

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108678

红外星模拟器星点位置分析与模拟技术研究*

郑茹^{1,2}, 刘博¹, 高越³, 王凌云^{1,2}, 陈启梦¹

(1. 长春理工大学 长春 130022; 2. 长春市理工高精度光电测试产业技术研发中心 长春 130022;
3. 中国中车长春轨道客车股份有限公司 长春 130062)

摘要:针对传统星点位置误差测试方法无法应用于红外星模拟器,提出了一种红外星模拟器星点位置分析、模拟与测试的新方法。结合传统星模拟器星点位置测试方法,分析像差对星点位置的影响因素,建立像差与星点位置模拟理论模型,并通过误差拟合,分析出像质好则单星位置误差小的理论关系。依据红外星模拟器与星敏感器的对接方式,设计了出瞳距大且外置的可见和红外光双重组态下的准直光学系统,并实现红外波段像质优于可见光波段像质。利用经纬仪实测,验证理论模型的准确性,同时实测结果表明,可见光波段单星位置误差优于 $\pm 13.65''$,红外波段间接实现单星位置误差优于 $\pm 13.65''$ 。

关键词: 红外星模拟器; 双重组态准直光学系统; 单星位置误差

中图分类号: TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.50

Research on star points position analysis and simulation technology of infrared star simulators

Zheng Ru^{1,2}, Liu Bo¹, Gao Yue³, Wang Lingyun^{1,2}, Chen Qimeng¹

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Science and Technology High-precision Optoelectronic Measurements Industry Technology Research and Development Center of Changchun, Changchun 130022, China; 3. CRRC, Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China)

Abstract: The traditional star points position error testing method cannot be applied to infrared star simulators. To address this issue, a new method for star points position analysis, simulation and test of infrared star simulators is proposed. Combined with the traditional star points position testing method of star simulator, the influence of aberration on star points position simulators is analyzed. The theoretical model of aberration and star points position simulation is formulated. Through error fitting the theoretical relationship that good image quality represents small single star points position error is analyzed. According to the docking mode of star simulator and star sensor, a visible and infrared light dual configuration collimating optical system with large exit pupil distance and an external position is designed, which could make the image quality of infrared band better than that of visible band. The accuracy of the theoretical model is evaluated by theodolite measurement. The actual measurement results show that the single star position error in visible band is better than $\pm 13.65''$. It indirectly realizes the single star position error in infrared band better than $\pm 13.65''$

Keywords: infrared star simulator; dual-band collimating optical system; single star position error

0 引言

随着军事领域和航天领域的发展,星光探测和星点导航的应用也越来越广泛^[1-2],星光特性地面模拟与测试的需求也越发迫切。以往星光地面模拟条件是基于航天

器在太空环境下的模拟,而导弹、无人机和船舶平台上应用则需要在传统的模拟条件上考虑大气层的散射与透射。依据瑞利散射,红外光波段相对可见光波段散射强度小,透过大气层的辐射能量强。同时,相同极限星等下红外波段的恒星数量远远大于可见光波段,小视场光学系统下便可探测足够多的恒星^[3-4]。综上,在地面测试环

收稿日期:2021-10-07 Received Date: 2021-10-07

* 基金项目:吉林省科技厅产业关键核心技术攻关项目(20210201033GX)资助

境中实现红外星图模拟成为提高星点导航与探测精度的新内容^[5]。

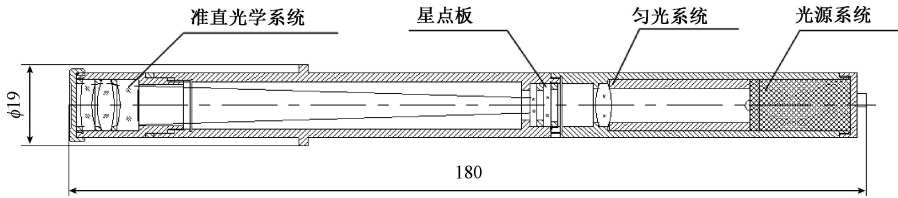
传统的星模拟器主要模拟可见光波段的固定星图,为了提高探测精度,增加每幅星图中星点个数,星模拟器研制的视场越来越大,但是大视场下光学系统像质不佳,影响星点位置模拟精度,彼此制约星模拟器的发展^[6-10]。本文将开展红外星模拟器星点位置模拟方法研究,以解决上述问题。目前,哈尔滨工业大学钱育龙等^[11]利用分振幅的方法,采用波段在3 300~3 800 nm和4 400~4 800 nm,视场角为2.2°模拟不同红外的目标,但是还没有开展红外星模拟器研制。同时,传统测单星位置的方式是经纬仪,

