

空间探测相机光学系统的杂散光分析和优化设计

舒政通 韩赠崇 吴羽婷 林志强 张昊 王敏

Stray light analysis and optimization design for optical system of space detection camera

SHU Zhengtong, HAN Zengchong, WU Yuting, LIN Zhiqiang, ZHANG Hao, WANG Min

引用本文:

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. DOI: 10.5768/JAO202344.0501006

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. DOI: 10.5768/JAO202344.0501006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小型化全景系统的杂散光分析与抑制方法研究

Analysis and suppression of stray light in miniaturized panoramic system

应用光学. 2020, 41(3): 455–461 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301004>

一种双波段成像系统的红外通道杂散光分析

Stray light analysis on infrared channel of dual-band imaging system

应用光学. 2018, 39(2): 262–267 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0206002>

基于CODE V和LightTools的成像系统初级鬼像分析

Primary ghost image analysis of imaging system based on CODE V and LightTools

应用光学. 2017, 38(2): 281–284 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0205002>

基于LitghtTools的激光四象限探测系统仿真

System simulation of laser four-quadrant detection system based on LitghtTools

应用光学. 2021, 42(1): 176–181 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0107004>

复合光学系统杂散辐射分析及抑制

Stray radiation analysis and suppression of composite optical system

应用光学. 2019, 40(1): 1–6 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101001>

DMD衍射效应及其产生的杂散光分析

Analysis of DMD diffraction effect and its generated stray light

应用光学. 2021, 42(4): 630–635 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401009>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 05-0982-10

空间探测相机光学系统的杂散光分析和优化设计

舒政通, 韩赠崇, 吴羽婷, 林志强, 张昊, 王敏

(福建师范大学光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室
福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 由于空间光环境的复杂性, 抑制杂散光对保证空间相机成像性能尤其重要, 该文针对宽光谱波段成像的空间探测相机光学系统进行杂散光分析和抑制优化设计。通过 SOLIDWORKS 和 TracePro 的无损式数据交互建立光机模型, 并从光机材料的表面特性、机械结构、镜片透过率等多角度优化杂散光模型, 再利用朗伯体光源分别对正反向进行光线追迹, 然后结合光机模型的半剖图对系统关键表面进行重点取样分析。分析结果表明: 优化后的光机系统在离轴角 $10.3^{\circ}\sim 15.4^{\circ}$ 内, 点源透过率值与优化前的系统相比下降了 66%~99.4%, 在离轴角大于 14.2° 时点源透过率值接近 10^{-4} 量级, 在离轴角 18.4° 处杂散光的点源透过率约为 10^{-4} 量级。最后通过鬼像实验, 进一步证明了优化后的光机系统设计方法具有良好的杂散光抑制效果。

关键词: 空间探测相机; 杂散光; 仿真建模; 光线追迹; 点源透过率; 鬼像

中图分类号: TN202;O439;V423.4+2

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0501006

Stray light analysis and optimization design for optical system of space detection camera

SHU Zhengtong, HAN Zengchong, WU Yuting, LIN Zhiqiang, ZHANG Hao, WANG Min

(Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education), College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Because of the complexity of space light environment, suppressing stray light is particularly important to ensure the imaging performance of space cameras. The stray light analysis and suppression optimization design were carried out for the optical system of the space probe camera for wide-band imaging. The optomechanical model was established through the lossless data interaction between SOLIDWORKS and TracePro, and the stray light model was optimized from the surface characteristics, mechanical structure, lens transmittance and other aspects of the optomechanical material. Then, the forward and reverse directions were traced by the Lambert body light source, and the key surfaces of the system were sampled and analyzed in combination with the half-section diagram of the optomechanical model. The analysis results show that the point source transmittance of the optimized optomechanical system at the off-axis angle of $10.3^{\circ}\sim 15.4^{\circ}$ decreases by 66%~99.4% compared with that of the original system. The point source transmittance at the off-axis angle of more than 14.2° is close to the order of 10^{-4} , and the point source transmittance of stray light at the off-axis angle of 18.4° is about 10^{-4} . The ghost image experiment further proves that the optimized design of optomechanical system has good stray light suppression effect.

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-02-23

基金项目: 福建省科技重大专项专题项目 (2021YZ040012); 中央引导地方科技发展专项 (2020L3008); 福建省科技计划项目
高校产学研合作项目 (2019H6013)

作者简介: 舒政通 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电技术与仪器研究。E-mail: 2849667606@qq.com

通信作者: 王敏 (1963—), 女, 教授级高级工程师, 硕士研究生导师, 主要从事光电技术与仪器研究。

E-mail: mwang@fjnu.edu.cn

Key words: space detection camera; stray light; simulation modeling; ray tracing; point source transmittance; ghost image

引言

随着航天事业的快速发展,越来越多的航天器进入太空,空间探测相机作为探索太空的眼睛,发挥着至关重要的作用。对于空间探测相机来说最大的挑战就是杂散光问题,这是由于所处的环境条件严苛,容易受到太阳活动的影响。杂散光会增加探测器的输出噪声,降低相机系统的成像信噪比,会在像面形成“幽灵”般的鬼像以及光斑,大大削弱相机的探测能力,甚至光学仪器系统内部猛烈的杂散光线会直接破坏高灵敏度探测器^[1-2],因此,进行杂散光分析以及消杂光设计对空间光学系统来说必不可少。

