

高时空分辨率动态星模拟器设计

李成浩, 何煦, 姬琪, 张晓辉, 李宁

引用本文:

李成浩, 何煦, 姬琪, 等. 高时空分辨率动态星模拟器设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 515–525.

LI Cheng-hao, HE Xu, JI Qi, et al. Design of high spatiotemporal resolution dynamic star simulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 515–525.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0515>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

暗弱空间目标的高精度定位

High precision orientation of faint space objects

光学精密工程. 2015, 23(9): 2627–2634 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152309.2627>

星空背景下空间目标的快速识别与精密定位

Fast recognition and precise orientation of space objects in star background

光学精密工程. 2015, 23(2): 589–599 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152302.0589>

基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统

Optical system of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology

光学精密工程. 2016, 24(3): 511–520 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162403.0511>

广角望远镜实时自动调焦的清晰度评价方法

Definition evaluation method for real-time auto-focusing of wide-angle telescope

光学精密工程. 2017, 25(5): 1368–1377 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172505.1368>

大型空间望远镜次镜调整机构精度分析与测试

Accuracy analysis and testing for secondary mirror adjusting mechanism in large space telescope

光学精密工程. 2019, 27(11): 2374–2383 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192711.2374>

文章编号 1004-924X(2020)03-0515-11

高时空分辨率动态星模拟器设计

李成浩^{1,2}, 何煦¹, 姬琪¹, 张晓辉^{1*}, 李宁¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对大口径空间天文望远镜稳像精度测试的难题,提出了一种高时空分辨率运动导星模拟方案。利用硅基液晶作为运动导星模拟源,结合光束准直系统为空间天文望远镜提供无穷远运动导星,并且通过在光路中加入物镜来提高模拟导星的运动分辨率。针对望远镜像面结构的特殊分布,提出利用多路模拟的方法,分别为望远镜两侧精密导星仪以及巡天像面提供实时运动导星。最后,对影响运动导星模拟精度的各项误差进行分析,进而建立了误差模型。仿真结果表明:在运动导星模拟精度优于 $0.5''$ 的概率为 95% ,时间分辨率为 3 ms 的前提下,动态星图星间角距误差小于 $0.04''$,单星张角小于 $0.02''$ 。通过实验验证了导星模拟模型的正确性,该模型基本满足空间天文望远镜稳像精度测试所需运动导星目标高时空分辨率的要求。

关键词:空间望远镜;运动导星;稳像精度;硅基液晶;物镜;误差模型

中图分类号:V441;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202803.0515

Design of high spatiotemporal resolution dynamic star simulator

LI Cheng-hao^{1,2}, HE Xu¹, JI Qi¹, ZHANG Xiao-hui^{1*}, LI Ning¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangxiaohui0123@163.com*

Abstract: Aiming at the problem of image stabilization precision testing of large-aperture space telescopes being developed in China, this paper proposes a high spatiotemporal resolution motion guide star simulation scheme. Firstly, the silicon-based liquid crystal is used as the motion guide star simulation source, and the beam alignment system is combined to provide the infinite motion guide star for the space telescope. The objective lens is added to the light path to improve the motion resolution of the simulated guide star. Then, owing to the special distribution of the telescopic mirror surface structure, a method for simulating the multichannel optical path is proposed to provide real-time moving guide stars for the precision guide sensor on both sides of the telescope and the survey image surface. Finally, the error sources that affect the simulation accuracy of the moving guide star are analyzed, and the error model is established. The simulation results show that under the assumption that the simulation accuracy of the moving guide star is better than $0.5''$, with probability

收稿日期:2019-10-18;修订日期:2019-11-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61875190)

of 95% and time-resolution of 3 ms, the precision simulation of the interstar angular distance error of the dynamic star map is less than $0.04''$ and the angle is the single star of less than $0.02''$. The simulation model was verified by experiments and meets the requirements of high spatiotemporal resolution of moving guide star targets for image stabilization accuracy testing of space telescopes.

Key words: space telescope; moving guide star; image stability accuracy; liquid crystal on silicon; objective lens; error model

1 引言

空间天文望远镜以航天器为平台,然而航天器的姿态变化、运动部件的微振动等都会对空间天文望远镜的深空探测产生重要影响。空间天文望远镜处于凝视工作模式时,其曝光时长决定极限深空探测能力,长时间曝光过程中光轴指向稳定度影响成像质量^[1-3]。为保证探测精度及成像质量,空间天文望远镜配备有稳像控制系统,将振动带来的影响抑制到可接受的范围。空间天文望远镜在地面装调、测试过程中,需要对稳像系统进行精度测试,稳像测试精度直接影响空间天文望远镜的成像质量^[4-7]。地面稳像测试过程中,需要为空间天文望远镜提供无穷远动态目标,并且目标成像到像面的像点要存在一定的指向稳定度^[8-11]。

功能检测型动态星模拟器的主要功能是模拟星图,产生的实时星图要满足检测需求,以实现对其某项功能精度的精确标定。动态星模拟器一般采用显示器件作为动态星图模拟源,但是受限于显示器件的像元尺寸,动态星图模拟精度较差、分辨率较低^[12-14]。另外,传统星模拟器的视场达 $10^\circ \times 10^\circ$,大视场导致星模拟器各视场像差不同,尤其各视场畸变大小不同,也会导致动态星模拟精度较低。相关资料报道,市面上精度较高的动态星模拟器单星张角为 $3''$,星间角距为 $5''$ 。长春理工大学利用显示器件拼接的方式实现大视场星图的模拟,由于多片显示器件对比度不一致以及显

