

## 10<sup>9</sup>量级高灵敏度点源透射比测试设备研究

王维 陆琳 张天一 王玮鹭 刘奕辰 孟庆宇 徐抒岩

### A 10<sup>-9</sup>-order point source transmission test facility

WANG Wei, LU Lin, ZHANG Tian-yi, WANG Wei-lu, LIU Yi-chen, MENG Qing-yu, XU Shu-yan

引用本文:

王维, 陆琳, 张天一, 王玮鹭, 刘奕辰, 孟庆宇, 徐抒岩. 10<sup>9</sup>量级高灵敏度点源透射比测试设备研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 390–396. doi: 10.37188/CO.2020-0050

WANG Wei, LU Lin, ZHANG Tian-yi, WANG Wei-lu, LIU Yi-chen, MENG Qing-yu, XU Shu-yan. A 10<sup>-9</sup>-order point source transmission test facility[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 390-396. doi: 10.37188/CO.2020-0050

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0050>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 高灵敏度空间点目标探测系统设计

Design of highly sensitive space point target detection system

中国光学. 2018, 11(1): 115 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0115>

#### 多元热流体激光检测及杂光抑制光路

Optical path of laser detection and stray light suppression for multiple thermal fluids

中国光学. 2019, 12(2): 310 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0310>

#### 大型合成孔径望远镜标准化点源敏感性分析

Normalized point source sensitivity analysis of large sparse telescopes

中国光学. 2019, 12(3): 567 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0567>

#### 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制

Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view

中国光学. 2019, 12(3): 678 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0678>

#### 超高灵敏度太赫兹超导探测技术发展

Development of ultra high sensitivity superconducting THz detectors

中国光学. 2017, 10(1): 122 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0122>

#### 单端面透射模式长周期光栅的设计和测试

Design and test of transmission mode measurement device based on long period fiber grating with a single end face

中国光学. 2017, 10(6): 783 <https://doi.org/10.3788/CO.20171006.0783>

文章编号 2095-1531(2021)02-0390-07

# $10^{-9}$ 量级高灵敏度点源透射比测试设备研究

王 维\*, 陆 琳, 张天一, 王玮鹭, 刘奕辰, 孟庆宇, 徐抒岩  
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了实现对光学系统杂散光抑制能力的定量评价, 开展了  $10^{-9}$  量级高灵敏度点源透射比测试设备的研究和实验验证。采用脉冲光源、脉冲探测的新测量方法, 在保证测试系统具有高灵敏度测量能力的同时, 简化了微弱光电信号探测组件的复杂程度, 建立了一套最大测试口径为 600 mm、测试波长为 527 nm 的点源透射比测试设备, 并利用该设备测试了一台 250 mm 口径空间光学相机的点源透射比。实验结果表明:  $60^\circ$  入射角度时的点源透射比测试结果为  $1.68 \times 10^{-9}$ 。证明该设备的测试误差在  $10^{-9}$  或更低的量级, 具备  $10^{-9}$  量级高灵敏度点源透射比测试能力。本文研究可以为天文望远镜、星传感器、空间目标监视载荷等多种类型的光学仪器提供杂光抑制性能评估。

**关键词:** 点源透射比; 杂光测试; 微弱光电信号探测

中图分类号: TH741.4; TN247 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2020-0050

## A $10^{-9}$ -order point source transmission test facility

WANG Wei\*, LU Lin, ZHANG Tian-yi, WANG Wei-lu, LIU Yi-chen, MENG Qing-yu, XU Shu-yan  
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of  
Science, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangwei123@ciomp.ac.cn

**Abstract:** In order to achieve the quantitative evaluation of the stray light attenuation in optical systems, we demonstrated a point source transmission test facility with  $10^{-9}$ -order sensitivity in this paper. We employed a pulsed source and measured the pulse to obtain the weak signal at the image plane, as well as to simplify the detection system. Using this scheme, we constructed a test facility with a maximum aperture of 600 mm and a test wavelength of 527 nm, and conducted the test with a 250 mm aperture optical system. Experimental results showed that the point transmission at a  $60^\circ$ -degree incident angle is  $1.68 \times 10^{-9}$ . The results prove that the test error of this facility is in the order of  $10^{-9}$  or below, and the test facility has the ability to test  $10^{-9}$ -order point source transmissions. This technology can provide quantitative evaluation for various optical systems with strict stray light requirements, like astronomical telescopes, star sensors and spaced target monitor payloads.