20世纪90年代末,光学系统设计中杂光分析及抑制方法的研究伴随着各国对资源的强烈需求迅速发展起来,并就此类课题开发设立了如SIRTF、COBE和IRAS等著名的科研项目。在目前的研究中,多以ASAP、TracePro、Lighttools等高精度、高准确度且工程实用强的软件进行杂散光分析。常见的抑制手段主要包括:在光学镜片上加涂消光漆^[3]、结构零件消除杂散光(在光学腔体镜筒内壁喷砂氧化)^[4]以及在系统中加入遮光罩及挡光环^[5]。

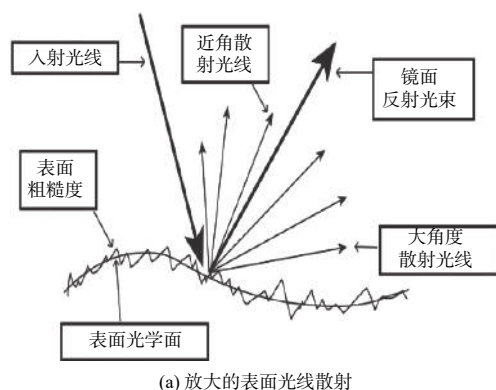
本文利用杂散光分析软件对成像质量良好的光学系统进行杂散光分析,设计相应的抑制杂散光的方法,并通过杂散光抑制评价方法判断所设计的抑制方式是否有效。主要通过三维建模平台SOLIDWORKS与杂光分析软件TracePro建立空间探测相机杂散光模型,并从光机表面特性、光机机械结构、镜片透过率等多个方面对光机模型进行优化设计。利用TracePro正反向光线追迹功能,精确找到光机系统内部发生一次散射的关键表面并进行重点采样分析,然后对优化前后的光机模型进行杂散光抑制评价分析,最后进行鬼像实验,进一步验证试制样机的杂散光抑制效果。

1 光学系统杂散光分析及抑制

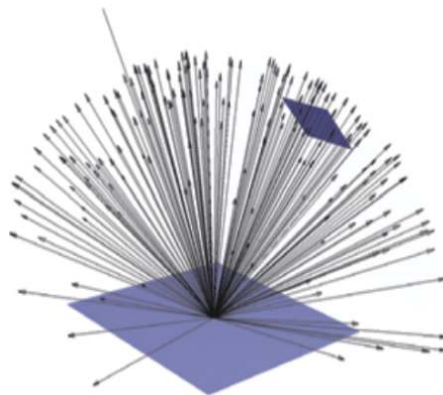
1.1 杂散光来源及抑制评价方法

杂散光主要分为外部非成像杂散光、成像杂散光和内部热辐射杂散光^[6]。系统外杂散光线透过光学表面时发生的多次反射、镜筒内壁和其他机械零件表面的散射以及残余的反射,最后到达像面形成外部非成像杂散光^[7-9]。成像杂散光是

指,视场内成像光线在光学元件表面多次反射后到达像面,形成鬼像或造成背景噪声的光线,可降低输出信号的信噪比,影响图像的对比度。对于红外成像系统而言,其内部元件在一定温度下会释放热辐射形成热辐射杂散光^[10]。光机系统结构内壁是由不同特性的非理想光滑表面组成,导致反射光线不规则地扩散开来,让本应在视场外的杂光重新经表面散射进入到成像视场内,如图1所示。



(a) 放大的表面光线散射



(b) 无数条表面光线散射

图1 非理想光滑表面的光线散射

Fig. 1 Light scattering from non-ideal smooth surfaces

分析杂散光传播路径与辐射能量衰减是以图1所示表面的散射特性为基础。表面的散射特性通常用双向反射分布函数BRDF(bidirectional reflectance distribution function)来表征,即散射光线通过BRDF在空间半球范围内来描述分布特性。现实中的表面多数凹凸不平,散射光在空间分布不均匀,BRDF不仅与入射光的入射方向、角度、波长有关,亦与观测散射光的角度有一些相互联系。系统表面会将某个方向的入射光反射到空间半球

的各个方向,不同方向反射的比率是不同的。我们用 BRDF 表示指定方向的反射光和入射光的比率关系, BRDF 定义为

$$f(l, v) = \frac{dL_o(v)}{dE(l)} \quad (1)$$

式中: f 即是 BRDF; l 为入射光方向; v 为观察方向, 也就是反射光方向; $dL_o(v)$ 为出射光从表面反射到 v 方向的微分辐射率; $dE(l)$ 为表面上来自入射光方向 l 的微分辐照度。 f 仅仅与材料表面本身的特性(反射率、透过率、吸收率、粗糙度等)相关。

本文设计的空间探测相机应用于可见光波段, 且成像杂散光也仅存在于特定的系统中, 故重点分析外部杂散光的影响。相比其他杂散光光源的强度, 太阳光的强度能够在不同离轴角对系统造成更为明显的影响, 所以只考虑太阳光为杂散光的主要来源^[11], 在进行模拟分析时采用朗伯体光源模拟太阳光。

