

基于高精度抖动补偿系统的星模拟技术

杨永兴^{1,2}, 王鑫蕊^{1,2}, 朱韵至³, 赖新华⁴, 李启统^{1,2}, 陈北北^{1,2}, 张景源^{1,2}, 李金鹏^{1,2,3*}¹中国科学技术大学, 安徽 合肥 230022;²中国科学技术大学南京天文仪器研制中心, 江苏 南京 210042;³中国科学院南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042;⁴上海师范大学数理学院, 上海 200234

摘要 为抑制地面环境扰动的影响,提升星敏器地面验证实验的标定精度,提出一种具有抖动补偿功能的星模拟技术。该技术通过可调激光光源提供抖动补偿信标光,利用大口径分光棱镜对多目标星图合束,使用大口径高精度压电偏转镜实时反馈补偿稳定星光,配合长焦距平行光管为高精度星敏器提供高稳定恒星目标源。仿真研究了该系统性能参数,结果表明补偿精度的峰值偏差为 $0.045''$,补偿分辨率为 $0.01''$ 。构建了基于抖动补偿系统的星图模拟系统,现场通过4D干涉仪实测得到的该系统补偿分辨率达到 $0.01''$,补偿精度优于 $0.1''$ 。所提技术能够探测微小光轴偏移并进行高精度反馈补偿,能为高精度星敏器地面验证系统提供稳定的恒星目标,为后续需要高稳定目标源的系统提供一种解决方案。

关键词 测量; 抖动补偿; 快速摆动镜; 星模拟系统; 光束稳定系统; 振动抑制

中图分类号 O435 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1812005

Star Simulation Technology Based on High-Precision Jitter Compensation System

Yang Yongxing^{1,2}, Wang Xinrui^{1,2}, Zhu Yunzhi³, Lai Xinhua⁴, Li Qitong^{1,2}, Chen Beibei^{1,2},
Zhang Jingyuan^{1,2}, Li Jinpeng^{1,2,3*}¹University of Science and Technology of China, Hefei 230022, Anhui, China;²Nanjing Research Center of Astronomical Instruments, University of Science and Technology of China, Nanjing 210042, Jiangsu, China;³Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, Jiangsu, China;⁴Mathematics & Science College of Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

Abstract In order to suppress the influence of ground environment disturbance and improve the calibration accuracy of the ground verification test of star sensors, a star simulation technology with the jitter compensation function is proposed. This technology uses a tunable laser as the light source to achieve a beacon light with jitter compensation. In addition, it employs a large-diameter beam-splitting prism to achieve a multi-target star map combination and a large-diameter high-precision piezoelectric deflecting mirror to give feedback on and compensate for starlight in real time. Furthermore, a long-focus collimator is utilized to provide stable stars for high-precision star sensors. The performance of the system is studied through simulation, and the results show that the compensation accuracy peak deviation is $0.045''$, and the compensation resolution is $0.01''$. Then, a star map simulation system based on the jitter compensation system is constructed, and the system is measured with a 4D interferometer. The results show that the compensation resolution of the system reaches $0.01''$, with the compensation accuracy better than $0.1''$. This technology can detect the slight deviation of the optical axis and perform high-precision compensation. It can also provide a stable star target for the ground verification system of the high-precision star sensor and offer a solution for subsequent systems that require a highly stable target source.

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-03-23; 录用日期: 2022-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(12003067, 12141304)、江苏省自然科学基金(BK20210052)、江苏省“外专百人计划”(BX2021067)、南京市国际科技合作项目(2020sx00100193)、企业院士工作站关键核心技术攻关项目、高端外国专家引进计划(G2021015001L)

通信作者: *lijinpeng@nairc.ac.cn

Key words measurement; jitter compensation; fast oscillating mirror; star simulation system; beam stabilization system; vibration suppression

1 引言

星敏传感器是一种高精度的空间姿态光学敏传感器,在航天领域得到了广泛而深入的应用^[1]。其中航天器及高精度卫星常采用空间光学姿态敏传感器进行实时姿态捕捉和测量,星敏传感器通过星图实时计算出飞行位置偏差和姿态偏差^[2-7]。星敏传感器实际在轨飞行前需要进行地面验证实验,星模拟器作为星敏传感器在地面标定的重要部分,可以在实验室条件下为大视场高精度星敏传感器提供目标源,模拟天空中星的位置、亮度等特性。

目前国内外均对星模拟器进行了大量研究^[8-10],如:美国 McDonnell Douglas Aerospace 研制了能够模拟三组不同天区星图的动态星模拟器^[11];德国 Carl Zeiss 研制的静态多星模拟器中使用平行光管来模拟无穷远星光^[12];美国 Eastman Kodak 研制了一种静态星模拟器,可通过控制光纤模拟出不同光谱特性的星点^[13];中国科学院西安光学精密机械研究所研制了使用积分球光源的静态星光模拟器^[14];北京控制工程研究所研制了一套高精度的静态星模拟器,采用焦距为 5 m 的光学系统来模拟来自无穷远的星光^[15]。