**Key words:** point source transmission; stray light test; weak signal detection

收稿日期: 2020-03-30; 修订日期: 2020-05-06

基金项目: 中国科学院青年创新促进会(No. 2019219); 国家自然科学基金(No. 61705220)

Supported by Youth Innovation Promotion Association, CAS (No. 2019219); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 61705220)

## 1 引言

随着对空间光学系统探测精度要求的提高,杂光分析与抑制技术已成为空间光学遥感成像的关键之一<sup>[1-3]</sup>。对于可见光波段的光学系统来说,杂散光主要由外部辐射经由结构件、光学元件表面的散射和衍射产生。点源透射比(Point Source Transmittance, PST)是评价光学系统视场外杂光抑制水平的重要指标,其定义为光学系统有效视场外某一视场角的平行光入射,经光学系统后,在像面产生的辐照度与其在光学系统入瞳处的辐照度的比值<sup>[4]</sup>。该指标与杂光辐射的入射角和系统的工作谱段有关,而与杂光光源的辐射强度无关,只体现光学系统对于视场外某一角度入射的杂光的抑制能力,在弱目标探测的空间光学系统中应用较为广泛<sup>[5]</sup>。

国外对光学系统杂光的分析与研究起步较早,在公开发表的文献中介绍了不少关于 PST 测试设备的研制以及成功应用于光学系统杂光测试的例子。2008年, Ball Aerospace & Technologies Corp 建立了一套新型杂散光测试设备 SLTF, 该设备首次引入镜面双柱筒结构,通过对被测设备表面的散射光线多次反射以达到测试环境杂散光抑制效果。文献中指出,在洁净度为 ISO 5 级环境下 PST 的测试能力优于  $10^{-9}$  量级<sup>[6-7]</sup>。国内对于点源透过率的研究起步较晚,2011年,哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心在实验室里搭建了一套无中心遮拦的离轴抛物面反射式杂光测量装置,该系统的光源采用高压短弧氙灯,模拟光源准直系统采用离轴抛物面镜,其对于口径为 300 mm、全视场为  $1.5^\circ$  的卡塞格林式望远系统的测量结果显示, PST 的测试能力可达到  $10^{-7}$  量级<sup>[8]</sup>。2015年,中国科学院上海技术物理研究所建立了一套 1 m 口径的三波段 PST 测试设备,其实际测试结果可达到  $10^{-7}$  量级<sup>[9]</sup>。2017年,中国科学院西安光学精密机械研究所建立了一套多波段点源透过率测试系统用于航天遥感相机的杂散光测试<sup>[10]</sup>,系统可测量口径小于 1000 mm 的光学系统,测试波段覆盖可见及红外波段,测试极限可见光为  $10^{-7}$ ,短波红外为  $10^{-6}$ ,长波红外为  $10^{-8}$ 。2018年,长春理工大学建立了一套 1 m 口径的多波段

PST 测试设备<sup>[11]</sup>,经实验验证其在可见光波段的测试极限可达到  $10^{-8}$  量级(红外波段的测试极限预计可达到  $10^{-10}$  量级,但是未报导相应实验验证结果)。

随着我国光学技术以及探测器件的发展,大部分空间光学系统都具有高分辨率、低阈值的特点,对杂光抑制水平和评价指标的要求也越来越高,迫切需要更高测试能力的 PST 实验室测试设备,以实现系统杂光抑制水平的定量评定。以我国正在建造的某空间天文望远镜为例,其杂光抑制指标是  $40^\circ$  以外的 PST 优于  $1 \times 10^{-8}$ ,这就要求 PST 测试设备的测试能力至少要达到  $10^{-9}$  量级。鉴于此,本文开展了  $10^{-9}$  量级 PST 测试技术研究,研制了一套最大测试口径为 600 mm、测试波长为 527 nm 的测试设备,并利用该设备测量了一台 250 mm 口径的空间光学相机在弧矢方向的 PST。这是国内首次报道的测量灵敏度达到  $10^{-9}$  量级的 PST 测试设备。