示器件像元间距对星点显示灰度和显示位置的影响,动态星模拟器的图像稳定度降低^[15-17]。

现有的动态星模拟器只能对精密导星仪进行单独测试。空间光学载荷一般都布置有多个导星仪,多个导星仪需要协同工作,上述动态星模拟方法无法满足此需求^[18-20]。

我国正在论证的空间天文望远镜(视场 $1 \times 1.1^\circ$ 、口径为 2.4 m 、角分辨率优于 $0.07''$)的导星仪位于望远镜像面边缘视场,本文首先对空间天文望远镜的稳像原理进行介绍,设计了相应的测试方法,为稳像系统精度测试提供特定运动规律的无穷远导星。采用反射式硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCOS)作为导星模拟源,通过在光路中加入物镜提高了运动导星的运动分辨率。针对望远镜像面结构的特殊分布,利用多路模拟光路为望远镜两侧精密导星仪以及巡天像面提供实时运动导星,并对影响运动导星模拟精度的各项误差源进行分析及建模。该星模拟器能够满足空间天文望远镜稳像精度测试所需运动导星目标高时空分辨率的要求。

2 工作原理

2.1 稳像系统组成

为了确保天文观测过程中的动态稳定成像,空间天文望远镜采用“卫星平台高精度姿控系统+振动抑制系统+精密稳像系统”的稳像方案,具体组成如图 1 所示。

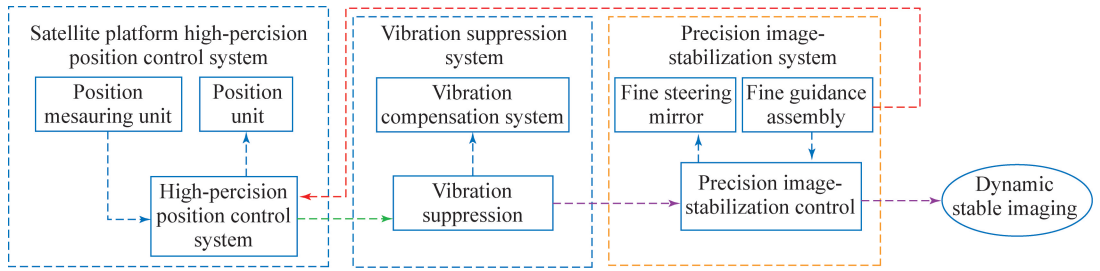


图 1 空间天文望远镜稳像系统

Fig. 1 Image stabilization system of space telescope

卫星平台高精度姿控系统与振动抑制系统统称为粗级稳像系统,将平台/振动抑制残差控制在 $5.2''$ 范围内。精密稳像系统又称精级稳像系统,在粗级稳像的基础上,进一步补偿望远镜的光轴扰动残差,使它满足预期的天文观测需求 $0.03''$ 。天文望远镜整机稳像测试是在粗级稳像系统完成工作后,验证望远镜精级稳像系统的稳像精度。因此,运动导星的模拟以粗级稳像残差作为模拟标准。

2.2 精级稳像原理

空间天文望远镜的焦面布局如图 2 所示,天文望远镜的精密导星仪(Fine Guidance Sensor, FGS)位于望远镜两侧。精级稳像原理如图 3 所示,来自无穷远的星点目标通过望远镜的光学系统,最终成像在望远镜像面上。在望远镜积分成像过程中,位于像面两侧的精导星仪实时获取星图。通过实时提取星点坐标计算出望远镜光学系统光轴的晃动量,控制器控制压电陶瓷驱动大口径快摆镜进行光轴晃动量的补偿,从而实现精密稳像。

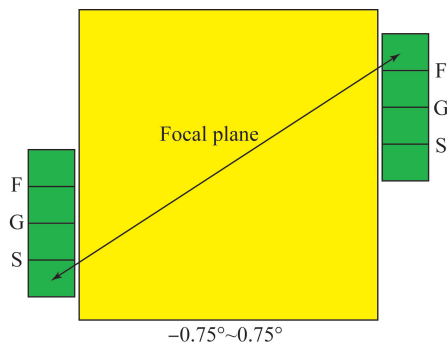


图 2 空间望远镜焦面布局

Fig. 2 Focal plane layout of space telescope

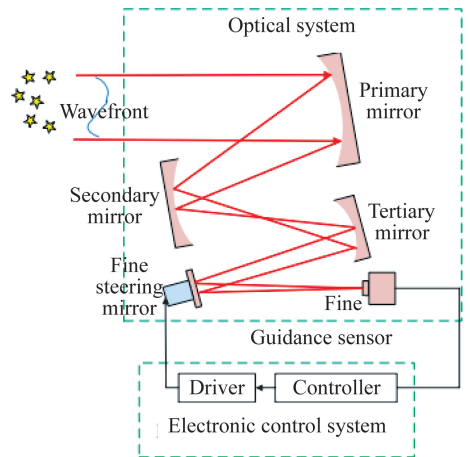


图 3 精密稳像原理

Fig. 3 Principle for precision image-stabilization

2.3 稳像测试原理

空间天文望远镜稳像测试需要同时为巡天主成像区、两侧导星仪提供成像所需的无穷远运动目标。实验室常用光束准直系统模拟无穷远目标,由于超大口径光束准直系统保证高质量成像的视场不足 $2'$,而望远镜导星仪位于天文模块两侧,跨越 1.5° 的视场成像,因此难以通过单个光束准直系统为导星仪和巡天主成像区提供运动星点目标。为此,需要通过附加光路的方法拓展测试光路的视场,为导星仪提供远场运动目标。通过控制三台光束准直系统焦面处的目标进行同步运动,实现导星仪目标和巡天像面目标的同步动态运动。

现有的动态目标模拟器件有液晶光阀(Thin Film Transistor Liquid Crystal Display, TFT-LCD)、数字微透镜阵列(Digital Micro-mirror Device, DMD)以及反射式 LCOS。对比 3 种显示器件的分辨率、像元间距和像元尺寸可知,LCOS 显示器件模拟的动态目标具有更高的时间、空间分辨率^[21-23]。因此使用

高分辨率、大面阵反射式 LCOS 作为运动导星模拟源。通过相应的控制程序,在一定时间内(与模拟导星运动序列加速度相关)逐一控制液晶阵列依次工作,实现 LCOS 面板调制,进而模拟运动导星。LCOS 面板位于光束准直系统的焦面,口径为 3 m 的

