

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2310991

# 高轨遥感卫星光轴指向误差夹角测量系统标定方法研究

李悦昕<sup>1</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 辛璟焘<sup>1,2</sup>, 庄炜<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院光纤传感与系统北京实验室 北京 100016; 2. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院北京市光电测试技术重点实验室 北京 100192)

**摘要:**针对空间环境应用中航天器结构形变夹角测量系统因系统误差导致测量精度较低的问题,提出一种基于自准直对比系统的夹角测量系统标定方法。通过该方法对夹角测量仪进行标定后得到标定系数,并应用仿真数据对系数进行验证。验证结果表明,夹角测量系统量程可达到 $\pm 25'$ ,测量分辨率可达到 $0.1''$ 。使用标定后的夹角测量系统进行角度检测,并将测量结果与自准直仪进行对比。结果表明,该标定方法简单方便精准度高,计算测量结果与标准值的差值的绝对值,夹角测量仪测量精度达到 $\pm 0.2''$ ,标定后夹角测量仪精度满足卫星使用要求,该方法的应用将为卫星在轨结构微形变研究提供技术支撑。

**关键词:** 夹角测量系统; 角度标定; 自准直法; 航天器结构型变

**中图分类号:** TH712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Research of calibration method for optical axis pointing error included angle measuring system on high orbit remote sensing satellite

Li Yuexin<sup>1</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>, Zhang Xu<sup>1</sup>, Xin Jingtao<sup>1,2</sup>, Zhuang Wei<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, School of Instrument and Opto Electronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 2. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, School of Instrument and Opto Electronic Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** A calibration method of the included angle measuring system based on the autocollimation contrast system is proposed. This method is used to improve the accuracy of the included angle measuring system. Therefore, it can accurately measure the deformation of the spacecraft structure in the space environment. The calibration coefficient is achieved by calibrating the included angle measuring system, and the coefficient is evaluated by simulation data. Results shows that the measuring range of the included angle measuring system can be up to  $\pm 25'$  and the measuring resolution can be up to  $0.1''$ . Experimental results show that the calibration method is simple and convenient with high accuracy. It proves that the measurement accuracy of the angle measuring instrument reaches  $\pm 0.2''$  by computing the absolute value of the difference between the measured results and certified value. In general, the accuracy of the angle measuring instrument after calibration meets the requirements of satellite utilization. This method can provide technical support for the study of micro deformation of satellite structures in orbit.

**Keywords:** included angle measuring system; angle calibration; autocollimation method; spacecraft structural deformation

## 0 引言

小、微角度的高精度测量技术是各国科研领域的一大热点,特别是在航空航天、军事装备、生物医疗等领域

对高精度夹角测量的需求与日俱增<sup>[1-4]</sup>。在航空航天领域中,航天器在工作过程中因受到太阳辐射、机械振动、地球重力等影响,会发生轻微结构形变<sup>[5-9]</sup>,从而导致航天器有效载荷与其基准面之间产生一定的角度偏转,对有效载荷的准确性产生影响<sup>[10]</sup>。

光学遥感卫星的姿态位置精度是影响卫星性能的关键,目前卫星姿态定位精度相较于过去已有了长足进步,其精度量级维持在秒(")级水平,在这一水平的定位精度下结构微形变对图像定位的影响可达3~5 m,卫星结构微形变这一问题是当前影响光学遥感卫星无地面控制几何定位精度的关键因素<sup>[11]</sup>。

星敏感器是遥感卫星姿态定位的关键器件之一。在实际应用中,星敏感器通常不与遥感卫星成像器件处于同一位置,因此在卫星主光轴与星敏感光轴之间会存在一定夹角,在空间微重力环境下,遥感卫星平台在运行过程中所产生的各种频率的抖动与颤振以及在轨运行过程中所经受的温度变化皆有可能造成卫星结构出现微小形变,从而改变主光轴与星敏感光轴之间的夹角,导致遥感卫星姿态定位精度下降,影响遥感卫星成像性能。

