

## 月基望远镜杂散光 PST 研究与测试

徐亮<sup>1,2</sup>, 赵建科<sup>1</sup>, 薛勋<sup>1</sup>, 周艳<sup>1</sup>, 刘峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对月基望远镜(LOT)杂散光抑制能力的验证, 在地面采用点源透过率法对其遮光罩视场外杂散光抑制比进行了测试, 并利用光学系统视场外不同离轴角的点源透过率(PST)来评价其杂散光抑制比。该 PST 测试方法突破了以往的杂散光测试方法, 采用高精度星模拟器与 EMCCD 结合的思路, 保证了探测器在其线性区域内具有大动态范围探测能力的特性, 其动态探测范围可达  $10^{12}$ , 可满足指标 PST(在  $22^\circ$  离轴角)测试值  $10^{-7}$  的要求。该方法能更客观、更直接地反应遮光罩的杂散光抑制能力, 其 PST(在  $22^\circ$  离轴角)测试不确定度可优于 60%, 远远高于以往杂散光抑制比的测试精度。另外, 讨论了该测试方法需改进的几点措施, PST 测试预期目标可达  $10^{-12}$ 。最后通过试验对 LOT 相机遮光罩的杂散光抑制比进行测试, 验证了 LOT 相机杂散光抑制比满足设计要求。

**关键词:** 杂散光; 遮光罩; 点源透过率; 离轴角

中图分类号: TN23; TH743 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)04-1289-07

## PST research and measurement of lunar-based optical telescope stray light

Xu Liang<sup>1,2</sup>, Zhao Jianke<sup>1</sup>, Xue Xun<sup>1</sup>, Zhou Yan<sup>1</sup>, Liu Feng<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

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

**Abstract:** To verify suppression capability of the stray light of the lunar-based optical telescope (LOT), its stray light rejection ratio of glare shield out of field range by point source transmittance on ground was tested, and assessing its stray light rejection ratio with PST of optical system diversity angle of off-axis. The new test method of PST breaks through the tradition method of stray light, using a new method that is combining high degree of accuracy star simulator with EMCCD, guaranteeing that the detector has large dynamic region within its linear range, and the dynamic range is  $10^{12}$ . It could satisfy the indexing demand that the PST testing result is  $10^{-7}$  (at  $22^\circ$  angle of off-axis). This test method could objectively and directly reflect the stray light rejection ratio of glare shield. The testing uncertainty of PST is above 60%, it will exceed the testing precision of classical stray light testing method. Moreover, discussing the improving method, the target PST testing result will reach  $10^{-12}$ . Last it verify the PST of LOT catering design demand with the experiment that it test stray light rejection ratio of glare shield.

**Key words:** stray light; glare shield; point source transmittance; angle of off-axis

收稿日期: 2013-08-13; 修订日期: 2013-09-16

基金项目: 探月工程二期项目

作者简介: 徐亮(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光学设计与弱光测试技术方面的研究。Email: xuliang757@163.com

## 0 引言

在月基天文目标星等探测中,为了观测各种天体的亮度变化,需要研制一种弱目标紫外星等观测相机,其具有高灵敏度弱光探测性能,星等探测能力为 15 Mv。由于空间环境电能供应的限制,LOT 目前只能在月面上白天工作,来自太阳和地球的强烈杂散光会对观测产生严重影响,而天文观测的科学目标本身也对系统杂散光的抑制水平要求很高,因此,杂散光抑制比的测试是保证 LOT 相机成像质量的关键技术之一<sup>[1]</sup>。

航天用光学系统的杂散光主要来源于视场外明亮物体(尤其是太阳)的强烈辐射,这些辐射经光学系统后发生散射、衍射,以杂散光形式分布于光学系统探测器上,从而影响光学系统的探测能力<sup>[2]</sup>。

目前利用所研制的高精度星等模拟器,采用点源透过率的测试原理,研究 LOT 相机杂散光抑制能力标定方法,这将对完成 LOT 相机的探测能力定标起决定性作用。因此,研究这种高灵敏度探测相机杂散光抑制能力的标定方法,成为研制 LOT 相机成败的关键。

