

文章编号 1674-2915(2011)04-0369-05

弱光紫外星模拟器的研制

徐亮,赵建科,周艳,张洁,刘峰
(中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西西安710119)

摘要:为了解决月基紫外深空观测相机地面定标的难题,研制了一种动态范围大、星等模拟精度高的紫外星模拟器。该模拟器采用5 m 离轴光管作为准直光学系统,用双积分球系统作为均匀光源,可模拟3~16等星的弱目标,其星等最小分辨率为0.2等星,星等不确定度为5.48%。通过试验证明,该星模拟器完全满足月基紫外弱光星等深空观测相机地面定标的试验要求,不仅可以在实验室内标定紫外观测相机的探测能力和灵敏度,还可用于测试观测相机的其它参数指标,为发展深空高轨探测相机提供了地面定标基础。

关键词:紫外星模拟器;星等;平行光管;辐照度
中图分类号:V524.3 **文献标识码:**A

Development of dim light ultraviolet star simulator

XU Liang, ZHAO Jian-ke, ZHOU Yan, ZHANG Jie, LIU Feng

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to resolve the problem on calibration for a lunar-based ultraviolet camera in deep space, an ultraviolet star simulator with large dynamic ranges and high precision simulating magnitudes was developed. By taking an off-axis collimator with the focal length of 5 000 mm as a collimating system and a double integrating sphere as the uniform source of light, it can simulate the star magnitude from 3 to 16 with the system minimum resolution of star magnitude of 0.2 and the uncertainty of 5.48%. The experimental result shows that the star simulator satisfies the requirement of ground-based calibration for the lunar-based ultraviolet camera in deep space. It not only can calibrate the detection ability and sensitivity of the ultraviolet camera, but also can measure its other technological parameters, which provides the foundation of ground-based calibration for developing the high altitude orbit camera in deep space.

Key words: ultraviolet star simulator; star magnitude; collimator; irradiance

1 引言

在月基天文观测中,为了实现各种天体在近紫外波段的亮度变化的观测,需要使用一种具有高灵敏度弱光紫外探测功能的紫外天体观测相机。高灵敏度星体观测相机的探测能力一般在8等星以上,但8等星的光照度很低,尚没有相应的标准测量设备来直接标定^[1]。目前,国内为了标定各种弱光探测相机的星等探测能力,多选择在深山中(或天文台)对国际公认的已知星等进行野外拍摄,然后将拍到的星图与实际星图天区对比来判断该相机的探测能力是否满足要求。在外场观星时,受自然条件的影响非常大,为了采集到满意的星图,在天气情况不好的条件下,有时需要在外场连续等待几十天才能获得理想的星图,投入了大量的人力和物力;而且由于大气密度、大气透过率、天空背景光等不确定性因素对光谱信息及光电探测器测量稳定性的影响^[2],很难保证采集到的数据完全可靠。另外,该试验是用于深空紫外星等观测,大气对紫外光谱的吸收也很严重,如果用相机直接在地面上对紫外天体拍摄,则很难获得到较高的星等。由于月基紫外深空观测相机要求在谱段200~400 nm处能够探测到5~15等星,并且要求该相机的星等分辨率为0.2等星,因此有必要研究一种能够在室内标定该相机星等探测能力及星等分辨能力的紫外弱光星等模拟器。

由于提出的试验用于模拟验证深空紫外15

等星时月基观测相机的观测能力,因此必须设计一套低照度弱光紫外星模拟器来标定观测相机探测能力及灵敏度。本文根据天文学对紫外15等星的辐照度定义,利用双积分球作紫外可调均匀光源,设计了一套微弱光紫外星模拟器,用于模拟3~16等星的恒星,其星等分辨率为0.2等星。该星模拟器可以在实验室内对紫外观测相机的探测能力及灵敏度进行标定,也可以用于对观测相机的其他光学参数指标进行测试。

2 星模拟器的布局及工作原理

2.1 标准紫外星等辐照度

星等,是天文学上对天体明暗程度的一种表示方法^[3]。在国际天文学中,星体的辐照度等级通过地球大气层外接收到星的辐照度来衡量,星等大小用来表示星体辐照度的亮暗水平等级^[4]。一般规定零等星的光照度大约为 2.65×10^{-6} lx,其视等星相差5等星时,星体的光照度相差100倍,如此推算则每两个星等间的光照度就相差大约2.512倍。星等等级及光照度之间关系如下:

$$a - b = -2.512 \lg \frac{E_a}{E_b}, \quad (1)$$

式中 E_a 和 E_b 分别为a星等和b星等在地球大气外的光照度^[5]。已知要观测的星等为15,其在200~400 nm波段的辐照度为 2.52×10^{-14} W/m²,则通过公式(1)可以推导出这个波段其他星等与辐射照度的绝对关系^[6]。这个波段其他星等辐照度对照如表1所示。

