

文章编号: 1672-8785(2016)05-0001-06

户外直接测试太阳杂散光对相机影响的一种新方法

陆 强^{1,2} 于清华^{1,2} 孙小进^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 介绍了一种在户外直接测试太阳杂散光对相机影响的新方法。采用该方法时测试的点源透过率量级可达 10^{-5} , 而且其造价远低于实验室的点源透过率测试设备, 适用于大口径光学系统的杂散光测试。该杂散光测试设备包括顶部可开口的厂房、百叶窗、可调角度工装、挡板、机械手臂及待测相机。把待测相机放置在角度可调的工装上, 在遮光罩口上安装百叶窗。测试时, 太阳光直射进入相机, 通过相机探测器的响应值直接评价太阳杂散光对相机的影响水平及分布。

关键词: 太阳杂散光; 户外; 百叶窗; 点源透过率

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.05.001

A New Method for Outdoor Direct Measurement of Effect of Sun Stray Light on Camera

LU Qiang^{1,2}, YU Qing-hua^{1,2}, SUN Xiao-jin^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A new method for outdoor direct measurement of the effect of sun stray light on a camera is presented. When the method is used, the lowest threshold of Point Source Transmittance (PST) can be up to 10^{-5} which is suitable for the stray light test of large aperture optical systems. The cost of the test equipment is far lower than that of a professional laboratory PST test equipment. The stray light test equipment includes a top opening plant, shutters, adjustable angle tooling, a baffle, a mechanical arm and a camera to be tested. The camera to be tested is placed on the adjustable angle tooling and the shutters are placed on the camera hood. During the test, the sun is shining directly into the camera. According to the response of the detector in the camera, the effect level and distribution of sun stray light on the camera can be evaluated.

Key words: sun stray light; outdoor; shutter; point source transmittance (PST)

0 引言

航天相机的成像质量会受扩散于像面上的

其它非成像光能量即杂散辐射的影响。这种非成像光能量会降低像面的信噪比, 使传递函数下降, 影响整个系统的探测能力^[1-4]。为保证合

收稿日期: 2016-03-23

作者简介: 陆强 (1985-), 男, 江苏淮阴人, 硕士, 助理研究员, 主要从事光学设计、光学装校及光学测试研究。

E-mail: luqiangac@126.com

理的光学系统设计, 获得预定的像质, 必须正确预计杂散光的数量级。点源透过率 (Point Source Transmittance, PST) 是评价光学系统消杂光能力的主要指标。其通常的定义是, 由离轴角为 θ 的点源引起的探测器辐照度 $Ed(\theta)$ 和在垂直于该点源的输入孔径上的辐照度 Ei 之比:

$$PST(\theta) = Ed(\theta)/Ei \quad (1)$$

对不同的离轴角进行计算, 给出 PST 曲线, 便可得到系统的杂光量级。

高精度的 PST 测量系统对环境的洁净度和空间大小的要求都很高。到目前为止, 仅有美国、法国等少数国家拥有高精度、低阈值的杂散光测量系统。美国犹他州大学的空间动力学实验室在上世纪 70 年代建立了 PST 测试装置^[5], 首次使用了双半圆柱罐。罐内洁净度为 ISO5 级, 波段覆盖紫外、可见、近红外和 $10.6 \mu\text{m}$, PST 测试精度达到 E-12。2008 年, 美国鲍尔航空航天技术公司建立了一套 PST 的测试装置^[6], 同样使用了双半圆柱罐, 设备的可测口径为 240 mm, PST 的测试精度优于 E9。2008 年, 美国 Breault Research Organization 公司建立了一套 PST 测试装置^[7], 同时还建立了红外热背景测试装置, 设备的可测口径为 300 mm, 可见光 PST 的测试精度优于 E-5, 红外 PST 的测试精度优于 2E-6。

国内的 PST 测试设备发展较滞后, 仅成都光电所曾做过一套 PST 测量系统^[8,9], 针对口径为 180 mm 的全反射 RC 红外系统, 在可见光和 $10.6 \mu\text{m}$ 波长处测试了 PST, 测试精度为 E-6。

在实验室测量大口径光学系统 (口径大于 400 mm) 的杂散光需要专业的 PST 测试设备, 平行光管的口径需大于 1 m, 试验技术复杂, 设备造价高。因此, 在保证测试精度的条件下, 寻找一种技术简便、成本低廉、适用于大口径光学系统的杂散光测试方案具有一定的现实意义。

