

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0105-05

# 基于星模拟器光学系统杂散光测试设备设计

冯广军<sup>1,2</sup> 马 臻<sup>1</sup> 李英才<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 高分辨率光电探测相机探测能力的提高受杂散光的限制,杂散光在很大程度上决定了探测能力的底限。由于光学系统的杂散光受到诸多因素影响,必须在最终指标上进行测试,如:点源透射率(PST),用于全系统性能指标控制。利用星模拟器超大动态范围的光辐射输出,设计了一台光学系统杂散光 PST 测试设备,解决了单个探测器动态范围无法覆盖  $10^8$  的问题;在一定信噪比下,分析了电子倍增 CCD 杂散光 PST 测试能力。经分析杂散光 PST 测试范围可达到  $10^{-2} \sim 10^{-8}$ ,满足高分辨率光电探测相机杂散光测试的要求。

**关键词** 光学器件;杂散光测试;点源透射率;星模拟器;电子倍增 CCD

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0105

## Design of Stray Light Test Facility Based on Optical System of Star-Simulator

Feng Guangjun<sup>1,2</sup> Ma Zhen<sup>1</sup> Li Yingcai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The detection ability of high resolution photoelectric detection system, to a great extent, is limited by the stray light. Since various factors influence stray light of optical system, its stray light must be tested in order to control the final indicators, such as point source transmittance (PST). On the base of star-simulator with huge dynamic range, the stray light test facility is designed, and the problem that dynamic range of single detector cannot cover  $10^8$  is solved. Under a reasonable signal-to-noise ratio, the test range of stray light PST with electron-multiplying CCD (EMCCD) is analyzed. Through analysis, the range of the stray light PST can reach  $10^{-2} \sim 10^{-8}$ , and meet the requirement for testing high resolution photoelectric detection system's PST.

**Key words** optical devices; stray light test; point source transmittance; star simulator; electron-multiplying CCD

### 1 引 言

杂散光是到达光学系统像面非成像视场内的光线,在系统探测器上形成背景噪声。杂散光对光学系统的影响表现在:降低探测目标的信噪比,扩展目标成像模糊,像面对比度下降,从而影响整个系统的探测和识别能力;被探测的目标信号完全湮没在杂光背景中,系统无法提取目标,或由于像面杂散光分布不均匀,在系统探测器上形成虚假信号,致使系统探测到伪目标,甚至导致整个系统失效<sup>[1]</sup>。杂散光

限制了高分辨光电探测相机探测能力的提高,不仅需要设计上加以控制,而且需要在最终指标上进行测试。

评价光学系统杂散光性能的方法主要有两种:1)设计阶段进行分析,包括系统中各部件材料的散射特性分析;在结构上合理设计遮光罩以及挡光环等;2)使用计算机软件对光学系统杂散光进行模拟仿真分析。待整个系统完成后,采用特定设备对光学系统进行测试,即杂光测量法。

收稿日期: 2010-04-05; 收到修改稿日期: 2010-06-02

作者简介: 冯广军(1985—),男,硕士研究生,主要从事星模拟器及杂光测试等方面的研究。E-mail: Feng520\_jj@126.com

导师简介: 马 臻(1976—),男,副研究员,主要从事光学设计与光学检测等方面的研究。E-mail: mazn@opt. ac.cn

在实际应用中,评价光学系统杂光性能的方法是两种方法的综合应用,即在设计阶段先进行杂光分析,系统完成后再进行杂光测试。点源透射率(PST)是目前普遍采用的一种评价光学系统消杂光能力的指标。定义为光学系统视场外离轴角 $\theta$ 的光源经过光学系统后在像面产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 与垂直于该点源的输入孔径上的辐照度 $E(\theta)$ 的比值。

点源透射率体现了光学系统本身对点杂光光源的衰减能力,而与杂散光源的辐射强度无关。显然,PST 越小则表示系统杂光抑制能力强,系统性能好。在实际应用中,当对系统像面的杂光辐照度有一定的要求时,在已知杂散光垂直于输入孔径上的辐照度的条件下,就可以对系统的杂散光指标 PST 提出要求<sup>[2]</sup>。