## 1 LOT 相机遮光罩杂散光抑制能力设计

### 1.1 LOT 相机杂散光分析

LOT 相机工作时,其杂散光主要来自于视场外的太阳光、地气辐射光。如图 1 所示。

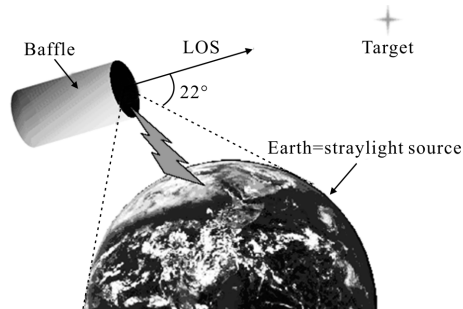


图 1 LOT 相机观测环境及杂散光光源

Fig.1 Observation environment and stray light source of LOT

太阳的临界入射角度为  $30^\circ$ ,地气光的临界入射角度为  $15^\circ$ 。在设计时,要求  $45^\circ$ 反射镜上不能有来自太阳光的直接照射,同时主镜上也不能有来自地球光的直射照射<sup>[3]</sup>。由于太阳上的杂散光可以通过卫星平台的姿态调整,有效地减小其产生的照射光

辐射,因此,为了有效抑制 LOT 相机视场外的杂散光,必须有效抑制来自地气光的辐射。经过计算分析,相机光轴与地气面夹角为  $22^\circ$ ,则夏至地气入射角时,杂散光在 CCD 靶面上的辐照度小于所探测的最高星等的星体在 CCD 靶面上的辐照度。因此,LOT 相机的杂散光抑制能力,主要研究  $22^\circ$ 视场角内的杂散光辐射特性。

### 1.2 LOT 相机主要技术指标

LOT 相机的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 LOT 主要性能指标

Tab.1 Chief parameters of LOT

Parameter	Value
Working wave range/ $\mu\text{m}$	0.2-0.4
Detectability/MV	-6-15
SNR	$\geq 5\sigma$
F#	3.75
CCD pixel size	$13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$
Optical system structure	R-C
PST	$10^{-7}(22^\circ)$

### 1.3 LOT 相机遮光罩设计

遮光罩主要用于抑制来自视场外大入射角的杂散光辐射源直接进入光学系统探测器上,因此,遮光罩的设计主要考虑大入射角杂散光辐射源的临界入射角对系统产生的影响。这里只考虑外部杂散光辐射源为地球,而地球对 LOT 相机的临界入射角为  $22^\circ$ 。因此,遮光罩的设计主要防止地球直射光线进入光学系统视场,确保来自地球的直射光线不能直接照射在主镜上。

#### 1.3.1 遮光罩上挡光环的设计

传统的挡光环一般垂直于遮光罩内壁,如图 2 所示,基本能够满足一般的消杂散光要求。但对于探测优于 +15 等星的空间相机而言,由于其探测星等

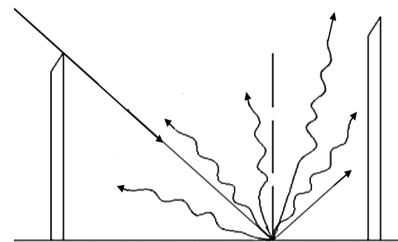


图 2 垂直于遮光罩壁的传统挡光环

Fig.2 Classical vane of vertical toward glare shield

较高,目标能量较低,对消光比的要求更为苛刻。可以用两种方法提高消光比:增加遮光罩长度及改变挡光环构型。考虑到空间相机质量、体积不宜太大,采用后一种方法来达到提高消光比的目的<sup>[4]</sup>。

传统方案中光线的散射问题是影响遮光罩效果好坏的重要因素,所以在新的设计中应尽可能使大部分光线无法散射到像面上。根据这一思想,把挡光环设计成与遮光罩内壁倾斜的结构,如图 3 所示。