1 试验原理

在户外, 借助太阳直接测试一天内由太阳以不同入射角入射的杂散光引起的探测器响应

值 (U 或 I), 再通过换算, 得到相机在轨受太阳杂散光影响的程度。

将相机固定在角度可调的工装上, 相机朝向正南北方向。根据太阳的高度角和方位角, 通过可调工装的角度, 得到太阳光与相机主光轴的夹角 θ_{1i} 。在正午前后观测, 可得到不同的太阳南北和东西离轴角, 记录下相机光轴与太阳光的夹角 (θ_1, θ_2) 。若用相机直接观测天空并与太阳成一定夹角, 用挡板挡住太阳光, 相机观测到的背景是天空及云层。云层的反射光易使相机饱和, 而且云层的移动对相机背景的影响较大。把挡板移走后, 太阳杂散光通过遮光罩侧壁散射进入相机, 由于天空背景较大且在变化, 因此无法从天空背景中分离出较弱的杂散光信号, 直接观测天空无法准确测试出太阳杂散光。

为测试出较弱的太阳杂散光信号, 本文提出在相机遮光罩上开口并安装百叶窗的方法, 以使相机目标视场观测不到天空。该百叶窗的轴向沿正南北方向, 由于相机光轴和太阳光存在夹角, 每次测试时需调节遮光罩口的百叶窗叶片, 使之与太阳光平行, 使太阳光顺着百叶窗叶片方向进入遮光罩。由于百叶窗叶片的阻挡, 相机观测到的背景从天空变为天空在百叶窗叶片上的散射以及百叶窗的自身辐射 (自身辐射只在红外波段存在)。该背景远小于天空背景, 有利于测试较弱的太阳杂散光。

测试布局如图 1 所示。首先将百叶窗叶片角度调到与太阳光线平行, 调节时可在百叶窗下放置白板。当观察到白板上的阴影最小时, 取出白板。将挡板置于相机遮光罩开口斜上方一定高度处, 使太阳光无法到达遮光罩的侧壁。相机探测器测得背景信号, 得到响应值 $U_{i0}(\theta_1, \theta_2)$ 或 $I_{i0}(\theta_1, \theta_2)$ 。再将挡板移开, 测试得到探测器响应值 $U_i(\theta_1, \theta_2)$ 或 $I_i(\theta_1, \theta_2)$ 。对探测器响应值进行处理, 得到地面相机探测器对太阳杂散光的响应值, 即 $U_i(\theta_1, \theta_2) - U_{i0}(\theta_1, \theta_2)$ 或 $I_i(\theta_1, \theta_2) - I_{i0}(\theta_1, \theta_2)$ 。将地面测试得到的太阳位于不同离轴角下杂散光影响的响应值除以相机入口的太阳辐射的照度, 得到太阳杂散光的 PST 曲线。将该曲线和仿真 PST 曲线进行比较, 便可验证太阳杂散光对相机的影响。

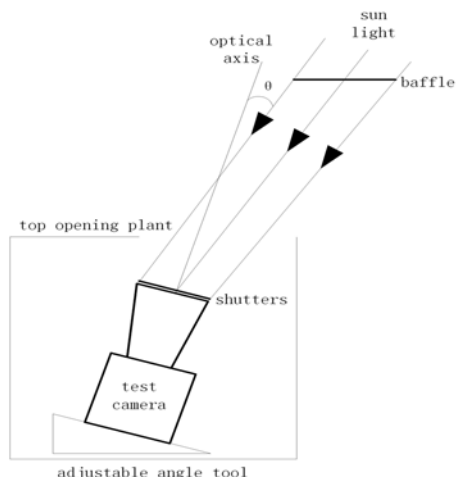


图 1 测试布局图

2 试验设备

参试的主要地面设备包括顶部可开口的厂房、角度可调工装、百叶窗和挡板。

2.1 厂房

为了保证产品安全和测试环境符合要求,在测试场地搭建厂房,厂房天窗在测试过程中为打开状态,非测试时处于关闭状态。

给厂房配备空调和抽湿机,以保证一定的温度、湿度和洁净度。在厂房顶部不打开的情况下,保持温度为 $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 8\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度为 35%~70%。

2.2 角度可调工装

角度可调工装为待测相机提供力学支撑,且能根据不同季节的太阳高度角实现 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 连续可调。

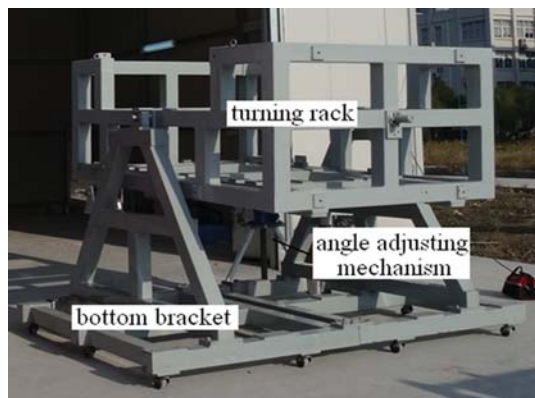


图 2 角度可调工装

2.3 百叶窗

百叶窗包括叶片、支撑和白板三个组成部分,在试验过程中起到将太阳光从环境背景中过滤的作用。百叶窗叶片下放置白板,用于判断百叶窗叶片的角度调节。当叶片在白板上阴影最小时,视为角度调节到位,可取走白板。百叶窗的示意图如图 3 所示。

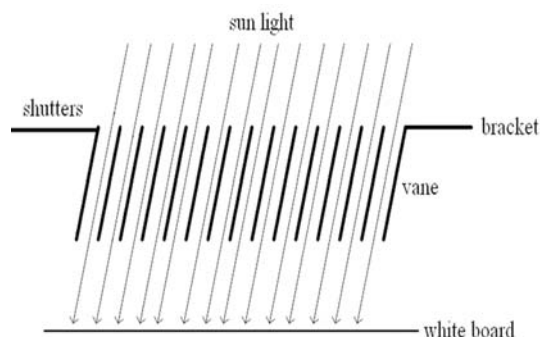


图 3 百叶窗的工作示意图

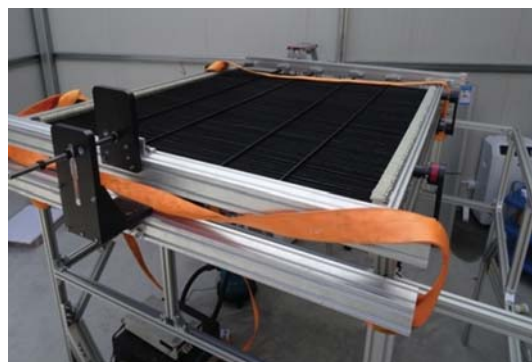


图 4 百叶窗

百叶窗相邻叶片中心的间距与叶片长度的比例小于 1:10,叶片展开时角度可控。在百叶窗底部开槽,放入白板,可观察叶片是否和太阳光线平行。叶片和竖直方向的夹角为 $5^{\circ} \sim 45^{\circ}$,叶片的调节精度优于 0.1° ,在任意位置处都可以锁定,百叶窗的尺寸完全覆盖待测相机的遮光罩外沿。

百叶窗叶片的材质为塑料,两面涂黑漆。

2.4 挡板

挡板位于相机遮光罩口的斜上方,完全遮挡住遮光罩开口,用于测试时减少背景影响。

挡板材质选用轻便材料,外框为铝框,挡板表面蒙有黑布。



图 5 挡板

3 数据处理及结果

实际试验中,进行了加百叶窗和不加百叶窗两种状态下可见通道和红外通道的杂散光测试,绘出了不同时刻不加挡板和加挡板时探测器的相对能量和时刻的曲线。不加挡板和加挡板时的探测器的相对能量差即是太阳杂散光在探测器上的相对能量。

利用太阳高度角 hs 的计算公式

$$\sin hs = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (2)$$

和太阳方位角 αs 的计算公式

$$\cos \alpha s = \frac{\sin hs \sin \varphi - \sin \delta}{\cos hs \cos \varphi} \quad (3)$$

计算出与观测位置和观测日期对应的太阳高度角和方位角。式中, δ 为太阳赤纬,表示太阳光线与地球赤道面的夹角,它一年四季每天都在变动,冬至日的 $\delta = -23^\circ 27'$,春分日和秋分日的 $\delta = 0^\circ$,夏至日的 $\delta = 23^\circ 27'$ 。 φ 为测点纬度,如上海的 $\varphi = 31^\circ 10'$ 。 ω 为太阳时角,当地正午时为 0° ,上午时为负,每小时变化 -15° ,下午时为正,每小时变化 $+15^\circ$, ω 在赤道面上每小时的变化为 15° , ω 所表示的是真太阳时,与时钟不同。

通过计算得到不同时刻的太阳高度角和方位角以及实测的相机俯仰角和方位角。将不同时刻的太阳高度角和方位角减去相机的俯仰角和方位角,得到各个时刻太阳相对相机的夹角。利用 tracepro 计算出各个通道的 PST,绘出 PST

曲线。将试验结果和仿真曲线进行比较,进行相互验证。

试验过程中,采用太阳辐照计对到达地面的可见光进行监测。为了减小环境光对测试的影响,在辐照计开口处放置遮光罩。监测结果如图 6 所示。

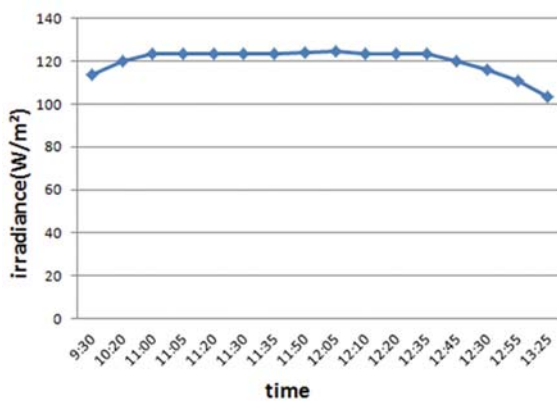


图 6 到达地面的可见波段辐照度

根据太阳光谱中短波光和可见光的能量比例,计算得到太阳光照射地面的短波能量,如图 7 所示。

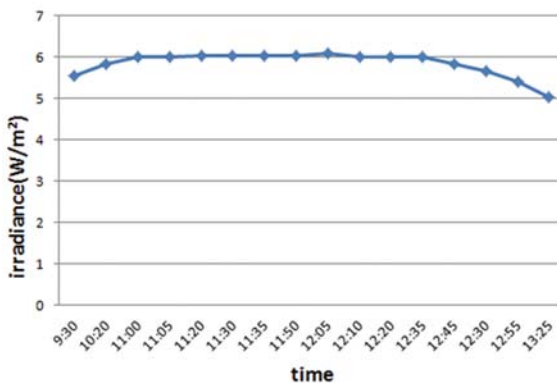


图 7 到达地面的短波辐照度

3.1 无百叶窗情况下的可见光通道 PST 测试

相机遮光罩开口处未装百叶窗时,对可见通道进行 PST 测试。将挡板移走后的照度减去有挡板时的照度,得到去背景下太阳杂散光在可见光探测器上产生的照度。再利用 PST 的定义公式,将该照度除以遮光罩入口处太阳在可见光波段的照度,得到相机可见光通道的实测 PST。

由于天空背景和云层的散射光可以直接进入相机遮光罩, 会在探测器上产生较强的背景。因此在有挡板和移走挡板两种状态下, 探测器上均有较强且在变化的强度响应。图 8 为无百叶窗时可见光通道在未加挡板和加挡板时的照度。图 9 为无百叶窗时可见通道的实测 PST 曲线。可以看出, 由于天空背景环境对测试的影响, PST 最低可测到 $1\text{E}-4$ 量级。

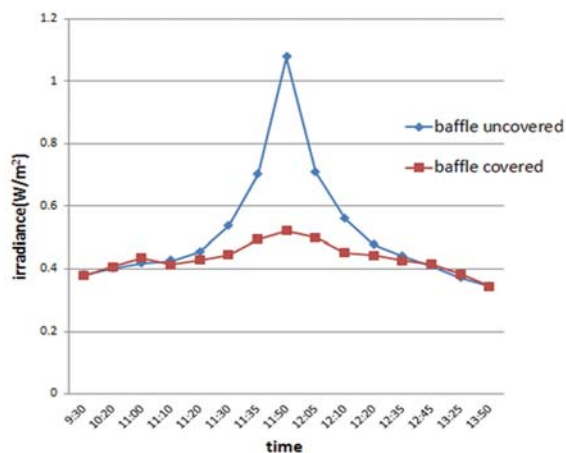


图 8 可见通道在未加挡板和加挡板时的照度 (无百叶窗)