光束准直系统为望远镜天文焦面提供实时动态目标,布置于光束准直系统两侧的两台 500 mm 口径光束准直系统可为导星仪提供实时动态目标。另外,在光路中加入物镜以提高稳像目标的模拟精度,光路组成如图 4 所示。

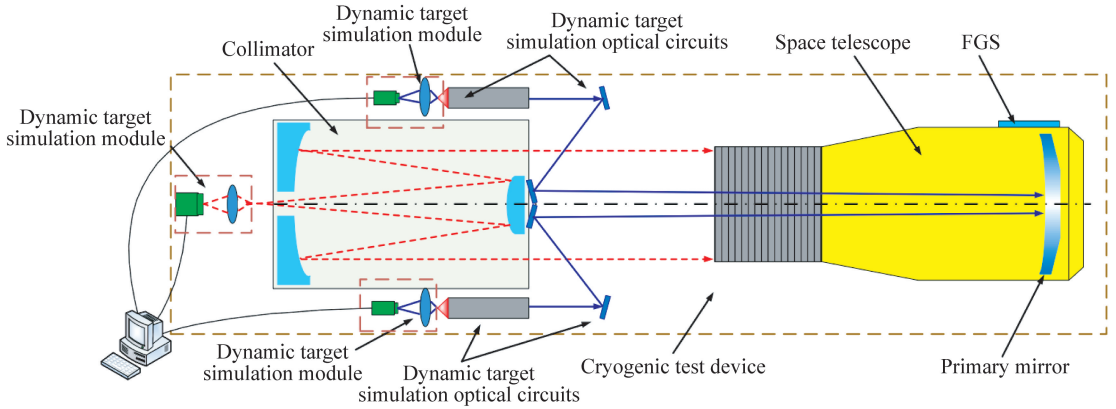


图 4 运动导星模拟方案

Fig. 4 Scheme for guide star simulation

2.4 粗级稳像残差

根据上述望远镜稳像原理,稳像精度测试需要为巡天像面和两侧导星仪模拟运动像移目标,稳像精度测试验证望远镜的精细稳像系统,运动导星的模拟以粗级稳像角度残差作为模拟标准,通过角度功率谱密度来评价模拟运动导星的高低频分量模拟精度。已知望远镜粗级稳像系统的稳像精度为 $0.5''$,时间分辨率为 5 ms,因此,模拟像点运动轨迹与粗级稳像残差之间的差值小于 $0.5''$ 作为运动导星的空间分辨率要求,时间分辨率要求优于 5 ms。

粗级稳像残差为平稳随机信号,其概率分布或矩函数与统计点的起始时刻不相关。对于粗级稳像残差序列,不仅要描述序列大小,还要从频域角度分析,通过分析粗级稳像残差的角度功率谱密度(Power Spectral Density, PSD),能够清晰地得出信号不同频段对应的信号功率值,更加准确地获得信号^[24]。粗级稳像残差的 PSD 曲线如图 5 所示,计算得到粗级稳像残差的均方根(Root Mean Square, RMS)为 $5.2''$ 。

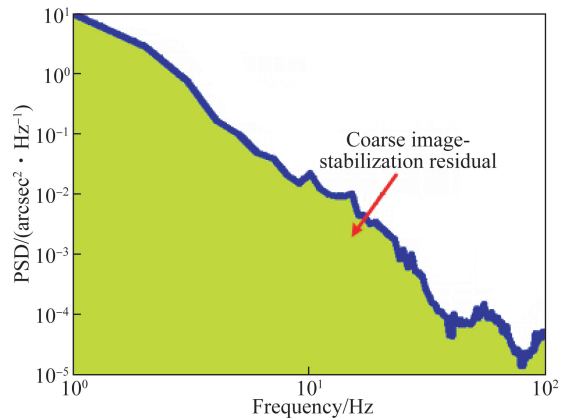


图 5 粗级稳像残差的功率谱密度

Fig. 5 Power spectral density of coarse image-stabilization residual

3 运动导星模拟

3.1 LCOS 成像原理概述

LCOS 工作原理如图 6 所示,光源发出的光波经偏振分光棱镜(Polarizing Beam Splitter, PBS)后,P 光投射、S 光反射后照射到 LCOS。线偏振光通过 LCOS 处于“开”状态下像素的反射调制,光矢量方向会有 π 的改变,LCOS 将 S 波调

制成 P 波, 经 PBS 偏振分光棱镜透射后, 通过光学系统成像。而 LCOS 处于“关”状态下的像素点不对光波进行调制, 未经 LCOS 调制的线偏振光光矢量方向没有改变, 经 PBS 反射和透射至光入射的方向, 光线无法通过光学系统成像^[19]。

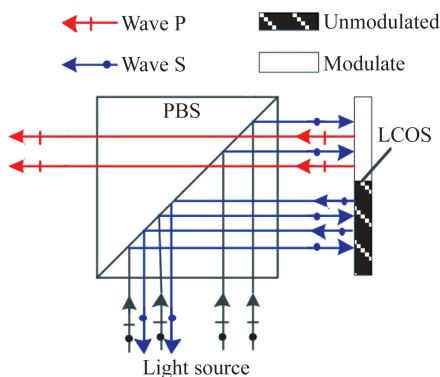


图 6 LCOS 工作原理

Fig. 6 Working principle of LCOS

3.2 运动导星模拟方法

通过控制 LCOS 面板上各像素不同时刻的开启状态对运动导星进行模拟。所选 LCOS 面板的时间分辨率为 3 ms, 满足模拟运动导星时间分辨率优于 5 ms 的要求。LCOS 面板的像元大小为 3.74 μm, 因此 LCOS 面板模拟运动导星的位移分辨率为 3.74 μm, 光路中加入物镜来提高 LCOS 面板模拟星点目标的位移分辨率, 简化光路如图 7 所示。未加入物镜时, 模拟运动导星的 PSD 如图 8 所示, 由图可知模拟运动导星的高频分量有所增大, 模拟误差为 0.5''。

