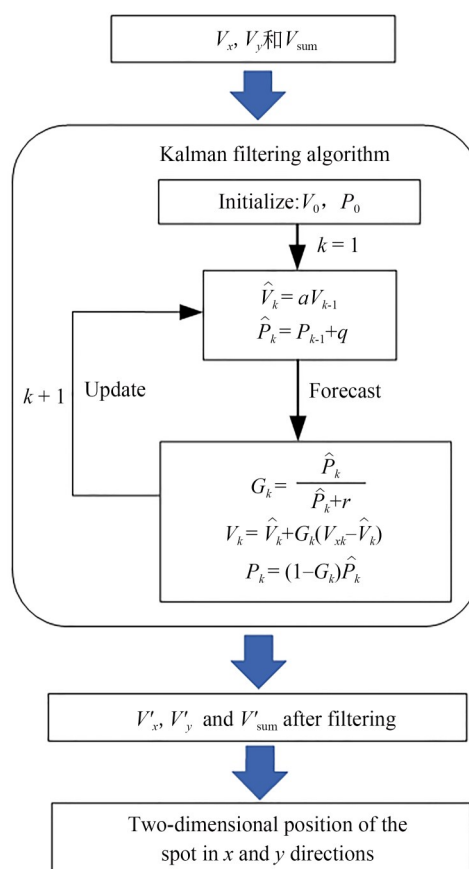


图1 卡尔曼滤波流程框图

Fig. 1 Block diagram of Kalman filter flow

波降噪后,再根据位置电压信号和光斑位置的关系式即可得到去噪后的光斑二维位置。

2.2 位置电压信号卡尔曼滤波降噪仿真

由于 PSD 三个代表位置的信号端口输出的是直流电压信号,实际进行 AD 采样时这些端口的位置信号呈现幅值再叠加含高斯白噪声信号,当光斑位置改变时,幅值也跟着改变。为了验证卡尔曼滤波降噪算法的可行性,使用 MATLAB 软件进行位置电压信号卡尔曼滤波降噪仿真。以其中一个端口电压信号为例,如图 2(a)所示,选择实验时真实采集到的有用信号恒为 0.4 V 的直流电压信号为理想信号,一段时间后该理想位置电压信号变为 0.25 V。选择均值为 0,在 ± 1.5 mV 均匀随机分布的高斯白噪声作为噪声信号,如图 2(b)所示,理想信号和高斯白噪声叠

加作为仿真输入信号。设置滤波器迭代 10 000 次,过程噪声协方差 q 值取 10^{-6} ,测量噪声协方差 r 值取 0.05,仿真结果如图 2(c)和图 2(d)所示。

图 2(c)是卡尔曼滤波后信号仿真结果,可以看出卡尔曼滤波过程需要 1 500 次迭代,但若算法在 FPGA+ARM 架构上实现,运算速度能达到 10 MHz 以上,意味着最多 0.15 ms 延迟完成滤波,可满足光斑位置变化的测量要求。图 2(d)是滤波信号与理想信号差值的仿真结果,稳定后的滤波信号与理想信号差值从 ± 1.5 mV 降到 ± 0.14 mV,输出的电压信号中毛刺大幅减小。仿真结果表明,卡尔曼滤波具有较好的降噪效果,经过电压与光斑位置换算关系进行运算后,能够实时得到更为准确的 PSD 光斑位置信息。

3 激光外差干涉位移测量及角度补偿系统

激光外差干涉位移测量及角度补偿系统装置如图 3 所示。He-Ne 激光器发出两正交偏振且不同频率的光,经 PBS 反射的 s 偏振光经过 1/4 波片 QWP_1 和平面反射镜 MR_1 反射,再经过 QWP_1 后变成 p 偏振光作为参考光,而从 PBS 透射的 p 偏振光依次经过 QWP_2 和 MR_2 反射,再次经过 QWP_2 后变成 s 偏振光并作为测量光。测量光和参考光经过 BS 分为两路,一路经过与两偏振方向呈 45° 偏振片 P_2 后在光电探测器 PD 处形成干涉信号;另一路经过偏振片 P_1 滤除掉参考光后,入射到位置敏感探测器 PSD 上作为角度测量光。假设作为移动测量镜的 MR_2 移动的距离为 S ,探测器 PD 处干涉信号的相位也发生变化,通过对干涉信号相位进行解调可以得到移动距离:

$$S = \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \lambda, \quad (12)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为干涉信号的相位变化, λ 为激光波长。