上述类型星模拟器的本质都是将位于系统焦面处的星点分划板成像到无穷远处以模拟恒星位置,然后由星敏传感器采集星图,提取特征星点,进而解算姿态和

指向;均未考虑由地面环境振动因素导致的星点像素漂移情况,而该振动因素会影响星敏传感器的地面标定效果,降低星敏传感器的实际使用性能。快速摆动镜作为稳像元件在大型空间望远镜中有较多的应用^[16-17]。快速摆动镜通过匹配对应的探测光路能够实现光束稳定,但是鲜有研究人员将其运用到星模拟系统中进行环境振动抑制。

本文提出一种具有高精度振动补偿功能的星模拟技术,并配合大口径、长焦距的平行光管系统,为星敏传感器的地面验证实验提供高稳定恒星光源。该系统可通过大口径分光棱镜获得大视场、高精度、多目标合成星图,为星敏传感器提供多种模式的模拟星图。该系统通过高速相机采集并提取振动信息,闭环控制快速摆动镜进行振动补偿,能够有效抑制地面的振动对整体光学系统的影响,为星敏传感器提供稳定的恒星光源,从而提升星敏传感器地面标定实验的精度。

2 高精度抖动补偿星模拟系统介绍

2.1 高精度抖动补偿星模拟系统

高精度抖动补偿系统如图 1 所示,上半部分为模拟星光透射光路和振动信号探测及补偿系统,下半部分为星敏传感器地面验证系统。高精度抖动补偿系统主要分为 3 个模块:模拟星图模块、振动探测及补偿模块、信标激光模块。其中:模拟星图模块包括积分球光

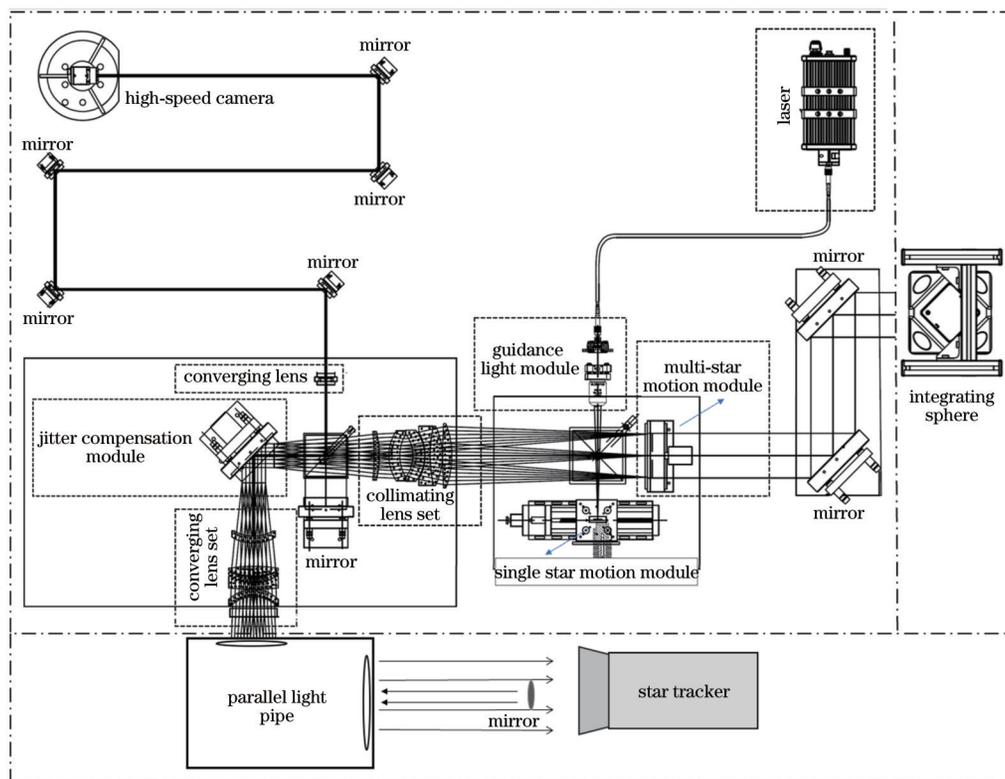


图 1 高精度抖动补偿系统的光路图

Fig. 1 Lightpath of high precision jitter compensation system

源、多星星点分划板、单星星点分划板、大口径分光棱镜、星光准直透镜组、反射镜、星光会聚透镜组和高精度平移导轨;振动探测及补偿模块包括高速相机、会聚透镜、分光棱镜、快速摆动镜(抖动补偿镜)和反射镜;信标激光模块包括激光器、光纤耦合器和投影镜组。

2.2 多目标合成星图关键技术

为解决目前星模拟器单次显示单一模拟星图的功能无法满足移动星图追踪需求,复杂星图下单星跟踪标定精度低等问题,提出一种大视场、高精度的多目标合成星图技术。图 2 所示为多目标合成星图光路。将积分球光源的出射光束照亮多星星点分划板,同时可调光源照亮单星星点分划板。分划板上刻有预先按星图设计的星点。多星星点分划板和单星星点分划板位于星光准直透镜组的焦面处,上述两种星