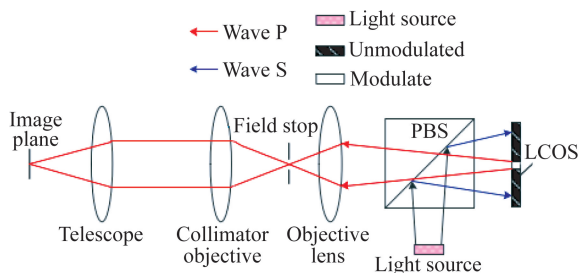


图 7 运动导星模拟光路

Fig. 7 Simulation light path of guide star

如图 7 所示, 加入物镜后, 面阵光源发出的光波经 PBS 棱镜起偏后, S 光反射照明 LCOS 面板。LCOS 面板上处于“开”状态下的像素点将

S 光调制成 P 光反射至 PBS 棱镜, 物镜将 LCOS 面板像素点进一步缩小, 并成像在光路准直系统焦面。通过光路准直系统出射平行光为望远镜提供无穷远目标, 并通过望远镜后成像在像面上。通过实时控制 LCOS 面板上像素点的“开”、“关”状态模拟 LCOS 面板上的星点运动轨迹, 最终得到望远镜像面像点的运动轨迹。

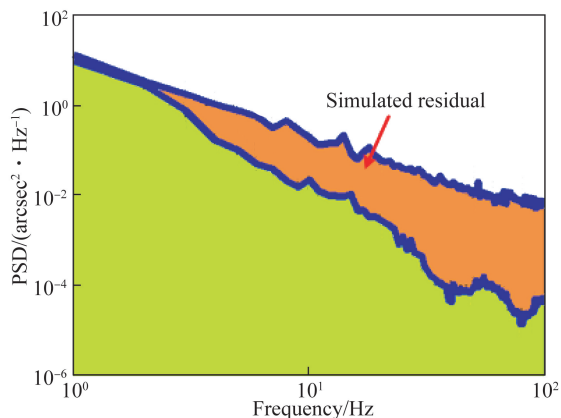


图 8 未加物镜模拟运动导星的功率谱密度

Fig. 8 Power spectral density of simulated guide star without objective lens

3.2.1 导星模拟光路物镜

LCOS 面板的像素尺寸为 3.74 μm, LCOS 面板模拟运动导星的最高空间分辨率为 3.74 μm。通过在光路中加入物镜, 提高了 LCOS 面板模拟运动导星的运动分辨率。

已知天文望远镜焦距 f_T 为 28 m, 大口径光路准直系统焦距 f_C 为 100 m, 两侧光路准直系统焦距 f_D 为 7 m, LCOS 像元尺寸 h 为 3.74 μm。设巡天光路物镜缩小倍率为 m_X 、两侧光路物镜缩小倍率为 m_D , 巡天光路与两侧光路要具有相同的成像倍率, 具体关系为:

$$\frac{m_X}{m_D} = \frac{h \times f_T \times f_C}{h \times f_T \times f_D} \quad (1)$$

带入上述数值可得: $m_X/m_D = 14.3$ 。

3.2.2 运动导星模型

粗级稳像残差序列 $x(t)$ 表示天文望远镜像面像点绕望远镜光轴的偏角序列, 它与望远镜像面像点位移序列 $h(t)$ 的关系为:

$$h(t) = f_T \times \tan(x(t)) \quad (2)$$

其中 f_T 为天文望远镜焦距。

由运动导星模拟光路可知物镜焦面像点的位

移序列为:

$$h_m(t) = \frac{f_c \times h(t)}{f_T}, \quad (3)$$

其中: f_c 为光路准直系统焦距, $h(t)$ 为望远镜像面像点位移序列, f_T 为天文望远镜焦距。

LCOS 面板上星点运动存在最小分辨率, 使用 LCOS 面板模拟粗级稳像残差时, 不能保证稳像残差序列中每一个数据都能准确模拟, 通过式(4)的插值算法对粗级稳像残差进行高精度模拟:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & -\frac{k}{2} < h_m(t) < \frac{k}{2} \\ nk, & \frac{(2n-1)k}{2} \leq h_m(t) < \frac{(2n+1)k}{2}, \\ n=1, 2, 3, \dots \\ nk, & \frac{(2n+1)k}{2} \leq h_m(t) < \frac{(2n-1)k}{2}, \\ n=-1, -2, -3, \dots \end{cases}, \quad (4)$$

其中: $y(t)$ 为 LCOS 模拟导星位移序列, $h_m(t)$ 为物镜焦面像点的位移序列, k 为 LCOS 面板结合物镜模拟星点运动的最小分辨率。

$$k = \frac{p_{\text{LCOS}}}{m}, \quad (5)$$

其中: p_{LCOS} 为 LCOS 的像元尺寸, m 为物镜倍率。

4 运动导星模拟精度分析

影响运动导星模型精度的因素主要包括插值算法误差、LCOS 面板像素尺寸误差、光路准直系统焦距误差和物镜倍率误差, 对应范围如表 1 所示。

表 1 运动导星模拟光路的主要误差源

Tab. 1 Main error sources of simulation optical path for guide star

Main error source	Margin of error
Interpolation algorithm error	Determined by objective lens magnification
LCOS pixel size error	<8%
Collimator focal length error	<5%
Objective lens magnification error	<5%

LCOS 面板模拟运动导星的插值算法误差, 体现在不同倍率的物镜对运动导星模拟精度的影响上。LCOS 面板像素尺寸误差使单位时间内模拟导星运动位移存在误差, 最终体现为望远镜像面导星角度晃动的序列误差。光路准直系统焦距误差影响模拟的成像放大倍率, 造成单位时间内星点晃动角度误差。物镜缩小倍率误差影响模拟星点位移的最小分辨率, 对运动导星模拟精度产生影响。下面以两侧光路为例分析各项误差对稳像目标模拟精度的影响。

4.1 插值算法精度

首先分析了插值算法误差对运动导星模拟精度的影响, 由式(4)可知插值算法误差由模拟运动导星的位移分辨率决定, 运动导星的位移分辨率又由物镜缩小倍率确定。以两侧光路为例, 不同缩小倍率的物镜模拟残差如图 9 所示。