无法直接运用于本系统的红外波段,本文建立像差与星点位置模拟之间的函数关系,设计红外-可见双重组态星模拟器光学系统并计算双波段下的星点位置误差,最后通过实验验证星点模拟精度,实现红外星点高精度模拟。

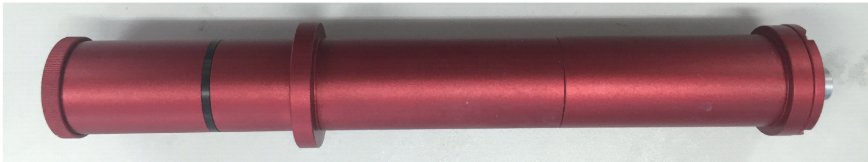
1 红外星模拟器组成、工作原理及技术指标

1.1 红外模拟器组成与工作原理

红外星模拟器主要由电源控制系统、光源系统、匀光系统、星点板、准直光学系统等部件组成^[12],其总体结构与实物如图1所示。



(a) 红外星模拟器结构图
(a) Structure diagram of the infrared star simulator.



(b) 红外星模拟器实物图
(b) Object picture of the infrared star simulator.

图1 红外星模拟器

Fig. 1 Infrared star simulator

其工作原理是由LED红外光源发出的光线,经过双凸会聚透镜及毛玻璃匀光后照亮位于准直物镜焦平面处刻有透光微孔的星点分划板上。透过星点分划板的光线经准直物镜后以平行光射出,在星光探测器的光瞳处形成模拟星点。在星点分划板上固定一个光敏二极管,实时反馈红外光源发光的亮度信息,以保证其稳定性。

1.2 红外星模拟器技术指标

本课题中红外星模拟器相关指标如表1所示。

表1 红外星模拟器技术指标

Table 1 Technical indicators of the infrared star simulator

主要技术指标	指标参数
视场	$\geq \Phi 2^\circ$
光谱范围	900~1 700 nm
单星位置误差	优于 $\pm 15''$

2 像质与单星位置误差分析

准直光学系统成像质量是影响单星位置误差的主要因素,可使模拟的星点变形或者离散,影响星光探测器识别精度。同时,红外星模拟器无法实现经纬仪单星位置误差的测试,即无法通过高精度测试设备测试单星位置误差,本论文通过建立成像像质与单星位置误差关系模型,理论分析像质对单星位置模拟的影响^[13-15],为红外星模拟器单星位置误差的确定提供理论依据。

2.1 球差的影响

球差使得星点在高斯面上成为了一个圆形的弥散斑,由于球差具有轴对称性,只改变单星星点的半径大小,不会改变光斑能量分布中心,对于单星位置精度影响较小。改变后的星点半径 $\delta R'_1$ 如式(1)所示。

$$\delta R'_1 = \delta L' \cdot \tan U' \quad (1)$$

式中: U' 为出射光线的孔径角, $\delta L'$ 为系统球差。

2.2 正弦差的影响

正弦差导致光束通过光学系统后不对称,会影响星点的成像位置,由正弦差造成的定位误差 $\Delta\theta_1$ 如式(2)所示。

$$\Delta\theta_1 = \arctan\left(\frac{OSC'}{f_{EF}}\right) \times 3\ 600 \quad (2)$$

式中: OSC' 为系统正弦差, f_{EF} 为系统焦距。

2.3 畸变和场曲的影响

畸变影响准直光学系统的平行度,影响星点的位置精度,由畸变产生的单星位置误差 $\Delta\theta_2$ 如式(3)所示。

$$\Delta\theta_2 = \arctan\left(\frac{\Delta Z'}{f_{EF}}\right) \times 3\ 600 \quad (3)$$

式中: $\Delta Z'$ 为系统畸变量。

场曲是光学系统的轴向像差会引起像面弯曲,会使星点成像失去对称性,从而影响星点能量中心的偏移,进而影响星点位置精度。由场曲引起的星点位置误差 $\Delta\theta_3$ 如式(4)所示。

$$\Delta\theta_3 = \arctan\left(\frac{\Delta x'}{f_{EF}}\right) \times 3\ 600 \quad (4)$$