表1 星等辐照度

Tab.1 Star magnitude irradiance

星等数	3	6	8	10	12	15	16
辐照度/(W·m ⁻²)	1.59×10^{-9}	1.00×10^{-10}	1.59×10^{-11}	2.52×10^{-12}	3.99×10^{-13}	2.52×10^{-14}	1.00×10^{-14}

2.2 紫外星模拟器布局及工作原理

紫外星等模拟器设计方案原理如图1所示,其中星模拟器主要由氙灯光源、滤光片、可变光阑、光学积分球、星点板、5M平行光管、控制系统组成。工作原理:氙灯发出的紫外光谱经过滤光片修正后,到达积分球1内壁,经过多次漫反射进

入积分球2,最后通过积分球2的出口发出均匀的紫外光谱;此时,在平行光管的焦面处放置一星点板,积分球2出口处的光照亮星点孔,则在平行光管出口处发出一束平行光,对着平行光管看去,正如来自无穷远处的星光辐射。其中各部分的功能如下:

氙灯光源主要提供紫外波长的光谱,并起修正滤光片的作用,可以模拟到光谱范围满足设计要求的辐射光光谱曲线。手动可变光阑的作用是使氙灯光能在进入积分球1后亮度可粗调,配合电动可变光阑(经过细分),便可使积分球2出口处的辐亮度变化范围满足所模拟星等辐照度动态变化的要求。两个积分球主要用于提供面均匀性和角均匀性(发散角 $\pm 20^\circ$)优于99%的均匀光源,这样在积分球2出口附近便可准确测出星点孔处的辐亮度,从而可推算出经过平行光管后辐照度的大小。为了能够监测出积分球2发出的光

谱辐射特性及辐亮度值,在积分球2出口附近采用光谱辐射计来实时监测光谱亮度变化,为标定星模拟器出口的辐照度提供计算依据。星点板采用的是0.02 mm星点,平行光管采用的是5 m平行光管,通过理论计算可以模拟出目标星等。控制系统主要是配合电动可变光阑完成积分球2出口辐亮度的动态变化,其中辐亮度可在 $250 \sim (1.0 \times 10^{-4}) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 进行连续调节,其辐亮度的增量值可细分到 $1.0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,通过计算可知,其完全满足0.2等星分辨率的要求。

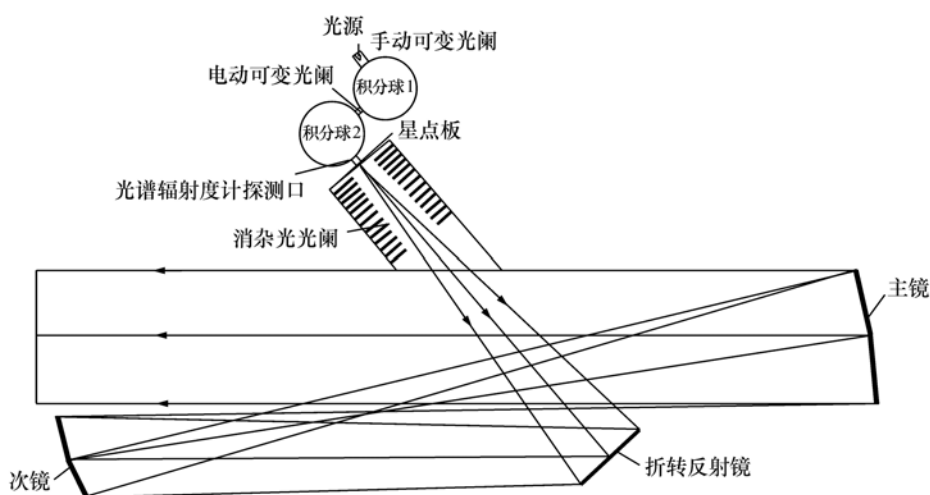


图1 紫外星等模拟器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ultraviolet star simulator