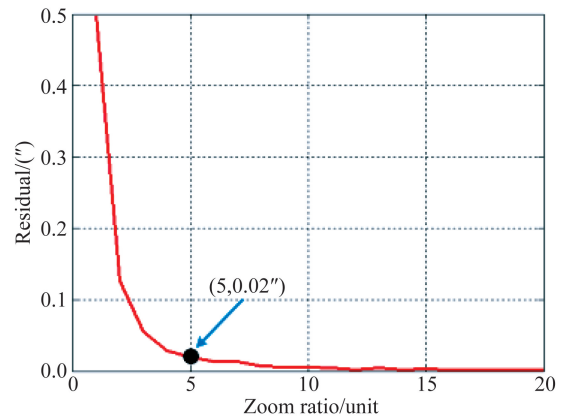


图 9 物镜倍率对模拟精度的影响

Fig. 9 Effect of zoom ratio of objective lens on simulation accuracy

由图 9 可知, 随着物镜缩小倍率的提高, 运动导星模拟残差逐渐减小。经计算, 当物镜缩小倍率为 5 时, 模拟运动导星偏角序列的模拟残差为 $0.02''$, 满足运动导星模拟要求。由于物镜倍率越高, 其视野越暗, 并且考虑到两侧光路物镜与巡天光路物镜倍率关系, 两侧光路物镜倍率不易过大, 因此两侧光路中物镜的缩小倍率暂定为 5。5 倍物镜模拟运动导星的 PSD 如图 10 所示。

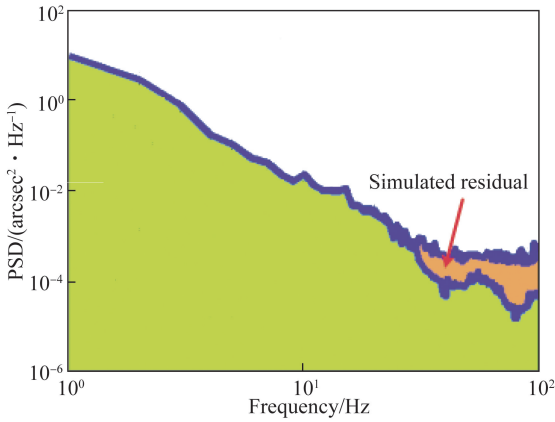


图 10 5 倍物镜模拟运动导星的功率谱密度

Fig. 10 Power spectral density of simulate guide star with $5\times$ objective lens

4.2 LCOS 面板像素尺寸精度

两侧光路中物镜为 5 倍, 由式(4)插值算法得到 LCOS 模拟角度序列为固定序列, 在此前提下, 分析 LCOS 面板像素尺寸误差对模拟精度的影响, 结合序列 RMS 的计算公式, 误差模型如式(6)所示:

$$E_{\text{pixel}} = \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{\text{pixel}}(f) df} - \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{\text{micro}}(f) df}, \quad (6)$$

其中: $S_{\text{pixel}}(f)$ 为加入像元尺寸误差时模拟运动导星的功率谱密度, $S_{\text{micro}}(f)$ 为物镜倍率为 5 时模拟运动导星的功率谱密度, f_{\min} 为 0.01 Hz, f_{\max} 为 100 Hz。

已知 LCOS 面板的像素尺寸为 $3.74 \mu\text{m}$, 误差小于 $0.28 \mu\text{m}$, 仿真分析过程中 LCOS 面板像素尺寸的误差灵敏度曲线如图 11 所示。

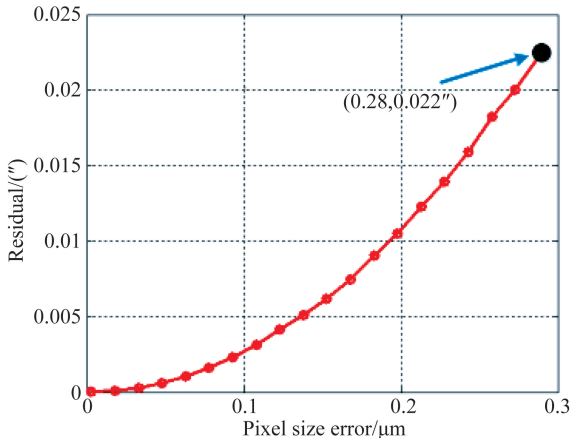


图 11 LCOS 面板像素尺寸误差灵敏度

Fig. 11 Analysis of pixel size error for LCOS panel

通过以上分析可得: 运动导星模拟残差随 LCOS 面板像素尺寸误差的增大而增大, 当 LCOS 面板像素误差为 $0.28 \mu\text{m}$ 时, 导星模拟残差为 $0.022''$ 。

4.3 光路准直系统焦距精度

两侧光路中光路准直系统焦距误差使像面星点目标成像放大倍率发生变化, 影响星点目标单位时间内的位移量, 对运动导星模拟精度产生影响, 误差模型如式(7)所示:

$$E_{\text{fcol}} = \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{\text{fcol}}(f) df} - \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{\text{micro}}(f) df}, \quad (7)$$

其中: $S_{\text{fcol}}(f)$ 为加入光路准直系统焦距误差时模拟运动导星的 PSD, $S_{\text{micro}}(f)$ 为物镜倍率为 5 时模拟运动导星的 PSD, f_{\min} 为 0.01 Hz, f_{\max} 为 100 Hz。

光路准直系统焦距误差取焦距理论值的 5% 范围进行分析, 已知两侧光路中光路准直系统的理论焦距为 7 m, 分析结果如图 12 所示。分析可得, 运动导星模拟残差随着光路准直系统焦距误差的增大而增大, 当光路准直系统的焦距误差为理论值的 5% 时, 模拟残差为 $0.24''$; 当焦距误差为焦距的 2% 时, 模拟残差为 $0.1''$ 。