高灵敏度 PST 测试的主要难点在于如何准确测量像面处极其微弱的杂光信号。国内以往的高精度测试设备<sup>[9-12]</sup>均采用锁相放大技术作为提升微弱信号探测信噪比的主要手段,即通过斩波器将光源调制为固定频率的周期信号,在探测端将接收到的光电信号与同频率的参考信号进行外差处理,从而实现特定频率微弱信号的放大。本文提出了采用脉冲光源、脉冲探测的新测量方法,无需采用锁相放大等一系列复杂的信噪比提升手段,简化了微弱信号光电探测组件结构,可以为天文望远镜、星敏感器、空间目标监视载荷等多种类型的光学仪器提供杂光抑制性能评估。该项工作将对现阶段研制的光电成像系统产品定型以及未来新型光电成像系统的结构优化、性能提升等具有指导意义。

## 2 测试设备的构成及其工作原理

PST 测试需要分别测量待测系统像面处和入光口处的光信号强度。PST 测试设备的组成及工作原理如图 1 所示,主要包括测试光源、双圆柱型消光壳体、可旋转光学平台、探测器及数据采集系统等几个部分。测试设备实物图如图 2 所示。待测系统放置在可旋转的光学平台上,通过光学平台的水平旋转实现不同角度平行光入射时

的测量,最大旋转角度达 $\pm 90^\circ$ 。垂直方向受到空间以及支撑结构的限制不能实现大角度的旋转,实际测试中可通过改变待测系统放置的姿态实现不同方位的 PST 测试。转台位于封闭的双圆柱型消光壳体的内部中心位置附近,双圆柱型消光壳体可以有效抑制光线从待测系统散射、经由壳体表面再次进入待测系统内部的传递<sup>[9,13]</sup>。在测试角度接近 $\pm 90^\circ$ 时,双圆柱壳体与待测相机接近共心,杂散光抑制效果会有所下降<sup>[13]</sup>,实际使用时,最大测试角度为 $\pm 70^\circ$ 。双圆柱壳体内部通过空气净化系统实现优于 ISO 6 级的超洁净环境,以将空气、灰尘的散射抑制到  $10^{-10}$  量级,避免其对测试结果的影响<sup>[14]</sup>。

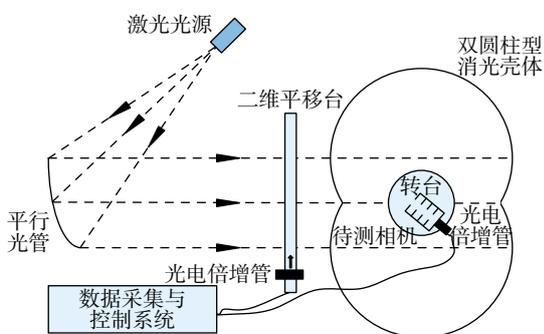


图 1 杂光测试系统组成与工作原理

Fig. 1 Composition and principal of the PST test facility



图 2 测试设备实物图

Fig. 2 Photograph of the PST test facility

测试光源为一台工作波长为 527 nm 的脉冲激光器,通过 680 mm 口径平行光管扩束为大口径平行光并入射到光学系统入光口处。利用光电倍增管的光辐射测量探头在待测系统入光口和像面处进行照度测量,测量探头安置在高精度电控二维位移台上,通过二维位移台的水平与垂直运动实现照度采集。测试过程中像面处照度和入光口处照度采用同一个光电倍增管进行分时测量,

两者比值即为测得的点源透过率。为使光电倍增管实现  $10^\circ$  范围内的线性测量,在其探头前加上不同倍率的已标定过的中性衰减片,(包括空挡、OD2~OD5、OD8),在测量过程中可根据信号的强度自动调整到合适的衰减倍率。

高灵敏度 PST 测试的主要难点在于如何准确测量像面处极其微弱的杂光信号。考虑到微弱信号检测不可避免地要引入复杂的放大、降噪等技术环节,为了降低光电探测系统的复杂度,探测系统设计时采用了其他思路,即尽可能提升像面处杂光信号的强度至可以直接探测的量级。这就意味着必须提高测试光源的功率,然而大功率激光体积庞大、损伤能力强,在实验室使用中存在着诸多风险和不便。因此,本文采用了具有低平均功率、高峰值功率特点的脉冲激光作为测试光源。以 TECH-527A 型激光器为例,其平均功率最高仅有 0.6 W,但是在重复频率为 4 kHz、脉冲宽度为 5 ns 的条件下,其峰值功率可达到 30 kW,可以实现极高的瞬时光照度。衰减  $10^9$  倍以后,仍然处于光电探测器的可探测范围之内。这样一来便可以采用光电倍增管直接探测杂光的峰值信号,而不需要采用斩波器和锁相放大提升信噪比。本设备的探测器与数据采集系统仅包含光电倍增管、运算放大器、数据采集模块以及各组件相应的电源模块。相比于采用斩波器和锁相放大器的探测系统,探测器与数据采集系统的复杂程度得到简化。