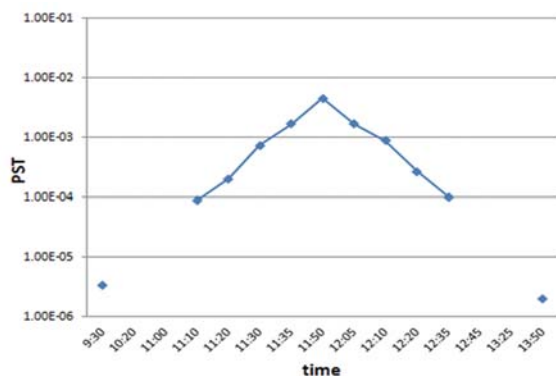


图 9 实测的可见通道 PST(无百叶窗)

3.2 有百叶窗时的可见光和短波通道 PST 测试

在相机遮光罩开口处安装百叶窗, 对可见光和短波通道进行 PST 测试。

由于安装了百叶窗, 可从天空背景中过滤掉太阳光。太阳光可以顺着百叶窗叶片进入相机遮光罩, 而相机视场无法看到天空背景。相机观测到的背景从天空转换为天空在百叶窗叶片

上的散射以及百叶窗的自身辐射 (自身辐射只在红外波段存在)。该背景和天空背景相比, 量级小并且稳定, 有利于测试较大离轴角下的太阳杂散光。

图 10 和图 11 为安装了百叶窗时可见光和短波通道挡板移走和未移走情况下探测器上的照度值。图 12 为相机在可见光和短波通道的实测 PST 曲线。

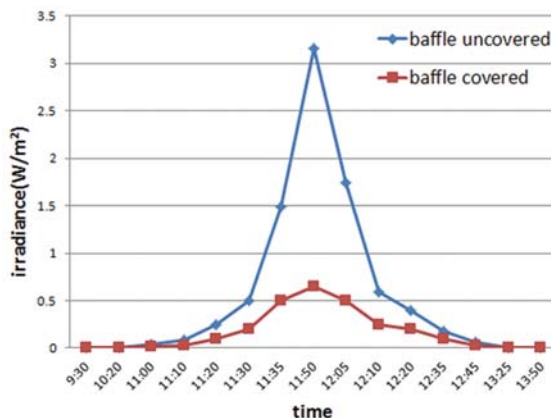


图 10 可见通道在未加挡板和加挡板时的照度 (有百叶窗)

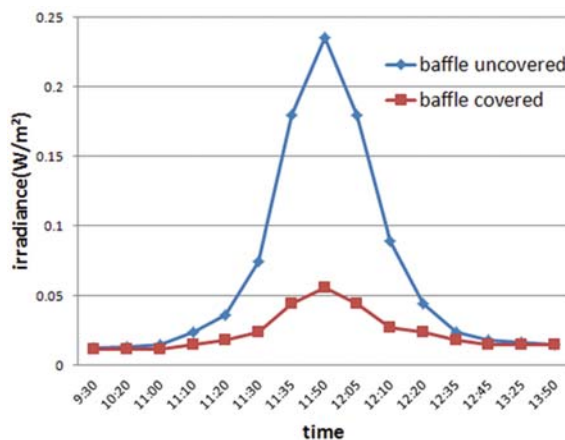


图 11 短波通道在未加挡板和加挡板时的照度 (有百叶窗)

用 tracepro 软件对相机模型进行杂散光仿真, 得到的 PST 如图 13 所示。

通过计算和对比分析, 未装百叶窗时, 由于较强的天空环境影响, 可见通道测试的 PST 量级只达 $1\text{E}-4$ 。安装百叶窗后, 由于过滤了天空环境的影响, 可见通道测试的 PST 提高了一个量级, 达到 $1\text{E}-5$ 。因此, 安装百叶窗有利于测试大离轴角的太阳杂散光。

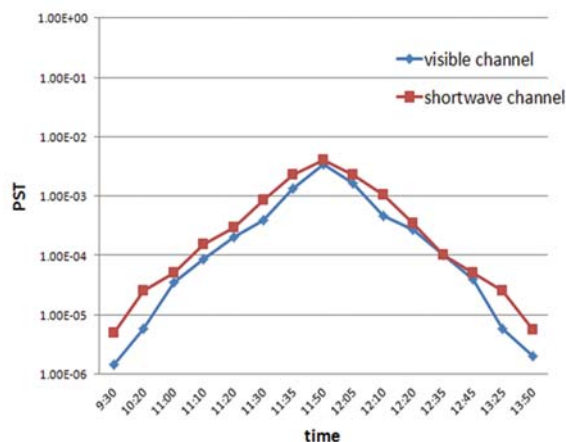


图 12 实测的可见光和短波通道 PST(有百叶窗)