式中: $\Delta x'$ 为系统场曲。

2.4 色差的影响

准直光学系统采用两个波段双重组态,因此由色差

$$\Delta\theta = 3\ 600 \times \sqrt{\arctan^2\left(\frac{OSC'}{f_{EF}}\right) + \arctan^2\left(\frac{\Delta Z'}{f_{EF}}\right) + \arctan^2\left(\frac{\Delta X'}{f_{EF}}\right) + \arctan^2\left(\frac{\delta y'_{ch}}{f_{EF}}\right) + \sum \frac{h^2}{f_{EF}} \frac{\phi}{\nu}} \quad (8)$$

由式(8)可知,像差小,单星位置误差小,因此光学系统采用双重波段下优化设计,并需要保证红外波段像质优于可见光波段。

3 光学系统设计

为了保证能量利用率,根据光瞳衔接原则,星模拟器光学系统是出瞳外置且具有较长出瞳距的光学系统。设计双波段准直光学系统,可见光波段为 500~800 nm,红外波段为 900~1 700 nm。具体指标如表 2 所示。

表 2 光学系统设计指标

Table 2 Design indexes of the optical system

Parameter	Target
光谱范围/nm	900~1 700 500~800
出瞳距/mm	88
孔径光阑直径/mm	10
视场角/(°)	2

引起的单星位置误差较大。其中位置色差会改变星点的半径,位置色差引起的星点半径 $\delta R'_2$ 如式(5)所示。倍率色差在不同波段下的成像倍率不同,影响星点的成像位置。其位置误差 $\Delta\theta_4$ 如式(6)所示。

$$\delta R'_2 = \delta L'_{ch} \cdot \tan U' \quad (5)$$

$$\Delta\theta_4 = \arctan\left(\frac{\delta y'_{ch}}{f_{EF}}\right) \times 3\ 600 \quad (6)$$

式中: $\delta L'_{ch}$ 为系统位置色差, $\delta y'_{ch}$ 为系统倍率色差。

2.5 二级光谱的影响

二级光谱会使星点透过准直光学系统后,相对于中心波段的星点有偏离,有二级光谱造成的位置偏差 $\sum C_1$ 如式(7)所示。

$$\sum C_1 = \sum \frac{h^2}{f_{EF}} \frac{\phi}{\nu} P \quad (7)$$

式中: h 为入射像高, ϕ 为准直光学系统光焦度, ν 表示准直光学系统中玻璃材料阿贝常数, P 表示两个波段间的相对色散。因此二级光谱对星点造成的位置误差由准直光学系统材料的相对色散和焦距决定。

综上所述,影响单星位置主要包括正弦差、场曲、畸变和倍率色差和二级光谱,拟合后的如式(8)所示。

3.1 设计结果

红外星模拟器需要模拟无穷远处的恒星,采用准直光学系统设计,所设计的四片式结构如图 2 所示。

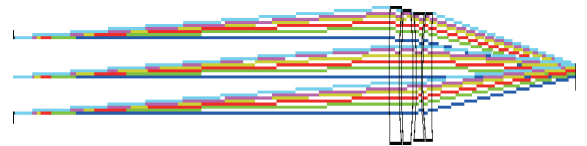


图 2 光学系统光路图

Fig. 2 Optical path diagram of the collimating optical system

系统在红外波段下焦距为 99.831 6 mm,可见光波段下焦距为 99.456 5 mm。不同波段下,光学系统所成像像质与像差结果对比如图 3~8 所示。

如图 3 和 4 可知,红外波段 MTF 相较于可见光波段更接近衍射极限。相同截止频率下,MTF 值更高。如图 5 和 6 可知,红外波段的场曲和畸变小于可见光波段。如图 7 和 8 可知,红外波段的球差和色差小于可见光波段。依据 Zemax 软件中计算得到的不同波长下的像差结果,以 0.707 视场下各波段的中心波长为例,各类像差引起星点的位置偏差如表 3 所示,理论设计准直光学系统