2.3 星模拟器平行光管光学设计

星模拟器平行光管的设计也是本项目的重点之一,因为星模拟器的出射光辐照度直接与平行光管焦距的大小有关,要模拟弱光星等并能满足被测相机焦距测试要求,需选用长焦距平行光管;另外,被测相机的口径也直接与平行光管口径相关,为了不让杂光进入相机光学系统中,必须研制大口径平行光管,使相机整个光学系统被涵盖于平行光管之中。同时为了使模拟星点发出的光尽可能地与实际星体发光匹配,需要设计一个无色差系统。如图2所示,选用一种离轴反射式光学系统,主、副镜均采用凹的离轴二次曲面,其主副镜布置上靠近光轴,非球面度可在一定程度上降低,这样可对加工有利;另一方面,主副镜之间有

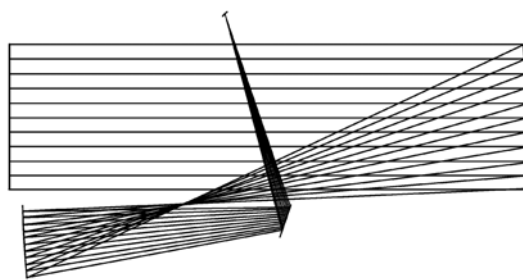


图2 平行光管光路图

Fig. 2 Light path of collimator

一个实像点,也对装调有利。为尽量避免焦面装置离主镜太近,影响主镜的稳定性,用一块折转平面镜将焦点位置做了调整。整个系统的焦距为

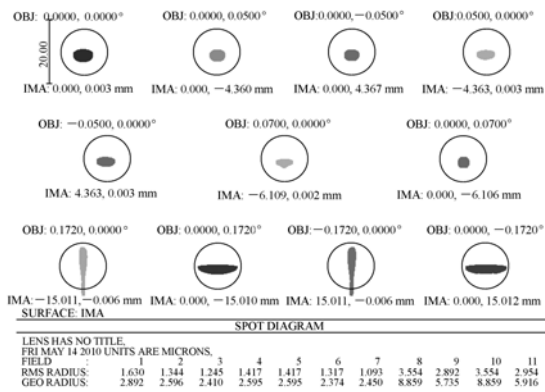


图3 点列图

Fig.3 Spot diagram

5 000 mm,总长度为 3 000 mm。该系统像质优良、无色差,满足星模拟器的研制需求。图3、图4为光学系统的像差设计结果,从设计结果可以看出,该系统像质优良,完全满足星模拟器的设计要求。

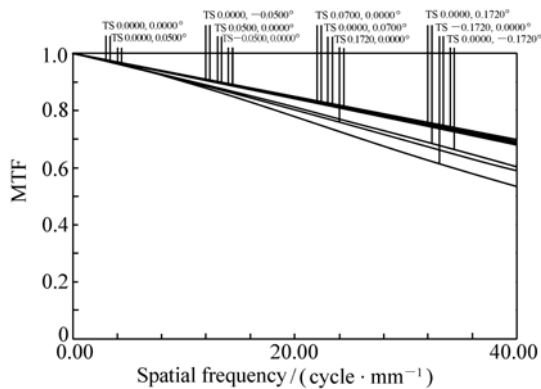


图4 传递函数曲线

Fig.4 MTF curve

3 星模拟器星等模拟计算

根据前面的设计分析可知,紫外星等模拟器的星等模拟难点主要是星等辐照度的测试问题,而目前国内没有这样的探测设备能够直接探测出 10^{-4} W/m^2 量级的辐照度,故需要一种间接的手段来测试星模拟器的出射光辐照度。经过分析,本文采用了一种间接测试方法,该方法通过计算出射光的辐照度。由下式求得平行光管出射的

辐照度:

$$E = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d}{f'}\right)^2 \cdot L \cdot \tau, \quad (2)$$

式中 d 为星点板星点孔的大小, f' 为平行光管的焦距, L 为积分球出口的辐亮度, τ 为平行光管的反射率^[7]。即只需测得平行光管的焦距、反射率、星点板上星点孔径的大小及积分球出口的辐亮度便可计算出平行光管出口的辐照度。

星点的选择遵循以下衍射极限公式:

$$d = \frac{0.61\lambda f'}{D}, \quad (3)$$

式中, λ 为相机中心波长, D 为相机孔径,星点孔的衍射极限尺寸为 0.01 mm。为了满足测试需要,根据经验选择星点孔的尺寸为 0.02 mm。

已知平行光管的反射率为 0.6, 焦距为 5 000 mm, 拟选用星点孔为 0.02 mm, 为了模拟 3~16 等星辐照度, 根据式(2)可计算出积分球出口处的辐亮度为: $210.88 \sim (1.326 \times 10^{-3}) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。由于该光源系统可以输出辐亮度为 $250 \sim (1.0 \times 10^{-4}) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 的光, 则理论上可以模拟出 3~16 等星的星等变化。此外因该光源的增量可细分到 $1.0 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 而 16.2 等星与 16 等星在积分球出口处的辐亮度增量为 $2.23 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 故可以满足星等细分精度为 0.2 等星的要求。