目前基于光学测量原理的微小形变测量方法主要包含自准直法<sup>[12-14]</sup>、激光干涉法<sup>[15]</sup>、菲涅尔双棱镜法<sup>[16]</sup>、光栅法<sup>[17-18]</sup>、图像处理法<sup>[19-22]</sup>等。Konyakhin等<sup>[23]</sup>通过自准直法实现微小角度测量,应用补偿算法消除反射图像点的光斑误差,保证其二维角度测量精度;张旭等<sup>[24]</sup>利用光栅法对板壳结构受力的微小形变情况的实时监测,建立曲面重构算法对板壳进行三维重构,解决了复杂三维结构难以实时测量的问题。对于相关测量设备的标定方法也有诸多研究课题,例如Li等<sup>[25]</sup>通过图像处理法实现了对自准直设备的校准,校准后其设备精度可达 $\pm 0.1$  pixels;Samoylenko等<sup>[26]</sup>开发了用于同时校准3个及以上自准直仪的校准系统,校准后测量系统测量结果与标准结果插值不超过0.15"。

本文基于应用自准直法设计的夹角测量系统,结合其光学原理与结构特点,建立了夹角测量系统标定系统的光路模型,构建了基于自准直原理的标定系统,完成对于夹角测量系统的标定。并对标定系统进行稳定性实验,实验数据表明经过标定的夹角测量系统测量精度满足卫星使用要求且系统具有稳定性。本研究创新证明了将自准直原理应用于星载夹角测量仪标定的可行性,并建立了夹角测量仪标定系统,利用该系统可以实现自准直法夹角测量系统的精细标定,实现对遥感卫星主光轴与星敏感光轴之间夹角变化的实时精确测量,从而提升卫星遥感精度。

## 1 夹角测量系统标定原理

### 1.1 夹角测量系统原理

夹角测量系统包含3台夹角测量仪与3片反射镜组件。夹角测量系统布局如图1所示。由图1所示,夹角测量系统中反射镜组件1和反射镜组件2组成一体棱镜结构,两镜的夹角由夹角测量仪1、2的安装位置决定,夹

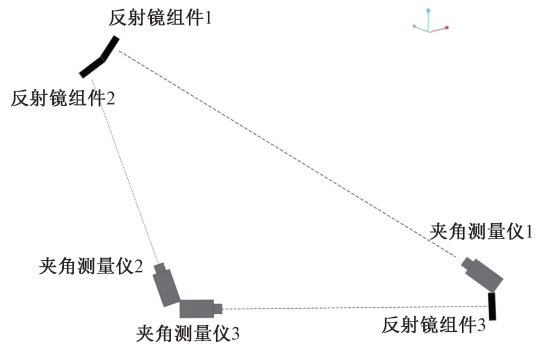


图1 夹角测量系统布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of the included angle measurement system

角测量仪3与夹角测量仪2处于同一位置,其对应的反射镜3布设在夹角测量仪1上。在轨运行过程中,夹角测量仪结构形变会造成夹角测量仪1和夹角测量仪2光轴指向发生偏转,引起测量误差,通过夹角测量仪3测量夹角测量仪1和夹角测量仪2的相对偏转,对测量结果做出修正。

### 1.2 夹角测量仪工作原理

夹角测量仪是一种利用光学自准直原理将角度测量转换为线性测量的计量仪器,可实现高精度的非接触空间角度测量。夹角测量系统工作原理图如图2所示,折/反射式夹角测量仪的CMOS传感器位于准直物镜焦平面上。光源发出的光经过主镜中心通光孔后照射在次镜上进行第一次反射,反射光束经主镜进行二次反射得到平行光束,然后经被测目标反射后再返回光学系统,通过分光镜在CMOS传感器靶面上成针孔像。夹角测量仪三维模型如图3所示。