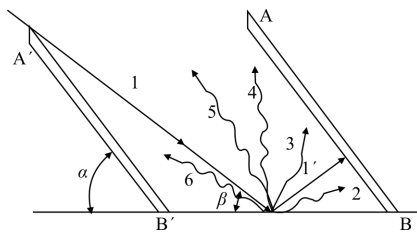


图 3 与遮光罩壁倾斜的挡光环  
Fig.3 Vane of inclining toward glare shield

这种结构可使杂散光 4 到入射光 1 之间的散射光线部分直接从遮光罩入口处出射,部分到达其他挡光环,再次发生反射、散射、吸收等衰减,最终到达像面的部分能量也已经很低。虽然不能完全遮挡杂散光,但已经大大减少了到达像面的杂散光,进一步改善了像质。

### 1.3.2 挡光环倾斜角度的选择

一般情况下,挡光环与遮光罩壁的夹角  $\alpha$  越小,挡光环遮挡入射光的杂散光能力越强。但是当入射光与遮光罩壁的夹角  $\beta$  大于挡光环与遮光罩的夹角时,光线会直接入射到挡光环 A'B' 上,其中有一部分散射光线会直接进入光学系统中,严重影响像面成像质量。

针对以上原因,设计挡光环的倾斜角度依次增大,始终保持  $\alpha \geq \beta$  的关系,这样才能避免一次散射光直接进入光学系统影响像质。

### 1.3.3 挡光环顶端设计

为了减少挡光环顶端面的边缘散射和边缘衍射,挡光环顶部结构一般设计成斜劈形或圆弧形<sup>[5]</sup>。

如图 4 所示,在遮光罩的前端,大离轴角辐射源可直接照射到挡光环上,因此,倾斜面应布置在左面,以防止被它散射的光直接进入光学系统。而对于系统内部较深的挡光环,其倾斜面应位于右侧,以防止外部辐射源直接照射到挡光环斜面上<sup>[6]</sup>。

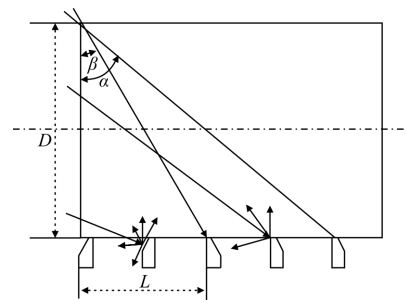


图 4 挡光环倾斜面方向的确定

Fig.4 Define of vane inclination orientation

图 5、图 6 为杂散光设计分析结果。根据结果分析,经过对遮光罩模型的仿真计算,光学系统杂散光抑制能力,在 22° 的离轴角 PST 值为  $10^{-8}$ ,可满足探测能力的要求。

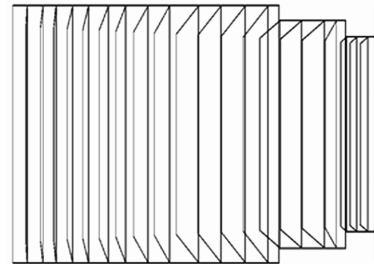


图 5 LOT 相机遮光罩设计图

Fig.5 Design of LOT glare shield

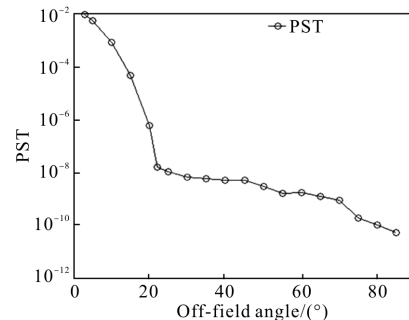


图 6 LOT 相机遮光罩 PST 设计曲线

Fig.6 PST design of LOT glare shield

## 2 LOT 相机杂散光 PST 的测试方法

### 2.1 PST 测试方法介绍

过去常以单位时间内到达系统像面上的杂散光总能量,或探测器所接收到的杂散光光子数,来评价光学系统对杂散光的抑制能力。但这些标准不仅描述了光学系统对杂散光的抑制能力,还包含了杂散光光源本身的辐射强度,对评价系统真实杂散光抑制能力产生了无关的影响<sup>[7]</sup>。

目前,随着国内外空间大口径、长焦距系统以及弱目标、高灵敏度、低探测阈值探测技术的飞跃发展,光学系统杂散光抑制比的研究与测试显得极其重要,尤其是这种空间弱目标探测系统(LOT)杂散光抑制比的精确测试。因此,根据需要,提出了一种科学的、可精确测量的,且能评价光学系统对杂散光抑制能力的测试方法:点源透过率法(Point Source Transmittance)<sup>[8]</sup>,简称 PST。