实际上,测量镜 MR_2 在移动过程中会随着被测物体偏转而产生转角。从图 3 中可以看到, MR_2 偏转使得反射测量光的路径和光程发生变化,带来位移测量误差。测量镜产生的转角能够体现在激光光斑位置在 PSD 探测面的变化上,通过分析激光光斑位置的变化可以算出转角,再根据转角与位移补偿模型对位移进行补偿。

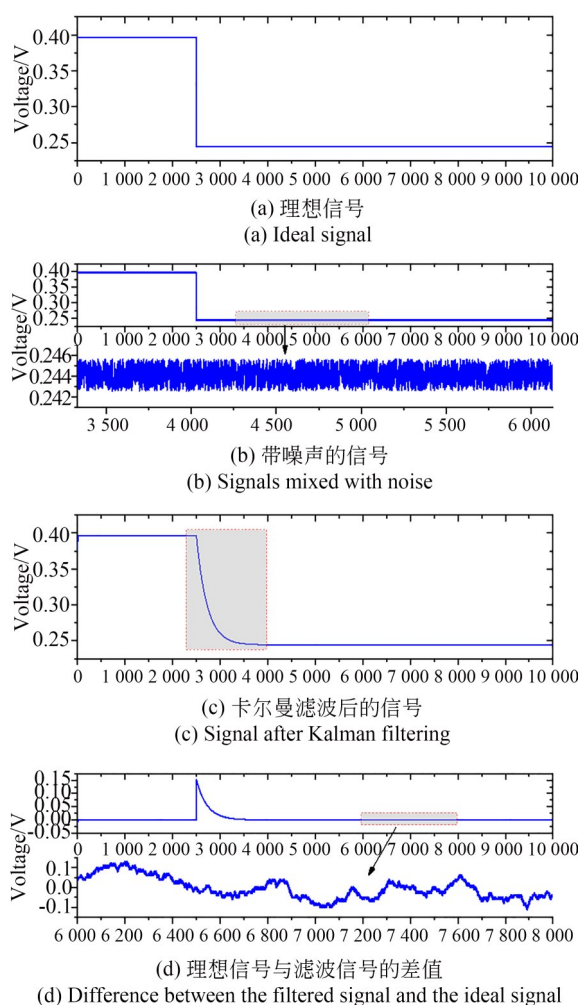


图 2 卡尔曼滤波仿真效果

Fig. 2 Kalman filter simulation effect

由于平面反射镜的特性,滚转角带来的位移测量误差影响可以忽略,因此这里主要对俯仰角和偏摆角进行测量。平面反射镜会产生偏摆角 β 和俯仰角 α 。以产生偏摆角为例,如图3所示,光束在水平和竖直方向分别产生 2β 和 2α 的角度偏移,最终经过凸透镜后在位置敏感探测器PSD汇聚成一个光点,由PSD探测到激光光斑在两个方向的偏移量 Δx_{PSD} 和 Δy_{PSD} ,求得俯仰角和偏摆角为:

$$\alpha = \frac{\Delta y_{\text{PSD}}}{2f}, \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\Delta x_{\text{PSD}}}{2f}, \quad (14)$$

式中: Δx_{PSD} 是激光光斑在水平方向的偏移量, Δy_{PSD} 是激光光斑在竖直方向的偏移量, f 是凸透镜的焦距。根据几何关系^[22]可推出位移补偿公式为:

$$S' = \frac{2S + 2S_0 + 2S_1}{1 + \sqrt{1 + (\tan 2\alpha)^2 + (\tan 2\beta)^2}} - S_0 - S_1 + H_z \tan \alpha + H_y \tan \beta, \quad (15)$$

式中: S_0 表示PBS和MR₂之间的距离, S_1 表示PBS和PD之间的距离, S 表示补偿前系统测得的移动测量镜的位移, S' 表示补偿后系统测得的移动测量镜的位移, H_z 表示激光光斑中心到 y 轴的距离, H_y 表示激光光斑中心到 z 轴的距离。