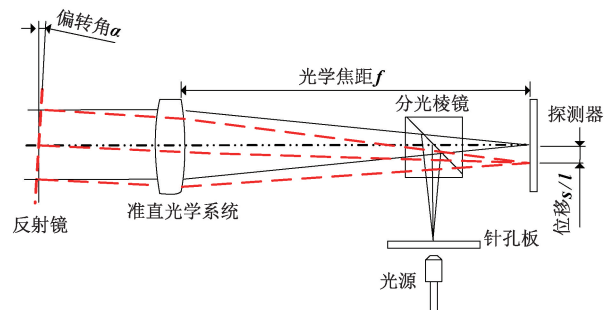


图2 夹角测量系统测量工作原理

Fig. 2 Schematic diagram of the included angle measurement system

### 1.3 夹角测量系统标定原理

根据夹角测量系统工作原理,采用将测量数据与被测数据标准值进行对比的方法,完成对夹角测量仪的标

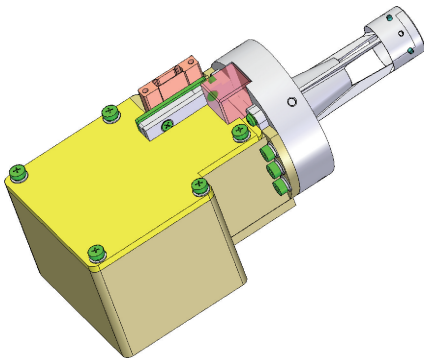


图3 夹角测量仪三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of included angle measuring instrument

定。夹角测量系统标定实验系统原理如图4所示。夹角测量系统试验主要设备包括夹角测量仪、反射镜1、反射镜2、自准直仪、偏转台、电子温度计以及上位机。

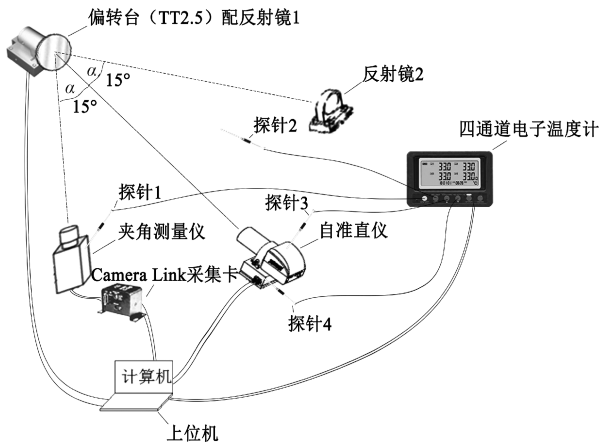


图4 夹角测量仪标定实验系统原理

Fig. 4 Schematic diagram of included angle measuring instrument calibration experiment

实验过程中将自准直仪正对安装反射镜1的偏转台固定,并以偏转台与自准直仪的连线为中线,将夹角测量仪与反射镜2对称放置于两侧,使夹角测量仪与反射镜2的角度为 $30^\circ$ 。上位机控制偏转台进行偏转,偏转过程中仅进行一个轴向偏摆,以减小偏转台的累积误差。自准直仪实时测量偏转台偏转角并将角度数据传输至上位机。

夹角测量仪采用Camera Link采集卡实时采集夹角测量仪接收的光斑图像,上位机通过对图像的实时处理从而确定光斑中心坐标。反射镜1法线方向与夹角测量仪至反射镜2光路夹角的角平分线处于平行位置,故光线经反射后按入射路径返回,此时返回光线在夹角测量仪上所成像的中心 $O'$ 记为系统零位。当反射镜1法线方

向与准直光学系统的主光轴有一夹角 $\alpha$ 时,则反射光线经夹角测量仪物镜后与主光轴所呈夹角为 $2\alpha$ ,此时反射光线所成的像的中心 $O'$ 与传感器零位相差距离 $s$ :

$$s = f \cdot \tan 2\alpha \quad (1)$$

式中: $f$ 为自准直光学系统的像方焦距。可以求得 $\alpha$ 值为:

$$\alpha = \arctan \frac{s}{2f} \quad (2)$$

当 $\alpha$ 很小时,有 $\tan 2\alpha \approx 2\alpha$ ,代入可得:

$$2\alpha = \frac{s}{f} \quad (3)$$

在实际实验测量中,夹角测量仪测量一般是通过两张图像光斑中心的相对位置位移测量来实现的,即位移 $s = l - l_0$ ,可得:

$$2\alpha = \frac{l - l_0}{f} \quad (4)$$

标定实验中得到夹角测量仪测量的光斑位移量 $s$ 后,与自准直仪所记录的反射镜1偏转角度的标准值 $\theta$ 进行对比标定,位移量 $s$ 与角度值 $\theta$ 进行一维线性拟合得到的拟合系数 $k$ 和 $b$ ,作为光斑位移量与角度间的标定系数。