4 精度分析

由于从平行光管出射的辐照度如式(2)所示, 故经平行光管出射的星等辐照度精度受星点孔尺寸、平行光管焦距、积分球出口辐亮度、平行光管反射率、杂光及其他环境因素影响。其中, 星点孔的测试精度 σ_d 为 0.1%; 平行光管的测试精度 σ_f 为 0.1%; 积分球出口辐亮度的测试不确定度 σ_L 为 5% (包含光源的不稳定度、光谱曲线的标定误差、积分球出口的辐亮度测试误差); 平行光管的反射率测试精度 σ_τ 为 1%; 杂光及环境影响因素对出口辐照度精度影响 e 为 2% (按照最弱光辐照时计算)。综合上述测试误差分析可计算出该星模拟器的星等模拟精度为:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial d}\right)^2 \times \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial f'}\right)^2 \times \sigma_{f'}^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial L}\right)^2 \times \sigma_L^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial \tau}\right)^2 \times \sigma_\tau^2}. \quad (4)$$

$$\Delta = \sqrt{\sigma^2 + e^2} = 3.2\%. \quad (5)$$

而根据16等星的辐照度可计算出,此时星等的模拟误差为 $3.2 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$,远远小于16等星时0.2等星分辨率辐照度为 $1.68 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$ 的要求;在3等星时星等的模拟误差为 $5.088 \times 10^{-11} \text{ W/m}^2$,此时0.2等星分辨率辐照度为 $2.67 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$,则此时的星等模拟误差也远远小于星等分辨率要求,故可完全满足使用要求。

种3~16等星大动态范围变化的紫外星模拟器设计方案,该方案解决了目前国内弱光紫外星等模拟地面定标的难题。通过理论计算和精度分析可知,该设计方案可行,满足实际使用要求,具有很强的弱光星等模拟推广性。另外,该星模拟器的设计可为月基天文观测用的各种探测相机作地面定标设备,大大节约了外场试验成本。

5 结 论

本文针对紫外弱光星等定标问题,提出了一

参考文献:

- [1] 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(增):331-334.
LIU Y P, LI J, ZHANG H. Design and calibration of star simulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(s): 331-334. (in Chinese)
- [2] 郭玉蛟. 星模拟器概述[J]. 控制工程,1986(5):42-49.
GUO Y J. The generation of star simulator[J]. *Control Eng. China*, 1986(5): 42-49. (in Chinese)
- [3] 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 ZH, LI Y C. Design and performance analysis of standard starlight simulator[J]. *J. Appl. Opt.*, 2010, 31(1): 39-42. (in Chinese)
- [4] 段晓东. 全天球实时星光模拟器的设计与标定[J]. 控制工程,1997(2):26-33.
DUAN X D. Design of real-time star simulator in whole celestial sphere[J]. *Control Eng. China*, 1997(2): 26-33. (in Chinese)
- [5] 周建涛,蔡伟,武延鹏. 星敏感器用仪器星等的确定[J]. 空间控制技术与应用,2009,35(2):46-50.
ZHOU J T, CAI W, WU Y P. Estimation of stellar instrument magnitudes for star tracker[J]. *Aerospace Control Appl.*, 2009, 35(2): 46-50. (in Chinese)
- [6] 谈斌,姚东升,向春生,等. 类柱体空间目标的星等计算模型研究[J]. 光电工程,2008,35(7):33-37.
TAN B, YAO D SH, XIANG CH SH, et al. Star magnitude computing model of space targets like prism[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2008, 35(7): 33-37. (in Chinese)
- [7] 钟奉金,许世文,赵亮,等. 星模拟器中积分球内光纤端面有效照度的计算[J]. 哈尔滨工业大学学报,1998,30(4):113-115.
ZHONG F J, XU SH W, ZHAO L, et al. Effective illuminance calculation on fiber end sited in integral sphere in stars simulation system[J]. *J. Harbin Institute Technol.*, 1998, 30(4): 113-115. (in Chinese)

作者简介:徐亮(1984—),男,陕西西安人,硕士,主要从事空间光学设计与微弱光测试方面的研究。

E-mail: xuliang757@163.com