国外在杂光分析方面研究得已经相当成熟,在测试方面杂散光 PST 测试水平可以达到 $10^{-12}$ ,甚至更高。国内在杂光分析方面也趋于完善,已经有大量文献资料、杂散光设计软件以及实际工程应用,但在测试方面还很少有专门的 PST 测试设备<sup>[3]</sup>。电子倍增 CCD(EMCCD)具有高量子效率、高灵敏度、低噪声等优点,广泛用于微弱光的探测<sup>[4]</sup>。就探测器本身而言,杂散光 PST 测试水平取决于探测器弱光探测能力与探测器本身的动态范围。EMCCD 的弱光探测能力较高,但当输入孔径上的辐照度 $E(\theta)$ 超出 EMCCD 饱和光照度时,其探测动态范围无法满足杂散光 PST 测试需求,必须通过其他方法进行弥补。

本文介绍了一种大动态范围星模拟器;在此基础上,设计了一台杂散光 PST 的测试设备,并对测试能力进行了分析。

## 2 星模拟器结构与原理

### 2.1 星模拟器各部件功能

星模拟器作为地面标定设备,用于模拟无穷远微弱星光照度,用以进行恒星探测器以及星敏感器等的地面标定试验<sup>[5~8]</sup>。高分辨率光电探测相机探测的目标并非完全的自然天体,而是探测人造卫星等空间目标,因此模拟太阳光谱能模拟出探测器的实际工作状态,最大限度地模拟在轨工作条件下的目标特性。

星模拟器由卤钨灯、电光源、滤光片、可变光阑、积分球、星点板、平行光管、光辐射计及标定软件构

成。其结构如图 1 所示。

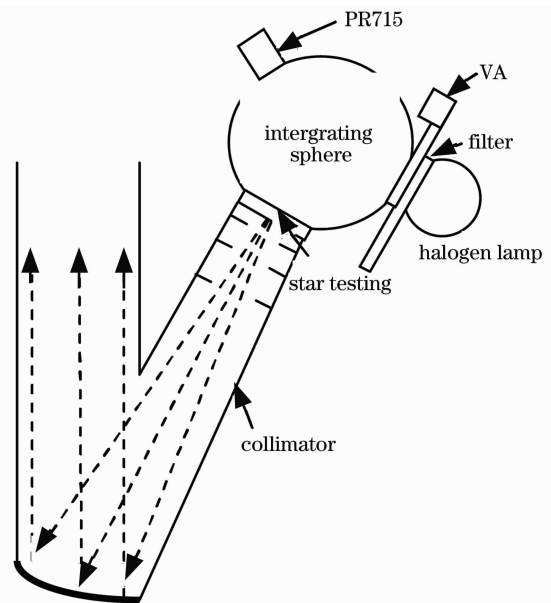


图 1 星模拟器结构示意图

Fig.1 Structure of star simulator

卤钨灯光源的特点是光谱连续且色温达 3300 K,经 Agilent 电光源稳压稳流工作稳定性可以优于 0.5%。加滤光片修正卤钨灯的光谱曲线,模拟出大气外太阳光谱曲线,使输出光的光谱与实际工作状态最为接近。可变光阑调节光源进入积分球的光通量大小,连续调光动态范围比较大,采用 Sphere optics 公司提供的 VA-HR 型可变光阑,从光阑全开到全闭经过 $2.1 \times 10^6$ 步长,控制精度较高,动态范围达 $10^8$ 水平,使得积分球出口处的光辐射亮度满足模拟微弱星光照度的要求。光进入积分球后,经过漫反射,将光源输出光辐射均匀照明星点板, Labsphere 公司积分球的涂层材料的稳定性和漫反射率较高,使得出口处的光辐射面均匀性达到 98%,角均匀性( $\pm 20^\circ$ 内)达到 98%。同时整个球体内部的亮度均匀,从而通过光谱辐射计测量星点处的辐射亮度,可以解决星等标定问题。积分球输出的均匀光经过星点板,产生均匀点光源,再配合平行光管,形成无穷远平行光,以模拟出无穷远处星点。可以拆换使用不同大小的星点板,以满足不同情况下的使用要求。光谱辐射计主要对积分球出口处辐射亮度进行测量,以及对光谱分布及色温进行监视,以提供对光源系统不稳定性的反馈。星模拟器即是模拟太阳光谱曲线的高稳定性、高均匀性、大动态范围的光源系统。

### 2.2 星模拟器能量传递原理

光学量在星模拟器中的传递流程如下卤钨灯光源经过可变光阑调节,光进入积分球后漫反射,出口亮度为

$$L = \frac{\phi_1}{\pi \cdot s} \cdot \frac{\rho'}{1 - \rho' \cdot (1 - \beta)}, \quad (1)$$