## 2 夹角测量仪标定实验

### 2.1 实验平台构建

实验在1 000级洁净实验间进行,实验系统放置于气浮式光学平台上,并使用防风罩避免空气流动对标定精度的影响。在实验中使用的2轴倾斜转台TT2.5的分辨率为 $0.005 \mu\text{rad}$ ,即角度分辨率为 $0.001''$ 。重复定位精度为 $0.01 \mu\text{rad}$ ,即角度重复性为 $0.002''$ 。量程为 $5 \text{ mrad}$ ,满量程误差为 $\pm 0.103 1''$ 。自准直仪的测量精度为 $\pm 0.1''$ ,测量范围为 $\pm 1 000''$ 。反射镜距夹角测量仪焦平面的距离应固定在 $220 \text{ mm}$ 位置,反射镜2应以反射镜1为对称轴放置于相应位置。在实验过程中各项仪器的控制、数据采集和计算由上位机进行。实验平台构建实物如图5所示。

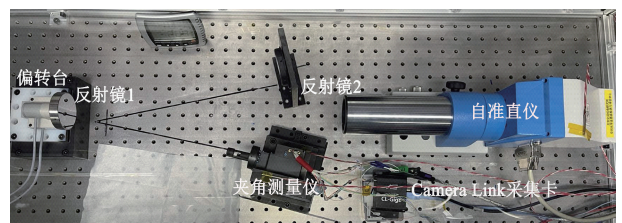


图5 夹角测量仪标定实验系统图

Fig. 5 Calibration experimental system of included angle measuring instrument

### 2.2 标定系统稳定性实验

在校准实验开始前,需先进行试验系统稳定性实验,以确保实验系统中各结构器件之间的应力释放完全。偏转台偏转角固定在零点位置,对采集图像进行实时的采集和处理,并判断中心点角度值是否稳定。测试过程中光斑图像如图 6 所示。

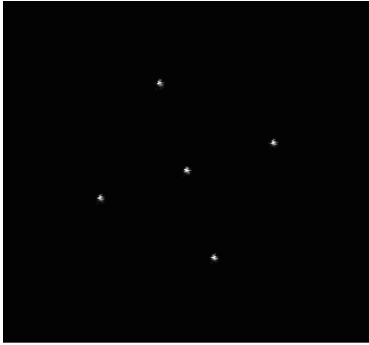


图 6 光斑实测图像  
Fig. 6 Measured image of facula

稳定性实验共持续 5 000 s,其时间与单次标定实验持续时间保持一致。在实验过程中每 10 s 保存一次光斑图像,共采集 501 张图像,对图像进行数据处理计算得到光斑中心的坐标值,其结果如表 1 所示。

表 1 稳定性实验光斑中心角度偏移量测量结果

Table 1 Measurement results of center angle offset of laser spot in stability experiment

角度相关值	角度偏移量 X 轴/(")	角度偏移量 Y 轴/(")
平均值	0.000 7	-0.001 6
标准差	0.005 4	0.006 6
最大残差	0.023 4	0.023 4

根据表 1 实验结果可以看出,各像光斑中心偏移量最大残差值为 0.023 4",说明实验系统漂移量<0.2",实验系统的具有稳定性。

### 2.3 夹角测量系统标定实验

实验过程中对夹角测量系统的 X 轴与 Y 轴分别进行标定,以避免偏转台在复杂运动过程中出现运动误差累积,导致标定精度下降。在 X 轴标定过程中偏转台从 2 000~3 000  $\mu\text{rad}$  运动,每步偏转步进 20  $\mu\text{rad}$ ,共步进 51 步,在每次步进中保持维持 10 s;Y 轴标定过程中在 1 750  $\mu\text{rad}$  至 3 250  $\mu\text{rad}$  范围内以偏转步进 30  $\mu\text{rad}$  的数值步进 51 步,在每次步进中保持维持 10 s。实验中以弧度值往返一次为一次完整的测量过程。

从验证重复性角度考量,选择 3 台夹角测量仪进行标定,并分别验证标定结果。3 组夹角测量仪的像素值

实验数据与自准直仪得到的角度值数据以中间数据为中点进行归零处理,在这之后通过程序对数据进行一次拟合,拟合得到的拟合系数即为标定系数。然后将像素数据带入拟合公式中计算夹角测量仪是实际测量角度值,并将测量结果与自准直仪测量角度值对比,计算残差,结果如表 2 所示。

表 2 夹角测量仪拟合系数

Table 2 Measurement results of central coordinates of laser spot in stability experiment

夹角测量仪 A	一次项拟合系数	常数项拟合系数	拟合结果残差绝对值最大值
X 轴	1.168 6	-0.025 4	0.068 6
Y 轴	-1.168 3	-0.023 4	0.124 6
夹角测量仪 B	一次项拟合系数	常数项拟合系数	拟合结果残差绝对值最大值
X 轴	1.169 7	-0.007 0	0.126 6
Y 轴	-1.170 1	0.027 4	0.177 6
夹角测量仪 C	一次项拟合系数	常数项拟合系数	拟合结果残差绝对值最大值
X 轴	1.159 5	-0.085 3	0.149 0
Y 轴	-1.158 7	-0.049 8	0.151 4

由表 2 中看出,标定实验所得拟合系数计算出角度值与实际角度值的残差最大值小于 0.2"。

## 3 实验结果验证

### 3.1 仿真实验验证

通过仿真系统实验对夹角测量系统的测量结果、精度与量程进行验证,仿真过程中基于实际使用的 CMOS 传感芯片尺寸 2 600×2 160 进行数据生成,数据精度参考夹角测量仪实际硬件编码精度保留 6 位整数与 6 位小数,模拟在以 1 pixels 为步进的条件下,光斑从 0 坐标位置步进至相应坐标轴最大值位置,使用仿真坐标值经过角度计算得到与坐标相对应的角度值,同时带入标定系数进行计算,模拟夹角测量仪的测量结果。结果如表 3 所示。

表 3 仿真结果

Table 3 Simulation result

精度/(")	量程/(')	测量结果(差值绝对值)/(")
$1 \times 10^{-6}$	-25.4~+25.4	<4.45

根据仿真实验结果, 夹角测量系统的量程位于  $-25.4' \sim +25.4'$  之间, 精度达到  $1 \times 10^{-6}''$ 。

### 3.2 系统实验验证

对每台夹角测量仪的每个轴向进行数据采集, 并通过系数计算, 从而验证标定后的检测精度。实验环境为维持恒温恒湿的 1 000 级超净环境, 温度保持在

20.5℃, 湿度保持在 34.0%。实验时间选择在凌晨 2 点以最大限度避免环境光、震动等因素对实验结果造成误差。同时在实验过程中涉及到夹角测量仪拆装的步骤对试验系统进行应力释放, 在确保实验装置应力已完全释放后才能进行实验。实验结果如图 7 所示。

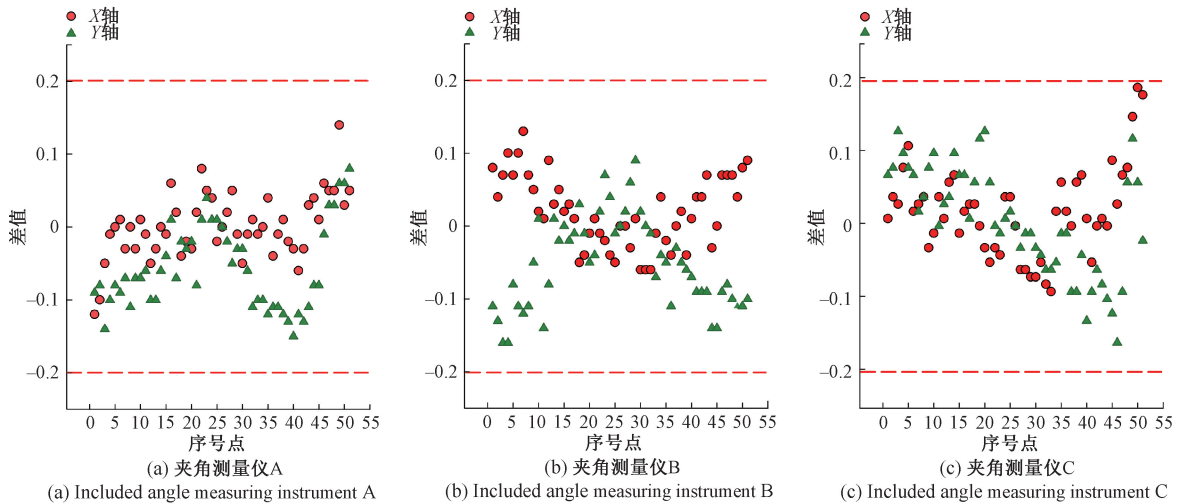


图 7 3 组夹角测量仪各轴测试结果

Fig. 7 Test results of each axis of three sets of included angle measuring instruments

从图 7 中数据可以得出结论, 夹角测量仪测量结果具有准确性, 角度检测精度为  $\pm 0.2''$ 。该结果与国内外同类标定方法结果对比如下表 4 所示。

表 4 国内外同类研究成果对比表

Table 4 Comparison Table of Similar Research Results

研究内容	研究人员	标定结果
图像处理法标定自准直系统	Li ZH T <sup>[25]</sup> 等	$\pm 0.2''$
三个及以上自准直仪同时标定系统	OM Samoylenko <sup>[26]</sup> 等	$\pm 0.15''$
高精度夹角测量仪标定方法	本文	$\leq \pm 0.2''$

由表 4 调研结果表明, 标定过后夹角测量仪精度达到当前国内外先进水平, 证明针对夹角测量仪的标定方法具有有效性, 可以确保夹角测量仪作为精确测量仪器的准确性, 为夹角测量仪后续星上应用提供数据保障。

## 4 结 论

本文针对高精度夹角测量仪存在的误差问题, 提出了一种基于自准直仪对比法的校准方法, 对夹角测量仪测量结果进行标定, 提高测量结果精确度。通过使用自准直仪配合反射光路可同步获得角度数据与测量数据, 实现了测量结果的校准。实验表明, 夹角测量系统量程

可达到  $\pm 25'$ , 测量分辨率可达到  $0.1''$ 。使用标定后的夹角测量系统进行角度检测, 并将测量结果与自准直仪进行对比, 在控制温度、湿度等环境变量的条件下校准后的夹角测量仪具有精确度, 测量误差均在  $\pm 0.2''$  之内。该标定方法易于操作, 且标定结果精度高稳定性好, 标定后夹角测量仪精度满足卫星使用要求, 可以在空间环境下为遥感卫星正常准确运作提供技术支持。

## 参考文献

- [1] ZHAO Y, FAN X, WANG C, et al. An improved intersection feedback micro-radian angle-measurement system based on the laser self-mixing interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126(6): 105866.
- [2] GECKELER R D, KRAUSE M, JUST A, et al. New frontiers in angle metrology at the PTB [J]. Measurement, 2015, 73(7): 231-238.
- [3] SHIMIZU Y, MATSUKUMA H, GAO W. Optical sensors for multi-axis angle and displacement measurement using grating reflectors[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5289.
- [4] KUMAR A S A, GEORGE B, MUKHOPADHYAY S C.

- Technologies and applications of angle sensors: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(6): 7195-7206.
- [5] 韩首榜,董明利,孙鹏,等. 遥感卫星外壳摄影测量网络定向方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020,41(4): 200-207.
- HAN SH B, DONG M L, SUN P, et al. Photogrammetric network orientation of remote sensing satellite outer surface[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020,41(4): 200-207.
- [6] BAZIL RAJ A A, VIJAYA SELVI A J, DURAI K D, et al. Intensity feedback-based beam wandering mitigation in free-space optical communication using neural control technique[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014(1): 1-18.
- [7] BAI S, WANG J, QIANG J, et al. Predictive filtering-based fast reacquisition approach for space-borne acquisition, tracking, and pointing systems[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26462-26475.
- [8] HSIEH T H, CHEN P Y, JYWE W Y, et al. A geometric error measurement system for linear guideway assembly and calibration[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(3). DOI: 10.3390/app9030574.
- [9] HU P H, YU C W, FAN K C, et al. Error averaging effect in parallel mechanism coordinate measuring machine[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(12): 383.
- [10] SCHERFF M L D, NUTTER J, FUSS-KAILUWEIT P, et al. Spectral mismatch and solar simulator quality factor in advanced LED solar simulators[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(S2): 08MB24.
- [11] 王艳丽. 光学遥感卫星姿态测量数据处理关键技术研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(3): 482.
- WANG Y L. Research on the key technology of attitude measurement data processing for optical remote sensing satellite [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 482.
- [12] TANG S, WANG Z, GAO J, et al. Influence of tilt on collinear calibration of a laser interferometer[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): B46-B51.
- [13] SAITO Y, GAO W, KIYONO S. A micro angle sensor based on laser autocollimation [C]. *Optomechatronic Systems Control*, SPIE, 2005, 6052: 219-227.
- [14] 廉孟冬,金伟锋,居冰峰. 二维光学自准直微角度传感器[J]. *机电工程*, 2010, 27(12): 23-26,35.
- LIAN M D, JIN W F, JU B F. 2D micro-angle sensor based on laser autocollimation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2010, 27(12): 23-26,35.
- [15] ZHANG E, CHEN B, ZHENG H, et al. Note: Comparison experimental results of the laser heterodyne interferometer for angle measurement based on the Faraday effect [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(4): 046104.
- [16] SABATYAN A, HOSEINI S A. Fresnel biprism as a 1D refractive axicon [J]. *Optik*, 2013, 124(21): 5046-5048.
- [17] HSIEH H L, PAN S W. Development of a grating-based interferometer for six-degree-of-freedom displacement and angle measurements[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2451-2465.
- [18] 陈璉,杨程亮,穆全全,等. 基于琼斯矩阵的液晶偏振光栅扭曲角及厚度的测量方法[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(5): 656-662.
- CHEN J, YANG CH L, MU Q Q, et al. Method for measuring the twist angle and thickness of liquid crystal polarization grating based on Jones matrix[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(5): 656-662.
- [19] WU Y, CHENG H, WEN Y. High-precision rotation angle measurement method based on a lensless digital holographic microscope [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): 112-118.
- [20] YUAN J, DAI P, LIANG D, et al. Grid deformation real-time measurement system of ion thruster based on videometrics[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(9): 1759.
- [21] 朱进,黄焱,朱维斌,等. 磁光阱异面空间角度测量及测量不确定度评定[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(1): 103-110.
- ZHU J, HUANG Y, ZHU W B, et al. Measurement of spatial angle of different surfaces of magneto-optical trap and evaluation of measurement uncertainty[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(1): 103-110.
- [22] 李娜,姜志,王军,等. 基于 Faster R-CNN 的仪表识

别方法[J]. 液晶与显示, 2020, 35(12): 1291-1298.

LI N, JIANG ZH, WANG J, et al. Instrument recognition method based on Faster R-CNN[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2020, 35(12): 1291-1298.

- [23] KONYAKHIN I, SAKHARIYANOVA A M, SMEKHOV A. Investigation vignetting beams in optoelectronic autocollimation angle measurement system [ C ]. Modeling Aspects in Optical Metrology V, SPIE, 2015, 9526: 91-97.

- [24] 张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 74-81.

ZHANG X, HOU M SH, LIU ZH CH, et al. Surface reconstruction algorithm of plate-shell structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9):74-81.

- [25] LI ZH T, LIU M Y, LU J F. High precision autocollimation measurement technology based on image recognition[C]. 2021 2nd International Conference on Computing and Data Science ( CDS ), IEEE, 2021: 125-129.

- [26] SAMOYLENKO O M, ADAMENKO O V, KUKAREKA B P. Investigation of the accuracy of reference instruments for measuring vertical angles by reference method of their calibration [ J ]. Metrology and Instruments, 2019 ( 6 ): 3-14.

## 作者简介



**李悦昕**, 2019 年于北京工业大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与光电器件。

E-mail: lyx0900f@126.com

**Li Yuexin** received his B.Sc. from Beijing University of Technology in 2019. He is currently a master student in the School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include optical fiber sensing and optoelectronic devices.



**祝连庆**(通信作者), 分别在 1982 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail:lqzhu\_bistu@sina.com

**Zhu Lianqing** (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1982 and 1989, respectively, and received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing technology, fiber laser, and opto-electrical precision measurement technology.