

doi:10.3788/gzxb20174611.1122002

# 超分辨卫星载荷光学系统杂散光抑制

裴琳琳<sup>1</sup>, 相里斌<sup>1,2</sup>, 吕群波<sup>2</sup>, 邵晓鹏<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学, 西安 710071)

(2 中国科学院光电研究院, 北京 100094)

**摘要:** 为了进一步提高超分辨卫星载荷光学系统的空间分辨能力, 需对系统杂散光进行抑制, 以得到准确的原始图像. 通过光线追迹方式, 分析了系统杂散光, 确认了杂散光的来源. 通过 Tracepro 定量化分析和结构有限元分析, 在限制范围内, 不断优化、改进遮光罩尺寸及挡光环位置, 得到光学系统视场外点源透射比均在  $10^{-3}$  以下, 验证了该杂散光抑制方案的有效性, 为卡塞格林光学系统的工程应用提供参考.

**关键词:** 光学设计; 超分辨; 卡塞格林光学系统; 杂散光; 点源透射比; 遮光罩

中图分类号: O439; O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1122002-6

## Research on the Stray Light Suppression for Super-resolution Optical System

PEI Lin-lin<sup>1</sup>, XIANG-LI Bin<sup>1,2</sup>, LÜ Qun-bo<sup>2</sup>, SHAO Xiao-peng<sup>1</sup>

(1 Xidian University, Xian 710071, China)

(2 Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In order to further improve the spatial resolution of the super-resolution satellite load optical system, it is necessary to suppress the stray light of the system to obtain accurate original images. By ray tracing, the stray light is analyzed, and the source of stray light is confirmed. Through the quantitative analysis and structural finite element analysis by Traccpro, the size of the hood and the position of the block were optimized, the point sources transmittance of the external point of the optical system is  $10^{-3}$ . The stray light suppression scheme is effective. The stray light suppression measures proposed in this paper provide theoretical support for the engineering application of Cassegrain optical system.

**Key words:** Optical system design; Super-resolution; Cassegrain optical system; Stray light; Point Sources Transmittance

**OCIS Codes:** 220.0220; 230.0230; 280.0280

## 0 引言

近年来, 高分辨率遥感卫星出现了技术快速变革的发展趋势<sup>[1]</sup>. 2013 年 11 月美国 Skybox Imaging 公司发射一颗小卫星 (SkySat-1), 单星成本为 5 千万美元, 质量在 100 kg 左右, 尺寸为 60 cm × 60 cm × 90 cm. Skysat-1 的 1.1 m 分辨率全色图像<sup>[2-3]</sup>, 经星上预处理和地面超分辨处理, 可实现 0.9 m 分辨率<sup>[4]</sup>.

实现高分辨率成像有两种方法: 一是采用传统光学成像方法, 不断提高焦距和口径<sup>[5]</sup>; 二是采用数字超分辨率成像方法, 进一步提升分辨率<sup>[6]</sup>, 第二种方法是未来高分辨率成像的主流. 目前, 将数字超分辨率成像技术应用于星载平台的典型系统主要有 SPOT 卫星和 SkySat 卫星. SPOT 卫星主要采用亚像元采样方式,

基金项目: 国家自然科学基金 (No.61505220) 和中国科学院国防创新项目基金 (No.CXJJ-15S156) 资助

第一作者 (通讯作者): 裴琳琳 (1987—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为计算成像光谱技术. Email: pll@aoe.ac.cn

导师: 相里斌 (1967—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为干涉成像光谱技术. Email: xiangli@aoe.ac.cn

收稿日期: 2017-04-26; 录用日期: 2017-06-27

<http://www.photon.ac.cn>

而 SkySat 卫星主要采用光学-数字处理联合设计技术以及亚像元偏移多帧曝光采样方式<sup>[7]</sup>.控制好杂散光,获得良好的原始数据是系统能够实现超分辨成像的前提.

杂散光是指光学系统中成像光线外扩散于探测器表面上的光线,以及经非正常光路到达探测器的光线.主要来源有:光学系统外部的辐射源(如太阳光、地球表面的散射光及大气漫射光等)进入系统,经系统内部构件的多次反射、折射或衍射到达探测器,称为外部杂散辐射或外杂光;光线经非光路表面散射或经光路表面的非正常传递而进入探测器,称为散射光<sup>[8]</sup>,对可见光系统,外杂光起主要作用.

杂散光的危害性在于降低了像面的对比度和调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF),使整个像面层次减少,清晰度变坏,甚至形成杂光斑点,严重时信号完全被杂散辐射噪声所淹没<sup>[9]</sup>.所以正确预计光学系统的杂散光水平是实现合理光学设计、保证成像能力的重要前提.

严格的杂散光分析研究始于 1970 年前后,随着航天技术的发展,杂散光的分析和抑制被提高到重要的地位.最早 NASA 委托 Arizona 大学的 Breault 和 Harvey 等成立杂散光研究机构,开始研究杂散光分析算法以及模型基本测量<sup>[10]</sup>,研究中心开发了 APART 分析软件.随着计算机的发展,出现了大型、实用性能强、精确度高的杂散光分析软件<sup>[11]</sup>,如美国军方资助霍尼韦尔(Honeywell)公司开发了 GUERA 分析软件<sup>[12]</sup>.2010 年美国 Ball Aerospace & Technologies Corp.为 NASA 的 Operational Land Imager Telescope 进行杂散光分析,提出了点源遮拦比的概念,并给出了相应的测试方案<sup>[13]</sup>.

国内对杂散光抑制的研究起步较晚,20 世纪 90 年代,浙江大学林中等人提出了针对激光喇曼分光计中杂散光的分析方法,研究了影响杂散光能量的因素,并获取了相对照度<sup>[14]</sup>;中科院长春光机所的张国玉、曹维国等人对计算方法进行了研究,研究了近轴近似法、随机统计法、能流密度法、光线追迹法在杂散光分析时的特点<sup>[15]</sup>.近年来,上海技物所对风云二号辐射计进行研究,通过计算系统的点源透过率对系统进行改进<sup>[16-17]</sup>;国防科技大学对典型双镜大反射结构进行仿真和实验,对杂散光的来源和影响有了量化的分析<sup>[18-19]</sup>.

超分辨卫星载荷光学系统要求在保证光学系统基本不变的前提下,进一步提高光学系统的空间分辨能力.为实现超分辨技术,必须做好杂散光的抑制,以得到准确的原始图像.在有限空间尺寸,研究常规杂散光抑制的手段是涂消光漆,均布挡光环,本文基于光纤追迹的方法,对超分辨率卫星载荷光学系统进行分析研究,在限制范围内,不断优化、改进遮光罩尺寸及挡光环位置,实现杂散光的有效抑制.

## 1 杂散光评价

点源透射比(Point Sources Transmittance, PST)是目前普遍采用的一种评价光学系统消除杂散光能力的指标<sup>[20]</sup>.定义为:光学系统视场外离轴角度为  $\theta$  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  $E_i(\theta)$  的比值,其数学表达式为

$$PST(\theta) = E_d(\theta) / E_i(\theta) \quad (1)$$

点源透射比体现了光学系统本身对杂散光光源的衰减能力,而与杂散光源的辐射强度无关<sup>[21]</sup>.显然,PST 越小表示系统杂光抑制能力强,系统性能好.

超分辨相机工作时,卫星平台位于 500 km 的轨道高度,相机向地面拍照,工作时基本不正对太阳和其他强发光天体,因此系统的杂散源主要为目标区域附近的地表反射杂光、大气散射杂光和地气杂光<sup>[22]</sup>.如图 1 所示,视场外某微元区域  $dA$  形成的照度  $dE_\theta$  可按照平方反比计算

$$dE_\theta = \frac{K_{\text{air}} L_{\text{earth}} dA \cos \theta \cos \theta}{(S / \cos \theta)^2} \quad (2)$$

式中, $K_{\text{air}}$ 为透过率, $L_{\text{earth}}$ 为地气光亮度,微圆区域面积  $dA$

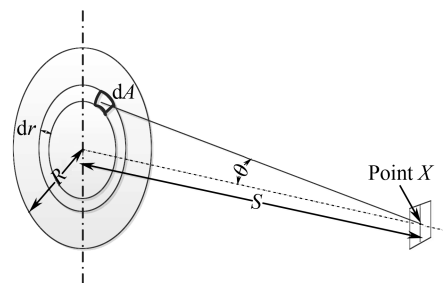


图 1 轴外光源在像面的照度

Fig.1 Illuminance in the image plane of the outside the shaft light source

$$dA = S \tan \theta d\phi dr = S \tan \theta d\phi \frac{S/\cos \theta}{\cos \theta} d\theta = S^2 \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} d\theta d\phi \quad (3)$$

式中  $S$  为物像距离,则角度为  $\theta$  的整个环带在  $X$  点处的照度为

$$E_{\theta} = \int_0^{2\pi} (dE_{\theta}) d\phi = 2\pi K_{\text{air}} L_{\text{earth}} \sin \theta \cos \theta \quad (4)$$

以  $\theta$  方向进入光学系统的杂光,整个系统的点源透射比为  $\text{PST}_{\theta}$ ,窗口面积为  $A$ ,探测器面积为  $WL$ ,那么进入像面的照度为

$$dE_{\text{stray}} = E_{\theta} \text{PST}_{\theta} (A/WL) \quad (5)$$

杂光是整个视场外光线的总和,因此

$$E_{\text{stray}} = \int_{\omega} (dE_{\text{stray}}) d\theta = \int_{\omega} \left[ E_{\theta} \text{PST}_{\theta} \left( \frac{A}{WL} \right)^2 \right] d\theta \quad (6)$$

为了使杂光对成像质量产生的影响足够小,要使得杂光在像面的照度远小于像面照度<sup>[23]</sup>,即

$$E_{\text{stray}} \ll E_{\text{img}}$$

若使杂光照度  $E_{\text{stray}}$  与探测器噪声  $E_{\text{noise}}$  达到同一量级,则杂光抑制效果为佳.根据探测器说明书给出的噪声等效输出电压,CCD 对应的像面照度应约为

$$E_{\text{noise}} = \frac{V_{\text{noise}}}{\text{CCE} \times p^2 t \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{h\nu} \times \text{QE}(\lambda) \times d\lambda} = 0.11 \text{ W/m}^2 \quad (7)$$

式中,CCE 为噪声电子数转换效率, $p$  为像元大小, $t$  为积分时间, $h$  为普朗克成熟, $\nu$  为光速, $\text{QE}(\lambda)$  为探测器对应波长的量子响应.窗口玻璃处所有杂光的照度总值为

$$E_{\text{window}} = \int_{\omega} (2\pi K_{\text{air}} L_{\text{earth}} \sin \theta \cos \theta) d\theta = \pi K_{\text{air}} L_{\text{earth}} (1 - \sin^2 \omega) \quad (8)$$

式中, $\omega$  为半视场角,那么,可计算出一个 CCD 点源透射比的平均值

$$\text{PST} = \frac{E_{\text{noise}}}{E_{\text{window}}} = 1 \times 10^{-3} \quad (9)$$

因此,当系统的点源透射比曲线低于  $10^{-3}$  时可认为杂光抑制效果满足成像质量要求.

## 2 消杂散光分析

空间相机一般要求长焦距、小视场、小体积,所以常选用反射式光学系统作为光学方案的基本结构.RC 系统具有尺寸小、焦距长、无色差等优点,该结构形式是卡塞格林系统的一种实现形式,在空间光学遥感器中有广泛的应用.RC 系统消除了初级彗差,但由于像散未消,视场仍不能很大.为了进一步扩大视场,需要在像面之前加上透射的视场校正镜组.因此,RC 光学系统一般是由主镜、次镜、主校正镜及次校正镜组成的折反射式系统.

本文研究的超分辨光学系统结构包括主镜、次镜和校正镜组,其焦距 1.625 m,视场角  $2.55^\circ$ , $F/\# 5.7$ ,光学结构见图 2.主镜中心开孔 116 mm,主次镜距离 327 mm,从光学结构不难看出,在没有机械镜筒遮拦的状况下,视场外光线可通过校正镜组直接进入探测器.

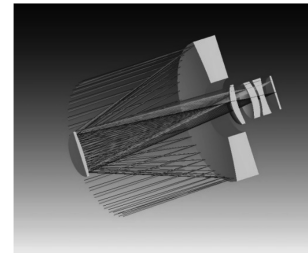


图 2 超分辨光学结构  
Fig.2 Super-resolution Optical system

在 Tracepro 中建立光学系统模型,通过光源的正向、反向追迹,查看杂散光来源,从仿真结果分析,本系统中杂散光来源主要有两种:一种是小角度光线经过主、次镜反射,进入校正镜,边缘再次散射到探测器靶面上;另一种是大角度光线不经过主、次镜反射,直接进入校正镜组,再经过多次散射,均匀的散射到探测器靶面上.非成像光束进入光学系统,在探测器靶面上形成杂散噪声,影响像质.

根据杂散光分析结果,借鉴卡塞格林系统消杂光的一般方法,通过添加外遮光罩、次镜遮光罩、内遮光罩,并在关键表面涂高吸光系数的材料进行杂光抑制<sup>[24]</sup>.

三个不同作用的遮光罩配合使用,以不影响成像光线和满足力学结构要求为设计约束条件,确定次镜光罩和内遮光罩的边界位置,针对不同高度和通光口径的遮光罩为模型,通过 Tracepro 仿真计算 PST,从而对系统优化前后的杂散光抑制情况进行量化分析,确定各个遮光罩的优化参数。

### 3 消杂光设计

本文研究的超分辨光学系统的消光手段主要有外遮光罩、内遮光罩和次镜遮光罩。其中,外遮光罩用于阻挡视场外大角度光线直射主镜表面,至少经过一次散射衰减。次镜遮光罩和内遮光罩的设计要求不遮挡正常成像光线但是不能漏光<sup>[25]</sup>,具体要求最大孔径和最小孔径的边缘光线不被次镜遮光罩和内遮光罩挡住,外遮光罩挡不住的大角度视场外光线,要被次镜遮光罩或者内遮光罩挡住<sup>[26]</sup>。在 AutoCAD 软件中建立光学结构模型,如图 3 所示,追迹边缘光线,确定三个遮光罩的初始尺寸,初步计算得到主镜遮光罩长度 614.53 mm,最大口径 300 mm,次镜遮光罩最大口径 116 mm,距离次镜顶点的距离为 38.9 mm;内遮光罩最前端口径为 95.4 mm,距离主镜中心为 127.1 mm。

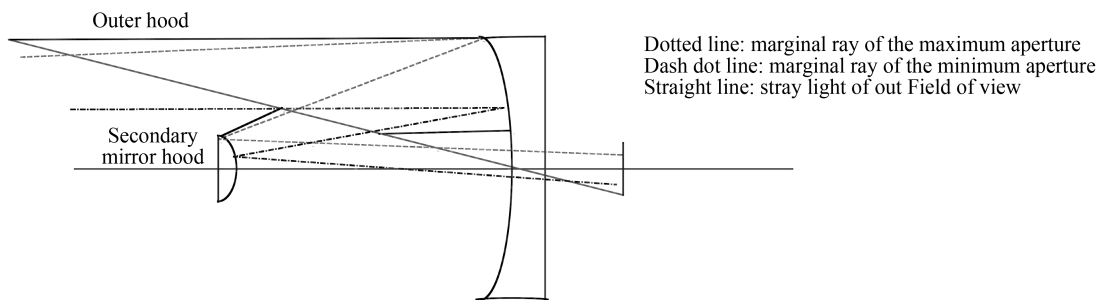


图 3 遮光罩边界尺寸

Fig.3 Boundary of the hood

在软件 Tracenpro 中建立光学模型,光学元件镀膜后,透镜的透过率大于 98%,主次镜的反射率大于 95%,并按照边界条件建立并输入遮光罩模型,镜筒内壁的吸收率设置为 95%,初步建立光机模型。

在随机光线追迹中,一般要分析  $10^6$  条以上的光线,才能得到与实际情况较吻合的结果<sup>[27]</sup>。分析轴外光线发现遮光罩可以阻止杂散光直接入射到像面,但是镜筒、遮光罩、补偿镜压圈等本身都具有一定的反射率,直射到这些零部件的光线有可能经过反射、单次散射或多次散射后到达像面位置,形成杂散光线,如图 4 所示,为  $3^\circ$  光线经过主次镜反射,然后在内遮光罩内壁发生散射进入探测器的路径,因此,不仅要给镜筒、遮光罩进行涂黑处理,还要进行挡光环的设计。

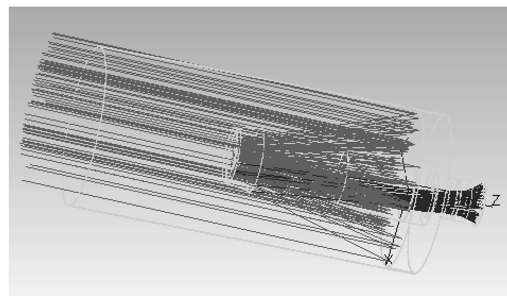


图 4 视场外  $3^\circ$  光线在 TracePro 中建模散射

Fig.4 Scattered light of the field of  $3^\circ$  in TracePro

挡光环的目的是为了改变光线的传播方向,通过光线追迹的方式查看散射光线具体透射位置,在不遮挡有效光线的情况下,增设挡光环,经过反复、多次优化,最终确定光机结构如图 5 所示,对比增设挡光环前后系统的计算点源透射比,如表 1 所示,不难看出 PST 均在  $10^{-3}$  量级一下,杂散光得到有效的控制。

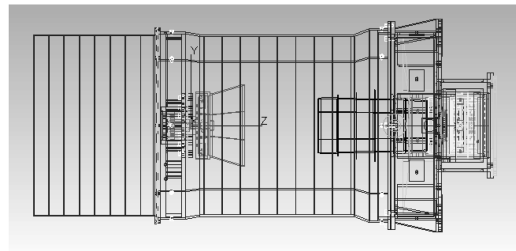


图 5 光机结构模型

Fig.5 Structure of light and machine

表 1 点源透射比  
Table 1 Point Sources Transmittance

PST	2	3	4	5	10	15	20	30	40
Before	0.1343	0.015	0.063	0.073	0.104	0.001	0.004	0.01	0
After	0.006	0.003	0.0006	0.0006	0.0009	0	0	0	0

## 4 结论

杂散光的存在,使得原本探测器上正常光入射可以获取的清晰图像变得模糊,本论文对超分辨光学系统进行了杂散光仿真分析研究,确定了 RC 光机系统的关键面,针对超分辨光学系统的光路特点,确定了外遮光罩、内遮光罩、次镜遮光罩的杂散光抑制措施,然后通过 Tracepro 计算机软件量化分析和结构有限元分析确定了遮光罩的具体尺寸参数.分析显示,采用这种综合考虑光机结构的有限元分析方法,确定杂散光抑制的手段,有利于对后续超分辨空间光学遥感器的杂散光抑制能力进行量化评估,经仿真计算,本论文分析的 RC 光机系统的杂散光抑制方案效果良好,为光机系统的优化设计提供了充分的理论、工程依据.

### 参考文献

- [1] SHI Dong-liang, XIAO Qin, LIAN Min-long. Research on stray light analysis and restrain of GF-4 satellite camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, **37**(5): 49-57.  
石栋梁,肖琴,练敏隆.“高分四号”卫星相机杂散光分析与抑制技术研究[J]. *航天返回与遥感*, 2016, **37**(5): 49-57.
- [2] KIRAN M, MICHAEL S, BYRON D, et al. SkySat-1: very high-resolution imagery from a small satellite[C]. *SPIE Remote Sensing*, 2014, **9241**: 92411E.
- [3] DIRK R. High-resolution imagery and video from SkySat[C]. The 2014 JACIE Workshop. Virginia: United States Geological Survey, 2014: 1-32.
- [4] LIU Tao. SkyBox' s high-resolution micro-satellite constellation opens commercial remote sensing 2.0 era[J]. *RS Application*, 2014, **3**: 71-72.  
刘韬. SkyBox 公司高分辨率小微卫星星座开启商业遥感 2.0 时代[J]. *卫星应用*, 2014, **3**: 70-71.
- [5] LIU Jing-dan, XU Ting-fa, XUN Xian-chao, et al. Simulation of geometric superresolution imaging by using optical mask[J]. *Optics Precision Engineering*, 2014, **22**(8): 2026-2031.  
刘晶丹,许廷发,荀显超,等. 光学掩膜实现几何超分辨成像的仿真[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(8): 2026-2031.
- [6] DIRK R, DAVID G S. Joint digital-optical design of superresolutionmultiframe imaging systems[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(10): B11-B20.
- [7] ZHOU Yu, WANG Peng, FU Dan-ying. System innovation and enlightenment of SkySat[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, **24**(5): 91-98.  
周宇,王鹏,傅丹膺. SkySat 卫星的系统创新设计及启示[J]. *航天器工程*, 2015, **24**(5): 91-98.
- [8] YAN Chang-xiang, XU Jie, PENG Yan. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(2): 289-293.  
颜昌翔,许杰,彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(2): 289-293.
- [9] LI Yan, LIU Jian-feng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(9): 0928002.  
李岩,刘剑锋. 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): 0928002.
- [10] ZHU Yang, ZHANG Xin, WU Yan-xiong, et al. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(8): 226-232.  
朱杨,张新,伍雁雄,等. 离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J]. *光学学报*, 2014, **34**(8): 226-232.
- [11] 高郭鹏. 双反射系统的杂散光抑制研究[D]. 北京:中国科学院光电研究院, 2009: 3-4.
- [12] STEADMAN S, LIKENES, BARRY K. GUERAP III simulation of stray light phenomena[C]. *SPIE*, 1977, **107**: 98-

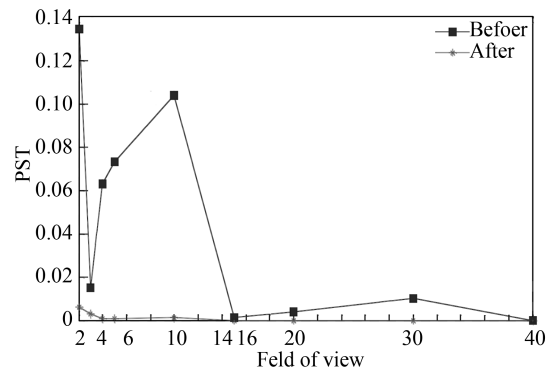


图 6 点源透射比曲线  
Fig.6 Point Sources Transmittance

106.

- [13] FRANK G, JOHN F. Stray light testing of the OLI Telescope[C]. SPIE, 2010, **7794**: 77940w1-77940w13.
- [14] LIN Zhong. The method of testing stray light in a laser raman spectrometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1981, **2**(1): 91-99.  
林中. 激光拉曼分光计中杂散光的测试方法[J]. 仪器与仪表学报, 1981, **2**(1): 91-99.
- [15] ZHANG Guo-yu, CAO Wei-guo, GAO Yu-jun, *et al.* The methods of analyses and calculation for stray light in optical system[J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 1995, **18**(4): 21-24.  
张国玉, 曹维国, 高玉军, 等. 光学系统杂散光的计算与分析方法[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1995, **18**(4): 21-24.
- [16] SHEN Yi, LI Xin-yao, CHEN Fu-chun. Research on suppression of stray infrared light in FY-2 radiometer[J]. *Infrared*, 2013, **34**(8): 1-5.  
沈易, 李欣, 耀陈福. 风云二号辐射计的红外杂散光抑制研究[J]. 红外, 2013, **34**(8): 1-5.
- [17] YOU Si-liang, PEI Yun-tian, CHEN Gui-lin. Analysis on stray radiation in the FY-2 imager during midnight[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 688-694.  
游思梁, 裴云天, 陈桂林. FY-2 卫星星载扫描辐射计午夜杂散光的分析[J]. 光学技术, 2006, **32**(5): 688-694.
- [18] SUN Ke, JIANG Hou-man, CHENG Xiang-ai. In-field stray light distribution caused by the surface scattering in ritchey-chretien systems[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, **34**(1): 13-18.  
孙可, 江厚满, 程湘爱. R-C 系统中由表面散射引起的视场内杂散光分布[J]. 国防科技大学学报, 2012, **34**(1): 13-18.
- [19] DENG Chao. Analysis on stray light elimination for space solar telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 715-720.  
邓超. 空间太阳望远镜消杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(4): 715-720.
- [20] 梅超. 大口径多光谱边角光学系统杂散光分析与抑制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 5.
- [21] HAN Xiao, XU Zhi, LI Zheng-gang, *et al.* Stray-light and space PSF measuring of the multi-band spectrometer of the 1 m new vacuum solar telescope[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2017, **14**(1): 52-59.  
韩笑, 徐稚, 李正刚, 等. 一米新真空太阳望远镜多波段光谱仪杂散光及空间 PSF 的测量[J]. 天文研究与技术, 2017, **14**(1): 52-59.
- [22] ZHANG Jun-qiang, WU Qing-wen, YAN Chang-xian. Stray Light Measurement of Space-borne High Resolution Imaging Spectrometer[J]. 2010, **39**(7): 1319-1323.  
张军强, 吴清文, 颜昌翔. 星载成像光谱仪杂散光测量[J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1319-1323.
- [23] SUN Ming-zhe, ZHANG Hong-xin, LU Zhen-wu, *et al.* Design and diffraction intensity test of toothed occulter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(1): 70-77.  
孙明哲, 张红鑫, 卢振武, 等. 锯齿型外掩体设计和衍射光强检测[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(1): 70-77.
- [24] LIN Jian-chun, SUN Li-wei, CHEN Bo-yang, *et al.* Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(1): 244-247.  
林剑春, 孙丽崑, 陈博洋, 等. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J]. 中国激光, 2013, **40**(1): 244-247.
- [25] LI Yang, LIAO Zhi-bo, MU Sheng-bo, *et al.* Design of ultra-short embedded baffle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(11): 2683-2688.  
李洋, 廖志波, 穆生博, 等. 超短型内嵌式遮光罩设计[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(11): 2683-2688.
- [26] YE Lu, WU Guo-dong. Testing of stray light distribution for optical lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, **37**(2): 240-243.  
叶露, 吴国栋. 光学镜头杂散光分布状态测试[J]. 应用光学, 2016, **37**(2): 240-243.
- [27] ZOU Gang-yi, FAN Xue-wu. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 605-609.  
邹刚毅, 樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 605-609.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61505220), the National Defense Innovation Project Fund Funded by the Chinese Academy of Sciences (No. CXJJ-15S156)