其中  $s$  为积分球内表面积,  $\rho'$  为积分球内表面反射系数,  $\beta$  为积分球的开口系数,  $\phi_1$  为进入积分球的光通量,其数值与可变光阑孔径  $d_1$  平方成正比。

积分球出射光照射星点孔  $d$ ,再经过离轴抛物面式平行光管反射后的光照度为

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

其中  $d$  为星点板直径,  $f$  为平行光管焦距,  $\rho$  为平行光管的反射率。  $E$  即为所要模拟的星等光照度。

由以上分析可知星等光照度跟可变光阑的孔径平方成正比

$$E = \alpha \cdot (d_1)^2, \quad (3)$$

其中  $\alpha$  为比例系数。在可变光阑的线性工作区,调节可变光阑使得星模拟器的输出光能量动态范围达  $10^6$  水平。实现了星模拟器的大动态范围光能量的输出。在星模拟器的情况下,输出光照度范围为  $5.5 \times 10^{-11} \sim 3.5 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$ ,满足模拟微弱星光的要求;在杂散光测试时,通过更换氙灯光源,提高星模拟器的出射能量,达到  $10^{-2} \text{ W/m}^2$ 。

## 3 光学系统杂散光 PST 测试设备

杂散光测试系统由星模拟器、载物台、高灵敏度 EMCCD 探测器、主控软件组成,实现光学系统杂散光 PST 的测试,整个测试处于净化等级较高的暗室环境中进行。结构示意图如图 2 所示。

### 3.1 系统杂散光测试原理与方法

杂散光 PST 测试原理是利用大动态范围的标准平行照射光源光学系统,在光学系统的焦平面上用高灵敏度的光电探测器探测杂散光。一般情况下,星模拟器输出光能量超出探测器饱和光照度,利用星模拟器作为强光源和弱光源,照明被测光学系统,被测光学系统上安装 EMCCD 标准弱光探测器。在星模拟器提供的强光源照明被测光学系统时,获得其杂光响应  $R_1(\theta)$ ,然后利用星模拟器的可变光阑将照度调低  $n$  倍,将探测器直接对准模拟器,此时的照度响应为  $R_2$ ,则

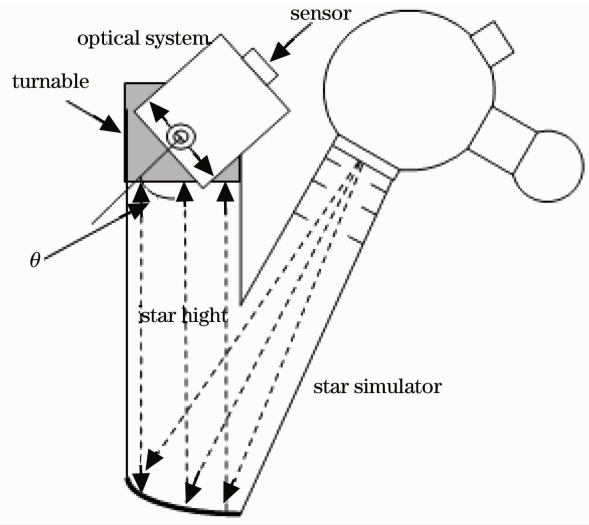


图 2 杂散光测试结构示意图

Fig. 2 Structure of stray light test facility

$$T_{ps}(\theta) = \frac{R_1(\theta)}{R_2 \times n}. \quad (4)$$

具体操作如下:使用大功率氙灯光源代替卤钨灯光源,提高星模拟器输出亮度,通过可变光阑调节积分球的输出光能量,并将微米级星孔用毫米级星孔代替,在杂散光测试情况下,星模拟器输出最大光辐射照度水平为

$$E(\theta) = 10^{-2} \text{ W/m}^2. \quad (5)$$

测试设备需置于 5 级净化等级的暗室环境中,以防止气溶胶散射对测试的影响;且要设置光陷阱和对相关部件进行涂黑<sup>[9]</sup>。光学系统放置于载物转台上,EMCCD 位于光学系统焦平面上,然后将星模拟器对准光学系统,转动光学系统令离轴角变化,当探测器接近饱和时停止测量,EMCCD 记录下响应  $R_1(\theta)$ 。通过调节可变光阑使得星模拟器光输出低于 EMCCD 饱和光照度,在低量级输出情况下,EMCCD 直接对准星模拟器的响应  $R_2$ 。同时使用光谱辐射计标定星模拟器的两种光辐射输出比率,即可得出光学系统的 PST。该方法利用了星模拟器的超大动态范围输出量,解决了单个探测器无法照顾  $10^8$  动态的问题。