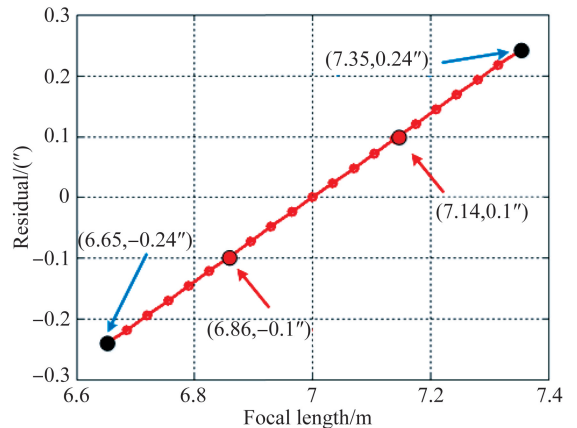


图 12 光路准直系统焦距误差对模拟精度的影响

Fig. 12 Influence of focal length error of collimator on simulation accuracy

4.4 物镜倍率精度

两侧光路中物镜焦距误差影响与光路准直系统焦距误差带来同样影响, 误差模型相同, 同样使像面星点目标成像放大倍率发生变化, 影响星点目标单位时间内的位移量, 对运动导星模拟精度产生影响。焦距误差取焦距的 5% 范围进行分

析,已知两侧光路的理论缩小倍率为 5,分析结果如图 13 所示。分析可得:两侧光路模拟残差随着物镜倍率误差的增大而增大,当物镜倍率误差为理论值的 5% 时,模拟残差为 $0.24''$;当物镜倍率误差为理论值的 2% 时,模拟残差为 $0.1''$ 。

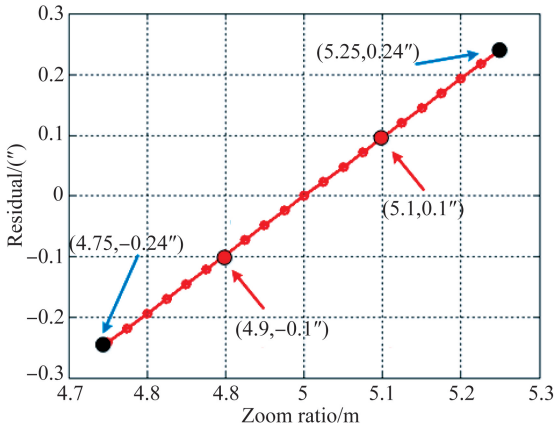


图 13 物镜倍率误差对模拟精度的影响

Fig. 13 Influence of zoom ratio error of objective lens on simulation accuracy

4.5 综合精度分析

综合上述所有误差,在两侧光路中物镜为 5 倍的前提下,对运动导星模拟精度进行分析,将上述所有误差源加入仿真模型中得到:

$$E = \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_{\text{all}}(f) df} - \sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_x(f) df}, \quad (8)$$

其中: $S_{\text{all}}(f)$ 为加入综合误差时模拟运动导星的 PSD, $S_x(f)$ 为粗级稳像残差的 PSD, f_{\min} 为 0.01 Hz, f_{\max} 为 100 Hz。

将上述 LCOS 像素误差、光路准直系统的焦距误差和物镜倍率误差按均匀分布加入运动导星模型中,其中光路准直系统焦距误差、物镜倍率误差分别取理论值的 1%、2%、3%、4% 和 5% 的范围进行分析。每种误差范围内进行 100 000 次蒙特卡洛仿真,运动导星模拟光路模拟残差分布如图 14 所示。分析可得:随着光路准直系统焦距误差、物镜倍率误差的增大,两侧光路模拟残差随之增大。当光路准直系统的焦距误差与物镜倍率误差在理论值 1% 内时,有 95% 的概率误差小于 $0.5''$;当光路准直系统的焦距误差与物镜倍率误差在理论值 5% 内时,有 76% 的概率误差小于 $0.5''$ 。

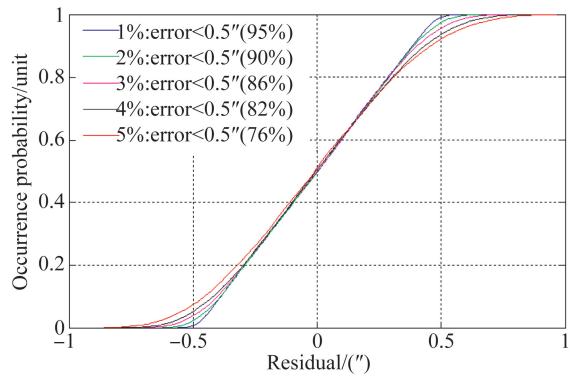


图 14 综合误差下运动导星模拟误差分布

Fig. 14 Simulated error distribution of guide star under comprehensive error

综上所述,运动导星模拟光路中物镜放大倍率对运动导星模拟精度的影响最大。巡天光路选取 25 倍物镜,光路准直系统导星模拟光路中物镜的缩小倍率暂定为 5 倍。巡天运动导星模拟光路与两侧运动导星光路相同,两光路中物镜结合光路准直系统放大倍率相同,因此巡天光路导星精度分析与两侧光路导星精度的分析结果相同。

4.6 单星张角和星间角距

动态星模拟器的单星张角和星点角距的计算公式如下:

$$\theta_1 = \arctan(d/f), \quad (9)$$

$$\theta_2 = \arctan(2 \times d/f) \quad (10)$$

其中: θ 为所模拟的单星张角, d 为模拟星点大小, f 为星模拟器焦距。

以运动星模拟器两侧光路为例,准直系统焦距为 7 m,LCOS 像元尺寸为 $3.74 \mu\text{m}$,物镜倍率为 5 倍,经计算单星张角为 $0.02''$,星间角距为 $0.04''$ 。

使用物镜提高了 LCOS 模拟星图的运动分辨率,结合长焦距光路准直系统,进一步提高了运动导星模拟精度,包括运动导星位移分辨率、单星张角模拟精度和星间角距精度。使用单片高性能的 LCOS 保证了运动导星图像的稳定度。

5 实验

为了验证上述运动导星模型,建立了运动导星模型实验装置,如图 15 所示,实验光路图与

图7相同,现场如图16所示。LCOS系统组件控制LCOS面板模拟导星目标运动,导星目标经物镜成像至光路准直系统焦点处。经光路准直系统出射平行光,通过成像镜头将导星目标成像至CCD上。控制电箱实时计算图像质心位置,并实时计算模拟目标的运动轨迹,之后计算运动导星相对成像镜头的光轴晃动角度序列。

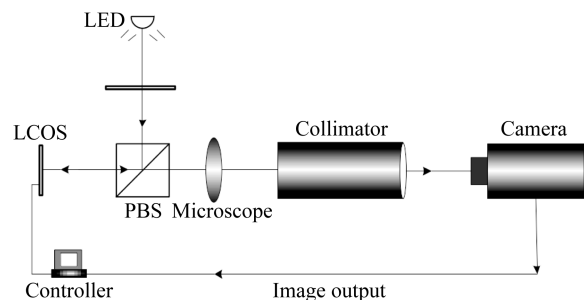


图15 运动导星模型实验系统

Fig. 15 Experimental system of guide star model

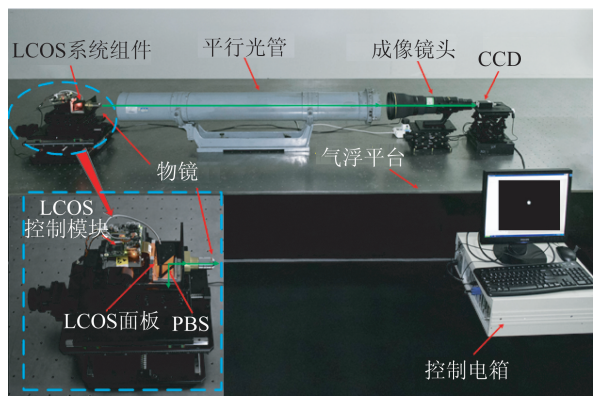


图16 运动导星模型实物图

Fig. 16 Photo of guide star model scenes

实验中,光路准直系统焦距为1 600 mm,成像镜头焦距为800 mm,LCOS控制面板的像元尺寸为 $3.74\ \mu\text{m}$,物镜缩小倍率为5。对运动导星模型进行仿真,误差模型引入如下:

(1)LCOS像元尺寸误差按均匀分布引入,误差绝对值在 $0.3\ \mu\text{m}$ 内;

(2)经过标定,光路准直系统的焦距误差和物镜倍率误差在理论值的2%以内,按均匀分布引入。

每种误差范围进行10 000次蒙特卡洛仿真,实验光路仿真模拟残差分布如图17所示。

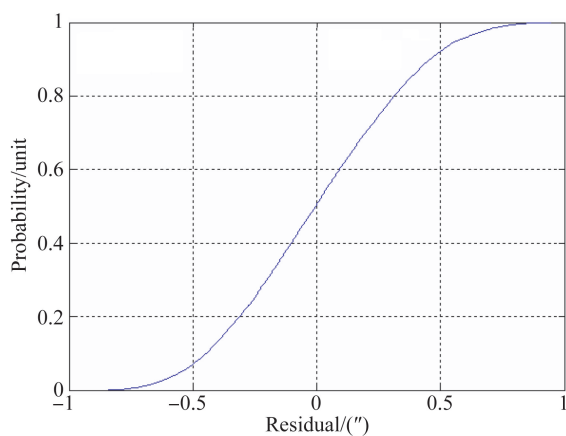


图17 实验光路运动导星模拟误差分布

Fig. 17 Error distribution of guide star in experimental optical path

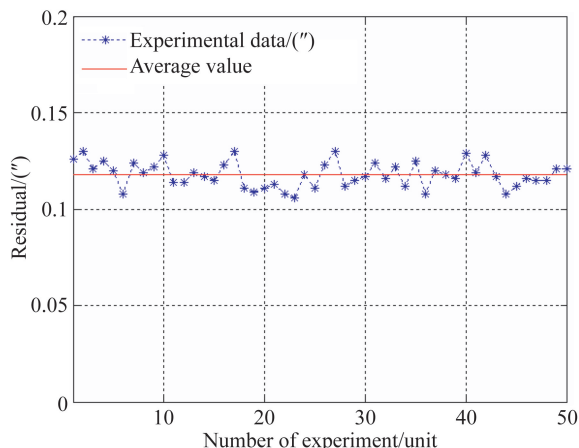


图18 动态导星模拟残差实验结果

Fig. 18 Result of residual test in dynamic guide star simulation

如图17所示,运动导星模拟精度优于 $0.5''$ 的概率为95%,最大值为 $0.76''$ 。对上述搭建的运动导星模拟光路进行50次实验,实验结果如图18所示,模拟残差均值为 $0.118''$,极差为 $0.024''$ 。由此可知,导星模拟光路中各组成部分误差为定值,唯一变化的是实验环境引起的误差, $0.024''$ 的极差范围由实验环境引起,导星模拟残差均值 $0.118''$ 包含在图17仿真误差内,实验结果与仿真结果吻合,证明运动导星模拟模型是正确的。

6 结 论

本文提出了一种用于空间天文望远镜稳像测试的运动导星模拟方法。针对空间天文望远镜的

像面分布特点,提出用三路模拟光路同时为两侧导星仪和中间巡天像面提供实时动态目标。利用 LCOS 作为运动目标模拟源,为了提高模拟精度在光路中加入了物镜,保证了运动目标的运动分辨率。在此基础上分析了导星模拟模型中各误差对导星模拟精度的影响。分析表明,在运动导星模拟光路中加入物镜提高了导星位移分辨率。物镜倍率对导星模拟精度的影响最大,由于物镜倍率越高,其视野越暗,同时考虑到导星光路物镜与巡天光路物镜倍率的关系,导星光路物镜倍率不易过大,最终选取 5 倍物镜,此倍率下导星模拟残差为 $0.02''$; LCOS 像元尺寸误差对导星模拟精度