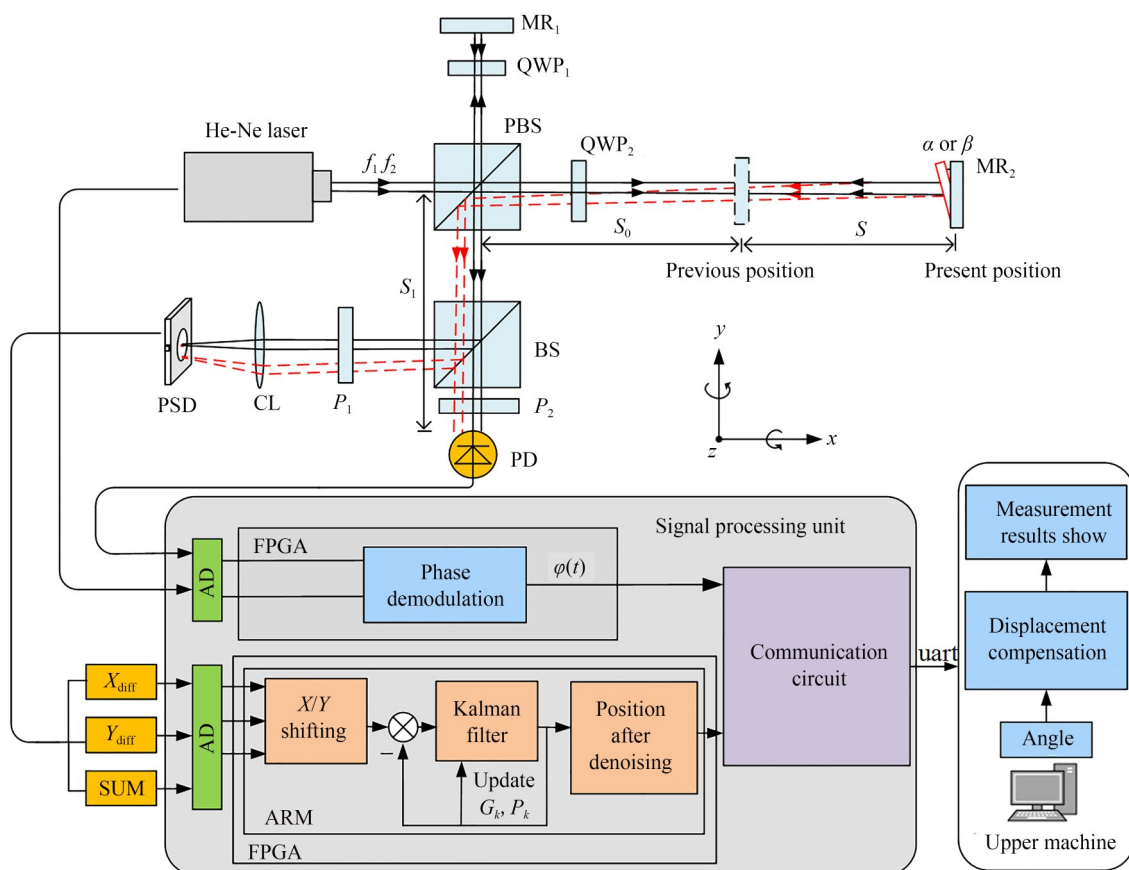


图3 激光外差干涉位移测量及角度补偿系统

Fig. 3 Laser heterodyne interferometric displacement measurement and angle compensation system

4 实验及结果分析

为验证本文位移测量及角度补偿效果,实验搭建了激光外差干涉测量装置,如图4所示。它

包括双频激光器、偏振分光镜、四分之一波片、平面反射镜、偏振片、凸透镜、光电探测器和位置敏感探测器。其中,双频激光器采用美国 Agilent 公司的 5517D 型激光器,波长为 632.991 37 nm,

位置敏感探测器采用美国索雷博公司的 PDP90A 探测器,光电探测器采用美国索雷博公司的 PDA36A2 探测器。

为实现位移与转角的同时测量,采用上海宇志通信公司的 MFSS6842 信号处理板进行位移测量信号处理,AD 采样速度最高可达 125 MHz,输入电压为 ± 5 V,14 位分辨率,满足位移干涉信号的采集和信号处理要求;采用上海芯驿电子科技有限公司 AX7Z010 开发板及 AD7606 模块负责位置敏感探测器 PSD 信号的 AD 采集和处理,AD 采样速度最高可达 200 kS/S,输入电压为 ± 5 V,16 位分辨率,采集精度能够达到 0.15 mV,能够准确测量 PSD 位置电压信号;最后,将两块信号处理板处理后得到相位和滤波后直流电压值上传到 LabVIEW 上位机,在上位机进行运算得到位移、转角测量结果及补偿后的位移测量结果。

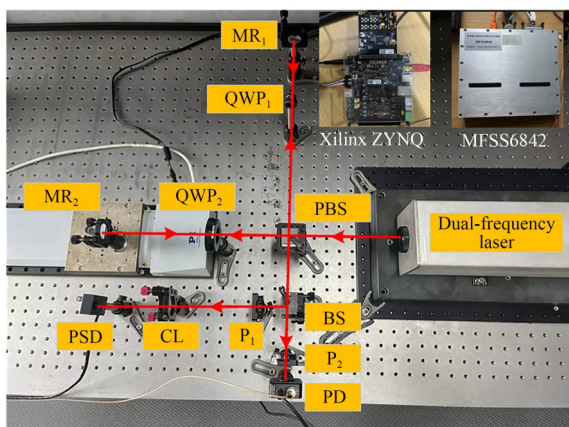


图 4 激光外差干涉位移测量补偿装置

Fig. 4 Compensation devices of laser heterodyne interference displacement measurement

4.1 光斑位置稳定性测量实验

为验证所设计去噪算法的可行性,首先进行了光斑位置稳定性测试实验。将测量平面反射镜安装在美国 Thorlabs 公司的六自由度转台 MAX606M 上跟随转台转动,转台转动 $5 \times 10^{-4}^\circ$ 后静止,记录 15 s 未去噪处理的原始光斑位置、卡尔曼滤波后的光斑位置以及索雷博自带去噪算法得到的光斑位置,然后转台再进行转角运动如此反复记录多组数据,对这 3 组不同算法下得到的光斑位置数据进行对比。以 y 方向激光光斑

位置测量为例,稳定性测量实验结果如图 5 所示。

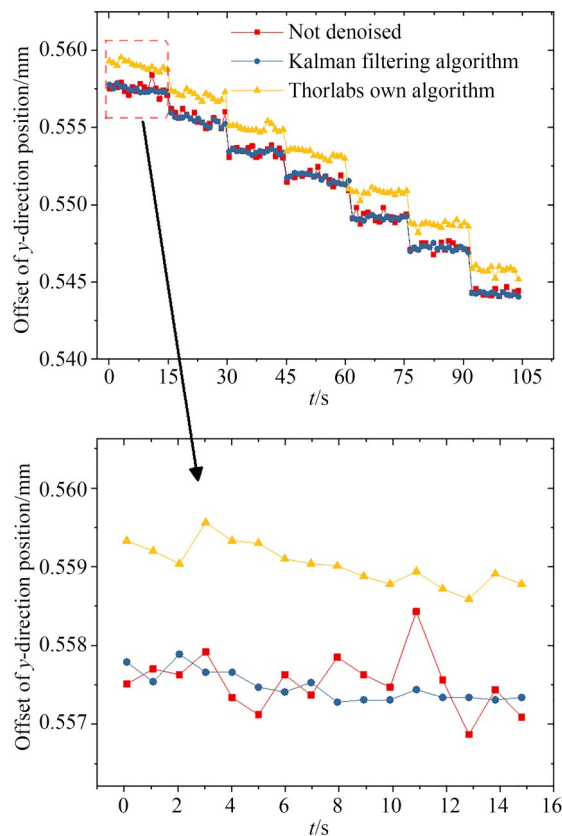


图 5 光斑位置稳定性测量实验结果

Fig. 5 Experimental results of spot position stability measurement

从图 5 中数据可以看到,FPGA 得到的原始未去噪处理的光斑位置、卡尔曼滤波后的光斑位置与索雷博自带去噪算法得到的光斑位置存在一定偏差,但相对位置的变化趋势是一致的,根据式(13)和式(14),转角测量需要测得的是光斑位置的相对变化量,这验证了卡尔曼滤波算法可用于转角的测量。截取第一段数据放大进行显示,索雷博去噪算法得到的光斑位置最大抖动偏差为 $0.8 \mu\text{m}$,最小抖动偏差为 $-0.4 \mu\text{m}$,抖动标准差为 $0.23 \mu\text{m}$ 。未去噪处理的原始光斑位置抖动较为明显,最大抖动偏差达到了 $2.5 \mu\text{m}$,最小抖动偏差为 $-1.58 \mu\text{m}$,抖动标准差为 $0.52 \mu\text{m}$,而经卡尔曼滤波后光斑位置的最大抖动偏差为 $0.5 \mu\text{m}$,最小抖动偏差为 $-0.3 \mu\text{m}$,抖动标准差降至 $0.18 \mu\text{m}$ 。由此可知,卡尔曼滤波算法可以有效降低位置敏感探测器的测量噪声。

4.2 角度测量验证实验

为了验证角度测量的准确性,同样将测量平面反射镜安装在美国 Thorlabs 公司的六自由度平台 MAX606M 上跟随平台转动,该平台的转角精度为 $1.0314 \times 10^{-6} (0.018 \mu\text{rad})$ 。以俯仰角测量为例,控制 MAX606M 依次做 5 次俯仰运动,每次俯仰 0.005° ,将测量得到的角度跟索雷博六自由度平台的转角进行比较,实验结果如图 6 所示。

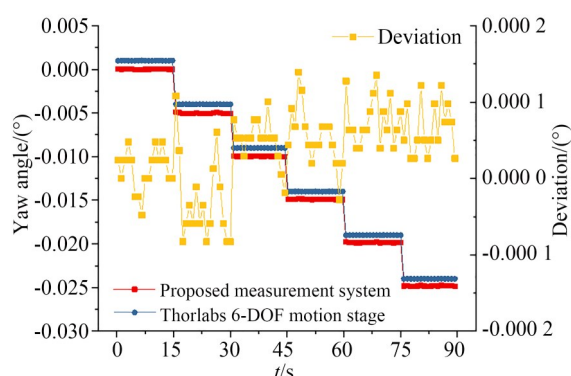


图6 角度测量对比实验结果

Fig. 6 Experimental results for comparison of angle measurement

为显示清晰,图6蓝色的六自由度转台转角曲线上移 0.001° 。从图6可以看出,测量系统卡尔曼滤波算法的延迟较小,具有较好的实时性,滤波后光斑位置稳定性好,测得转角数据与索雷博六自由度转台的转角数据偏差在 $\pm 1.38 \times 10^{-4}$ 内,符合角度测量精度要求。角度测量结果表明,该系统满足角度测量的精度要求,可以对激光外差干涉位移测量进行补偿。

4.3 激光外差干涉位移测量补偿实验

为验证实际位移测量的补偿效果,以分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ 的德国 PI 公司的 M-531. DD 导轨为测量对象,将测量平面反射镜固定安装在 M-531. DD 导轨起始位置上, M-531. DD 导轨起始位置距离激光器 50 cm。转角引入的位移量与测量镜平面反射镜的转动支点位置有关,这里测量镜转动支点与导轨安装平台中心 x 轴方向的距离为 1 cm,与导轨安装平台中心 y 轴方向的距离为 0.8 cm。

实验时,控制导轨以 1 mm/s 运动速度步进,

每次步进后记录测量位移和测量转角,一共步进 200 次,总移动位移为 200 mm。系统测得俯仰和偏摆角度测量结果如图 7 所示,位移补偿前后对比测量结果如图 8 所示。

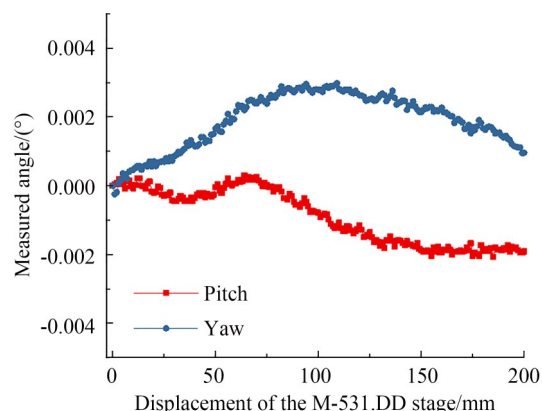


图7 激光外差干涉位移测量系统测得的测量镜转角

Fig. 7 Angle of measuring mirror measured by laser heterodyne interferometric displacement measuring system