### 3.2 系统杂散光 PST 测试能力分析

PST 的测试上限由探测器的饱和等效光照度与星模拟器的最大输出光照度相比确定。光照 EMCCD 下产生的电荷数计算公式为

$$N_e = \frac{E_d(\theta) \cdot A \cdot t}{(h \cdot \nu) \cdot \eta}, \quad (6)$$

式中  $E_d(\theta)$  为到达像面的光照度,  $A$  为像元面积,  $t$

为曝光时间,  $\eta$  为量子效率,  $(h \cdot \nu)$  为光子能量。

ANDOR 公司 DU897 背光型 EMCCD 典型饱和和满阱电子数为 160000, 像元尺寸为  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ 。取曝光时间为 1 s, 中心波长为 550 nm。由(7)式得

$$E_d(\theta) = \frac{N_e \cdot (h \cdot \nu)}{\eta \cdot A \cdot t} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2, \quad (7)$$

表示曝光时间为 1 s, 星模拟器输出光照度大于  $2.5 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ , 探测器件就达到饱和状态。此时可通过可变光阑调节将星模拟器输出光照度降至  $2.5 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$  以下, 同时用光谱辐射计标定出强光与弱光的比率  $n$ , 由(4), (5), (7)式可知 PST 测试的上限为  $10^{-2}$  水平。

PST 测试的下限水平则由探测器的最小可探测光照度与星模拟器的最大光照度相比确定。噪声等效功率  $N_{ep}$  为信噪比为 1 情况下所需要最小输入光信号功率, 反映了探测器的理论探测能力的重要指标之一。一般情况下, 入射光功率应大于  $N_{ep}$  若干倍, 即信噪比要大于一定的值(3~5 倍), 信号才能被检测出来。以下在信噪比  $R_{SN} = 3$  情况下分析 PST 测试水平。EMCCD 由于电子倍增的作用, 读出噪声对总噪声的贡献被很好地抑制。增益模式下, 总噪声表示为<sup>[10]</sup>

$$N = \sqrt{N_D \cdot F^2 + S \cdot F^2 + \frac{N_A^2}{G^2}}, \quad (8)$$

式中  $\sqrt{N_D}$  为暗电流噪声,  $\sqrt{S}$  为入射光子噪声,  $N_A$  为读出噪声,  $F$  为噪声因子, 极限值为  $\sqrt{2}$ 。  $G$  为电子倍增增益, 当  $G$  足够大时, 读出噪声  $N_A$  被有效抑制。一般情况下, 通过调节增益  $G$ , 使得读出噪声为前两项噪声的 10%, 即

$$(N_D \cdot F^2 + S \cdot F^2) \times 10\% = \frac{N_A^2}{G^2}, \quad (9)$$

信噪比

$$R_{SN} = \frac{S}{\sqrt{(N_D + S) \cdot F^2 \times 1.1}} = 3, \quad (10)$$

对于 ANDOR DU897 背光型 EMCCD, 暗电流  $0.001 \text{ e}^-/\text{pixel}/\text{s}$  ( $T = 208 \text{ K}$ ), 1 帧产生的暗电流为(曝光时间为 1 s) ( $0.001 \text{ e}^-/\text{pixel}/\text{s}$ )  $\times 1 \text{ s} \times 1 \text{ pixel} = 0.001 \text{ e}^-$ ; 此外, 固定暗电流为  $0.1 \text{ e}^-/\text{pixel}$  得到 1 帧总暗电流为:  $N_D = 0.101 \text{ e}^-$ 。

由(9)式, 代入数据

$$R_{SN} = \frac{S}{\sqrt{(0.101 + S) \times 2 \times 1.1}} = 3, \quad (11)$$

得出 EMCCD 单像元所探测的最小信号电子数  $S = 19.9 \text{ e}^-$ 。由(7)式得 EMCCD 单像元所探测的

最小光照度为

$$E_d(\theta) = \frac{N_e \cdot (h \cdot \nu)}{\eta \cdot A \cdot t} = 3 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2, \quad (12)$$