PST 的定义是:光学系统视场外视角为  $\theta$  的点源目标的辐射,经光学系统后,在像面产生的辐照度  $E_i(\theta, \lambda)$  与其在光学系统入瞳处辐照度  $E_o(\theta, \lambda)$  的比值,其数学表达式为:

$$PST_i(\theta, \lambda) = \frac{E_i(\theta, \lambda)}{E_o(\theta, \lambda)} \quad (1)$$

PST 是光学系统对视场外点源目标的杂散光抑制能力的客观评价标准,不受杂散光光源强度的影响。通过公式(1)可以看出, PST 值越小,系统对杂散光的抑制能力越强,目标对比度越高。如果可精确测量系统的 PST 值,当点源目标在入瞳上辐照度已知时,可根据公式(1)计算出探测器上的杂散光辐照度水平,推算出系统目标对比度或信噪比<sup>[9]</sup>。相反,如果对系统目标对比度或信噪比有一定要求时则可推算出探测器上所能容忍的杂散光极限值,即杂散光最大辐照度容限;并根据已知点源目标在入瞳处的辐照度计算出杂散光抑制比的临界要求<sup>[10-12]</sup>。LOT 相机的杂散光抑制比指标就是根据目标信噪比的要求计算出杂散光源在偏离光学系统光轴的临界限制角为  $22^\circ$  时系统的 PST 小于  $10^{-7}$  的要求。

一般视场外点源目标进入光学系统后会产生散射、衍射现象,到达系统像面探测器上的杂散光辐射主要有七种:遮光罩和主镜的散射,主镜表面的散射,孔径光阑的衍射,遮光罩和孔径光阑衍射,视场光阑、孔径光阑和 LOT 光阑衍射,主镜和遮光罩表面散射,孔径光阑衍射和遮光罩散射。通常情况下,光学系统的 PST 是以上七种杂散光引起的综合。但当光学系统设计了 LOT 光阑时,其可对由衍射而引起的杂散光进行彻底的抑制,此时,杂散光经过系统的三次衍射衰减消除了一次和二次衍射杂散光,则到达系统像面探测器的三次衍射杂散光能量已非常微弱。因此,在月基望远镜的杂散光抑制能力设计中,采用 LOT 光阑作为

消除系统杂散光的最佳途径。

另外,在月基望远镜杂散光抑制能力的测试中,根据相机光轴与地气面夹角为  $22^\circ$  的杂散光抑制角要求,利用点源透过率原理对 LOT 相机的视场外杂散光抑制能力进行测试。

## 2.2 LOT 相机杂散光测试

在 LOT 相机 PST 测试时,利用高精度星模拟器来完成大动态范围能量的模拟,其光能动态范围为  $10^6$ ,配合 EMCCD 响应动态范围( $10^6$ )可完全满足 PST 值为  $10^{-7}$  的测试。

PST 的最高测试水平则由探测器的饱和等效光照度与星光模拟器的最大光照度相比确定。由于 EMCCD 受满阱电荷的限制,在杂散光测试中,光照 EMCCD 后产生的电荷数计算公式如下:

$$N_e = \frac{E \cdot S \cdot t}{(h \cdot \nu) \cdot \eta} \quad (2)$$

式中: $E$  为到达像面光照度; $S$  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 公司提供的 DU897 型背光 EMCCD 参考数据如下:像元尺寸为  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ ,量子效率均值取 0.9,可将 EMCCD 高增益模式取消,其典型饱和满阱电子数为 160 000 电子,其饱和 DN 值为 65 535,取曝光时间 1 s,得出对应的光照度水平为:

$$E_d = \frac{N_e \cdot (h \cdot \nu)}{\eta \cdot S \cdot t} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

