

文章编号 1004-924X(2019)07-1435-09

双频激光干涉三自由度微振动测量系统

陈家键, 胡慧珠*, 缪立军, 周一览, 舒晓武

(浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:为获取光学平台多自由度微振动信息,设计了一种基于平面镜双频激光干涉的三自由度动态微振动测量系统。该系统利用激光多普勒效应,采用三个测量轴获得测量反射镜的三点位移信息,计算出测量镜平动、扭转角、俯仰角信息,实时检测三自由度的微振动情况,从而为光学系统的微振动补偿控制提供基础。对微振动测量系统进行了不确定度分析,建立了不确定度模型,为进一步提高系统精度提供理论依据,也为系统在校准和计量领域的应用奠定基础。实验过程中,采用高精度地震计对待测平台进行同步测量,与系统平动测量结果进行对比,验证了系统的测量准确性。该系统的平动分辨率可达到 5 nm,扭转角分辨率为 5.05 μrad ,俯仰角分辨率为 4.69 μrad ,具有多自由度、非接触、高分辨、可溯源的优点。

关键词:微振动测量;双频激光干涉;多自由度;不确定度分析

中图分类号:O439 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192707.1435

Three-degree-of-freedom micro-vibration measurement system based on dual-frequency laser interference

CHEN Jia-jian, HU Hui-zhu*, MIAO Li-jun, ZHOU Yi-lan, SHU Xiao-wu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instruments, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

* Corresponding author, E-mail: huhuizhu2000@zju.edu.cn

Abstract: To obtain multi-degree-of-freedom micro-vibration information of an optical platform, a three-degree-of-freedom dynamic micro-vibration measurement system based on plane mirror dual-frequency laser interference is designed. The system utilizes the laser Doppler effect to obtain the three-point displacement information of the measuring mirror by using three measuring axes; calculates the overall displacement, torsion angle, and pitch angle information of the measuring mirror; and detects the three-degree-of-freedom micro-vibration in real time, thereby providing a basis for micro-vibration compensation control of the optical system. The uncertainty of the micro-angular vibration measurement system is analyzed, and an uncertainty model is established, which provides a theoretical basis for further improving the accuracy of the system and also lays a solid foundation for application of the system in the field of calibration and metrology. During the experiment, a high-precision seismometer was used to measure the platform simultaneously and, by comparison with the system translation measurement results, the measurement accuracy of the system was verified. The displacement resolu-

收稿日期:2019-04-01;修订日期:2019-04-17.

基金项目:技术基础科研项目(No. JSJL2017110B001);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2016XZZX004 01)

tion of the system is 5 nm, the torsion resolution is 5.05 rad, and the pitch resolution is 4.69 rad. The system has the advantages of multiple degrees of freedom, noncontact operability, high resolution, and traceability.

Key words: micro-vibration measurement; dual-frequency laser interference; multi-degree of freedom; uncertainty analysis

1 引言

光学平台作为承载光学设备的基础结构,是一种隔除振动的工作平面,它利用自身的隔振效果能有效地避开环境振动所产生的共振现象。但光学系统对环境振动极为敏感,而目前的光学平台无法完全消除环境振动对光学系统精度的影响,在刚性光学平台上各个自由度的振动,都会影响光学系统的动态分辨率^[1]。因此研究光学平台不同形式的微振动信息,并通过量化分析确定振幅和振动频率,从而对光学系统环境振动干扰进行补偿,一直是光学系统稳定性研究的重点。

要对光学平台的微振动进行测量需要高精度测量系统。常用的测振方法是在测量物体上安装加速度传感器,将加速度传感器的输出信号即加速度信号转换为电信号,从而测量振动^[2]。但是,接触式测量往往会因为自身质量和安装问题使得最终的测量结果产生较大的误差。随着光学技术的飞速发展,光学测振已经成为现代振动测量的重要方法之一^[3-6]。其中,利用激光干涉特性研制的激光干涉仪具有精度高、可溯源、非接触等优点,广泛应用于振动测量领域^[7-8]。目前,俄罗斯、美国等国均已采用激光干涉测振技术建立了国家振动基准,我国也在二十世纪七十年代末相继开展了低频、中频、高频的振动校准研究^[9]。但激光干涉法测量时受环境条件的影响较大,测量时要求波长稳定。在现有的文献报道中,采用激光干涉法研制的微振动测量系统大多只能测量一个自由度的微振动信息。而现有的多自由度测量系统则需要多个干涉仪进行多轴向测量^[10]。

本文提出一种基于双频激光干涉的三自由度微振动实时测量系统。该系统采用双频激光干涉仪代替单频激光干涉仪,减小了直流漂移对系统的影响,提高了系统的抗环境干扰能力^[11]。同时,系统用平面镜代替角锥棱镜作为测量反射镜,并将激光分成能量相等、相互平行的三路光束。

通过测量出平面镜上的三点位移信息,计算出光学平台的平动、扭转角振动和俯仰角振动,实现三自由度微振动测量。同时对该系统进行了不确定分析,为进一步提高系统的相对精度提供理论依据。

2 工作原理

2.1 双频激光干涉仪位移测量原理

本系统通过测量平面镜上三个点的位移来获得三个自由度的微振动信息,其中测量某一点的位移信息原理如图 1 所示^[12]。从双频激光器输出频率为 f_1 的左旋圆偏振光和频率为 f_2 的右旋圆偏振光,通过 $\lambda/4$ 片变成两束振动方向相互垂直的线偏振光。用分光镜反射一小部分激光。反射光经过反射棱镜、检偏器形成 f_1 和 f_2 的拍频信号,其频率为 $f_1 - f_2$,由光电接收器接收,通过数字信号处理系统处理后作为系统的参考信号。另一部分光射向偏振分光镜(Polarization Beam Splitter, PBS),根据偏振方向不同,两偏振光分离,频率为 f_2 的线偏振光被 PBS 全部反射到固定参考镜上,再由参考镜反射回 PBS,其间两次通过 $\lambda/4$ 片,方向转过 90° 。而频率为 f_1 的线偏振光透过偏振分光镜射向测量反射镜,再由测量反射镜反射回 PBS,同样两次通过 $\lambda/4$ 片,方向转过 90° 。测量反射镜被固定在光学平台上,光学平台的微振动使得测量反射镜的该点振动。根据多普勒效应,反射回来的 f_1 光频率变为 $f_1 \pm \Delta f_1$,其中 $\Delta f_1 = 2f_1 v_1 / c$ (v_1 为平面镜该点沿光轴移动的速度, c 为光速)。 f_2 光和 $f_1 + \Delta f_1$ 光在偏振分光镜的分光面上再度汇合,经直角棱镜、检偏器,被光电接收器接收,其频率为 $(f_1 - f_2) \pm \Delta f_1$,经过数字信号处理系统处理后作为测量信号。测量信号和参考信号在数字信号处理器中相减可获得多普勒频差 $\pm \Delta f_1$,对其积分获得周期数 N :

$$N = \int_0^t (\Delta f_1) dt. \quad (1)$$

则反射镜该点沿光路位移 L 的表达式为:

$$L = \frac{\lambda}{2} N = \frac{\lambda_0 N}{2n}, \quad (2)$$

式中: λ 为测量时刻的激光波长, λ_0 为激光的真空波长; n 为测量时的空气折射率。

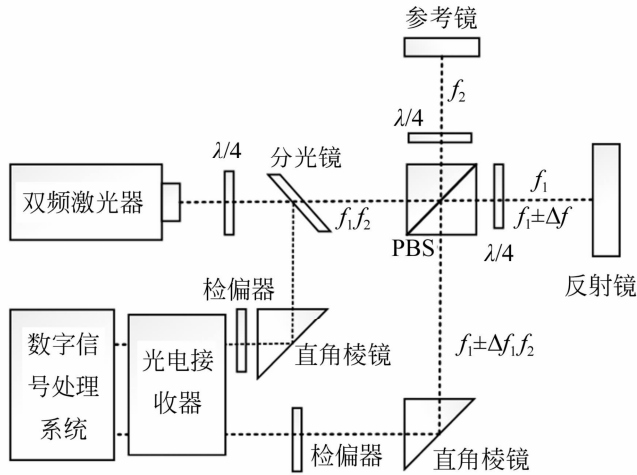


图 1 双频激光干涉仪单光束测位移原理

Fig. 1 Principle for displacement measurement with single beam based on dual-frequency laser interference

2.2 三自由度测量原理

根据上文,系统测量出平面镜中的 3 点位移信息,如图 2 所示。3 个测量轴测量出 3 点的位移信息分别为 L_1, L_2, L_3 。其中 L_1 为 A 点的位移信息, L_2 为 B 点的位移信息, L_3 为 C 点的位移信息。

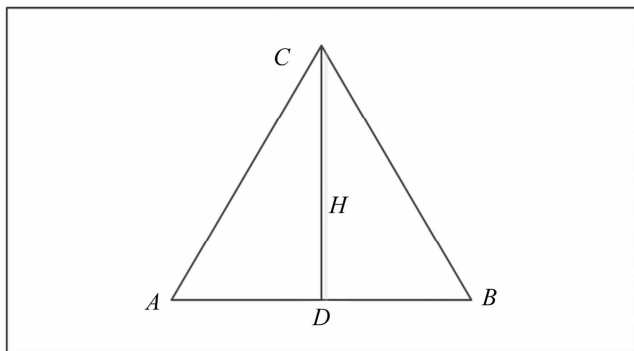


图 2 三点测量原理

Fig. 2 Principle of three-axis measurement

2.2.1 平动测量

随着光学平台振动,测量反射镜的平动为:

$$L = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} = \lambda_0 \frac{N_1 + N_2 + N_3}{6n}. \quad (3)$$

2.2.2 扭转角测量

如图 3 所示,测量反射镜的扭转角位移 θ_y 为:

$$\tan \theta_y = \frac{L_1 - L_3}{D} = \lambda_0 \frac{N_2 - N_3}{2nD}, \quad (4)$$

式中 D 为 A, B 两点的距离。当 θ_y 足够小时, $\theta_y \approx \tan \theta_y$ 。

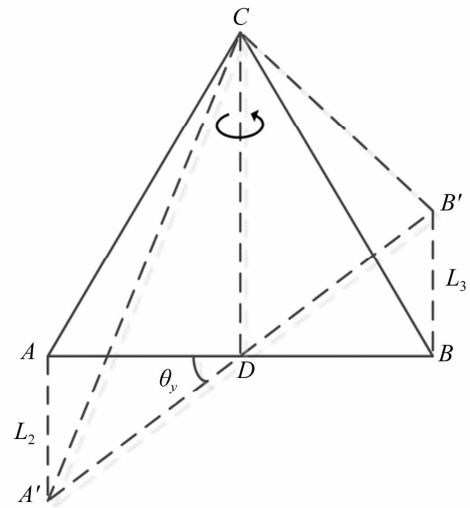


图 3 扭转角测量原理

Fig. 3 Principle of torsion angle measurement

2.2.3 俯仰角测量

测量反射镜俯仰角测量原理如图 4 所示,俯仰角 θ_z 为:

$$\tan \theta_z = \frac{L_1 - (L_2 + L_3)/2}{H} = \lambda_0 \frac{N_1 - (N_2 + N_3)/2}{2nH}, \quad (5)$$

式中 H 为 3 点在测量反射镜上形成的三角形的高。当 θ_z 足够小时, $\theta_z \approx \tan \theta_z$ 。

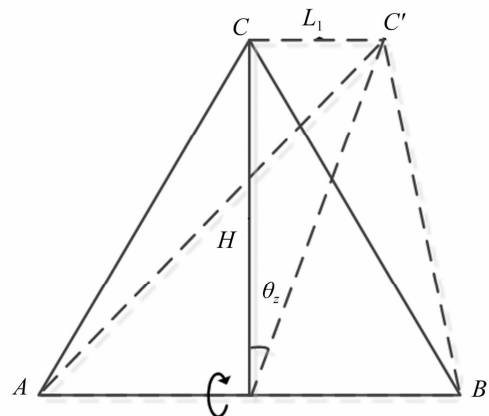


图 4 俯仰角测量原理

Fig. 4 Principle of pitch angle measurement

3 系统不确定度分析

式(3),式(4)和式(5)为系统测量位移、扭转

$$u(L) = \sqrt{\left[\frac{\partial L}{\partial \lambda_0}\right]^2 u^2(\lambda_0) + \left[\frac{\partial L}{\partial n}\right]^2 u^2(n) + \left[\frac{\partial L}{\partial N}\right]^2 u^2(N)}, \quad (6)$$

$$u(\theta_y) = \sqrt{\left[\frac{\partial \theta_y}{\partial \lambda_0}\right]^2 u^2(\lambda_0) + \left[\frac{\partial \theta_y}{\partial n}\right]^2 u^2(n) + \left[\frac{\partial \theta_y}{\partial N}\right]^2 u^2(N) + \left[\frac{\partial \theta_y}{\partial D}\right]^2 u^2(D)}, \quad (7)$$

$$u(\theta_z) = \sqrt{\left[\frac{\partial \theta_z}{\partial \lambda_0}\right]^2 u^2(\lambda_0) + \left[\frac{\partial \theta_z}{\partial n}\right]^2 u^2(n) + \left[\frac{\partial \theta_z}{\partial N}\right]^2 u^2(N) + \left[\frac{\partial \theta_z}{\partial D}\right]^2 u^2(H)}. \quad (8)$$

上式中任何一项参数的不准确,都会影响测量结果,下文以平动的测量不确定度 $u(L)$ 为例进行分析。由式(6)可知,系统测量平动的不确定度包括三个方面:激光器真空波长稳定性引入的不确定 $u(\lambda_0)$ 、空气折射率变化引入的测量不确定度 $u(n)$ 以及干涉条纹计数值的误差引入的不确定度 $u(N)$ 。

3.1 激光器真空波长稳定性引入的测量不确定度

双频激光干涉仪是以激光波长作为基准的测量仪器,波长直接影响系统的测量不确定度。本系统所用的双频激光器的真空波长为 633 nm,经过检定,激光器波长稳定性可以达到 $\pm 0.02 \times 10^{-6}$ 。

按照矩形分布,激光器真空波长稳定性引入的测量不确定度分量为:

$$u_1(L) = \frac{L}{\lambda_0} u(\lambda_0) = \frac{2 \times 10^{-8}}{\sqrt{3}} L = 1.15 \times 10^{-8} L. \quad (9)$$

3.2 空气折射率变化引入的测量不确定度

在用双频激光干涉仪进行测量时,必须对激

$$u(n_e) =$$

$$\sqrt{(-93 \times 10^{-8})^2 u^2(n_t) + (0.268 \times 10^{-8})^2 u^2(n_p) + (-0.036 \times 10^{-8})^2 u^2(n_f) + (3 \times 10^{-8})^2} = 12.79 \times 10^{-8}. \quad (11)$$

此时空气折射率变化引入的不确定度为:

$$u(n) = \sqrt{u^2(n_w) + u^2(n_e)} = 12.79 \times 10^{-8}. \quad (12)$$

空气折射率变化引入的测量不确定分量为:

$$u_2(L) = \frac{L}{n} u(n) = 12.79 \times 10^{-8} L. \quad (13)$$

3.3 干涉条纹计数值误差引入的不确定度

3.3.1 双频激光干涉仪测量电路噪声引入的测量不确定度 $u_1(N)$

电路噪声引入的误差为计数器的最小刻度误

角和俯仰角的数学模型,根据系统的测量数学模型,平动、扭转角、俯仰角的测量不确定度可以分别表示为:

光波长进行空气折射率的修正。空气折射率变化引入的测量不确定度主要来源于两部分^[13]:根据 Edlen 公式修正空气折射率时,测试环境参数(压力、温度和湿度)的传感器引起的不确定度 $u(n_e)$;在非 20 °C 条件下的测量值折算成标准计量温度(20 °C)下的示值引起的不确定度 $u(n_w)$ 。而后者远小于前者,因此 $u(n_w)$ 可忽略不计。根据修正后的 Edlen 公式^[14]可以推导出在正常状态(气压 $P = 101\ 325$ Pa, 温度 $t = 20$ °C, 湿度 $f = 1333.22$ Pa, CO_2 含量为 0.03% 的干燥空气)下,空气折射率的微分表达式为:

$$\delta n_e = (-93\delta t + 0.268\delta p - 0.036\delta f) \times 10^{-8}. \quad (10)$$

假设压力、温度、湿度传感器的测量不确定度分别为 ± 40 Pa, ± 0.2 °C, ± 50 Pa,再考虑到修正后的 Edlen 公式自身的理论误差为 3×10^{-8} 。按照矩形分布,测试环境参数(压力、温度和湿度)传感器引入的不确定度 $u(n_e)$ 为:

差,而电路测量分辨率为 4.94 nm,则电路噪声引入的测量不确定度为:

$$u_1(N) = \frac{4.94}{\sqrt{3}} = 2.85 \text{ nm}. \quad (14)$$

3.3.2 双频激光干涉仪测量非线性误差引入的测量不确定度 $u_2(N)$

将系统放置于纳米级运动台,结合精密环境控制和高精度减震,进行比对测量,获得系统的非线性误差。系统的非线性误差为 2.2 nm。根据矩形分布,非线性误差引入的测量不确定度为:

$$u_2(N) = \frac{2.2}{\sqrt{3}} = 1.27 \text{ nm}. \quad (15)$$

3.3.3 其他不确定度 $u_3(N)$

其他不确定度包括双频激光干涉仪系统安装不当产生的安装不确定度,主要有阿贝误差、余弦误差和空程误差。激光干涉系统中余弦误差属于系统误差,一般数值较小,可用修正的方法消除。本系统搭配光束角度调节器,通过调节光束角度调节器调整激光准直角度,直到获得最大测量值,从而消除余弦误差。阿贝误差是由于激光光束与测量轴不在同一水平高度造成的,其产生原因是因为测量反射镜振动时存在扭转和俯仰角偏转。本系统可测量出扭转角 θ_y 和俯仰角 θ_z ,扭转角和俯仰角的测量结果可对线性位移测量进行阿贝误差实时补偿,可以有效降低由于测量平台和反射镜之间的缺陷所导致的阿贝误差,因此在测量不确定度中阿贝误差可以直接忽略。为了解决空程误差,可在安装时使双频激光干涉仪尽可能接近测量反射镜。因此在总的 $u(N)$ 中 $u_3(N)$ 可忽略不计。

由此干涉条纹计数值的误差引入的不确定度分量 $u(N)$ 为:

$$u_3(L) = u(N) = \sqrt{u_1^2(N) + u_2^2(N)} = 3.12 \text{ nm}. \quad (16)$$

根据式(9),式(13)和式(16)可得,当测量的平动为 $L=1 \text{ mm}$ 时,微振动测量系统的平动测量不确定度为:

$$u(L) = \sqrt{u_1^2(L) + u_2^2(L) + u_3^2(L)} = 3.12 \text{ nm}. \quad (17)$$

当置信系数 $k=2$ 时,扩展不确定度为:

$$U = ku(L) = 6.24 \text{ nm}. \quad (18)$$

因此平动测量不确定度为 $6.24 \text{ nm}/1 \text{ mm}$,系统具有较高的理论精度。根据上文分析,在测量微振动时,影响系统测量平动精度的主要因素是干涉条纹计数值的不确定度。同时,在对系统的扭转角和俯仰角进行不确定度分析时,还需要考虑 A 、 B 点之间的距离 D 和三角形的高 H 的测量以及算法本身引入的不确定度。

4 测 试

本系统包括双频激光器、干涉仪系统、数字信号处理系统和计算机等部分。系统的主要性能参见表 1。

表 1 双频激光干涉微振动测量系统的主要性能

Tab. 1 Main system performance of three-degree-of-freedom micro-vibration measurement system based on dual-frequency laser interference

主要性能
激光波长: 632.8 nm
光学分辨率: $\lambda/4$
干涉仪最大光斑直径: 9 mm
角度测量范围: $\pm 3 \text{ mard}$ (被测距离为 150 mm 时)

测量时,双频激光器发出的光束经过光束调节器射向干涉仪系统,在干涉仪系统内部分成 3 路激光,分别测量反射镜的 3 点位移信息。数字信号处理系统根据获得的 3 点位移信息计算出测量镜的平动、扭转角和俯仰角。

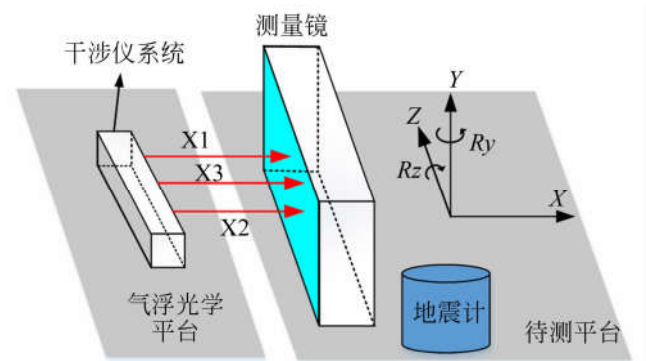


图 5 双频激光干涉系统布局

Fig. 5 Layout of dual-frequency laser interference system

如图 5 所示,将激光入射方向定义为 X 轴,垂直平台方向为 Y 轴,平行于台面且与 X 轴垂直的方向为 Z 轴, R_y, R_z 分别为绕 Y 轴和 Z 轴的旋转量,即扭转角为 R_y ,俯仰角为 R_z 。

本实验采用英国 Guralp 公司型号为 3ESPC 的地震计同步测量待测平台 X 轴方向的振动。将地震计在 X 轴方向的振动测量结果与本系统平动测量数据进行对比,从而验证系统的可行性。该地震计采用摆式动圈换能传感原理进行测量,测量频率为 $0.017 \sim 100 \text{ Hz}$,灵敏度达到 $2000 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

待测平台三自由度微振动测量的具体步骤如下:

(1) 搭建测量平台,其中双频激光器、干涉仪系统、数字信号处理系统固定在气浮光学平台上,

而测量反射镜则固定在待测平台上。将地震计固定在待测平台上,让地震计接近测量反射镜。

(2)调整激光光路,保证激光器、干涉仪、反射镜处在同一水平高度。

(3)数据处理软件实时处理并显示待测平台的平动、扭转角和俯仰角信息。同时收集地震计的测量数据。

5 测量结果分析

本次测试先用地震计分别对隔振气浮平台和

待测平台 X 轴方向的振动进行测量,结果显示待测平台的振动指标约为隔振气浮平台指标的 5.9 倍,隔振气浮平台具有很好的隔振效果,可以用作本次实验承载双频激光器和干涉仪系统的基准平面。而待测平台的固有频率为 3~6 Hz,振幅不大于 5 μm 。系统采样频率为 256 Hz。

数字信号采集系统对采集数据进行实时处理,获得待测平台三个自由度的微振动信息。最后对数据进行傅里叶变换计算出幅度谱,结果见图 6、图 7 和图 8。

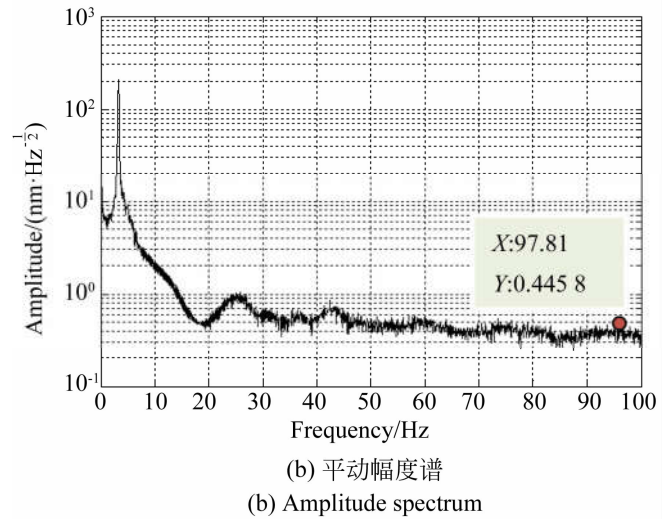
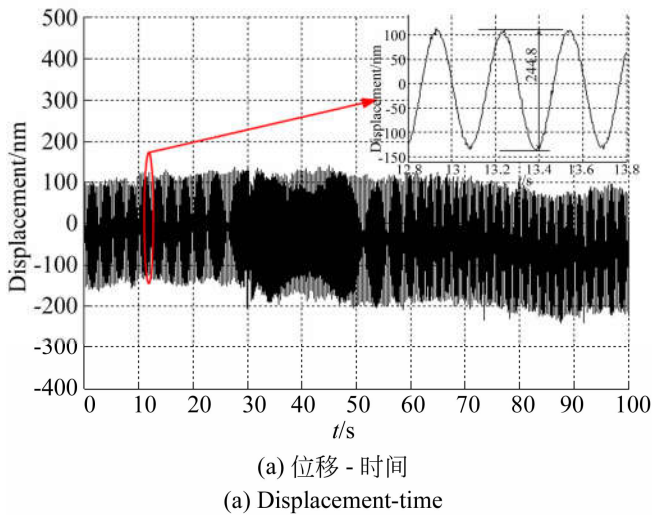


图 6 平动测量结果

Fig. 6 Displacement measurement result

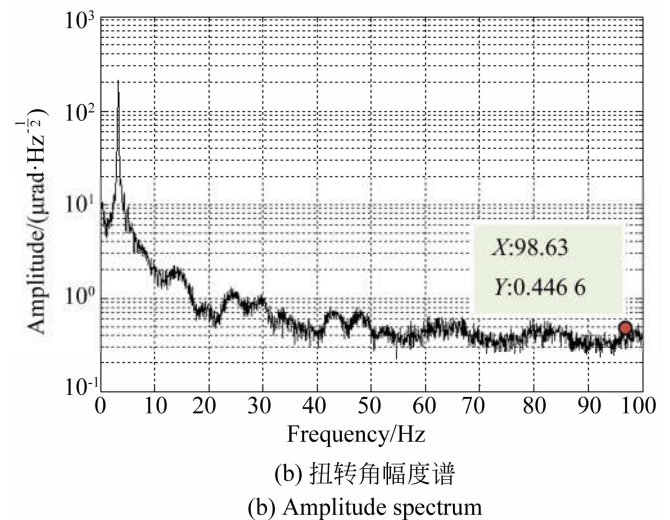
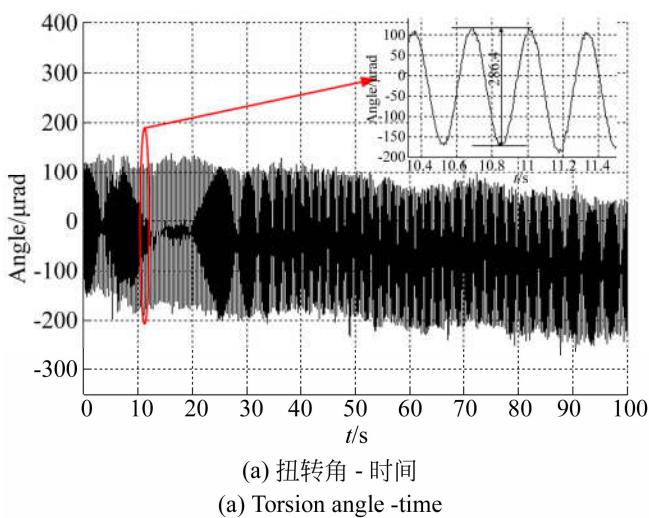


图 7 扭转角测量结果

Fig. 7 Measurement result of torsion angle

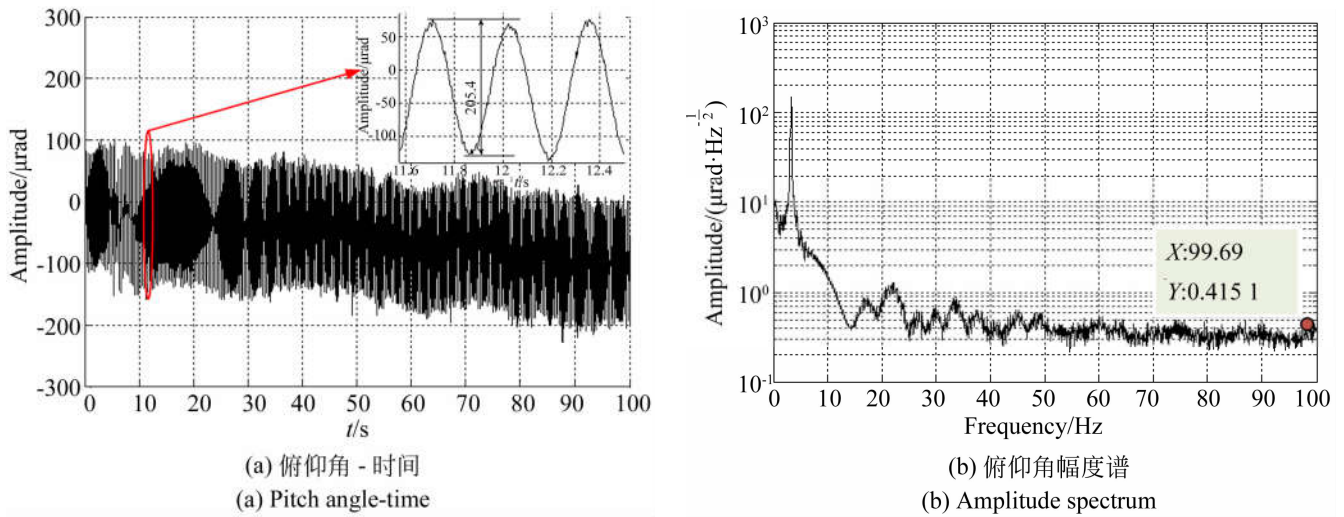


图 8 俯仰角测量结果

Fig. 8 Measurement result of pitch angle

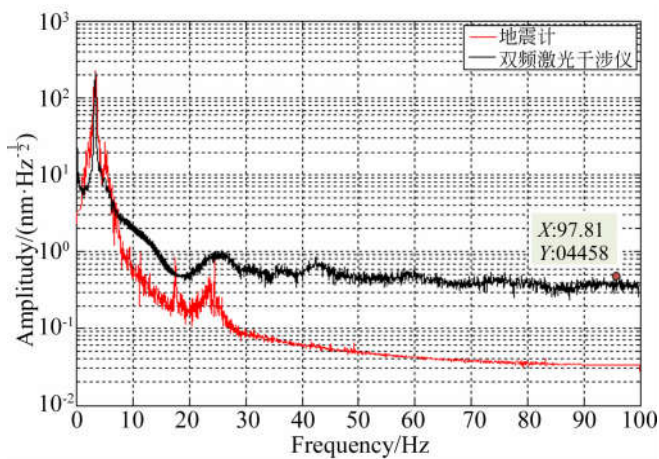


图 9 双频激光干涉系统和地震计位移幅度谱

Fig. 9 Displacement amplitude spectrum of dual-frequency laser interference system and seismometer

从图 6、图 7 和图 8 的幅度谱中可以看出,在低频段 2~5 Hz 处有较大的波动,而在高频段系统幅度谱较为稳定。从中计算出系统平动、扭转角和俯仰角的测量分辨率,结果如表 2 所示。

表 2 系统实验数据

Tab. 2 System experiment data

测量项目	分辨率	峰值
平动/nm	5	122.4
扭转角/ μrad	5.05	143.2
俯仰角/ μrad	4.69	102.7

地震计采集到的数据为速度信号,对速度进行积分获得 X 轴方向的振动位移信息。对它进

行傅里叶变换获得地震计的位移幅度谱,和系统平动幅度谱进行对比,结果见图 9。结果显示,双频激光干涉系统和地震计的测量结果相吻合。在低频段 2~5 Hz 处,该系统和地震计在 X 轴方向的振动测量结果接近,与待测平台的固有振动频率相吻合。在高频段,待测平台的隔振效果较好,同时可以看出地震计具有更高的平动测量分辨率。

重复 10 次实验,计算出系统平动测量幅度的标准差,其结果如表 3 所示。

表 3 系统平动测量幅度标准差

Tab. 3 Standard deviation of system displacement

序号	平动幅度标准差/nm
1	100.8
2	91.5
3	96.5
4	90.1
5	97.2
6	104.0
7	96.8
8	97.9
9	87.1
10	93.3

根据 10 组实验结果,计算出系统平动测量的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (L_{std,i} - \bar{L})^2 / 10} = 4.81 \text{ nm}. \quad (19)$$

式中: $L_{std,i}$ 为单次实验的平动幅度标准差, \bar{L} 为系统平动测量幅度标准差的均值。结果与不确定度分析结果相符。结合实验结果和不确定度分析, 系统在进行测量时需要注意以下几点:

(1) 保证测量环境温度、气压的稳定性, 从而减小空气扰动对测量系统精度的影响。

(2) 虽然采用了平面镜作为测量镜, 提高了本系统的测量精度, 但当测量平面镜的角位移过大时, 也会造成反射光能量损失。因此在安装反射镜和干涉仪时, 两者距离应足够近, 从而扩大测角量程, 减小空程误差。

(3) 在系统测量时需要使用合适的卡具将反射镜安装在待测平台上, 避免因非平台振动使测量镜发生角振动带来的测量误差。

参考文献:

- [1] 耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 314-320.
GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 314-320. (in Chinese)
- [2] 刘继承, 徐庆华, 查建新. 用加速度传感器测量振动位移的方法[J]. 现代雷达, 2007(5): 69-71.
LIU J CH, XU Q H, ZHA J X. Method of Vibration Displacement Measured with Acceleration Sensor[J]. *Modern Radar*, 2007(5): 69-71. (in Chinese)
- [3] 刘立生, 张合勇, 王挺峰, 等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6): 1508-1515.
LIU L SH, ZHANG H Y, WANG T F, *et al.*. Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1508-1515. (in Chinese)
- [4] 赵锦春. 激光测振在振动计量中的发展概况及作用[J]. 计量与测试技术, 2011, 38(6): 11-13, 15.
ZHAO J CH. Vibration development situation and function of laser measurement in vibration measurement [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2011, 38(6): 11-13, 15. (in Chinese)
- [5] 徐达, 何凯平, 熊伟, 等. 线激光散斑检测弹幕武

6 结 论

本文对光学平台的微振动进行测量, 结合反馈系统提高光学平台上的光学系统精度是进一步提高光学系统分辨率的有效手段。本文中的双频激光干涉三自由度微振动测量系统具有较高的测量精度, 可测量 3 个振动自由度, 多自由度分析平台振动情况。系统具有非接触、高分辨率、可溯源的优点, 系统的平动分辨率可达到 5 nm, 扭转角分辨率为 5.05 μrad , 俯仰角分辨率为 4.69 μrad 。同时, 本文采用高精度地震计同步测量待测平台振动, 与系统平动测量进行对比, 验证了系统测量的准确性; 且系统体积小, 可根据不同场合进行设计、装配, 从而应用于类似的测量场合。

器炮口振动测量方法[J]. 激光技术, 2017, 41(6): 106-110.

XU D, HE K P, XIONG W, *et al.*. Method for measuring muzzle vibration of barrage weapons based on line laser speckle detection [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6): 106-110. (in Chinese)

- [6] 张澍, 李玉, 卢广锋. 基于双频环形激光器的激光多普勒测振系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0312003.

ZHANG SH, LI Y, LU G F. Research of laser doppler vibrometer based on dual-frequency ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0312003. (in Chinese)

- [7] 刘爱东, 于梅, 何闻. 角振动测量方法的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 216-219.

LIU A D, YU M, HE W. A study of an angle vibration measuring method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(12): 216-219. (in Chinese)

- [8] 赵荣丽, 陈新, 李克天. 双柔性平行六连杆微动平台结构的设计及测试[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(10): 2860-2869.

ZHAO R L, CHEN X, LI K T. Design and experiments of micro motion platform based on a pair of flexible parallel six-bar linkages[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2860-2869. (in Chinese)

- [9] 薛景锋. 高频角振动校准方法与技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.

XUE J F. *Research on Methods and Techniques of High Frequency Angular Vibration Calibration*

- [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [10] 杨明, 蔡晨光, 刘志华, 等. 基于外差激光干涉法的三轴向振动绝对校准方法研究[J]. 计量学报, 2018, 39(2):201-206.
YANG M, CAI CH G, LIU ZH H, *et al.*. Research on the method of the triaxial primary vibration calibration using the heterodyne interferometry [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(2):201-206. (in Chinese)
- [11] 姜一民. 双频激光干涉仪的原理与应用(一)[J]. 工具技术, 1996, 30(4):44-46.
XIAN Y M. Principle and application of dual frequency laser interferometer (1) [J]. *Tool Engineering*, 1996, 30(4): 44-46. (in Chinese)
- [12] 胡慧珠, 陈家键, 周一览, 等. 一种基于光纤陀螺带宽测试校准方法及校准装置: 中国, 201810489326.3[P]. 2018-05-21.
HU H Z, CHEN J J, ZHOU Y L, *et al.*. A bandwidth measurement and calibration method and device based on fiber optic gyroscope: China, 201810489326.3[P]. 2018-05-21. (in Chinese)
- [13] 金施群, 刘巧云. 环境对双频激光干涉仪测量不确定度的影响[J]. 上海计量测试, 1997, 24(3): 33-34.
JIN SH Q, LIU Q Y. Effect of environment on measurement uncertainty of dual-frequency laser interferometer [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 1997, 24(3):33-34. (in Chinese)
- [14] BIRCH K P, REINBOTH F, WARD R E, *et al.*. The effect of variations in the refractive index of industrial air upon the uncertainty of precision length measurement [J]. *Metrologia*, 1993, 30(1): 7-14.

作者简介:



陈家键(1994—),男,浙江温州人,硕士,2016年于南昌大学获得学士学位,主要研究方向为惯性技术和光学传感。
E-mail:chenjiajian@zju.edu.cn

导师简介:



胡慧珠(1979—),男,教授,博士生导师,1999年于西安交通大学获得学士学位,2004年于浙江大学获得博士学位,现为浙江大学光学惯性与传感技术重点学科实验室主任,主要研究方向为光学惯性导航及精密测量。E-mail:huhuizhu2000@zju.edu.cn