此时的 PST 测试可达  $10^{-6}$  水平。

如果采用  $4 \times 4$  binning 处理, 同样的曝光时间下, 总暗电流  $N_D = 1.616 \text{ e}^-$ , 由(10)式计算出 EMCCD  $4 \times 4$  pixel 所探测的最小信号电子数  $S = 20.5 \text{ e}^-$ 。对应所探测的最小光照度为

$$E_d(\theta) = \frac{N_e \cdot (h \cdot \nu)}{\eta \cdot A \cdot t} = 2.0 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2, \quad (13)$$

此时的 PST 测试可达  $10^{-7}$  水平。

从上述分析可知, 电子倍增 CCD 在曝光时间为 1 s, 信噪比为 3 的情况下, 其整个设备的杂散光 PST 测试能力范围为  $10^{-2} \sim 10^{-7}$ 。适当提高 EMCCD 的曝光时间, 提高探测器的探测能力; 同时提高星模拟器的输出光辐射照度, PST 测试能力可以进一步提高, 可以稳定在  $10^{-2} \sim 10^{-8}$  范围, 满足高分辨率光电探测相机地面杂散光测试的要求。

## 4 结 论

杂散光 PST 测试成为高分辨率光电探测相机地面重要测试内容。介绍了一种大动态范围星模拟器的结构与原理; 在此基础上, 配合高灵敏度 EMCCD 设计了一台杂散光 PST 的测试设备, 利用星模拟器大动态范围的输出, 解决了单个探测器动态范围无法覆盖  $10^8$  的问题; 在合理的信噪比下, 分析了电子倍增 CCD 的杂散光 PST 测试能力, 经分析该方案的 PST 测试水平达到  $10^{-2} \sim 10^{-8}$ , 满足高分辨率光电探测相机地面杂散光测试的要求。

## 参 考 文 献

- Li Hui, Li Yingcai. Mathematical and physical model for a simplified stray light analysis method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(7): 665~672  
李 晖, 李英才. 一种简化杂光分析方法的数理模型[J]. *光子学报*, 1996, **25**(7): 665~672
- Li Ting. Research on Optical System of Lunar-Based Optical Telescope [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007, 33~37  
李 婷. 月基光学天文望远镜(LOT)的光学系统的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学机械精密研究所, 2007, 33~37
- Liao Sheng, Shen Mangzuo. Point source transmittance of stray light of infrared optical system and its measurements [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1996, **15**(5): 375~378  
廖 胜, 沈忙作. 红外光学系统杂光 PST 的研究与测试[J]. *红外与毫米波*, 1996, **15**(5): 375~378
- He Weiji, Chen Qian, Qu Huiming *et al.*. Charge multiplication of CCD based on electrons multiplication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1161~1166

- 何伟基, 陈 钱, 屈惠明 等. 电子倍增 CCD 的电荷倍增特性研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1161~1166
- 5 Guo Yujiao. The generation of star simulator [J]. *Control Engineering of China*, 1986, (5): 42~49  
郭玉蛟. 星模拟器概述[J]. 控制工程, 1986, (5): 42~49
- 6 Feng Guangjun, Ma Zhen, Li Yingcai. Design and performance analysis of standard starlight simulator [J]. *Applied Optics*, 2010, **31**(1): 39~42  
冯广军, 马 臻, 李英才. 一种高星等标准星模拟器器的设计与性能分析[J]. 应用光学, 2010, **31** (1): 39~42
- 7 Gan Xinji, Fu Youyu, Guo Jin. Error analysis of star magnitudes scale of space target scene simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 211~215  
甘新基, 付有余, 郭 劲. 空间目标场景模拟器的星等定标误差分析[J]. 光学学报, 2009, **29**(s1): 211~215
- 8 D. G. Koch, W. Borucki, E. Dunham *et al.*. CCD photometry tests for a mission to detect Earth-size planets in the extended solar neighborhood [C]. *SPIE*, 2000, **4013**: 508~519
- 9 L. Blarre, A. Mestreau. Stray light characterization of optical system [C]. *SPIE*, 1996, **2775**: 279~286
- 10 The use of multiplication gain in L3VisionTM electron multiplying CCD Sensors [Z]. A1A2Low2Light TechnicalNote 2, Issue 4, July 2003, E2V, England. [http://www.e2v.com/assets/media/files/documents/imaging-space-and-scientific-sensors/papers/low\\_light\\_technical\\_note\\_2.pdf](http://www.e2v.com/assets/media/files/documents/imaging-space-and-scientific-sensors/papers/low_light_technical_note_2.pdf).