在相机入瞳处照度测试时,将 EMCCD 直接对准星模拟器出口,星模拟器辐亮度水平为  $10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,其 EMCCD 的曝光时间和增益分别调至 0.1 s 和 100,此时 EMCCD 的 DN 值为 50 795。然后关闭星模拟器,采用相同的曝光时间和增益采集环境杂散光,其 DN 值为 302,如图 7 所示。根据公式(3)可等效计算出入瞳处的辐照度为  $1.93 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ 。PST 测试原理

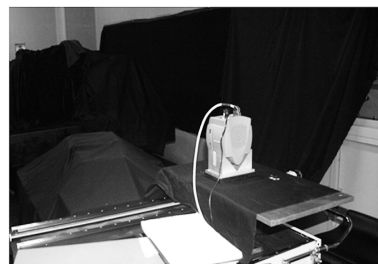


图 7 LOT 相机入瞳照度测试

Fig.7 Irradiance measurement of LOT entrance pupil

如图 8 所示。

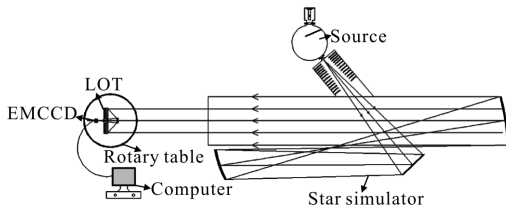


图 8 LOT 相机 PST 测试原理图

Fig.8 PST measurement principle of LOT

在不同离轴角 PST 测试时, 将 EMCCD 安装在 LOT 相机焦面处, 为了保证在不同离轴角下能精确测量其焦面照度, 使其入瞳与转台中心重合, 同时在转台上安置平移台, 可保证相机在不同离轴角下遮光罩都可被平行光管完全照亮。如图 9 所示。

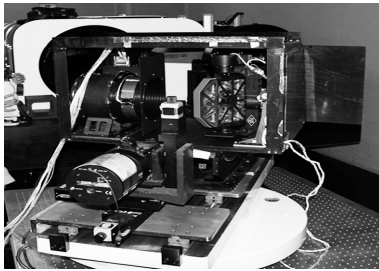


图 9 LOT 相机不同离轴角度的 PST 测试

Fig.9 PST measurement of LOT diversity angle of off-axis

被测相机在小角度( $\pm 5^\circ$ )杂散光测试时, 来自目标的一次散射杂散光较多, 此量级与其他杂散光辐射相比也是大量级的杂散光辐射。为了在小角度附近能准确测量不同量值杂散光辐照度, 根据光源及 EMCCD 大动态范围的特性适当调整星等模拟器的星等模拟范围及 EMCCD 的曝光时间和增益 (线性区域), 可有效地探测出不同离轴角对应的杂散光响应 DN 值。最后利用公式(3)可推算出不同离轴角对应的杂散光辐照水平。

### 3 LOT 相机杂散光 PST 的测试结果

#### 3.1 LOT 相机杂散光测试结果

由于被测相机的杂散光抑制角为  $22^\circ$  视场范围, 在测量 LOT 相机 PST 时角度测量范围为  $5^\circ \sim 30^\circ$ , 角度测量间隔为每  $3^\circ$  测量一个 PST 值。则利用上述测试方法最终在 EMCCD 上得到不同视场角对应的 DN 值响应, 如表 2 所示。

表 2 LOT 相机不同离轴角测量时的条件状态及 DN 值

Tab.2 Measurement condition and DN of LOT diversity angle of off-axis

Off-axis/ ( $^\circ$ )	Radiance/ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	Time of exposure/s	Gain	DN
5	74	$10^{-3}$	1	33 325
8	74	$10^{-2}$	1	41 085
11	74	0.1	1	33 317
14	140	0.1	5	27 743
17	140	0.1	50	38 720
20	140	0.1	100	21 524
22	140	1	100	40 550
25	140	1	100	22 255
28	140	1	100	13 840
30	140	1	100	7 985

为了保证上述不同角度测量的辐照度响应均在 EMCCD 的线性响应区域内, 在测量时根据不同角度对应的 DN 值, 调整光源辐亮度及 EMCCD 的曝光时间、增益来保证其响应一致性, 即上述给出的 DN 值为调整光源辐亮度、EMCCD 曝光时间、增益后的响应。