红外波段光学系统像质带来的位置偏差小于可见光波段,即实现了准直光学系统红外波段光学系统像质优于可见光波段的设计要求。

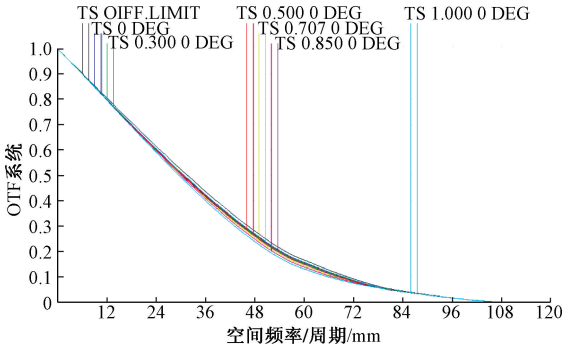


图 3 红外波段 MTF 曲线

Fig. 3 Infrared band MTF curve chart

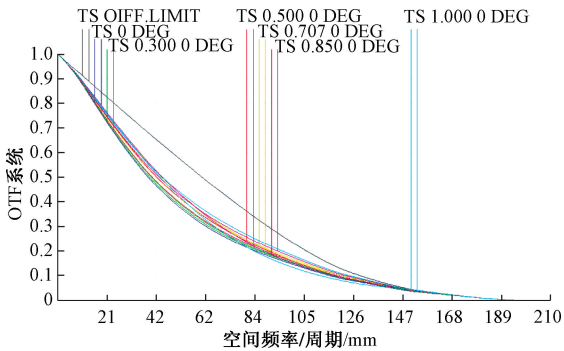


图 4 可见光波段 MTF 曲线

Fig. 4 Visible light band MTF curve chart

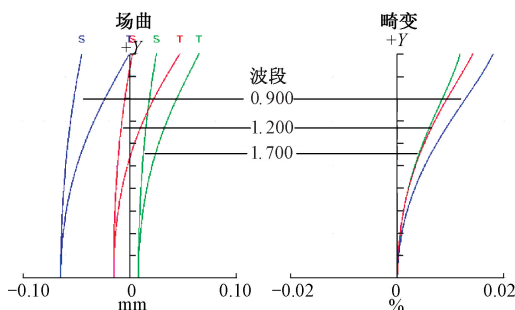


图 5 红外波段场曲与畸变曲线

Fig. 5 Field curvature and distortion curve chart of infrared band

3.2 像质对单星位置误差的影响

成像质量影响着红外星模拟器的星点位置模拟精度,不同波长的光像面成像位置不同,也将直接影响单星位置误差的大小。由表 3 中各类像差对星点位置偏差值代入式(1)~(7)计算出由像差造成的单星位置误差如表 4 所示。通过理论计算,红外波段下的单星位置误差小于可见光波段下单星位置误差,具有更高的星点位置精度。

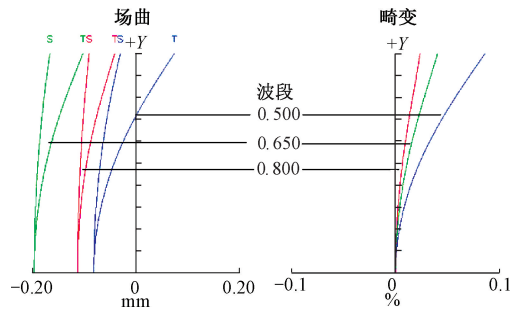


图 6 可见光波段场曲与畸变曲线

Fig. 6 Field curvature and distortion curve chart of visible light band

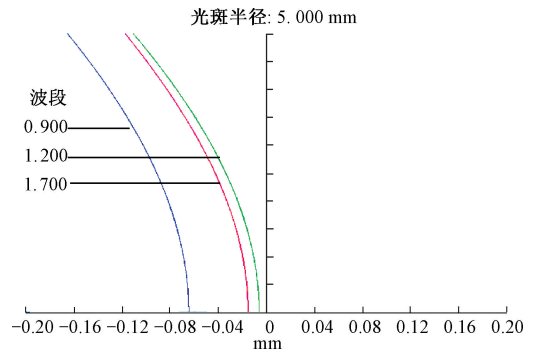


图 7 红外波段球差与色差曲线

Fig. 7 Chromatic aberration curve charts of infrared band

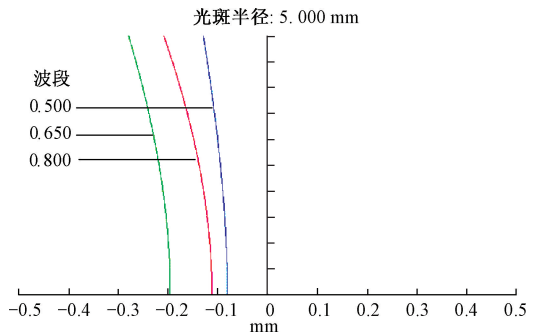


图 8 可见光波段球差与色差曲线

Fig. 8 Chromatic aberration curve charts of visible light band

4 测试结果

准直光学系统的成像质量直接影响红外星模拟器单星位置误差,成像质量高则单星位置误差小,为了验证此理论,分别采用中心波长为 525、620、660 nm 3 种 LED 可见光光源配合经纬仪对单星位置误差进行测试。星模拟器所模拟的星点能量在艾里斑半径内集中度越好则成像质量越好,因此本系统采用点列图描述成像质量,基于准直光学系统设计结果,如图 9 所示为 3 个波段下的

表3 各类像差引起星点偏差值
Table 3 Star point deviation caused by various aberrations

Table with 7 columns: 波段, 球差, 正弦差, 场曲, 畸变, 位置色差, 倍率色差. Rows for 红外 and 可见.