点分划板的出射星光通过大口径分光棱镜合束至准直镜组,经准直镜组折射后形成平行光束。该平行光经分光棱镜透射到抖动补偿镜上,经补偿镜实时反馈补偿后反射到星光会聚透镜组,星光会聚透镜组的焦面与平行光管系统共焦面,故平行光管系统出射光束为无穷远星光,此星光为星敏感器提供高稳定模拟恒星源,此光路即为多目标模拟星图的光路传播路径。需要指出的是:上述多星星点分划板被安装于可以 360° 旋转的高精度电机上,可为星敏感器呈现满天恒星旋转的星图模拟;单星星点分划板被安装于高精度平移导轨,可实现单星点移动目标模拟星图。两种星图结合可模拟多恒星背景下单星点运动的星图。多种模拟星图为星敏感器模拟在轨飞行提供所需运行工况。

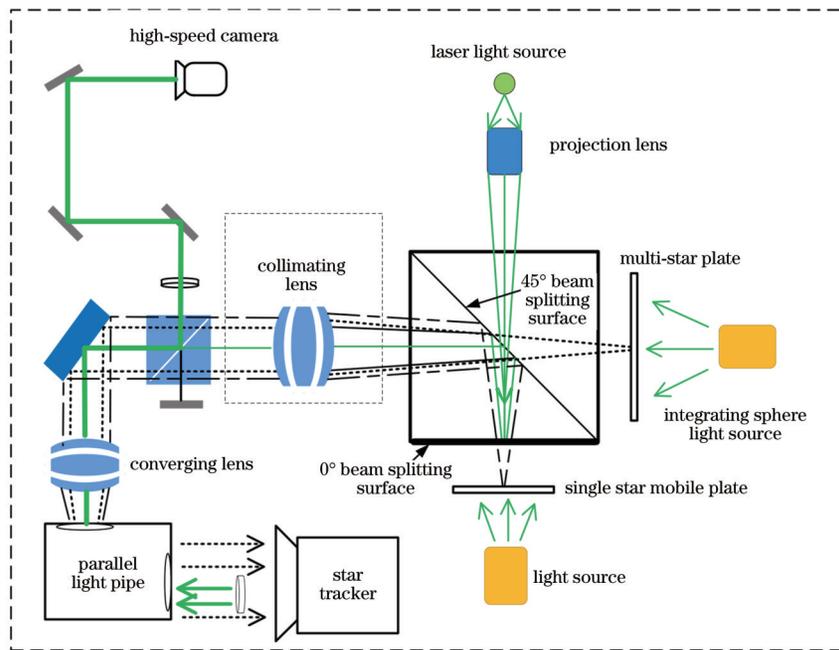


图 2 多目标合成星图光路

Fig. 2 Lightpath of multiple target synthetic star map

2.3 信标光抖动补偿关键技术

信标光的光路如图 2 所示,激光器光纤出射的信标光由投影物镜会聚到分光棱镜内,该信标光实像位置与星点分划板关于分光面对称,信标光由分光棱镜 0° 分光面反射,再经过分光棱镜 45° 分光膜反射进入准直镜组准直为平行光束,此平行光束经过分光棱镜后分成两束光:一束光经分光棱镜反射后由长焦会聚透镜组会聚到高速相机的焦面上,作为参考光点;另一束光作为信号光透射分光棱镜,经补偿镜和会聚透镜组进入平行光管,最终由探测振动信号光路收集处理。

探测振动信号的光路如图 3 所示,在星敏感器前端放置一个小口径反射镜,将上述信标光反射回平行光管系统,此信标光经星光会聚透镜组出射为窄平行光束,经抖动补偿反射镜和分光棱镜反射后,由长焦会聚透镜组会聚到高速相机的焦面上,形成信号光点。

抖动补偿镜系统架构如图 4 所示,该系统由大直

径压电偏转台、驱动电路及快速摆动镜组成。由于大口径长焦距平行光管系统和星敏感器在地面受到振动因素的影响,因此由星敏感器前端反射镜返回的光点会在高速相机的焦面处发生漂移。计算信号光点相对于参考光点的像素偏移量,即可知道信号光束偏移的角度,此时控制快速摆动镜偏移对应的角度,微调光轴以抵消光束抖动造成的光轴偏移,即可补偿此时星光偏移的角度,达到稳定星点的稳像作用。

3 系统仿真验证

为验证高精度抖动补偿系统的性能,对整体装置的各光学元件进行光学建模分析。表 1 给出了各工作面的属性值和光源的相关设置情况。使用 Zemax 软件对模型进行光线追迹,系统各光学元件按图 1 所示光路结构进行布置。将点光源放置在星光准直透镜组焦面处,由其准直出射平行光束,分光棱镜将平行光束分