脉冲光源、脉冲探测的测量方法需要探测器及其后续电路具有较高的工作带宽,若工作带宽不足,则会造成光电信号的展宽,进而导致脉冲幅值的降低,最终使微弱信号探测的信噪比降低。但是,30 kW 的峰值功率对于  $10^{-9}$  量级 PST 测试来说是非常充裕的,即使信号因为带宽不足而损失了一定的幅值,仍然能够保证探测结果具有足够的信噪比。

### 3 光源与光电探测系统

测试设备中的光电探测器选用滨松公司的 H10425-01 型号的光电倍增管,其阳极辐射响应灵敏度在 527 nm 波长处的典型值约为  $3.2 \times 10^4$  A/W。光电阴极直径为 22 mm,暗电流最大值约为 20 nA,上升时间典型值约为 1.5 ns,可以满

足 5 ns 激光脉冲的测量需求。放大电路模块选择与之相配套的滨松公司 C5594-44 放大器单元, CV 转换因子为 3.15 mV/ $\mu$ A, 噪声系数为 5 dB, -3 dB 带宽最高可至 1.5 GHz, 可以满足 5 ns 激光脉冲的测量需求。采用 Pico 公司的 5244A 型数据采集卡作为 A/D 转换和数据采集装置, 最高采样带宽为 200 MHz。

由于整形后激光器的发散角小于等于平行光管的孔径角, 故可认为激光器能量全部进入平行光管。激光脉冲峰值功率按 300 W (考虑到入光口处信号可能过强, 未用到激光器最大输出功率) 计算, 根据平行光管口径以及光束整形扩束系统的总光学透过率, 可得到平行光管出射光束峰值功率处的照度约为  $5.95 \times 10^2$  W/m<sup>2</sup>。对应的入瞳信号电流为峰值功率照度与光电倍增管光电阴极面积、阳极辐射响应灵敏度的乘积, 为 6731.09 A。光电倍增管的饱和电流为 100  $\mu$ A, 因而, 需在光电倍增管前加装滤光片组以控制光电倍增管输出电流, 选取一款衰减倍率标定值为  $3.65 \times 10^9$  的 OD8 衰减片, 对应输出电流约为 24  $\mu$ A, 可以保证光电倍增管不出现饱和现象, 且仍具有一定的测量信噪比。

在使用光电倍增管进行像面照度探测时, 系统噪声主要来源于两部分, 一是光电倍增管自身的暗电流以及其经过放大电路产生的噪声, 二是数据采集模块的电压噪声。二者的均方和为系统总噪声。假定微弱光信号产生的电流为  $I_0 = 0.36 \mu$ A, 由于光电倍增管的最大暗电流为 20 nA, 则探测的原始信噪比约为 18。放大电路噪声指数为 5 dB, CV 转换因子为 3.15 mV/ $\mu$ A, 则经过放大后, 输出电压值约为 1.13 mV, 信噪比降为 10, 噪声电压约为 0.113 mV。数据采集模块噪声为 0.12 mV, 此时, 可以计算出探测系统的总噪声约为 6.85, 可以满足最小信噪比为 6 的要求。

通过上述分析, 可以计算出 PST 测试能力极限。若以 0.36  $\mu$ A 作为光电流探测极限, 则在入射角为  $\theta$  时的 PST 测试能力极限可表示为:

$$PST = \frac{I_0}{I_1 \cdot \cos \theta} = \frac{0.36 \mu A}{6731.09 A \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

在不同入射角度下的测试能力极限的理论计算结果见表 1。分析该结果可知, 探测与数据采集系统具备  $10^{-9}$  高灵敏度 PST 测试的能力。

表 1 PST 测试能力极限理论计算结果

Tab. 1 Theoretical analysis results of the PST detection limit

入射角度 $\theta$	PST 测试能力极限
30°	$6.2 \times 10^{-11}$
40°	$7.0 \times 10^{-11}$
50°	$8.3 \times 10^{-11}$
60°	$1.1 \times 10^{-10}$
70°	$1.6 \times 10^{-10}$