根据公式(3), 将上述测量值经过推导换算成在相同曝光时间、增益、光源辐亮度下不同离轴角对应的杂散光辐照度, 如表 3 所示。

表 3 LOT 相机不同离轴角测量的杂散光辐照度及对应 PST 值

Tab.3 Stray light irradiance and PST of LOT diversity angle of off-axis

Off-axis/ $(^\circ)$	Irradiance/ $W \cdot m^{-2}$	PST designing	PST testing
5	$1.7 \times 10^{-6}$	$5.7 \times 10^{-2}$	$9.0 \times 10^{-2}$
8	$2.1 \times 10^{-7}$	$8.2 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-2}$
11	$1.7 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^{-4}$
14	$1.5 \times 10^{-9}$	$4.8 \times 10^{-5}$	$7.8 \times 10^{-5}$
17	$2.1 \times 10^{-10}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-5}$
20	$5.8 \times 10^{-11}$	$6.0 \times 10^{-7}$	$3.0 \times 10^{-6}$
22	$1.1 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-8}$	$5.5 \times 10^{-7}$
25	$6.0 \times 10^{-12}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-7}$
28	$3.7 \times 10^{-12}$	$8.3 \times 10^{-9}$	$1.9 \times 10^{-7}$
30	$2.1 \times 10^{-12}$	$6.0 \times 10^{-9}$	$1.1 \times 10^{-7}$

根据表 3 计算出不同离轴角对应的 LOT 相机杂散光辐照度水平,利用公式(1)可计算出不同离轴角对应的 PST 值,其最终的设计值与测试值如图 10 所示,并分别给出了不同离轴角对应的 PST 设计值与测试值。

由图 10 可以看出,在离轴角 22°范围内,PST 测试值与设计值一致性较好,且在 22°离轴角 PST 值达到  $10^{-7}$ ,可验证 LOT 相机在地面测试杂散光抑制能力满足要求。

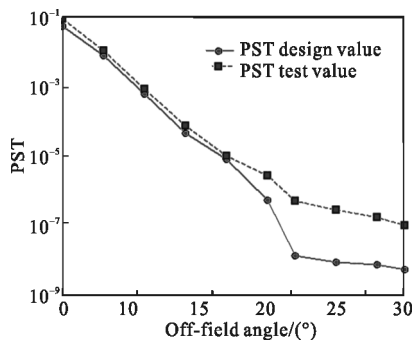


图 10 LOT 相机 PST 测试曲线图

Fig.10 Actual PST measurement graph of LOT

### 3.2 LOT 相机杂散光测试结果分析

由上述测试结果可知,虽然在视场 25°以外,LOT 相机杂散光抑制能力的测试值与实际设计值相差一到两个数量级,但在视场 25°以内,测量值与设计值一致性较好,可充分说明在这个视场范围内杂散光测试是有意义的,也完全满足该项目实际使用要求。

考虑实际测量与设计值的偏差,其主要原因有以下几个方面:

(1) 环境杂散光影响较大。虽然在测试过程中已经对房间内反光区进行遮蔽处理,但环境杂散光影响仍然很严重,尤其在离轴角 22°以后的杂散光测试,环境漫反射杂散光将是目标杂散光的 10 倍,甚至更大。环境杂散光在离轴角 22°时对目标杂散光的测试影响为 50%;

(2) 环境洁净度对杂散光的影响较大。由于该实验是在十万级洁净度实验室进行的,空气的体散射引起的杂散光对测试影响较大。在离轴角 22°时,其空气的体散射对杂散光测试影响为 30%;

(3) 探测器在大离轴角测试时对弱光响应产生的测量误差也会产生影响,探测器噪声在离轴角

22°时引起的测量误差为 10%。

将上述测量误差合成后可得出离轴角在 22°时的 PST 测量不确定度,即:

$$\sigma = \sqrt{(50\%)^2 + (30\%)^2 + (10\%)^2} = 59.2\% \quad (4)$$

在离轴角 22°时 PST 测量值要求不确定度小于一倍的杂散光系数,因此,该测量精度满足指标要求。

综上所述,从 LOT 相机实际杂散光测量结果分析可以看出,PST 在大离轴角测试时受环境及洁净度影响较大。因此,在以后的工作中将改进测试方法,将整个测试装置放置在 1 000 级甚至 100 级实验室内来消除空气的体散射对杂散光测试的影响;另外,采用斩波与数字锁相放大技术在环境光亮背景辐照中提取暗弱目标信号,该方法可大大提高环境杂散光及探测器本底噪声对 PST 测量误差的影响,可将 PST 测量范围扩展至  $10^{-12}$ ,这将在很大程度上实现精确测量遮光罩对杂散光的抑制比要求。