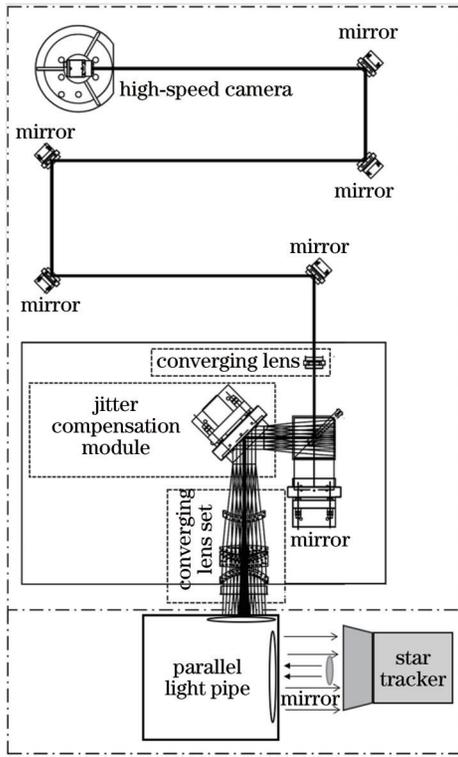


图 3 探测振动信号的光路图
Fig. 3 Lightpath for detecting vibration signals

为两束,经分光棱镜反射的平行光束由长焦距会聚镜组会聚到相机焦面处形成参考星点;透射的光束经抖动补偿镜反射到星光会聚镜组后由平行光管系统准直,在模型中用焦距为 3000 mm 的近轴透镜代替此平

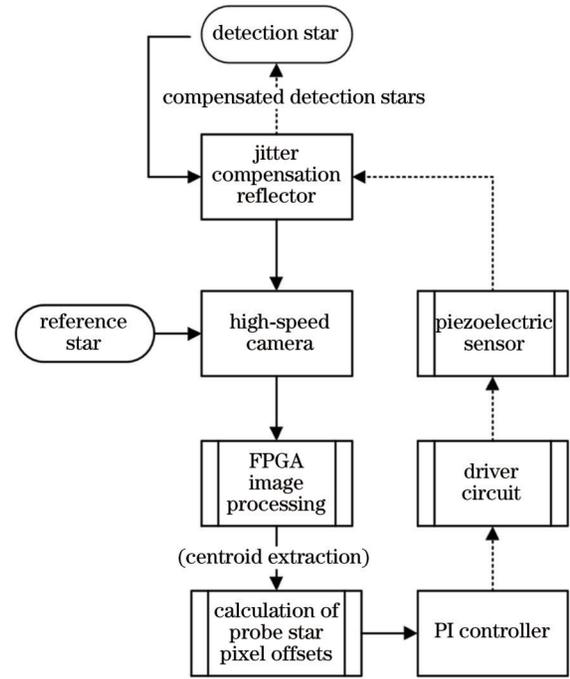


图 4 补偿镜框架图
Fig. 4 Frame of compensation mirror

行光管。模型中在平行光管后端使用一个口径为 20 mm 的小反射镜来代替星敏感器前端的小反射镜,由其反射回的光束经图 3 所示的光路会聚到相机焦面上形成探测星点,此时抖动补偿系统模型搭建完成。利用 Zemax 软件得到的光线追迹结果如图 5 所示。

表 1 光线追迹参数表
Table 1 Ray tracing parameters

Model type	Setting
Light source	Source point;
	Total rays: 100000;
Jitter compensation mirror	Polarization: random polarization;
	Cone angle: 3°
Starlight collimating lens	Silver-plated film;
	Reflectivity: 98.7%;
Off-axis triple reflection system	Wavelength: 0.4-0.9 μm
	Field: ±6.3°;
Detector	Aperture value: 40 mm;
	Effective focal length: 330.046 mm
Small reflector	Object type: paraxial lens;
	Focal length: 3000 mm
	Type: detector rectangle;
	Full width at half maximum: 2.5 mm;
	Pixel No. : 1000
	Diameter: 20 mm;
	Surface property: silver plated reflective film

从图 5 可以看到,探测光束由小反射镜反射后,经探测振动信号光路收集并会聚于高速相机焦面处,所设计的会聚镜组焦距为 2000 mm,并采用长焦距会聚

系统保证探测系统的高精度。图 6 所示为模型光线追迹后探测星点在焦面处的成像,设置探测器的 CMOS 半峰全宽为 2.5 mm,像素为 1000 pixel,单单元大小为

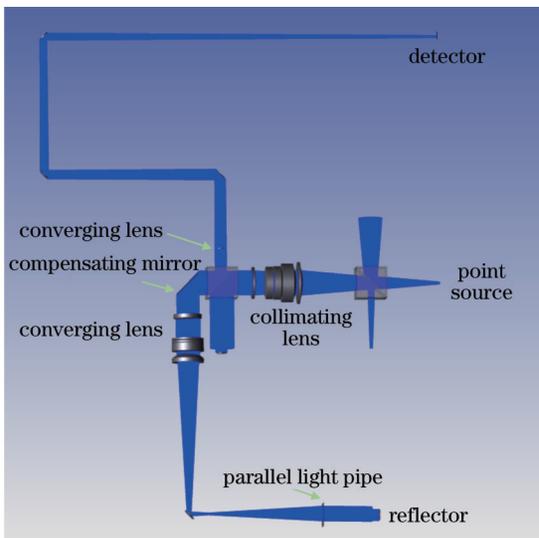


图 5 Zemax 光线追迹图

Fig. 5 Zemax ray tracing diagram

5 μm 。根据设计要求补偿精度达到 $0.1'$ ，补偿分辨率达到 $0.01''$ 。使用质心补偿算法进行星点定位，当振动信号星点发生偏移时，CMOS 像素单位偏移量对应于 $0.1''$ 。探测星点的信号应当占据 CMOS 像面的 $3\sim 5$ pixel，进一步保证了探测系统的精度。

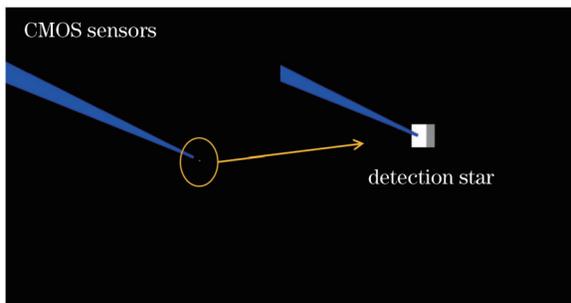


图 6 探测器像面星点图

Fig. 6 Star map on the detector image plane

通过建模仿真分析了高精度抖动补偿系统的抖动补偿分辨率和抖动补偿精度。抖动补偿分辨率测量方法为：偏转快速摆动镜使光轴偏转 $0.01''$ ，探测星点在探测器焦面上的偏移量。例如，将补偿镜偏转 $0.01''$ ，利用探测器 CMOS 对星点位置进行响应，并由计算处理模块提取星点质心并记录位置坐标。图 7 所示为补偿分辨率仿真结果，可以看到每偏转 $0.01''$ ，相机焦面上的星点位置都有对应的偏移量，即系统能对 $0.01''$ 的输入进行响应，表明系统的分辨率达到 $0.01''$ 。抖动补偿精度测试方法为：先建立补偿镜偏转角度与探测器像面像元移动量之间的关系，并将此对应关系作为模型的真值；再将补偿镜偏转任意角度，并以此时探测器探测的星点位置为测试值。利用该方法得到的真值与测试值相差小于 $0.1''$ 。图 8 所示为抖动补偿镜偏转角度与探测器像面标定函数，所得到的拟合优度 R^2 为 0.99997 ，表明模型拟合程度较优、可靠性较强。抖动补偿精度如图 9 所示，测量的精度峰值偏差为

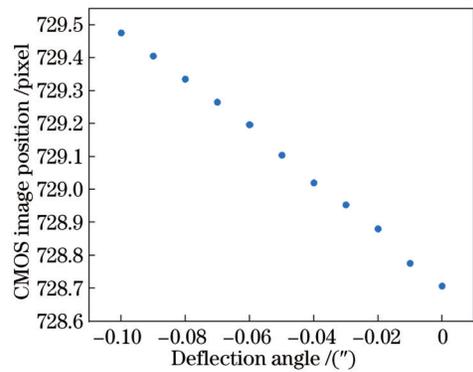


图 7 补偿系统分辨率测试结果

Fig. 7 Compensation system resolution test results

$0.04544''$ ，优于 $0.1''$ 的设计指标，从仿真分析的角度验证了该装置的性能满足要求。

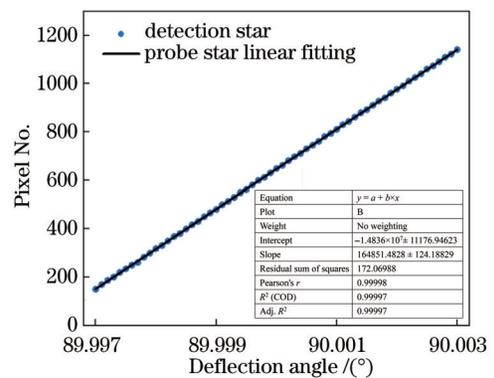


图 8 探测星点标定函数

Fig. 8 Detection star calibration function

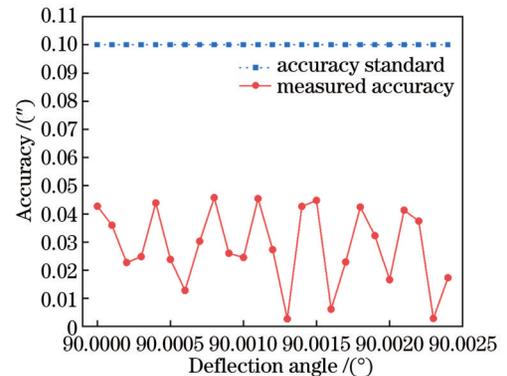


图 9 抖动补偿精度测试结果

Fig. 9 Test results of jitter compensation accuracy

4 抖动补偿系统现场实验

4.1 测试光路介绍

搭建高精度抖动补偿星模拟系统后，对该系统的抖动补偿关键技术进行现场实验研究，按照图 10 所示的测试光路搭建系统来测试抖动补偿精度。将干涉仪放置在星光准直镜组焦面处作为光源，将作为外部扰动源的球面快摆镜曲率中心放置在星光会聚镜焦面后方，用于反射探测光，此探测光可同时被干涉仪和高速

相机靶面接收。补偿精度测试方法如下:控制补偿镜偏转任意角度,此时干涉仪中干涉条纹会发生移动,根据移动条纹数量可计算偏转角度,将干涉仪计算的角度作为实际偏转角度的真值;利用高速相机探测信号

光位置信息,计算信号光束在 CMOS 靶面的移动距离,结合系统焦距计算偏转角度,并将此角度作为实际偏转角度的测量值;对比真值与测量值,即可得补偿精度。图 11 为抖动补偿系统性能测试现场图片。

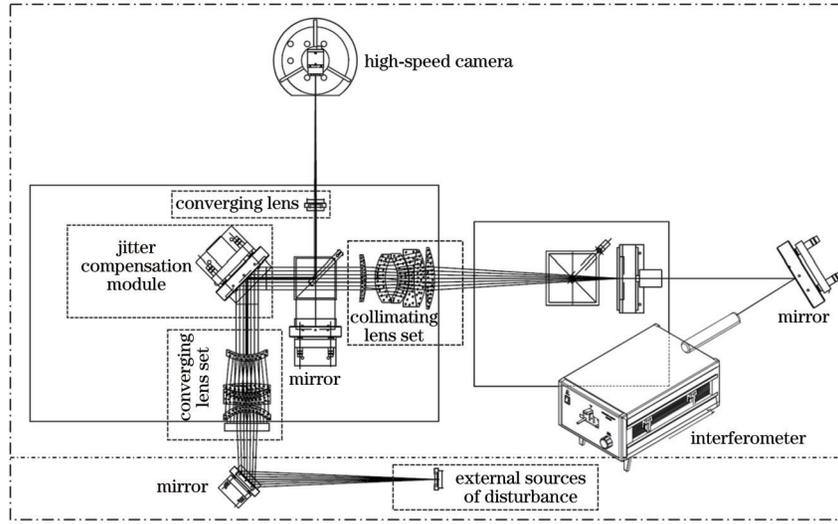


图 10 测试光路示意图

Fig. 10 Test lightpath diagram

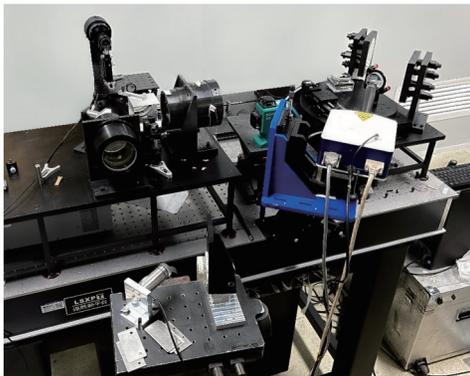


图 11 抖动补偿系统性能测试现场照片

Fig. 11 Picture of performance test of jitter compensation accuracy

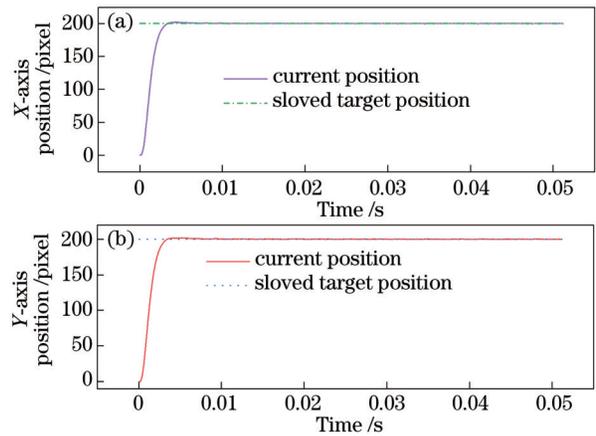


图 12 补偿镜沿不同坐标轴的偏转测试结果。(a) X轴;(b) Y轴
Fig. 12 Compensation mirror deflection test results along different axes. (a) X axis; (b) Y axis

4.2 测试结果分析

4.2.1 抖动补偿系统性能测试实验

为研究高精度抖动补偿系统的补偿分辨率及精度,按照图 10 所示的测试光路搭建系统进行性能测试。如图 12 所示,补偿镜在 PI 促动器的作用下能够在 0.0034 s 内偏转 200 μrad ,表明其具有快速偏转的特性,能够满足高频率抖动补偿的需求。图 13 所示为抖动补偿精度测试结果。根据上述补偿精度测试方法,使用相机 CMOS 探测值作为测量值,干涉仪的测量值作为真值,偏转补偿镜位置,对比干涉仪与相机 CMOS 的测量值,其最大偏转误差为 0.4961 μrad ,优于 0.5 μrad (0.1")的设计指标。

抖动补偿系统分辨率测试光路与补偿精度测试光路相同,控制补偿镜的 PI 促动器偏转最小单位角度,此时高速相机中探测星点会发生偏移,根据像素偏移

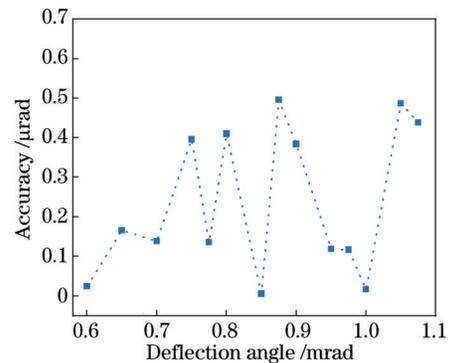


图 13 补偿精度测试结果

Fig. 13 Compensation accuracy test results

量可计算偏转角度。表 2 所示为补偿分辨率的测试结果,可以看到,PI 促动器每偏转 $0.05 \mu\text{rad}$ ($0.01''$),探测星点的微小偏移量都能够被高速相机探测到并输出其质心位置,表明系统的分辨率能够达到 $0.01''$ 。

表 2 补偿分辨率测试结果
Table 2 Compensation resolution test results

Measurement serial number	Deflection angle / μrad	Star center coordinates / pixel
1	600.00	461.15315
2	600.05	461.11479
3	600.10	461.06843
4	600.15	461.02907
5	600.20	460.98971
6	600.25	460.94293
7	600.30	460.90499
8	600.35	460.86563
9	600.40	460.82927
10	600.45	460.78291
11	600.50	460.73255
12	600.55	460.69818
13	600.60	460.65982

4.2.2 实际星模拟实验

为研究实际抖动补偿系统的星图模拟效果,结合已有的离轴三反系统进行星图模拟实验。采用大视场设计的准直镜组,以保证分划板出射星光都能收集进系统,为星敏感器提供所需的恒星目标源。星模拟实验参数如表 3 所示。采用多星星点分划板进行星图模拟,分划板的直径为 77 mm ,星光准直镜组的视场为

表 3 星模拟实验参数表

Table 3 Star simulation experiment parameters

Category	Parameter
Multi-star dot board	Diameter: 77 mm ;
	Transmittance: 0.0001
Single star dot board	Diameter: 12.7 mm ;
	Transmittance: 0.0001 ;
	Star point size: $50 \mu\text{m}$
Starlight collimating lens	Field: $\pm 6.3^\circ$;
	Aperture value: 40 mm ;
	Effective focal length: 330.046 mm
	Field: $\pm 2^\circ$;
Off-axis triple reflection system	Focal length: 3000 mm ;
	Light output aperture: 300 mm
	Type: detector rectangle;
Detector	Full width at half maximum: 2.5 mm ;
	Pixel No.: 1000
	Field: $\pm 2^\circ$;
Star sensor	Focal length: 1000 mm

$\pm 6.3^\circ$ 。图 1 中的平行光管为离轴三反系统,离轴三反系统的焦距为 3000 mm ,出光口径为 300 mm ,视场为 $\pm 2^\circ$ 。将星图归算到离轴三反系统的视场角为 $\pm 1^\circ$ 。抖动补偿系统与离轴三反系统共焦面,离轴三反系统出射的平行光束用于星敏感器采集星图。离轴三反系统为星敏感器提供的星图视场角为 $\pm 1^\circ$ 。接收星光的星敏感器焦距为 1000 mm ,星敏感器采集到的实际星图如图 14 所示。



图 14 实测星图

Fig. 14 Measured star map

在高精度抖动补偿系统未开启时采集 600 次星点图像,绘制的星点散点图如图 15 所示,星点在 X 轴的最大漂移量为 5.727 pixel ,Y 轴最大漂移量为 4.436 pixel ,星点距中心点的最大漂移量为 3.225 pixel ,均方根(RMS)为 0.585 。开启高精度抖动补偿系统,采集 600 次星点图像,绘制的星点散点图如图 16 所示,星点在 X 轴的最大漂移量为 1.187 pixel ,Y 轴最大漂移量为 1.016 pixel ,星点距中心点的最大漂移量为 0.730 pixel ,RMS 为 0.118 。通过分析得出高精度抖动补偿系统可以降低环境振动对星点的扰动,提升星点稳定性。

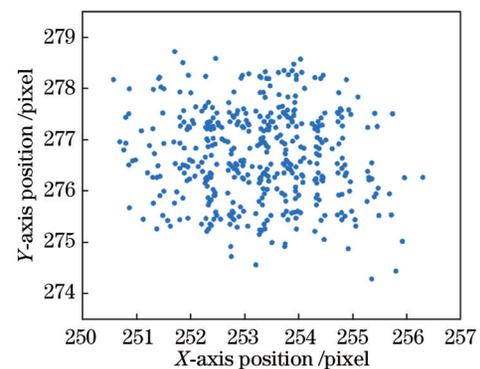


图 15 无补偿星点散点图

Fig. 15 Uncompensated star point scatter diagram

5 结 论

提出一种基于抖动补偿功能的星模拟技术,该技术通过多目标合成模拟星图,可为星敏感器提供多种模式模拟星图。该技术能探测到由环境振动引起的光

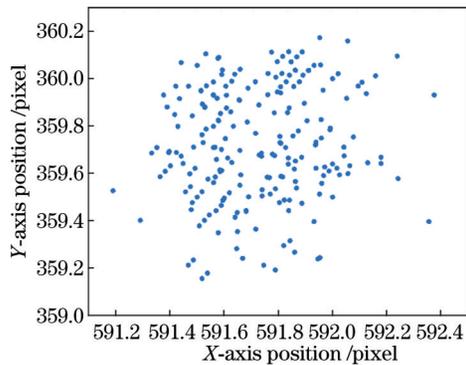


图 16 有补偿星点散点图

Fig. 16 Compensated star point scatter diagram

轴微小偏移量,并实时控制快速摆动镜反馈补偿光轴偏移,配合平行光管,可为星敏感器提供高稳定恒星目标源。对该系统进行仿真建模,利用光线追迹方法对整体装置进行性能测试,仿真结果表明,系统能对光轴 $0.01''$ 的偏转量进行响应,补偿精度的峰值偏差为 $0.045''$ 。进一步通过 4D 干涉仪现场实测该抖动补偿装置的性能,并进行快速摆动镜偏转测试和补偿分辨率以及补偿精度测试,从实验结果得出快速摆动镜在 1.75 ms 内偏转 $200\ \mu\text{rad}$,系统的补偿分辨率优于 $0.05\ \mu\text{rad}$ ($0.01''$),补偿精度优于 $0.1''$ 。最后,分别采集 600 次星点图像对比抖动补偿系统效果,结果显示星点漂移量从 0.585 pixel 下降到 0.118 pixel 。该技术能够探测微小光轴偏移并进行高精度反馈补偿,能为高精度星敏感器地面验证系统提供稳定的恒星目标,为后续需要高稳定目标源的系统提供一种解决方案。

参 考 文 献

[1] Katake A, Bruccoleri C. StarCam SG100: a high-update rate, high-sensitivity stellar gyroscope for spacecraft[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7536: 753608.

[2] 孙兴哲,张锐,师晨光,等.基于动态夹角匹配的星图识别算法[J].光学学报,2021,41(16):1610001.
Sun X Z, Zhang R, Shi C G, et al. Star identification algorithm based on dynamic angle matching[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1610001.

[3] Wu X J, Wang X L. A SINS/CNS deep integrated navigation method based on mathematical horizon reference[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2011, 83(1): 26-34.

[4] 闫旭亮,徐望,杨功流,等.基于改进对数极坐标变换的星图识别算法[J].光学学报,2021,41(10):1010001.
Yan X L, Xu W, Yang G L, et al. Star map recognition algorithm based on improved log-polar transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1010001.

[5] Fei X, Nan C, Zheng Y, et al. A novel approach based on MEMS-gyro's data deep coupling for determining the centroid of star spot[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012: 403584.

[6] 刘杰,张耿,冯向朋,等.基于三次样条拟合插值的高精度质心定位方法[J].光学学报,2021,41(12):1212004.
Liu J, Zhang G, Feng X P, et al. High precision centroid location algorithm based on cubic spline fitting and interpolation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1212004.

[7] Zhang L J, Yang H B, Lu H P, et al. Cubature Kalman filtering for relative spacecraft attitude and position estimation[J]. Acta Astronautica, 2014, 105(1): 254-264.

[8] Michaels D L, Speed J F. New Ball Aerospace star tracker achieves high tracking accuracy for a moving star field[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5430: 43-52.

[9] Michaels D, Speed J. Ball aerospace star tracker achieves high tracking accuracy for a moving star field[C]//2005 IEEE Aerospace Conference, March 5-12, 2005, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2005.

[10] Mainzer A K, Young E T. On-orbit performance testing of the pointing calibration and reference sensor for the Spitzer Space Telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5487: 93-100.

[11] Zacharov A I, Krusanova N L, Moskatniev I V, et al. On increasing the accuracy of star trackers to subsecond levels[J]. Solar System Research, 2018, 52(7): 636-643.

[12] Rao G N, Alex T K, Bhat M S. Incremental-angle and angular velocity estimation using a star sensor[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2002, 25(3): 433-441.

[13] Chen X Q, Sun R, Wang F, et al. Two-stage unscented Kalman filter algorithm for fault estimation in spacecraft attitude control system[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(13): 1781-1791.

[14] 冯广军,马臻,李英才.一种高星等标准星光模拟器的设计与性能分析[J].应用光学,2010,31(1):39-42.
Feng G J, Ma Z, Li Y C. Design and performance analysis of standard starlight simulator[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 39-42.

[15] 孙高飞,张国玉,姜会林,等.甚高精度星模拟器设计[J].光学精密工程,2011,19(8):1730-1735.
Sun G F, Zhang G Y, Jiang H L, et al. Design of very high accuracy star simulator[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1730-1735.

[16] 冯甜甜,高晶敏.一种空间目标高精度指向控制方法[J].中国空间科学技术,2020,40(2):1-9.
Feng T T, Gao J M. A high accuracy pointing control method for space target[J]. Chinese Space Science and Technology, 2020, 40(2): 1-9.

[17] 史少龙,尹达一,龚惠兴.大口径快摆镜机构系统辨识及控制参数优化[J].中国惯性技术学报,2014,22(2):161-166,216.
Shi S L, Yin D Y, Gong H X. Large-aperture fast steering mirror system identification and controller parameter optimization[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(2): 161-166, 216.