表4 各类像差引起的单星位置误差

Table 4 Effects of various aberrations on star position

Table with 6 columns: 波段, Δθ1, Δθ2, Δθ3, Δθ4, Δθ. Rows for 红外 and 可见.

点列图,525 nm 波段下的 RMS 半径大于 660 nm 波段,因此中心波长为 660 nm 波长的成像质量优于中心波长为 525 nm 的成像质量。利用经纬仪对 3 种光源下相同星图(星点位置一致)的星点进行测试,理论角距与测试角距的差值则为单星位置误差。测试结果如表 5~7 所示,3 个波段下,中心波长为 525 nm 光源测试的单星位置误差为±13.65",中心波长为 660 nm 光源测试的单星位置误差为±8.98"。3 个波段的光源,中心波长为 660 nm 光源,像质最佳,单星位置误差最小,反之成立。

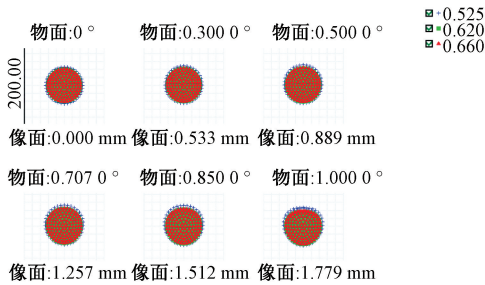


Table with 2 columns: 面: 像面, 点列图. Includes Zemax software details and RMS radius data for different wavelengths.

图9 波长 525、620、660 nm 的点列图

Fig.9 Spot Diagram with wavelengths of 525、620、and 660 nm

表5 525 nm 光源单星位置误差测试

Table 5 Single star position error test of 525 nm light source

Table with 4 columns: 星点序号, 测试角距/("), 理论角距/("), 单星位置误差/("). Rows 1-6.

表6 620 nm 光源单星位置误差测试

Table 6 Single star position error test of 620 nm light source

Table with 4 columns: 星点序号, 测试角距/("), 理论角距/("), 单星位置误差/("). Rows 1-6.

表7 660 nm 光源单星位置误差测试

Table 7 Single star position error test of 660 nm light source

Table with 4 columns: 星点序号, 测试角距/("), 理论角距/("), 单星位置误差/("). Rows 1-6.

由于红外波段(900~1700 nm)成像质量优于可见光波段(500~800 nm)成像质量,即红外波段下单星位置误差优于可见光波段下单星位置误差。在可见光波段中选取的3个波段范围中,中心525 nm的波段范围成像质量最差,单星位置误差优于±13.65",因此,间接验证红外波段下单星位置误差优于±13.65",解决了红外波段下单星位置误差无法利用经纬仪测量的现状问题。

5 结论

本文针对传统星模拟器无法实现红外波段测试的困难,本文提出基于红外光谱的星点位置模拟与分析方法。分析各种误差对单星位置误差的影响,搭建了像质与单星位置误差的理论模型。设计了长出瞳距双波段的准直光学系统,并对畸变和色差进行重点优化。通过实验验证像质对单星位置误差的影响,得到成像质量好,单星位置误差小的结论,结合红外波段的像质优于可见光波段的设计结果,实测可见光波段单星位置误差优于±13.65",进而间接实现红外星模拟器星点位置误差优于±13.65"的要求,为红外星模拟器的测试提供新方法。