## 4 测量实验验证

### 4.1 信号测量线性度验证

在测试之前, 先标定探测器及数据采集系统的测量线性度。将探测组件固定在入光口前的一个位置, 光电倍增管前加装 OD8 衰减片, 不断增加激光器的输出功率, 即入光口的光强度, 读出此时探测器采集到的光信号强度, 测试结果如图 3 所示。可见, 探测器呈现良好的线性, 经过拟合得到的线性度优于 6.0%。

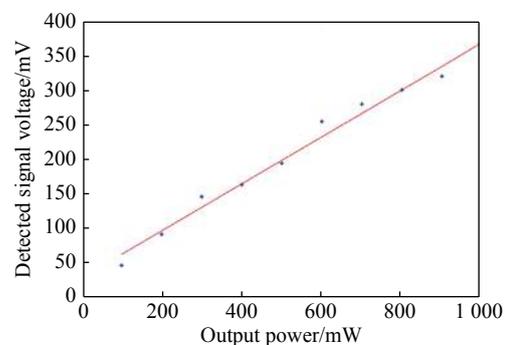


图 3 信号测量的线性度验证

Fig. 3 Linearity verification of signal detection

### 4.2 PST 测试验证

利用该设备测试了一台 250 mm 口径、3.5 m 焦距的空间光学相机在弧矢方向分别为 40°、50°、60° 时的 PST。相机的杂光抑制指标要求为 40° 以外的 PST 优于  $1 \times 10^{-8}$ 。在入光口处不同位置 (均匀选择 6 个测试点) 测量得到的电压值见表 2。测量信号平均值为 1818 mV, 入光口不同位置的信号标准差为  $std=259.57$ , 照度均匀性约为 14.28%。可以认为入光口照度是基本均匀的, 满足杂光抑制能力测试的需求。

表 2 入光口信号测量值

Tab. 2 Signal voltages at different positions of the input plane

编号	信号测量值/mV
1	1600
2	2060
3	2120
4	1450
5	1880
6	1800
平均值	1818

在像面位置处,通过二维扫描平移台测量了像面上均匀划分的不同视场位置的杂光信号,测量结果分别如表 3、表 4、表 5 所示。

表 3 距中心视场 40°像面信号测量值

Tab. 3 Detected signal voltages at the image plane at the 40° off-axis angle (mV)

	水平位置1	水平位置2	水平位置3	水平位置4	水平位置5
垂直位置1	580	620	660	660	660
垂直位置2	550	590	630	630	650
垂直位置3	530	570	590	590	620
垂直位置4	490	530	530	530	600
平均值	590.5				

表 4 距中心视场 50°像面信号测量值

Tab. 4 Detected signal voltages at the image plane at the 50° off-axis angle (mV)

	水平位置1	水平位置2	水平位置3	水平位置4	水平位置5
垂直位置1	310	330	350	380	370
垂直位置2	330	330	350	380	360
垂直位置3	310	330	350	370	360
垂直位置4	300	340	340	360	360
平均值	345.5				

探测信号随时间的变化情况如图 4 所示,可以看到,探测信号与激光器输出光能量的分布一致,均为脉冲形式,相邻探测信号的间隔约为 0.25 ms,与激光器重复频率(4 kHz)完全吻合,确认探测到的信号是激光发出信号。此时输出信号的噪声背景仍约为 15 mV,噪声形式是较为均匀

的白噪声背景,没有呈现出明显的频率特性。但各激光脉冲峰值的幅值有所差异,在测试期间监视其时间稳定性,最大变化约为±16.1%。

表 5 距中心视场 60°像面信号测量值

Tab. 5 Detected signal voltages at the image plane at the 60° off-axis angle (mV)

	水平位置1	水平位置2	水平位置3	水平位置4	水平位置5
垂直位置1	210	220	230	250	240
垂直位置2	210	210	230	240	240
垂直位置3	210	220	220	230	230
垂直位置4	190	200	210	230	220
平均值	222				

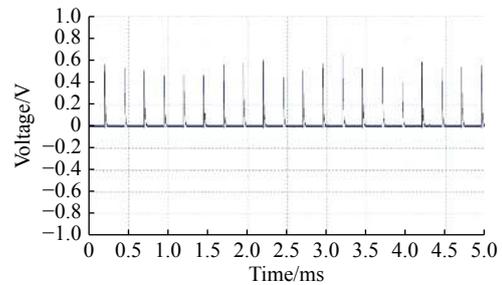


图 4 测试信号随时间的变化关系

Fig. 4 Signal voltages varying with time

由入光口信号值和像面处信号的平均值可以计算得到各入射角度下待测系统的 PST,结果见表 6。各角度测试结果均在  $10^{-9}$  量级。

表 6 待测系统不同角度下的 PST 值

Tab. 6 PSTs at different incident angles of the test subject

测试角度	PST
40°	$4.48 \times 10^{-9}$
50°	$2.62 \times 10^{-9}$
60°	$1.68 \times 10^{-9}$