## 4 结论

为了在地面对月基望远镜(LOT)相机的杂散光抑制能力进行验证,在实验室内利用高精度星等模拟器及 EMCCD 大动态范围的特性,将 LOT 遮光罩的杂散光抑制比进行了测试,测试范围主要为 5°~30°相机工作区域,验证了 LOT 相机在关键角度 22°离轴角的杂散光抑制能力,在相机工作角度区域及 22°离轴角表明了其杂散光测试结果与设计结果吻合,满足使用要求。并结合理论分析,得出了 PST 测量不确定度的主要来源,提出了一种改善杂散光测量精度的测试方法,该方法能更精确地测量不同离轴角 PST 值;同时,利用锁相放大技术可将 PST 测试范围提高到 5 个数量级。

从实验结果也可以看出,LOT 相机 PST 测试与环境洁净度关系尤为密切,若提高环境中空气洁净度,则 PST 测试精度也随之提高。因此,在以后的 PST 测试工作中,在现有条件允许的情况下可将被测相机放置在高洁净度试验环境中进行测试;另外,可将被测相机设置在类似双柱罐这样的消杂散光装置中,以保证环境杂散光不会对 PST 测试精度产生较大的影响。

## 参考文献:

- [1] Li Ting. Research on optical system of the lunar-based optical telescope (LOT) [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2007: 43-65. (in Chinese)
- [2] Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping, et al. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36 (S): 136-141. (in Chinese)
- [3] Xu Liang, Zhao Jianke, Xue Xun, et al. The detectability calibration on ground of lunar-based optical telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20 (5): 68-73. (in Chinese)  
徐亮, 赵建科, 薛勋, 等. 月基望远镜探测能力的地面标定 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 68-73.
- [4] Yang Lin, Li Da, Cui Tiangang, et al. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1456-1463.  
杨林, 李达, 崔天刚, 等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除 [J]. 光学精密工程, 2011, 19 (7): 1456-1463.
- [5] Yang Lihua, Fan Xuewu, Yu Shunjing, et al. Design of a new-style vane [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31 (1): 29-33. (in Chinese)  
杨利华, 樊学武, 余舜京, 等. 一种新型挡光环的设计 [J]. 应用光学, 2010, 31(1): 29-33.
- [6] Liao Sheng, Shen Mangzuo. Point source transmittance (PST) of visible stray light of R-C optical system and its measurements [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25 (S): 17-20. (in Chinese)  
廖胜, 沈忙作. R-C 光学系统可见光杂光 PST 的研究与测试 [J]. 光电工程, 1998, 25(S): 17-20.
- [7] Kemp J C, Staude J L, Turcotte S, et al. Terrestrial "Black Hole" for measuring high-rejection off-axis response [C]// SPIE, 1999, 3122: 45-56.
- [8] Liao Sheng, Shen Mangzuo. Point source transmittance of stray light of infrared optical systems and its measurements [J]. *J Infrared Millim Waves*, 1996, 15 (5): 375-378. (in Chinese)  
廖胜, 沈忙作. 红外光学系统杂光 PST 的研究与测试 [J]. 红外与毫米波学报, 1996, 15(5): 375-378.
- [9] Frank Grochocki, John Fleming. Stray light testing of the OLI Telescope [C]//SPIE, 2010, 7794: 77940W-1-77940W-13.
- [10] Peterson G L. Stray light test station for measuring point source transmission and thermal background of visible and infrared sensors [C]//SPIE, 2008, 7069: 70690M-1-70690M-9.
- [11] John Fleming, Frank Grochocki, Tim Finch, et al. New stray light test facility and initial results [C]//SPIE, 2008, 7069: 001-005.
- [12] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)  
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316-318.