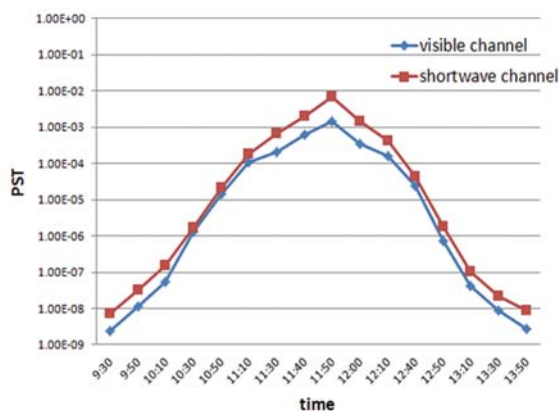


图 13 软件仿真得到的可见和短波通道 PST

安装百叶窗时,可见光及红外通道实测 PST 与仿真 PST 相比,响应峰值的时刻一致,在 11:50 左右(上海地区),PST 峰值前后 50 min 下降的量级和软件仿真一致,对应的方位角为 $\pm 12.5^\circ$,测试的 PST 量级可达 $1E-5$ 。PST 仿真曲线在 $1E-5$ 量级以上部分和试验数据吻合。

4 试验的不准确度

外场测试会受到多种因素的影响,其测试不准确性的主要影响因素有:

(1) 大气环境

户外测试场地应空旷,最好在制高点,周围无高大建筑物,无树木遮挡,以防止散射对测试结果的影响。环境的洁净度要高,以防止空气灰尘被照亮引起散射形成杂光。测试时天空应晴朗无云,以防止云层散射。安装百叶窗后,大气环境对测试精度的影响大大降低,引起的测试不准确度约为 10%。

(2) 电子学噪声

试验过程中,采取多次采样求平均的办法可以降低电子学采集噪声,由此产生的不确定度约为 5%。

(3) 百叶窗叶片与太阳光的平行度

试验时每个测试点均需调节百叶窗叶片。观察白板上的太阳阴影,当阴影最小时认为叶片和太阳光已平行。但实际操作时,人眼判断存在误差,其影响的不确定度约为 10%。

综合考虑,户外测试太阳杂散光的不准确度约为 30%。

5 结论

设计了户外直接测试太阳杂散光的试验方法。考虑到外场测试环境的影响,在遮光罩开口处安装了百叶窗, PST 测试精度在 $1E-5$ 量级,不确定度约为 30%。与传统的实验室专业 PST 测试相比,本方法技术简便、成本低廉,适用于大口径光学系统的杂散光测试。

参考文献

- [1] 徐亮,赵建科,薛勋,等.月基望远镜杂散光 PST 研究与测试[J].*红外与激光工程*,2014,4(43):1289-1295
- [2] 李婷,马小龙,李福,等.卡塞格伦光学天线杂散光分析与测试[J].*光子学报*,2015,8(44):0806002-1-5
- [3] 李岩,刘剑峰.红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J].*光学学报*,2013,33(9):1928002-1-5
- [4] 朱杨,张新,伍雁雄,等.离轴反射式空间天文望远镜系统设计及其杂散光抑制研究[J].*光学学报*,2014,34(8):0822002-1-7
- [5] John C K, John L S, Stephen T, et al. Terrestrial "Black Hole" for Measuring High-rejection Off-axis Response[J].*SPIE*,1997,3122,0277-786X:45-56.
- [6] Fleming J, Grochowski F, Finch T, et al. New Stray Light Test Facility and Initial Results.[J].*SPIE*,2008,7069:1-6.
- [7] Gary L P. Stray Light Test Station for Measuring Point Source Transmission and Thermal Background of Visible and Infrared Sensors [J].*SPIE*,2008,7069:70690M-1.
- [8] 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] 廖胜,沈忙作. RC 光学系统可见光杂光 PST 的研究与测试[J].*光电工程*,1998,12(25):17-20.