### 4.3 测试结果及误差分析

PST 的测试误差主要来源于光源稳定性、探测系统线性度等随机性误差,滤光片倍率标定误差引起的系统误差,以及空气洁净度、双圆柱壳体结构表面散射引起的系统误差<sup>[15]</sup>。其中,滤光片倍率标定误差虽然在 PST 测试过程中属于系统误差,但是其来源于滤光片倍率标定时多种

系统误差和随机误差,也应作为随机误差来考虑。可通过对独立的随机误差进行均方相加的方式得到总误差,激光光源的稳定性误差约为 16.1%,探测器线性度误差约为 6.0%,滤光片倍率标定不确定度最大值约为 13.6%(由同一滤光片在多个设备、多次测量的结果计算得出),总误差约为 21.9%,其对测量结果准确性的影响在可接受范围之内。

系统误差的影响则需要通过分析测试过程中的杂光传递路径得出。待测相机自身的杂光传递路径一般为光源—遮光罩—镜面—像面,这部分杂光是真正的测量对象;双圆柱壳体表面散射也会在待测相机像面产生杂光,传递路径一般为光源—遮光罩—双圆柱型壳体—镜面—像面,这部分杂光是系统误差之一;测试设备中空气、灰尘经光源照射后产生的散射光直接成为成像视场光线照射至像面后,也会出现杂光,在非真空条件下这部分杂光不可消除,也是测试系统误差之一。

从路径上看,两种系统误差的传递路径与待测杂光的传递路径是具有强耦合性的,仅以这一套测试设备无法区分像面上的杂光是来自于 3 种路径中的哪一种。因此,无法得出系统误差与测量真值的相对比较值。但是可以确定的是,两种误差因素以及相机自身杂散光的 PST 总和为

$1.68 \times 10^{-9}$ , 3 条杂光传递路径中的任意一种引起的 PST 均不超过总值。这就可以证明待测相机满足其自身的杂光抑制设计指标要求,同时也可以证明,本测试设备的 PST 测试误差绝对值在  $10^{-9}$  或更低的量级。

## 5 结 论

本文研制了一套可见光波段高灵敏度的 PST 测试设备。该设备的最大测试口径为 600 mm,测试波长为 527 nm,测试灵敏度达到  $10^{-9}$  量级。该设备采用了脉冲光源、脉冲探测的新测量方法,简化了微弱信号光电探测组件结构。利用该设备测试了一台 250 mm 口径空间光学相机的 PST,测得的最小 PST 值出现在  $60^\circ$  入射时,此时 PST 测试结果为  $1.68 \times 10^{-9}$ 。证明该设备的测试误差在  $10^{-9}$  或更低的量级。这是国内首次报道的测量灵敏度达到  $10^{-9}$  量级的 PST 测试设备。该设备可以为天文望远镜、星敏感器、空间目标监视载荷等多种类型的光学仪器提供杂光抑制性能的评估,将对现阶段研制的光电成像系统产品定型以及未来新型光电成像系统的结构优化、性能提升等具有重要指导意义,有利于推动我国空间光学载荷向更高探测深度发展。