参考文献

- [1] 侯娅贤. 星敏感器高动态运动星点定位技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2021.
HOU Y X. Research on high dynamic motion star positioning technology of star sensor [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 2021.
- [2] 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): 103-109.
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): 103-109.
- [3] 何兴伟,韩琦,冯小虎,等. FY-3B 卫星 MERSI 可见光近红外波段定标精度评估[J]. 光学学报,2020,40(18):178-187.
HE X W, HAN Q, FENG X H, et al. Calibration accuracy evaluation of visible and near-infrared hands of FY-3B MERIS [J]. Acta Optica Sinica, 2020,40(18): 178-187.
- [4] 李彬,卢士庆,孙小龙,等. 可见光波段灰度熵和热红外亮温差的沙尘遥感判识[J]. 遥感学报,2018,22(4):647-657.
LI B, LU SH Q, SUN X L, et al. Dust detection algorithm based on the entropy of visible band brightness and brightness temperature difference [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2018,22(4):647-657.
- [5] 潘越,徐熙平,乔杨. 双 DMD 红外双波段场景模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报,2017,38(12): 2994-3002.
PAN Y, XU X P, QIAO Y, et al. Opto mechanical structural design for two DMD infrared dual band scene simulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2994-3002.
- [6] 张建萍,杨词银. 红外目标模拟器辐射校准方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(9): 2045-2050.
ZHANG J P, YANG C Y. Research on the radiation Calibration method of infrared target simulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2013, 34(9): 2045-2050.
- [7] 郑茹,张国玉,高越,等. 基于 LCOS 拼接技术的动态星模拟器光学系统设计[J]. 仪器仪表学报,2012,33(9): 2144-2150.
ZHENG R, ZHANG G Y, GAO Y, et al. Optical system design of dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2144-2150.
- [8] 吴建霖,蒋理兴,李晨阳,等. 基于单目红外的远距离多测点振动测量方法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(9): 255-263.
WU J L, JIANG L X, LI CH Y, et al. Study on the remote multi-points vibration measurement method based on single infrared camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2018, 39(9): 255-263.
- [9] 何大华,段溪川. 模拟红外星体角位置的高精度测量方法[J]. 激光与红外,2018,48(5):573-578.
HE D H, DUAN X CH. High precision method for angular position of simulated infrared stars [J]. Laser & Infrared,2018, 48(5): 573-578.
- [10] LI G X, WANG L Y, ZHENG R, et al. Research on partitioning algorithm based on dynamic star Volume XX, 2017 simulator guide star catalog [J]. IEEE Access, 2021,9:54663-54670.
- [11] 钱育龙,侯晴宇,王治乐,等. 红外双波段目标模拟器方案与光学系统设计[J]. 应用光学,2014,35(5): 761-765.
QIAN Y L, HOU Q Y, WANFG ZH L, et al. Design for scheme of infrared dual-band target simulator and projection optical system [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 761-765.
- [12] 陈娜,王凌云,李光茜,等. 静态星模拟器准直光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2019,42(5):23-26.
CHEN N, WANG L Y, LI G Q, et al. Design of collimating optical system for static star simulator [J]. Changchun Univ. Sci. Technol., 2019, 42(5), 23-26.
- [13] 魏文俭,秦石乔,李华,等. 像差对激光制导目标方位探测精度的影响[J]. 光学技术,2007(S1):142-143, 146.
WEI W J, QIN SH Q, LI H, et al. Influence of optical system aberration on precision of detecting target position in laser semi-active seeking guidance [J]. Optical Technique, 2007(S1):142-143,146.
- [14] 廖家莉. 图像传感器噪声对恒星定位精度影响的理论

与实验研究[D].北京:国防科学技术大学,2010.

LIAO J L. Effect of image sensor noise on position accuracy of star [D]. Beijing: National University of Defense Technology, 2010.

[15] 姜文璋. 星模拟器精度测试方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.

JIANG W ZH. Research on measuring method of star simulator accuracy [D]. Changchun: National University of Defense Technology, 2017.

作者简介



郑茹, 2009年于长春理工大学获得学士学位, 2012年于长春理工大学获得硕士学位, 2016年于长春理工大学获取博士学位, 现为长春理工大学光电工程学院讲师, 主要研究方向为航天器模拟试验与标定技术。

E-mail: zhengru@cust.edu.cn

Zheng Ru received her B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees all from Changchun University of Science and Technology in 2009, 2012, and 2016, respectively. She is currently a lecture with the School of Optoelectronic Engineering at Changchun University of Science and Technology. Her current research interests include spacecraft ground simulation and calibration techniques.



刘博, 2018年于平顶山学院获得学士学位, 现为长春理工大学研究生, 主要研究方向为航天器模拟试验与标定技术。

E-mail: 915397226@qq.com

Liu Bo received his B.Sc. degree from Pingdingshan University in 2018. He is currently pursuing his master degree at Changchun University of Science and Technology. His current research interests include spacecraft simulation tests and calibration techniques.