的影响小于 $0.022''$; 光路准直系统的焦距误差与物镜放大倍率误差对导星模拟精度的影响呈线性趋势,当光路准直系统的焦距误差与物镜倍率误差在理论值 1% 内时,有 95% 的概率误差小于 $0.5''$, 时间分辨率为 3 ms, 单星张角为 $0.02''$, 星间角距为 $0.04''$; 使用物镜提高了 LCOS 模拟星图的运动分辨率, 结合长焦距光路准直系统, 进一步提高了运动导星模拟精度, 包括运动导星位移分辨率、单星张角模拟精度和星间角距精度。使用单片高性能的 LCOS 保证了运动导星图像的稳定性。该运动导星模拟模型是可行的, 满足空间天文望远镜对粗级稳像残差高时空分辨率的模拟需求。

参考文献:

- [1] KENDRICK S E, STOBBER J, GRAVSETH I. Pointing and image stability for spaceborne sensors: from comet impactors to observations of extrasolar planets [J]. *SPIE*, 2006, 6265: 62652V-1-62652V-11.
- [2] 史少龙. 空间望远镜精密稳像控制关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
SHI S L. *Research on Control Technology of Precision Image Stabilization System in Space Telescope* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [3] 何煦, 杨雪, 李颀, 等. 大口径空间光学望远镜重力卸载点布局优化方法 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(11): 2764-2775.
HE X, YANG X, LI Y, *et al.*. Gravity compensation optimization algorithm for large aperture spatial optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11): 2764-2775. (in Chinese)
- [4] ODELL C R. Creation of the Hubble space telescope [J]. *Exp Astron*, 2009, 25(1): 261-272.
- [5] LALLO M. Experience with the Hubble space telescope: 20 years of an archetype [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 011011.
- [6] LIGHTSEY P A, ATKINSON C A, CLAMPIN M, *et al.*. James Webb space telescope: large deployable cryogenic telescope in space [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 011003-1-011003-19.
- [7] PHLIIP A L, JOHN E D. An overview of the James Webb Space Telescope (JWST) project [J]. *SPIE*, 2014, 5487: 549-563.
- [8] BEALS G A, CRUM R C, DOUGHERTY H, *et al.*. Hubble space telescope precision pointing control system [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1988, 11(2): 119-123.
- [9] ANSEVIN R W. The Hubble space telescope star simulator test stand [J]. *SPIE*, 1984, 0518: 125-135.
- [10] JOHN N, PAUL D A, CHARLES B A, *et al.*. James Webb Space Telescope (JWST) observatory architecture and performance [J]. *SPIE*, 2004, 5487: 576-587.
- [11] MIROSLAW O. Fine steering mirror for the James Webb space telescope [J]. *SPIE*, 2007, 6665: 66650D-1-66650D-10.
- [12] 孙高飞, 张国玉, 姜会林, 等. 甚高精度模拟器设计 [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]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1730-1735. (in Chinese)
- [13] 赵晨光, 谭久彬, 刘俭, 等. 用于天文导航设备检测的星模拟器装置 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1326-1332.
ZHAO CH G, TAN J B, LIU J, *et al.*. Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1326-1332. (in Chinese)
- [14] 刘亚平, 李娟, 张宏. 星模拟器的设计与标定 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S1): 331-334.
LIU Y P, LI J, ZHANG H. Design and calibration of star simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 331-334. (in Chinese)
- [15] 陈启梦, 张国玉, 张健, 等. 高精度亚像素显示技术动态天体模拟器 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1037-1045.
CHENG Q M, ZHANG G Y, ZHANG J, *et al.*. High-precision dynamic celestial simulator with

- sub-pixel display technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018,26(5): 1037-1045. (in Chinese)
- [16] 孟遥,张国玉,孙高飞,等. 基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统 [J]. *光学精密工程*, 2016,24(3): 511-520.
MENG Y, ZHANG G Y, SUN G F, *et al.*. Optical system of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(3): 511-520. (in Chinese)
- [17] 刘欣然,徐熙平. 基于 LCOS 拼接的小型目标模拟器光机结构设计 [J]. *长春理工大学学报:自然科学版*, 2019,42(4): 55-60.
LIU X R, XU X P. Optical machine structure design of small target simulator based on LCOS splicing [J]. *Journal. of Changchun University of Science Technology: Natural Science Edition*, 2019,42(4): 55-60. (in Chinese)
- [18] RODDEN J, DOUGHERTY H J. Solar object tracking for the Hubble space telescope [J]. *SPIE*, 1986, 0641:43-53.
- [19] ROWLAND N, WARNER G, BERNDT C, *et al.*. Detector characterization for the JWST fine guidance sensor [J]. *SPIE*, 2010, 7742:77421T-1-77421T-12.
- [20] ROWLANDS N, ALDRIDGE D, ALLEN R, *et al.*. The JWST fine guidance sensor [J]. *SPIE*, 2004, 5487:664-675.
- [21] 张福瑞. 基于液晶光阀的动态场镜目标器设计 [D]. 西安:西安工业大学, 2015.
ZHANG F R. *Resign of Dynamic Scene Target Device Based on TFT-LCD* [D]. Xi'an: Xian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [22] 张健,辛悦,刘伟奇,等. 基于微透镜阵列的三维数字成像 [J]. *光学精密工程*, 2009,17(7): 1701-1706.
ZHANG J, XIN Y, LIU W Q, *et al.*. Three-dimensional digital imaging based on microlens array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1701-1706. (in Chinese)
- [23] 陈旭. LCOS 可调谐光滤波器阵列的研究与设计 [D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
CHEN X. *Resign and Design on a Tunable Optical Filter Array Based on LCOS* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [24] 张磊,程鑫彬,张锦龙,等. 光学表面功率谱密度的表征 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(12): 3707-3712.
ZHANG L, CHENG X B, ZHANG J L, *et al.*. Characterization of power spectral density of optical surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3707-3712. (in Chinese)

作者简介:



李成浩(1993—),男,山东临沂人,2015年于长春大学获得学士学位,主要从事大口径相机稳像测试等方面的研究。
E-mail: 13039045937@163.com

通讯作者:



张晓辉(1967—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,1991年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学检测、像质评价技术等方面的研究。E-mail: zhangxiaohui0123@163.com