## 参考文献:

- [1] 黄强. 空间光学系统的杂散光分析[J]. 红外, 2006, 27(1): 26-33.  
HUANG Q. Analysis of stray light in space optical system[J]. *Infrared*, 2006, 27(1): 26-33. (in Chinese)
- [2] 田铁印, 王红, 吴国栋. 杂光对三线阵相机光学系统成像的影响[J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 847-851.  
TIAN T Y, WANG H, WU G D. Impact of stray light on image of three line array camera[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 847-851. (in Chinese)
- [3] 杨会玲, 吴玉宏, 孙慧婷, 等. 基于杂波抑制的海平线红外弱小目标检测[J]. 液晶与显示, 2017, 32(4): 316-324.  
YANG H L, WU Y H, SUN H T, et al.. Small dim infrared target detection of horizon region based on clutter rejection[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(4): 316-324. (in Chinese)
- [4] 钟兴, 贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 621-625.  
ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 621-625. (in Chinese)
- [5] 陆强. 地球同步轨道空间相机杂散光分析与应用技术的研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2016.  
LU Q. Study on stray light analysis and application technology of the earth synchronous orbit space camera[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [6] FLEMING J, GROCHOCKI F, FINCH T, et al.. New stray light test facility and initial results[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7069: 70690O.
- [7] GROCHOCKI F, FLEMING J, KAMPE T. Stray light test results of Operational Landsat Imager 2 (OLI-2) compared to OLI[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10750: 107500E.
- [8] 王治乐, 龚仲强, 张伟, 等. 基于点源透过率的空间光学系统杂光测量[J]. 光学技术, 2011, 37(4): 401-405.

- WANG ZH L, GONG ZH Q, ZHANG W, *et al.*. Measurement of stray light based on point-source transmittance in space optical system[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(4): 401-405. (in Chinese)
- [9] 曾瑾, 王战虎, 李欣耀, 等. 基于双柱罐结构的三波段杂散光PST测试装置[J]. *红外*, 2017, 38(4): 12-16, 22.  
ZENG J, WANG ZH H, LI X Y, *et al.*. Three-band stray-light test facility for point source transmission based on double cylindrical chamber[J]. *Infrared*, 2017, 38(4): 12-16, 22. (in Chinese)
- [10] 陈钦芳, 马臻, 王虎, 等. 高精度点源透过率杂光测试系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(12): 39-44.  
CHEN Q F, MA ZH, WANG H, *et al.*. High-precision test station for stray light based on point source transmission[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 39-44. (in Chinese)
- [11] 吴琪, 徐熙平, 徐亮, 等. 基于PST的杂散光测试系统研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(3): 16-21.  
WU Q, XU X P, XU L, *et al.*. Research on stray light measurement system based on PST[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 41(3): 16-21. (in Chinese)
- [12] 徐亮, 高立民, 赵建科, 等. 基于点源透过率测试系统的杂散光标定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1607-1614.  
XU L, GAO L M, ZHAO J K, *et al.*. Calibration of stray light based on point source transmittance measurement system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1607-1614. (in Chinese)
- [13] 孙永建, 孙晓明, 刘云起, 等. 基于线性扩散板的高光抑制方法研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(6): 897-901.  
SUN Y J, SUN X M, LIU Y Q, *et al.*. Specular highlight suppression method based on linear diffuser[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(6): 897-901. (in Chinese)
- [14] 曹智睿, 付跃刚, 田浩. 空气洁净度对点源透射比测试准确度的影响[J]. *光子学报*, 2016, 45(1): 0112002.  
CAO ZH R, FU Y G, TIAN H. The impact for the air cleanliness to the precision of PST test[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(1): 0112002. (in Chinese)
- [15] 李朝辉, 赵建科, 徐亮, 等. 点源透过率测试系统精度标定与分析[J]. *物理学报*, 2016, 65(11): 114206.  
LI ZH H, ZHAO J K, XU L, *et al.*. Analysis and calibration of precision for point source transmittance system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 114206. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 维(1990—), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 副研究员, 2019年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事空间光学载荷总体设计、光学系统杂光抑制技术研究。E-mail: wangwei123@ciomp.ac.cn



陆 琳(1989—), 女, 江苏常州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事光学系统杂光抑制技术研究。E-mail: Lu\_lin\_ciomp@163.com



张天一(1989—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要从事光学系统装调与光学检测方面的研究工作。E-mail: tyzhang@niaot.ac.cn



王玮鹭(1993—), 女, 吉林松原人, 硕士, 研究实习员, 主要从事空间光学系统结构设计研究。E-mail: wangweilu@ciomp.ac.cn



刘奕辰(1996—), 男, 吉林白山人, 学士, 研究实习员, 主要从事空间光学载荷的装调检测技术、光学系统杂光抑制技术研究。E-mail: liuyc@ciomp.ac.cn



孟庆宇(1986—), 男, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 主要从事光学系统设计理论与方法, 光学仪器设计与研制方面的研究。E-mail: mengqy@ciomp.ac.cn



徐抒岩(1963—), 男, 辽宁岫岩人, 硕士, 研究员、博士生导师, 主要从事空间大口径光学望远镜、光学系统空间在轨组装技术的研究。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn