

〈系统设计〉

用于空间目标天基红外探测的同轴光学系统杂散光抑制技术

孟繁多¹, 王 潇², 童卫明¹, 高幸华¹, 马文坡¹
(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100094)

摘要: 空间目标天基红外探测系统在对近地轨道暗弱目标探测时, 会受到来自视场外地球和大气的强烈杂散光的影响, 因此, 这类探测系统对杂散光抑制的要求非常高。本文围绕空间目标天基红外探测需求, 在分析借鉴了国外一些天基红外探测系统的杂散光抑制技术的基础上, 对用于空间目标天基红外探测的同轴光学系统的杂散光抑制技术进行了研究, 提出通过在次镜背部添加中心遮光罩来进一步提升杂光抑制能力的技术途径。以 SABER 的同轴光学系统为例, 对在次镜背部增加中心遮光罩前后的杂散光抑制能力进行了仿真, 仿真结果表明在次镜背部增加中心遮光罩后, 在临边探测方向上光学系统的 PST 明显降低, 其中在离轴角 5°和 10°时分别降低了 46%和 35%。

关键词: 空间目标; 天基红外探测; 同轴光学系统; 杂散光抑制; 中心遮光罩

中图分类号: TP732.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8891(2025)04-0403-07

Stray Light Suppression of Coaxial Optical System for
Space-Based Infrared Detection of Space Target

MENG Fanduo¹, WANG Xiao², TONG Weiming¹, GAO Xinghua¹, MA Wenpo¹
(1. *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;*
2. *Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China*)

Abstract: Space-based infrared detection systems for space targets are affected by strong stray light from the Earth and atmosphere outside the field of view when detecting faint targets in low Earth orbit. Therefore, such detection systems have high requirements for stray light suppression. Based on the requirements of space-based infrared detection for space targets, this study analyzes the stray light suppression technologies of several foreign space-based infrared detection systems, investigates the stray light suppression technology of coaxial optical systems used for space-based infrared detection of space targets, and proposes a technical approach to further improve stray light suppression by adding a center baffle to the back of the secondary mirror. Using SABER's coaxial optical system as an example, the stray light suppression capability was simulated before and after adding the center baffle. The simulation results show that, after adding the center baffle to the back of the secondary mirror, the point source transmittance (PST) of the optical system in the detection direction at the edge is significantly reduced by 46% and 35% when the off-axis angles are 5° and 10°, respectively.

Keywords: space target, space-based infrared detection, coaxial optical system, stray light suppression, center baffle

0 引言

目前, 空间目标天基探测主要采用可见光探测系统, 仅能在有光照条件下对目标进行探测。若想实现空间目标昼夜连续探测, 需要发展天基红外探测系统。然

而, 天基红外探测系统在对近地轨道的暗弱目标进行临边探测时, 会面临来自视场外地球和大气的强烈杂散光的影响, 必须采取严格的杂散光抑制措施^[1-5]。例如, 美国的空间红外成像望远镜 (spatial infrared imaging telescope III, SPIRIT III)、大气宽带辐射探

收稿日期: 2024-07-02; 修订日期: 2024-07-31.
作者简介: 孟繁多 (2000-), 硕士研究生, 主要从事空间光学传感器杂散光抑制方面的研究。E-mail: fanduomeng@foxmail.com。
通信作者: 马文坡 (1967-), 研究员, 博士, 主要从事空间光学传感器总体设计方面的研究。E-mail: mawenpo@sina.com。

测仪 (sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry, SABER) 和广域红外探测仪 (wide-field infrared explorer, WIRE) 等均采取了严格的杂散光抑制措施。

SPIRIT III 用于获取目标和临边背景特性数据, 其采用离轴二次成像光学系统, 通过设置视场光阑、里奥光阑、遮光罩、地球挡光屏 (earth shield), 并对反射镜面采取超光滑加工及防污染措施来抑制杂散光^[6-7]。

SABER 采取地球临边探测模式测量大气辐射, 由于视场内大气辐射微弱, 必须采取严格的杂散光抑制措施才能对大气进行精确测量。SABER 采用同轴四反二次成像光学系统, 通过设置视场光阑、里奥光阑、遮光罩, 并对反射镜面采取超光滑及防污染措施来抑制杂散光^[8-9]。

WIRE 用于研究星系演变并寻找新生星系, 由于深空星系辐射微弱, 需要对视场外强烈杂散光进行抑制。WIRE 采用 R-C 卡塞格林系统, 通过设置视场光阑、遮光罩并在遮光罩前端设计倾斜的孔径遮光罩 (aperture shade) 以遮挡来自太阳、地球和月亮的杂散光^[10-11]。

本文在分析借鉴了国外一些天基红外探测系统的杂散光抑制技术的基础上, 针对用于空间目标天基红外探测的同轴光学系统, 提出了通过在次镜背部增加中心遮光罩来进一步提升杂光抑制能力的技术途径, 并以 SABER 的同轴光学系统为载体, 对其杂散光抑制效果进行了仿真, 并对其抑制临边探测方向杂散光的能力进行分析, 验证其在该探测场景下的同轴光学系统对杂散光抑制的有效性。

1 典型空间目标天基红外探测场景

本文所研究的天基红外探测系统, 主要任务是对近地轨道空间目标进行探测。如图 1 所示, 在探测过程中, 由于目标尺寸小或距离远等因素, 能够探测到的目标辐射能量很弱, 如果不对来自地球及大气的强烈杂散光加以抑制, 会导致系统无法对这类目标实现有效探测。

以 SPIRIT III 为例, 其运行在高度 900 km 的太阳同步轨道上, 对近地轨道空间目标进行探测, 面临着来自地球及大气的强烈杂散光。假设空间目标为长 1 m, 底部半径 0.5 m, 发射率 0.5, 温度 300 K 的圆锥体, 根据视角不同, 当投影面积为 0.3 m^2 时, 约 2.8 W/Sr 的辐射能量位于波长为 $11.1 \sim 13.2 \mu\text{m}$ 的长波红外区间^[7,12]。当空间目标探测距离为 6400 km, 探测切线高度为 80 km 时, 到达入光口处的辐照度仅为 $6.8 \times 10^{-14} \text{ W/m}^2$, 到达入光口的视场外杂散辐射辐照度高达 $1.2 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$, 是目标辐照度的约 1800 倍^[6,13]。同时, 随着探测目标切线高度的降低, 系统接收到的来自地球及大气的视场外杂散光愈发强烈。对切线高度 40 km 进行探测时, 与对切线高度 80 km 探测相比, 探测谱段内的大气辐亮度增大了两个数量级^[6]。

对于 SABER 这一探测大气辐射的载荷, 其在工作时同样面临着类似的强烈杂散光环境。以波长为 $14.7 \sim 15.8 \mu\text{m}$ 的长波红外通道为例, 对切线高度为 70 km 的大气辐射进行探测时, 到达入光口处的视场外杂散辐射是视场内大气辐射的约 3200 倍^[8]。

由此可见, 对于这类天基红外探测系统, 对来自地球及大气的单侧强烈的视场外杂散光的抑制是极为重要的。开展天基红外探测系统杂散光抑制技术研究, 进一步提高系统杂散光抑制性能, 能够增大系统探测目标的高度范围, 并且由于镜面散射是系统杂散光的重要来源, 因而也能在一定程度上提高系统对镜面粗糙度的容忍程度。

2 天基红外探测系统杂散光抑制技术

2.1 SPIRIT III 的杂散光抑制设计

SPIRIT III 是中段空间试验卫星 (midcourse space experiment, MSX) 的主要载荷之一, 主要任务是对处于飞行中段的洲际弹道导弹等空间目标进行探测, 并收集临边背景特性数据^[14]。如图 2 所示, SPIRIT III 辐

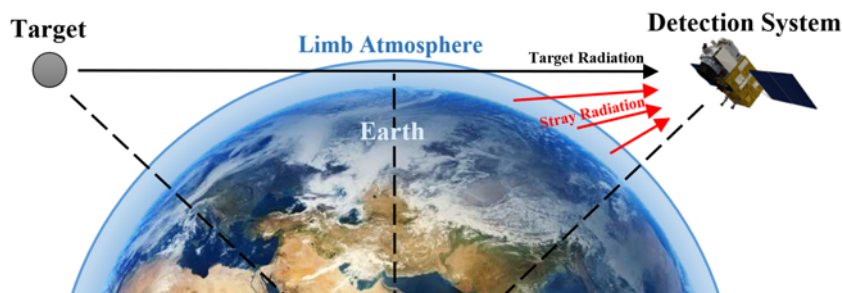


图 1 天基红外探测系统对近地轨道目标探测示意图

Fig.1 Schematic diagram of low-earth orbit target detection by space-based infrared detection system

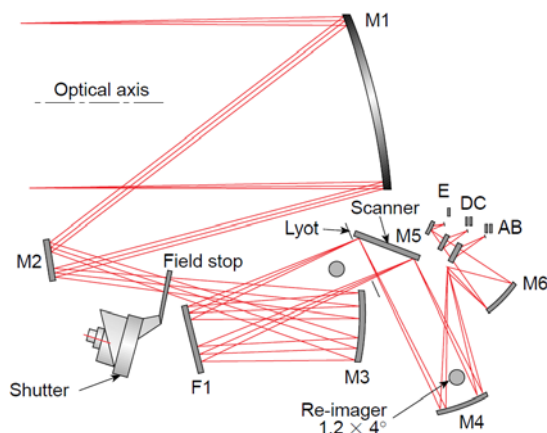


图2 SPIRIT III 辐射计光学系统及主要杂散光抑制设计^[15]
Fig.2 SPIRIT III radiometer optical system and main stray light suppression design^[15]

辐射计采用离轴二次成像光学系统,入瞳直径 368.3 mm, F 数 3.72, 视场 $1^\circ \times 3^\circ$, 探测谱段为 $4.22 \sim 4.36 \mu\text{m}$ 、 $4.24 \sim 4.46 \mu\text{m}$ 、 $6.03 \sim 10.91 \mu\text{m}$ 、 $11.10 \sim 13.24 \mu\text{m}$ 、 $13.50 \sim 15.90 \mu\text{m}$ 和 $18.30 \sim 25.00 \mu\text{m}$ 。SPIRIT III 的光学系统工作在 $10 \sim 20\text{K}$ 的温度下,在系统光阑、镜面散射控制等方面采取了杂散光抑制措施。

在系统光阑的设计上, SPIRIT III 在光学系统的一次像位置设计了视场光阑 (field stop), 遮挡了主镜和次镜产生的散射杂散光; 里奥光阑 (Lyot stop) 遮挡了孔径光阑产生的衍射杂散光, 并进一步遮挡了三镜、折镜及视场光阑未能遮挡的散射杂散光。

在镜面散射的控制上, 为降低镜面粗糙度引起的散射, 主镜和次镜采取超光滑加工, 粗糙度控制在 10\AA , 在 $10.6 \mu\text{m}$ 波长下的表面双向反射分布函数 (bidirectional reflective distribution function, BRDF) 被控制在小于 $(1 \times 10^{-4} \theta^{-2})\text{sr}^{-1}$, 其中 θ 为反射光线与主光轴的夹角; 为降低镜面污染引起的散射, SPIRIT III 在地面测试期间严格控制环境洁净度, 保持在 10000 级洁净室环境中, 确保镜面在发射前不受污染^[6,16]。

图 3 为 SPIRIT III 辐射计在镜面 BRDF 为 $(1 \times 10^{-4} \theta^{-2})\text{sr}^{-1}$ 时 $11.1 \sim 13.2 \mu\text{m}$ 谱段点源抑制比 (point source reduction ratio, PSRR) 曲线。采取上述杂散光抑制措施后, 该谱段点源抑制比在离轴角为 10° 时达到 10^{-6} 数量级。

2.2 SABER 的杂散光抑制设计

SABER 的主要任务是研究高度为 $50 \sim 180 \text{ km}$ 之间的大气中间层和热层的能量学、化学和动力学性质^[8]。如图 4 所示, SABER 采用同轴四反二次成像光学系统, 入瞳直径 100 mm , F 数 2.0, 视场 $1.4^\circ \times 1.4^\circ$, 10 个探测谱段位于 $1.27 \sim 16.9 \mu\text{m}$ 之间。SPIRIT III 的光学系统工作在 220 K 的温度下, 在系统光阑、遮光

罩及镜面散射控制等方面采取了杂散光抑制措施, 并进行了在轨验证。

在系统光阑的设计上, SABER 在光学系统的一次像位置设计了视场光阑, 限制了主镜和次镜产生的散射杂散光; 内、外里奥 (Lyot) 光阑除了遮挡来自内孔径光阑和次镜支撑的衍射光, 同时遮挡了主镜锥形遮光罩和次镜锥形遮光罩产生的散射杂散光^[9]。

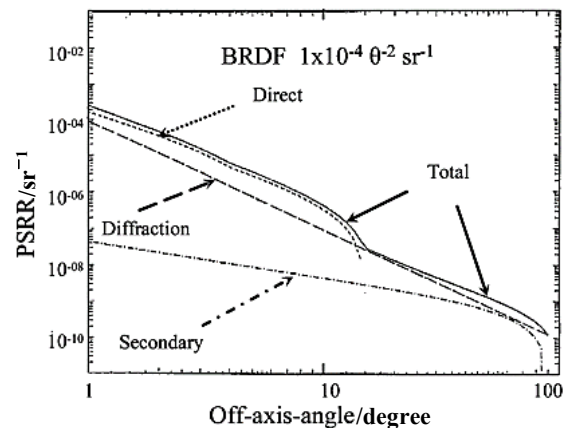


图3 SPIRIT III 辐射计在镜面 BRDF 为 $(1 \times 10^{-4} \theta^{-2})\text{sr}^{-1}$ 时 $11.1 \sim 13.2 \mu\text{m}$ 谱段点源抑制比曲线^[6]

Fig.3 Point source reduction ratio curve of SPIRIT III radiometer in $11.1 \sim 13.2 \mu\text{m}$ spectral segment when mirror BRDF is $(1 \times 10^{-4})\theta^{-2}\text{sr}^{-1}$ ^[6]

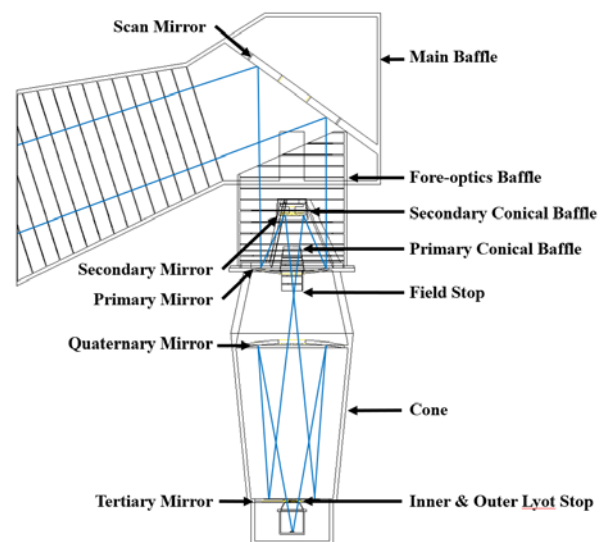


图4 SABER 光学系统及主要杂散光抑制设计

Fig.4 SABER optical system and main stray light suppression design

在遮光罩的设计上, 系统设计了主遮光罩、前光学遮光罩、主镜锥形遮光罩、次镜锥形遮光罩。主遮光罩和前光学遮光罩限制视场外大角度一次杂光, 并加入了光陷阱对外部漏光进行吸收; 主镜锥形遮光罩、次镜锥形遮光罩避免主镜一次散射光直接到达次

镜。遮光罩挡光环间隔非均匀设计，且尖端不涂漆，起到降低尖端散射并反射视场外杂散光的作用。挡光环和非光学元件喷涂黑漆后吸收率在长波谱段达到93.5%以上^[17]。

在镜面散射的控制上，为降低镜面粗糙度引起的散射，主镜和次镜采取超光滑加工，在10.6 μm 波长下的BRDF被控制在小于 $(1 \times 10^{-3} \theta^{-2}) \text{sr}^{-1}$ ；为降低镜面污染引起的散射，SABER 在地面测试期间严格控制环境洁净度，保持在100级洁净室环境中，确保镜面在发射前不受污染。

图5为SABER在14.7~5.8 μm 谱段归一化点源辐射透过率（point source normalized irradiance transmittance, PSNIT）曲线，图中横坐标为相对主遮光罩主轴离轴角，与主光轴相差5.5°^[9]。采取上述杂散光抑制措施后，该谱段归一化点源辐射透过率在相对主光轴离轴角为10°（即相对主遮光罩主轴离轴角为15.5°）时达到10⁻⁶数量级。

2.3 针对同轴光学系统的改进杂散光抑制设计

在同轴光学系统中，对于视场外的离轴入射光线，增大离轴光路中的遮拦能够减少离轴杂散光进入系统有效光通量，起到杂散光抑制作用^[18-20]。为抑制视场外来自地球及大气的强烈杂散光，本文从天基红外同轴光学系统在探测空间目标时面临的杂散光场景出发，提出了中心遮光罩设计，其能在不增大系统遮拦的前提下，提高对离轴入射光线的遮挡，降低直接到达主镜的强烈杂散光，进而减少主镜的散射杂散光，同时能够降低到达遮光罩和次镜支撑的杂散光。本文以采用同轴光学系统的SABER为例，在现有杂散光抑制措施的基础上，结合中心遮光罩这一改进杂散光抑制设计进行了仿真与分析。

图6所示为中心遮光罩结构示意图，其放置在次镜背侧。中心遮光罩结构设计为半锥筒，挡光环面向地气杂散光入射方向，表面涂黑漆。这样设计的目的是既能对单边来源的强烈杂散光进行抑制，也能降低结构重量。

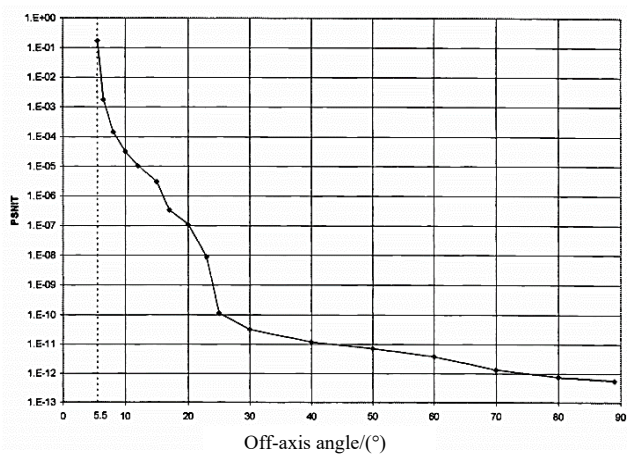


图5 SABER在14.7~15.8 μm 谱段归一化点源辐射透过率曲线^[9]

Fig.5 Point source normalized irradiance transmittance curve of SABER in the 14.7-15.8 μm spectrum^[9]

结合图7的SABER系统光路图进行分析，确定中心遮光罩的结构尺寸与安装位置，确保新设计的中心遮光罩在最大程度起到抑制杂散光作用的同时，对视场内的正常光线没有遮挡。受限于光路及主遮光罩、前光学遮光罩结构，中心遮光罩上端不能高于前光学遮光罩，上端与前光学遮光罩入口平面平齐。在前光学遮光罩的入口处添加标准面，如图7中橙色平面所示，对该平面光迹图进行分析。如图8所示，各视场光锥由中心遮拦产生的空心区域在该平面处有半径为17.24 mm的重叠，验证了中心遮光罩设计的可行性。

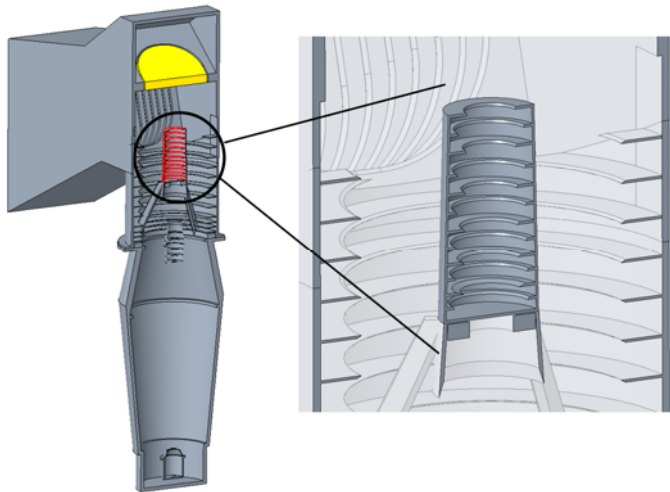


图6 中心遮光罩结构示意图

Fig.6 Structure diagram of the center baffle

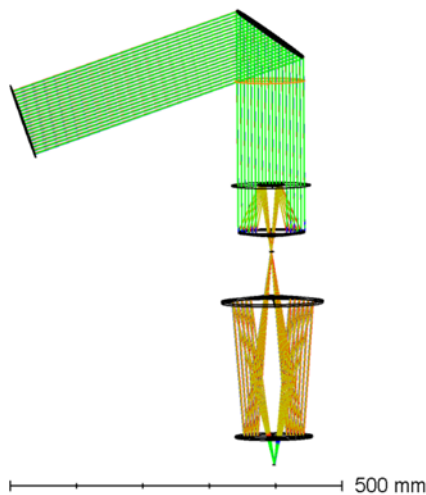


图7 SABER系统光路图

Fig.7 SABER system optical path diagram

根据上述分析,中心遮光罩下端与次镜结构背侧平面平齐,上端与前光学遮光罩入口平面平齐,因此中心遮光罩高度设计为77.18mm。中心遮光罩下端半径与次镜结构半径相同,为19.47mm。中心遮光罩上端半径根据标准面光迹图确定,为17.24mm。根据中心遮光罩上下端半径及中心遮光罩高度,计算得到中心遮光罩倾角为1.42°。

中心遮光罩挡光环结构设计如图9所示,中心遮光罩的挡光环设计遵循“两次反射”原则,使杂散光至少经过遮光罩挡光环及侧壁两次以上的反射或散射才能到达主镜。具体设计步骤为,连接次镜背侧边缘点与中心遮光罩上端边缘点,其与系统光路光锥内壁的平行线的交点为一级挡光环位置;连接中心遮光罩上端边缘点与一级挡光环边缘点,其与中心遮光罩侧壁的交点与主镜边缘点连线,与光锥平行线的交点

为二级挡光环位置,其余挡光环以此类推。在各挡光环的中间点添加高度为初始挡光环一半的交错挡光环,以提升对一次散射光线的抑制效果。各级挡光环尖端倾斜角度由遮光罩底端与该级挡光环连线确定,确保挡光环尖端为非关键面。

3 杂散光抑制性能仿真分析

3.1 评价指标

评价光机系统自身对杂散光抑制水平通常采用点源透过率(point source transmittance, PST)作为评价指标。PST与前文所述的PSRR与PSNIT含义相同,是指视场外离轴角为 θ 的点源目标辐射,经光学系统后在像面产生的辐射照度 $E_d(\theta)$ 与入口处辐照度 $E_i(\theta)$ 的比值,即:

$$PST(\theta)=\frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)}$$

(1)

PST作为评价光机系统抑制杂散光能力的重要指标,代表着系统本身对杂散光的衰减能力,与光线的入射角 θ 、系统的工作波段 λ 有关,而与入射光的辐射强度无关^[21]。系统增加中心遮光罩这一杂散光抑制设计后,对临边探测方向及其反方向的离轴杂散光抑制能力出现差别,需要对临边探测方向及其反方向均进行PST仿真^[22]。

3.2 仿真参数设置

首先在Creo中建立系统光机模型,并导出三维模型至Tracepro软件中。在Tracepro中设定光学元件的材料属性和光机结构的表面参数。光机结构的表面参数是影响杂散光在光机系统中传输的主要影响因素,ABg模型能够对材料表面的散射特性进行定义,

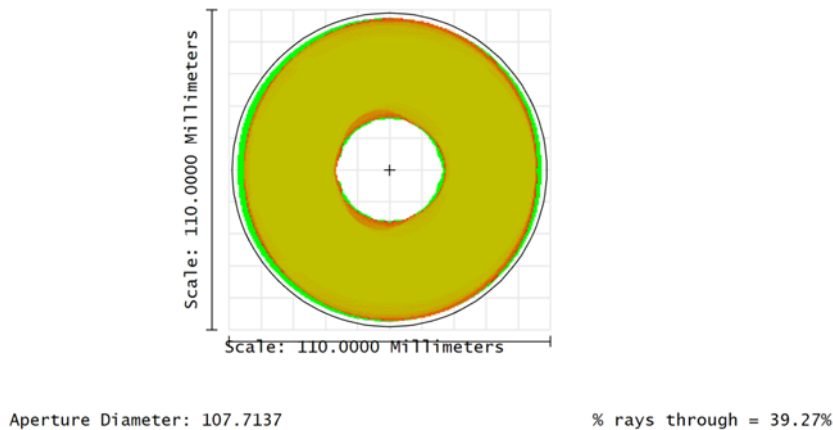


图8 标准面光迹图

Fig.8 Standard surface light trace

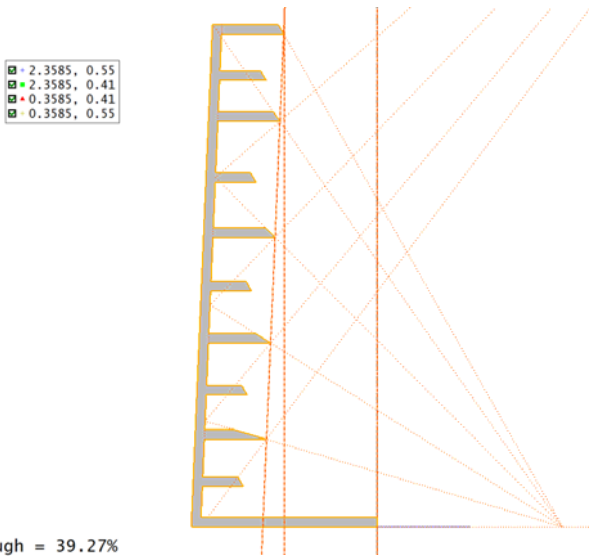


图9 挡光环结构设计示意图

Fig.9 Baffle vane structure design diagram

适用于描述结构表面的 BRDF, 故本文在 Tracepro 中采用 Bg 模型来描述材料表面散射特性, 其表达式为:

$$\text{BRDF} = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g} \quad (2)$$

其中, A 、 B 、 g 为参数; β 、 β_0 分别为光线发生镜面反射和散射在平面上的投影。对 PST 进行仿真时, 将光源设置为不同离轴角下的充满系统遮光罩入口的平行光源, 光线数量 5000 万条, 并设置重点采样。为保证仿真像面照度的可信性, 仿真时每根光线的光通量追迹门槛应设置为理论像面照度低 2 个数量级以上。当设置光源辐照度为 $1 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 时, 根据理论 PST 求得理论像面照度为 $2.4 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$, 根据理论像面照度分析, 仿真光通量追迹门槛为 $1 \times 10^{-6} \text{ W}$ 。

3.3 仿真结果与分析

以 SABER 波长为 $14.7 \sim 15.8 \mu\text{m}$ 的长波红外谱段为例, 设置长波探测器像面为完全吸收, 进行系统 PST 的仿真。由于 2.3 节中心遮光罩这一改进杂散光抑制设计使得临边探测方向与其相反方向的杂散光抑制性能出现差别, 为了分析其在两个方向上杂散光抑制性能的变化情况, 以扫描镜为旋转中心点, 将光源绕卫星俯仰维进行旋转。定义临边探测方向为旋转正方向, 采集光源在各个角度入射时探测器表面辐照度, 并根据系统 PST 分析添加中心遮光罩前后系统杂散光抑制性能变化。

经过仿真, 得到增加中心遮光罩前后系统 PST 随离轴角的变化情况, 如图 10、图 11 所示。图 10 为临边探测方向与其相反方向, 入射光线离轴角范围 $\pm 60^\circ$ 的 PST, 图 11 为入射光线离轴角范围 $\pm 10^\circ$ 的 PST。从图 10 中可以看出, 中心遮光罩提升了系统对临边探测方向的杂散光抑制性能, 尤其是在离轴角 $\pm 10^\circ$ 内的小离轴角范围, 同时对相反方向的杂散光抑制性能也有一定提升。

由于小离轴角下 PST 对探测器实际接收到的杂散光辐照度影响较大, 对这一区域의 PST 变化情况进行进一步分析, 如图 11 所示。在正方向, 即地球及大气杂散光入射方向, PST 在离轴角 5° 时降低了 46%, 在离轴角 10° 时降低了 35%, 已达到 10^{-7} 数量级。在这一方向上小离轴角 PST 的降低能够显著降低到达像面的系统视场外杂散光。在负方向, 中心遮光罩同样起到了遮挡作用, 使 PST 出现了一定幅度的下降。由于实际工作环境该谱段来自深空的离轴入射杂散光相较于来自地球及大气的离轴入射杂散光极低, 因此从负方向到达像面的杂散光对系统杂散光抑制性能的影响可以忽略。在添加中心遮光罩后, 若保持到达

像面的视场外杂散辐射不变, 系统最低探测高度可由 50 km 降至 42 km。

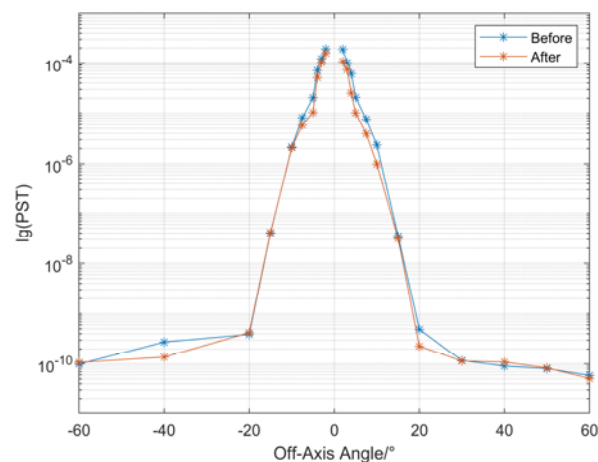


图 10 增加中心遮光罩前后系统 PST 对比(离轴角范围 $\pm 60^\circ$)

Fig.10 PST comparison before and after the addition of center baffle (off-axis angle range $\pm 60^\circ$)

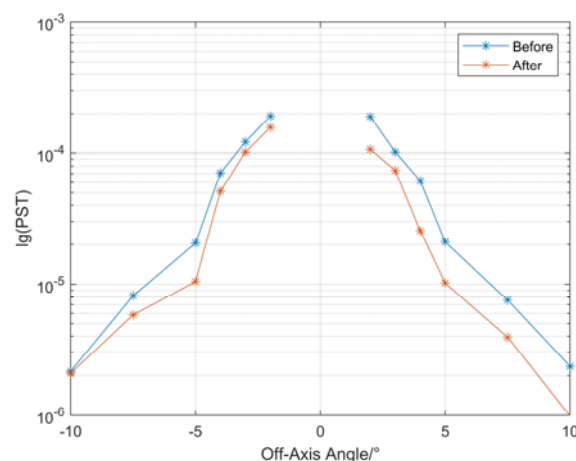


图 11 增加中心遮光罩前后系统 PST 对比(离轴角范围 $\pm 10^\circ$)

Fig.11 PST comparison before and after the addition of center baffle (off-axis angle range $\pm 10^\circ$)

4 结语

天基红外探测系统在对近地轨道的暗弱目标进行临边探测时, 会面临来自视场外地球和大气的强烈杂散光的影响, 必须采取严格的杂散光抑制措施。本文从上述场景中工作的同轴光学系统面临的杂散光环境出发, 提出了中心遮光罩这一杂散光抑制设计。中心遮光罩为半锥筒结构, 位于次镜背侧, 能够在不引入额外遮拦的条件下, 降低直接到达主镜的强烈杂散光, 进而降低主镜的散射杂散光能量, 同时降低到达遮光罩和次镜支撑的杂散光。以 SABER 的同轴光学系统为例开展仿真分析, 添加中心遮光罩后, 系统

PST 在离轴角 5° 时降低了 46%, 在离轴角 10° 处降低了 35%。

参考文献:

- [1] 王浩, 马文坡, 张倩, 等. 临边/深空背景探测系统地球杂散辐射建模分析[J]. 红外与激光工程, 2023, **52**(10): 332-339.
WANG Hao, MA Wenpo, ZHANG Qian, et al. Modeling and analysis of earth stray radiation of earthlimb/deep space background detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, **52**(10): 332-339.
- [2] ZHOU D, WANG X. Stray light suppression of wide-field surveillance in complicated situations[J]. *IEEE Access*, 2023, **11**: 2424-2432.
- [3] 王虎, 陈钦芳, 马占鹏, 等. 杂散光抑制与评估技术发展展望(特邀)[J]. 光子学报, 2022, **51**(7): 125-180.
WANG Hu, CHEN Qinfang, MA Zhanpeng, et al. Development and prospect of stray light suppression and evaluation technology (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, **51**(7): 125-180.
- [4] 陆福星, 李夜金, 赵云峰, 等. 天基红外动目标检测系统的仿真和评估[J]. 红外技术, 2017, **39**(5): 451-456, 462.
LU Fuxing, LI Yejin, ZHAO Yunfeng, et al. Simulation and evaluation of space-based infrared moving target detection system[J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(5): 451-456, 462.
- [5] 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.
SHI Dongliang, XIAO Qin, LIAN Minlong. Research on stray light analysis and restrain of GF-4 satellite camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, **37**(5): 49-57.
- [6] O'Neil R R, Gibson J, Richards E. Midcourse space experiment: off-axis rejection performance of the infrared sensor[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, **43**(6): 1347-1358.
- [7] Stair A T. MSX design parameters driven by targets and backgrounds[J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 1996, **17**(1): 11.
- [8] Esplin R, Mlynczak M G, Russell J, et al. Sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER): instrument and science measurement description[J]. *Earth and Space Science*, 2023, **10**(9): e2023EA002999.
- [9] Stauder J L, Esplin R W. Stray light design and analysis of the sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER) telescope[C]//*Infrared Spaceborne Remote Sensing VI*, SPIE, 1998, **3437**: 52-59.
- [10] Wright E L. WISE: the wide-field infrared survey explorer[C]//*Infrared Systems and Photoelectronic Technology IV*, SPIE, 2009, **7419**: 13-19.
- [11] Mainzer A K, Eisenhardt P, Wright E L, et al. Update on the wide-field infrared survey explorer (WISE)[C]//*Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter*, SPIE, 2006, **6265**: 661-672.
- [12] 唐宏晨, 徐鹏, 阮宁娟, 等. 高超声速运动点目标检测[J]. 航天返回与遥感, 2018, **39**(6): 46-54.
TANG Hongchen, XU Peng, RUAN Ningjuan, et al. Detection of hypersonic moving point target[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, **39**(6): 46-54.
- [13] 曾天机, 唐义, 张丽君, 等. 基于合作目标的空间目标尺寸反演模型[J]. 航天返回与遥感, 2024, **45**(2): 66-73.
ZENG Tianji, TANG Yi, ZHANG Lijun, et al. Spatial target size inversion model based on cooperative targets[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2024, **45**(2): 66-73.
- [14] O'Neil R R, Gardiner H A, Gibson J J, et al. Midcourse space experiment (MSX): plans and capability for the measurement of infrared earthlimb and terrestrial backgrounds[C]//*Characterization and Propagation of Sources and Backgrounds*, SPIE, 1994, **2223**: 264-273.
- [15] Bartschi B Y, Morse D E, Woolston T L. The spatial infrared imaging telescope III[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, **17**(2): 215-225.
- [16] Hall D F, Cranmer J H, Sanders Jr J T, et al. MSX spacecraft contamination control methodology and results[C]//*Optical Systems Contamination and Degradation*, SPIE, 1998, **3427**: 4-15.
- [17] Stauder J L, Esplin R W, Zollinger L, et al. Stray-light analysis of the SABER telescope[C]//*Infrared Spaceborne Remote Sensing III*, SPIE, 1995, **2553**: 264-270.
- [18] 张梓扬, 常军, 黄一帆, 等. 基于强化学习的空间引力波探测望远镜系统外杂光抑制研究[J]. 光电工程, 2024, **51**(2): 71-81.
ZHANG Ziyang, CHANG Jun, HUANG Yifan, et al. Reinforcement learning-based stray light suppression study for space-based gravitational wave detection telescope system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(2): 71-81.
- [19] 闫佩佩, 樊学武. R-C 光学系统设计及杂散光分析[J]. 红外技术, 2011, **33**(4): 214-218.
YAN Peipei, FAN Xuewu. Optical design and stray light analysis of R-C system[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(4): 214-218.
- [20] 林剑春, 孙丽崴, 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): 250-253.
LIN Jianchun, SUN Liwei, CHEN Boyang, 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): 250-253.
- [21] 舒政通, 韩赠崇, 吴羽婷, 等. 空间探测相机光学系统的杂散光分析和优化设计[J]. 应用光学, 2023, **44**(5): 982-991.
SHU Zhengtong, HAN Zengchong, WU Yuting, et al. Stray light analysis and optimization design for optical system of space detection camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, **44**(5): 982-991.
- [22] 殷恺, 钮新华, 张镔. 基于可见光红外扫描辐射计杂散光建模仿真[J]. 遥感学报, 2024, **28**(3): 747-755.
YIN Kai, NIU Xinhua, ZHANG E. Modeling and simulation of stray light based on the visible and infrared radiometer[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, **28**(3): 747-755.