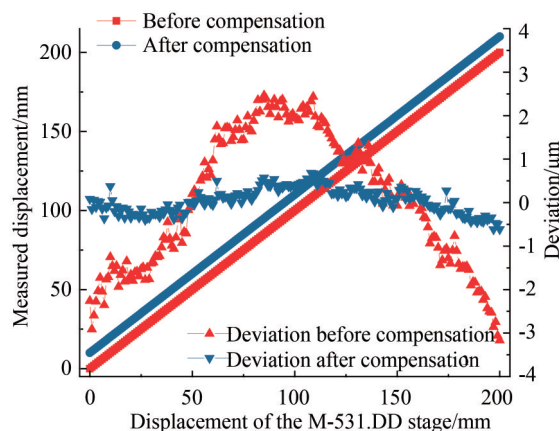


图8 位移补偿前后对比

Fig. 8 Comparison before and after displacement compensation

由图7可以看出,测量镜在 M-531. DD 线性导轨的 0~200 mm 行程内,偏摆角最大为 2.97×10^{-4} ,最小为 -2.072×10^{-3} ,俯仰角最大为 2.986×10^{-3} ,最小为 -2.44×10^{-4} 。为方便观察,将补偿后的位移测量数据向上整体平移 10 mm。由图8可以看出,补偿前位移测量结果与 M-531. DD 线性导轨的位移数据趋势不一致,其偏差结果呈现出“抛物线”曲线,最大偏差为

2.39 μm , 最小偏差为 $-3.16 \mu\text{m}$, 标准差为 $1.55 \mu\text{m}$; 补偿后位移测量数据与 M-531. DD 线性导轨位移数据的最大偏差降至 $0.68 \mu\text{m}$, 最小偏差降至 $-0.61 \mu\text{m}$, 标准差降至 $0.29 \mu\text{m}$, 验证了本文位移补偿方法的有效性。

5 结 论

本文针对激光外差干涉仪在测量过程中由被测对象转角引入位移测量误差的问题, 提出了一种激光外差干涉仪转角误差测量及位移补偿的方法, 通过 FPGA+ARM 架构对位置敏感探测器信号进行采集, 使用卡尔曼滤波算法对光斑位置信号进行去噪, 提高光斑位置的测量精度, 得到更为准确的转角测量结果, 最后根据补偿模

型对位移进行补偿。为验证转角测量及补偿方法的可行性, 进行了光斑位置稳定性、角度测量精度、位移测量及补偿实验。实验结果表明, 所提出的卡尔曼滤波方法能够有效减小位置敏感探测器的噪声误差, 最大抖动偏差从 $2.5 \mu\text{m}$ 减小到 $0.5 \mu\text{m}$, 最小偏差从 $-1.58 \mu\text{m}$ 减小到 $-0.3 \mu\text{m}$, 抖动标准差从 $0.52 \mu\text{m}$ 减小到 $0.18 \mu\text{m}$; 系统测量的角度与索雷博六自由度转台的转角偏差在 $\pm 1.38 \times 10^{-4}^\circ$ 内; 经过位移补偿, 位移测量结果与 M-531. DD 导轨定位数据的最大偏差从 $2.39 \mu\text{m}$ 减小到 $0.68 \mu\text{m}$, 最小偏差从 $-3.16 \mu\text{m}$ 变到 $-0.61 \mu\text{m}$, 标准差从 $1.55 \mu\text{m}$ 减小到 $0.29 \mu\text{m}$, 有效补偿了测量镜在移动过程中转角带来的位移测量误差, 提高了位移测量精度, 可应用于微纳米测量等领域。

参考文献:

- [1] 杨宏兴, 付海金, 胡鹏程, 等. 超精密高速激光干涉位移测量技术与仪器[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922018.
YANG H X, FU H J, HU P C, *et al.* Ultra-precision and high-speed laser interferometric displacement measurement technology and instrument[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922018. (in Chinese)
- [2] 张凡. 固体激光外差干涉位移测量技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
ZHANG F. *Research on Displacement Measurement Technology Using Solid-state Laser Heterodyne Interference* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [3] 张志平, 杨晓峰. 激光外差干涉技术在光刻机中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922017.
ZHANG Z P, YANG X F. Application of laser heterodyne interference technology in lithography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922017. (in Chinese)
- [4] BAO C C, FENG Q B, LI J K. Simultaneous measurement method and error analysis of the six degrees-of-freedom motion errors of a rotary axis[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2232.
- [5] DIAO K, CHEN C, LEACH R, *et al.* Crosstalk decoupling measurement method to determine the six degrees of freedom of motion error of linear stages[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(6): 1284.
- [6] ROHLIN J. An interferometer for precision angle measurements [J]. *Applied Optics*, 1963, 2(7): 762.
- [7] 张鹏, 崔建军. 外差干涉仪非线性误差补偿抑制与测量研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1100003.
ZHANG P, CUI J J. Research progress in nonlinear error compensation suppression and measurement of heterodyne interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1100003. (in Chinese)
- [8] LOU Y T, LI Z Y, YAN L P, *et al.* A phase differential heterodyne interferometer for simultaneous measurement of straightness error and displacement [J]. *Optics Communications*, 2021, 497: 127195.
- [9] 程亮. 激光外差干涉长行程精密导轨直线度测量及补偿方法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
CHENG L. *Study on Laser Heterodyne Interferometric Straightness Measurement and Compensation for Long-Travel Precision Stage Metrology* [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2017. (in Chinese)
- [10] 蔡杨杨. 基于激光准直的转角定位误差测量与误差模型[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
CAI Y Y. *Measurement of Angular Position Error Based on Laser Collimation and Error Model* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

- Chinese)
- [11] 楼志斌,赵辉,刘权,等. 结合激光准直的二维转角动态测量系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 561-568.
LOU ZH B, ZHAO H, LIU Q, *et al.* Two-dimensional rotation angle dynamic measurement system combining laser collimation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(3): 561-568. (in Chinese)
- [12] CUI C X, FENG Q B, ZHANG B, *et al.* System for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors using a polarization maintaining fiber-coupled dual-frequency laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6735-6748.
- [13] ZHANG E, CHEN B, ZHENG H, *et al.* Laser heterodyne interferometer with rotational error compensation for precision displacement measurement[J]. *Opt Express*, 2018, 26(1): 90-98.
- [14] REN W J, LIU J, YANG H M, *et al.* Self-collimation for two-dimensional micro-angle measurement in space[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2021, 26(2): 156-164.
- [15] 王高文,曲兴华,邢书剑,等. 大直径内孔自动测量机构倾斜度测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1): 63-68.
WANG G W, QU X H, XING SH J, *et al.* Research on inclination measurement in large size pipe for automatic measuring machine[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(1): 63-68. (in Chinese)
- [16] HUANG Z C, ZENG X Q, WANG D Q, *et al.* Noise reduction method of nanopore based on wavelet and Kalman filter[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(19): 9517.
- [17] ABDELZAHER H M, EL-DOKANY I M, EL-DOLIL S A, *et al.* Noise reduction in optical gyroscope signals based on hybrid approaches[J]. *Journal of Optics*, 2022, 51(1): 5-21.
- [18] LI C P, HUANG R N, YI Y, *et al.* Investigation of filtering algorithm for noise reduction in displacement sensing signal[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7808-7812.
- [19] ZHOU X Z, KAN Z, MENG H W, *et al.* Research on trenching data correction method based on wavelet denoising-Kalman filtering algorithm[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48(2): 1097-1117.
- [20] LIU W F, TAO Z, ZHANG L N, *et al.* Measurement of attitude angles of single stator multi-degrees of freedom ultrasonic motor[C]. *SPIE Proceedings, Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation. Hangzhou, China.* SPIE, 2010, 7544: 29.
- [21] SONG Q, WANG H P. A new method based on position sensitive detectors to measure four-degree-of-freedom geometric errors of linear guide rails[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 706/707/708: 1120-1123.
- [22] LOU Y T, YAN L P, CHEN B Y. A phase modulating homodyne interferometer with tilting error compensation by use of an integrated four-photodetector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(2): 025111.

作者简介:



周志鹏(1997—),男,广东茂名,硕士研究生,主要从事精密测量方面的研究。E-mail:348223582@qq.com

通讯作者:



楼盈天(1985—),男,浙江杭州人,博士,副教授,主要从事精密测量包括激光干涉测量、多自由度测量、大长度跟踪测量等方面的研究。E-mail: louyt@zstu.edu.cn