当一个光机系统进行消杂光设计后, 需计算能进入系统内的杂散光能量, 对杂散光性能做出评估, 常用的评价方法有测量系统的杂光系数 V 、杂散光模型的 PST(点源透过率)以及辐照度分析图。本文在仿真模型各项材料表面属性设计准确的前提下, 利用 TracePro 输出的辐照度分析图计算系统 PST 值, 以此评定系统的杂散辐射水平。PST 是评价不同离轴角下光学系统消杂光能力的主要指标, 只表征系统本身抑制杂散光能力, 它与视场外杂散光源的强度无关^[12], 仅与光机系统的设计和性质相关。相机探测器灵敏度越高, 感应微弱光线信号的能力越强, 因此 PST 限定值越小, 整套光机系统对杂散光的抑制能力越好^[13]。

点源透过率 PST 有以下两种形式^[14]:

1) 归一化轴上点源透过率(R_{PSTN}), 可用下式表示:

$$R_{\text{PSTN}}(\phi) = \frac{P_d(\phi)}{P_d(0)} \quad (2)$$

式中: $P_d(\phi)$ 是离轴角为 ϕ 的点源落在探测器上的辐射通量; $P_d(0)$ 是位于轴上的同一点源落在探测器上的辐射通量。

2) 点源垂直照度透过率(R_{PSNIT}), 可用下式表示:

$$R_{\text{PSNIT}}(\phi) = \frac{E_d(\phi)}{E_i} \quad (3)$$

式中: $E_d(\phi)$ 是离轴角为 ϕ 的点源到达探测器系统像面上的辐照度; E_i 为点源在光学系统入瞳处的辐照度^[15]。

1.2 杂散光抑制方法

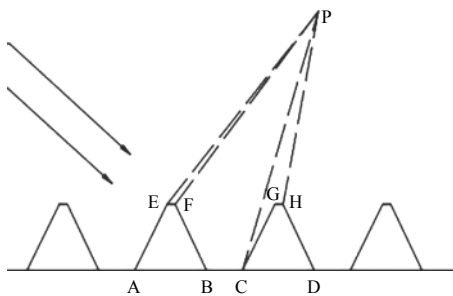
杂散光的来源因素有很多, 光学系统与机械结构这两部分对杂散光的产生有一定的贡献, 尤其是不同材料表面特性对杂散光路的形成有不同的作用。因此, 本文从光学系统设计、机械结构及表面特性这 3 个可控因素方面进行杂散光抑制优化设计, 以满足后续杂散光消除或抑制的需要^[16]。

本文采用的优化方法, 首先从光学系统设计入手, 增加镜片透过率, 除了选择优质透镜材料来提高透过率外, 还通过给透镜表面镀多层特殊增透膜, 减少这部分成像光线在透镜表面的反射、散射现象。本模型的光学元件均为透镜, 镀膜前通光表面透过率为 93%~94%, 本文结合目前传统镀膜工艺, 对透镜表面特性进行合理优化。改进前的模型按照传统方式镀单层增透膜, 透过率为 97%~98%, 通过对镀膜、蒸镀工艺进行探究, 本文使用的光学透镜采用镀多层增透膜设计, 透过率可达 99.5% 以上。

其次, 在机械结构方面进行杂散光抑制优化设计。通过寻找在光学系统中对杂散光比较敏感的中间结构, 设计消光纹来抑制杂散光, 使消光纹散射并反射大部分杂散光, 从而使其不能进入后面的光学系统或者最终不落在探测器表面。消光纹实物图及消光纹抑制杂散光示意图如图 2 所示。



(a) 消光纹实物图



(b) 消光纹示意图

图 2 消光纹实物图及消光纹抑制杂散光示意图

Fig. 2 Physical image of matt pattern and schematic diagram of matt pattern suppressing stray light

最后通过改变表面特性来减少内部杂散辐射。光机系统中机械结构件基本都是由金属加工制成, 一般加工完成后其表面呈银白色, 此时粗糙度很小, 银色光滑的表面具有很低的光吸收作用, 这种情况容易发生杂散光反射和散射。因此, 本文仿真改进后的光机系统的机械件表面, 采用阳极氧化着色发黑方式对机械件表面进行氧化染黑处理, 处理后的表面吸收率约为 96%。对光学透镜边缘进行黑色喷涂处理, 采用的是日本生产的消光漆 GT-7, 它是一种双组份环氧树脂涂料, 颜料是炭黑与氧化铁, 能有效吸收 99.8% 的杂散光, 使成像更为清晰^[17]。透镜喷漆后的成品图如图 3 所示。

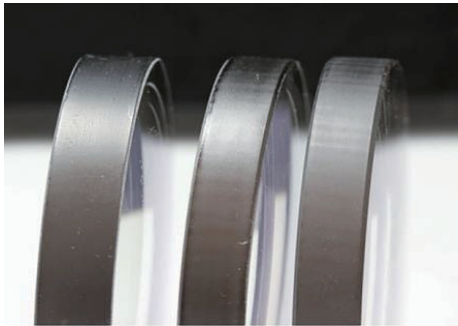


图 3 喷漆后的透镜
Fig. 3 Lens after painting

2 光机系统建模及杂散光分析

2.1 光学系统结构

空间探测相机光学系统采用 8 p 长焦结构^[18], 前组采用正透镜组, 以减小成像光束的口径, 后组采用负-正-负-正透镜组合, 改善场曲和倍率色差等轴外像差, 主要光学指标包括: 视场角为 19.6°, 相对孔径为 1:2.8, 畸变不大于 1%, MTF(光学传递函数) 在 110 lp·mm⁻¹ 处不小于 0.5。光学系统二维结构图如图 4 所示。

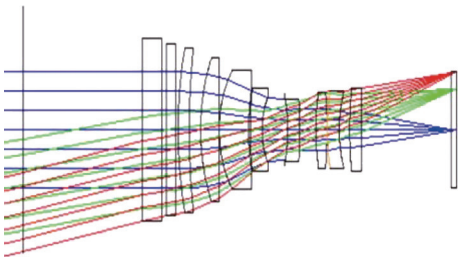
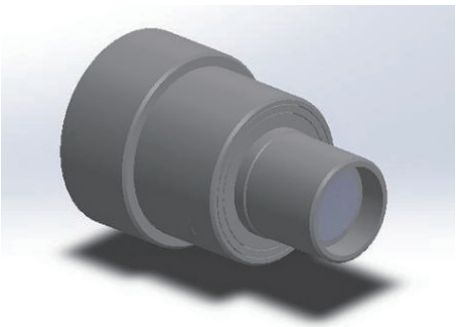


图 4 空间探测相机光学系统二维结构图
Fig. 4 Two-dimensional structure diagram of optical system of space detection camera

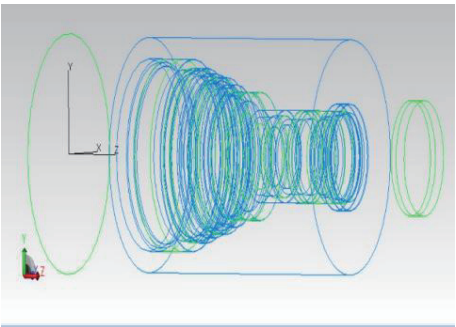
2.2 杂散光模型的建立

通过 SOLIDWORKS 对空间探测相机光机模型

进行初步建模, 如图 5(a) 所示。按照光学系统设计要 求, 对透镜、机械部件的材质作进一步结构处理, 再与 TracePro 光学仿真软件进行无损耗模型传输与数据交互, 建立杂散光模型, 如图 5(b) 所示。根据上述抑制手段, 对光学元件材料参数设置, 即用 ABg 模型给光机结构表面属性赋值处理。



(a) SOLIDWORKS 空间探测相机三维模型



(b) TracePro 空间探测相机杂散光模型

图 5 SOLIDWORKS 空间探测相机三维模型和 TracePro 空间探测相机杂散光模型

Fig. 5 3D model of SOLIDWORKS space detection camera and stray light model of TracePro space detection camera

2.3 光线追迹寻找关键表面

通过分析光学系统中关键表面和被照射面, 可以得到杂散光的传播途径。只有透镜反射或透射的光线照射到相应的机械表面, 在上面形成一次散射路径, 这样的表面才是关键表面。由于杂散光的能量经过多次散射有所衰减, 远小于一次散射后的杂散辐射能量, 所以本文在仿真建模分析杂散光过程中, 主要考虑一次散射后的杂散光对系统的影响。图 6 为 TracePro 软件正向光线追迹示意图。在模拟中发现光源表面出射的光线在经过光学系统时, 部分镜筒内壁会被直接照射到, 照射到的表面即为被照射面, 亦可能是产生杂散光的关键表面。记录所有被照射面, 通过反向光线追迹进一步确定关键表面。图 7 是反向光线追迹

示意图。将像面设置成表面光源,光源发出的光线从像面出发向前方传播,部分光线能够照射镜筒内壁表面,它们可以被探测器表面或像面直接“观察”到,即为寻找的关键表面。从模拟中可以发现,此时关键表面全部集中视场光阑之后,像面无法直接看到光阑之前的镜筒内壁表面,由此可知,对杂散光比较敏感的部分在光阑前后。

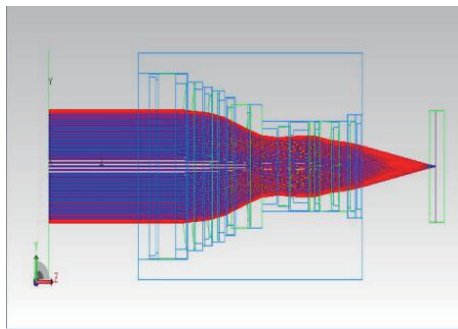


图 6 正向光线追迹示意图

Fig. 6 Schematic diagram of forward ray tracing

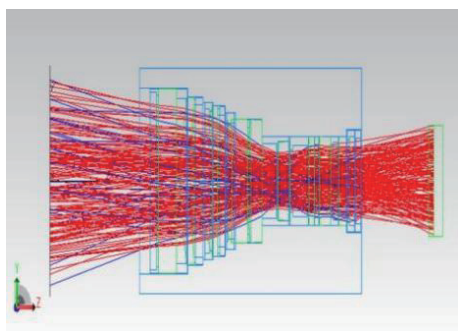


图 7 反向光线追迹示意图

Fig. 7 Schematic diagram of reverse ray tracing

通过比较并分析正向和反向光线追迹,且结合 SOLIDWORKS 半剖图可确定光源光线进入光机系统后,哪些面是一次散射关键表面,空间探测相机光机系统半剖图如图 8 所示。为抑制更多杂散光,对经表面属性改进后的杂散光模型中隔圈 4 和 5 作消杂光螺纹处理,如图 9 所示。

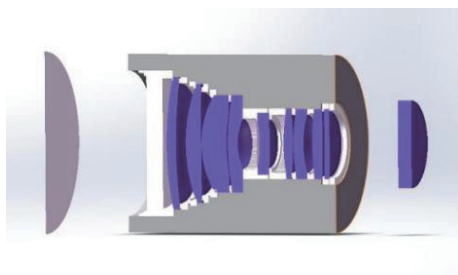


图 8 空间探测相机光机系统半剖图

Fig. 8 Half-sectional drawing of optomechanical system of space detection camera

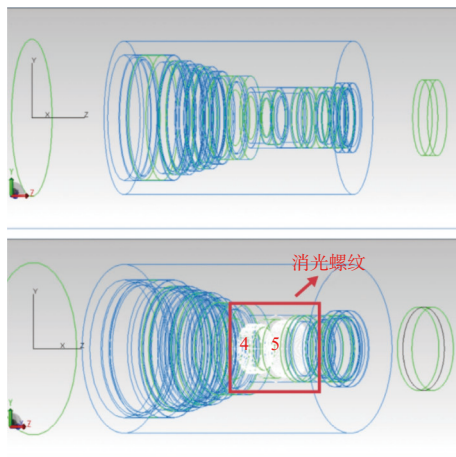


图 9 在隔圈 4 和 5 上增加消光螺纹

Fig. 9 Adding matt threads on spacers 4 and 5

2.4 重点采样及相关设置

Tracepro 对光学系统光线追迹时,光线数量越多,阈值越小,仿真结果相对越精确。因此,有必要对 Tracepro 杂光分析软件进行合理参数设置,保证数据结果正确性和真实性。对所有关键表面进行重点采样,增加表面一次散射到像面上杂散光线的数量,具体设置如图 10 所示。



图 10 重点采样设置

Fig. 10 Key sampling settings

除了设置重点采样外,Tracepro 光线追迹选项中门槛数值和总相交次数亦能提高分析结果的准确性和计算效率。在设置好门槛数值的前提下,模拟和分析光学系统中某个表面产生杂散光的贡献,固定散射次数,光线与面的相交次数也不变,这样可以排除高次散射光线以及无用的分析光线。本文 Tracepro 采用如图 11 门槛数值和光线与

面相交次数设置。

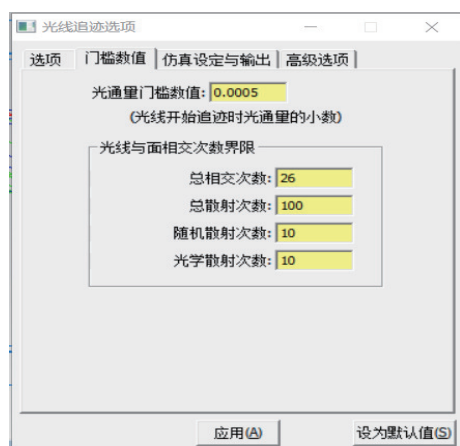


图 11 门槛数值和总相交次数设置

Fig. 11 Threshold value and total number of intersection settings

空间探测相机光学系统有 8 块光学镜片和 2 片保护窗玻璃、1 个光源表面、4 个散射表面、1 个像面。针对关键表面,在考虑一次散射的情况下,光线与面总相交 26 次。若总相交次数大于 26 次,则多次散射光线会被纳入计算和分析;反之,则光线到达像面前已停止计算。

2.5 杂散光分析

通过前边对关键表面的确认以及消光纹的加入,利用 TracePro 软件的门槛数值设置对关键表面进行重点采样追迹,从边缘半视场角 9.8° 开始进行光线追迹。分析像面的照度图,发现杂散光源离轴角在 $10^\circ \sim 18.4^\circ$ 之间,光源表面发出的光线中存在部分杂散光能够到达关键表面,并经一次散射落到探测器表面。在离轴角 $9.8^\circ \sim 18.6^\circ$ 之间,以 0.3° 离轴角为步距依次对视场外杂散光进行光线追迹,分别统计入射到空间探测相机光学系统入瞳位置的光线能量辐照度与像面上的辐照度,利用公式(2)计算改进前后模型各离轴角对应的 PST 值。由于蒙特卡洛分析具有随机性,因此,由进行改进后 3 次实验求得的平均值得到的数据绘制 PST 曲线图,如图 12 所示。

从图 12 中可以看出,优化后的 PST 值急剧下降,比较改进前后系统的 PST 曲线,发现在离轴角 $10.3^\circ \sim 15.4^\circ$,优化设计后的光机系统对小角度入射的杂散光起到明显且良好的抑制作用,整个系统的点源透过率 PST 值在这个角度范围内比改进前下降了 $66\% \sim 99.4\%$ 。随着离轴角的继续扩大, PST 曲线急剧下降,其值越来越小,分析这段区间的 PST 曲线可知,视场外离轴角大于 14.2° 的杂散

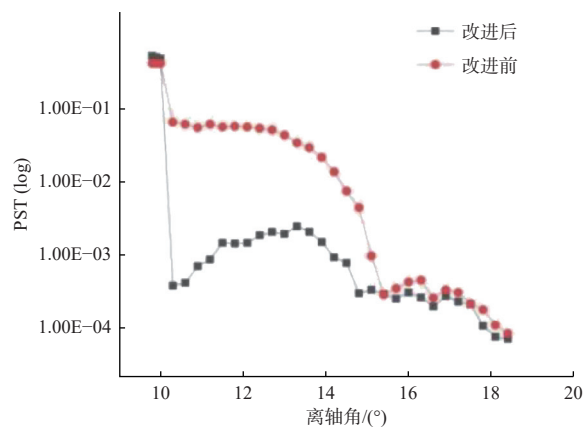


图 12 PST 和杂散光源离轴角的关系曲线图

Fig. 12 Relation curves between PST and off-axis angle of stray light source

光光源发出的光线,经过多次散射,其能量得到一定衰减,像面杂散光的 PST 值接近 10^{-4} 量级。在离轴角 18.4° 杂散光的 PST 约为 10^{-4} 量级,此后,离轴角的杂散光无法影响本文相机光机系统的正常工作。静止轨道上传统星载相机在未加装遮光罩情况下,不同离轴角时系统 PST 值在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 量级,并且 10^{-4} 以下量级是大视场遥感相机针对 30° 以上离轴角杂散光线的 PST 值。由于系统的 PST 仅和系统本身对光线能量的削弱能力有关系,因此在有限尺寸下,本文优化设计的空间探测相机系统具有较强的消杂光能力,能够在复杂照度环境下工作,验证了本文空间探测相机光机系统杂散光抑制设计的可行性。

3 空间探测相机鬼像实验分析

试制装配后的空间探测相机样品实物如图 13 所示。

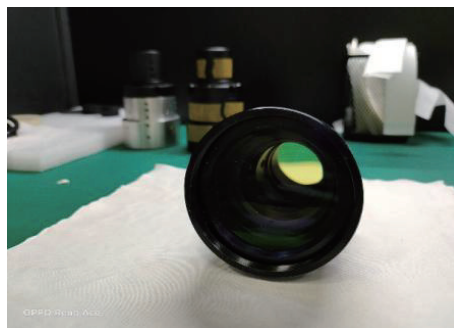


图 13 空间探测相机试制样品

Fig. 13 Prototype of space detection camera

点源透过率 PST 仅用来表征系统对视场外杂散光的抑制能力,而视场内在成像波段范围的光线基本都能够通过正常成像路径到达探测器表面

或像面。在实际生产加工过程中, 光学成像元件本身材质表面的工艺参数不会趋于软件建模得到理想的数据, 再加上装配过程中人为产生的误差, 容易形成鬼像或造成背景噪声, 从而影响图像的对比度。因此, 有必要对镜头进行鬼像实验, 进一步验证试制后的样机对杂散光的抑制能力。

3.1 鬼像实验

搭建的测量实验平台如图 14 所示。使用 5 mW 低功率激光器作为光源, 激光器距离相机入瞳位置为 1 175 mm, 通过平移和旋转光源控制入射主光线绕镜头入瞳中心旋转, 观察不同视场角下所成图像。在暗室中开启激光器, 分别观察不同入射角下所成图像, 结果如图 15 所示。根据所成实像位置关系, 在 $\pm 2.8^\circ$ 入射角下, 结合所成鬼像图像主光源位置, 用黑色贴纸贴在靶面的半边, 对靶面主像位置进行遮挡处理, 如图 16 所示, 观察在亮暗条件下遮挡后的成像情况, 结果如图 17 所示。

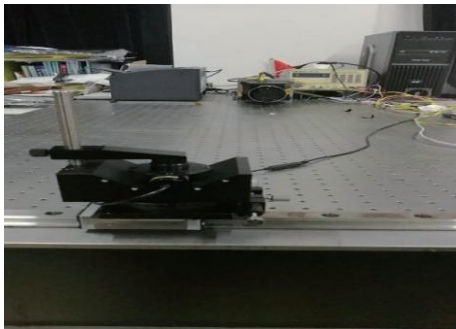


图 14 测量实验图

Fig. 14 Physical drawing of measurement experiment

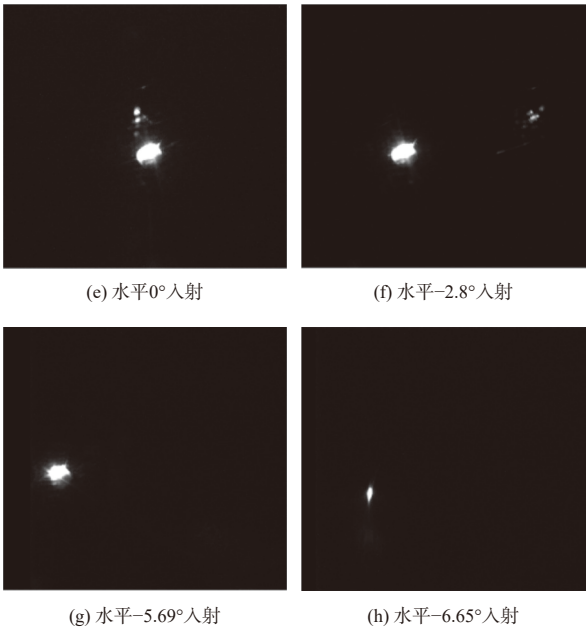
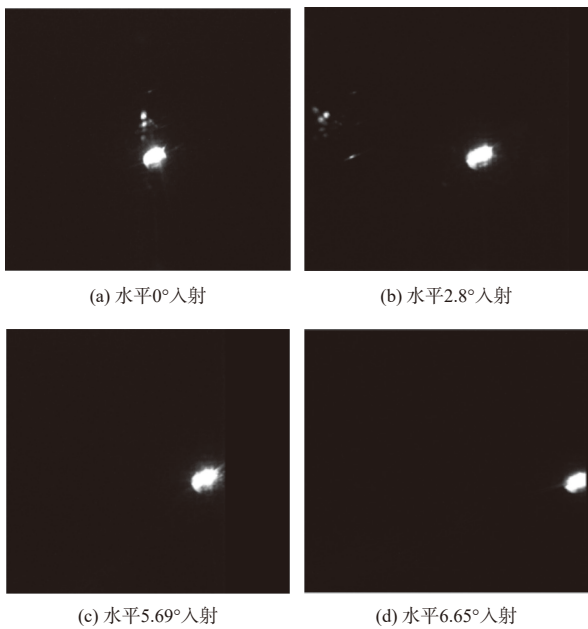
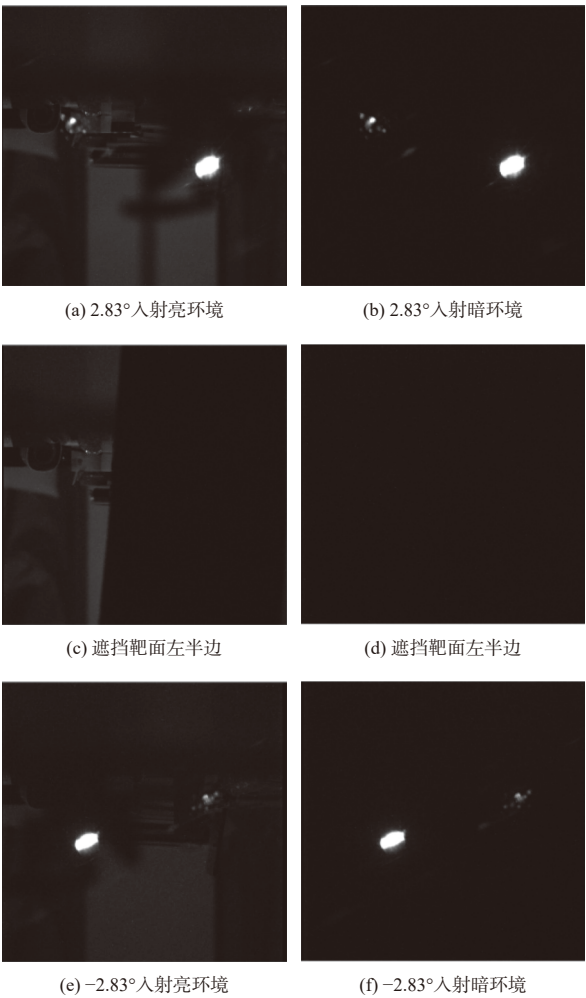
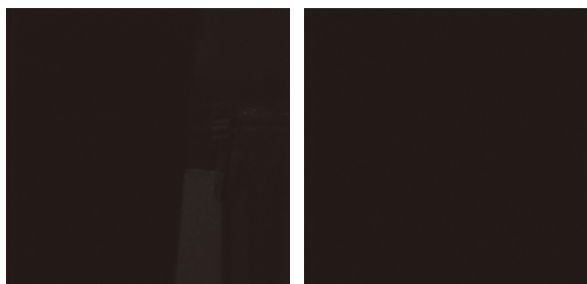


图 15 不同入射角的鬼像实验图像

Fig. 15 Experimental images of ghost image at different incident angles





(g) 遮挡靶面右边

(h) 遮挡靶面右边

图 16 被掩盖的靶面左半边

Fig. 16 Left half side of masked target surface



图 17 靶面遮挡实验结果

Fig. 17 Test results of target surface occlusion

3.2 实验结果及分析

从图 15 可知, 激光正入射到光学系统时, 透射光聚焦点正好位于视场中心。Zemax 模拟靶面反射像示意图如图 18 所示。从图 18 可以看出, 随着光源入射角度的增大, 透射光聚焦点与鬼像中心的偏移量增大, 当光源入射角度增大到一定角度时, 鬼像会移出视场外, 而透射光聚焦点仍然在视场内。通过 Zemax 模拟仿真可初步判断, 该鬼像是由于靶面保护玻璃不断反射, 依次反射出一、二、三次反射像等造成的, 如图 19 所示。从图 19 中可知, 无镀膜情况下靶面保护玻璃 K9 透射率为 93%, 反射率为 7%, 计算得出主像的能量为 86.46%, 一次反射像能量为 0.423%, 二次反射像能量为 0.002 1%, 三次反射像能量为 0.000 01%。本系统镀增透膜之后透过率在 99.5% 以上, 忽略吸收损失, 则透镜与靶面玻璃表面残余反射引起的鬼像能量只会更低。从图 19 中还可以看出, 随着光源角度的增大, 鬼像也由原来的一簇光斑变成离散的散斑, 由三次反射形成的系统鬼像在测试中呈现良好的趋势(如图 15 所示), 正方向 5.69° 和负方向 5.69° 时鬼像处于靶面临界位置, 正方向 6.65° 和负方向 6.65° 时鬼像消失。

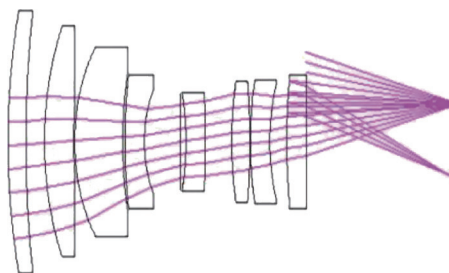


图 18 Zemax 模拟靶面反射像

Fig. 18 Target surface reflection image simulated by Zemax

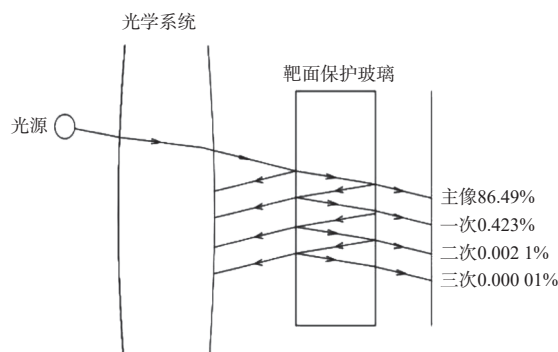


图 19 靶面鬼像分析图

Fig. 19 Analysis diagram of ghost image on target surface

如图 17 所示, 在对所成像在靶面的主像位置进行遮挡后, 不再有光线进入靶面, 靶面将不再反射, 对应的三次反射像也随之消失, 由此进一步确认杂散光是由靶面保护玻璃反射造成的。由此可见, 本文给出的探测相机光学系统在视场内的目标成像质量满足要求, 试制后的样机对杂散光有良好的抑制能力。

4 结论

本文概述了一个空间探测相机光学系统杂散光优化设计方法, 首先结合软件进行仿真建模, 再通过仿真模拟寻找最佳抑制手段和优化设计方案, 然后通过分析软件对杂散光模型的 PST 进行分析评价, 最后对试制样机进行鬼像实验, 进一步验证系统的杂散光抑制能力。从评价结果可以看出, 本文设计的抑制杂散光方案具有可行性, 优化后的光机系统具有良好的杂散光抑制效果。利用光学结构与机械结构关键表面散射特性相结合的 Tracepro 杂散光模型分析方法, 对优化光学系统和选择杂散光抑制措施具有指导意义。

参考文献:

- [1] 刘洋, 方勇华, 吴军, 等. 中红外平面光栅光谱仪系统杂

- 散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1164-1171.
- LIU Yang, FANG Yonghua, WU Jun, et al. Stray light analysis for a mid-infrared plane grating spectrometer system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1164-1171.
- [2] 李晖, 李英才, 薛鸣球. 光学系统黑斑法杂光系数和 PST 间的联系[J]. *光子学报*, 1996, 25(10): 920-923.
- LI Hui, LI Yingcai, XUE Mingqiu. Relationship between heterochromatic coefficient and PST by black spot method of optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25(10): 920-923.
- [3] 宋延松, 杨建峰, 李福, 等. 基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(19): 84-92.
- SONG Yansong, YANG Jianfeng, LI Fu, et al. Method of controlling optical surface roughness based on stray light requirements[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 84-92.
- [4] 孙林. 成像光学系统杂散光系数分析与计算[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- SUN Lin. Analysis and calculation of the veiling glare index in optical systems[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [5] 李俊杰, 孙剑, 赵珩翔, 等. 星载多普勒差分干涉仪杂散光特性与抑制[J]. *光子学报*, 2022, 51(11): 1130002.
- LI Junjie, SUN Jian, ZHAO Hengxiang, et al. Stray light characteristics and suppression in space-borne Doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 1130002.
- [6] HENDRIX J L, SCHWEYEN J C, ROWE J, et al. Ghost analysis visualization techniques for complex systems: examples from the NIF final optics assembly[J]. *SPIE*, 1999, 3492: 306-320.
- [7] 李芸, 相里斌, 李立波. 一种新型空间相机遮光罩的设计与仿真[J]. *光电工程*, 2010, 37(7): 41-44.
- LI Yun, XIANGLI Bin, LI Libo. Design and simulation of a new type of space camera hood[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7): 41-44.
- [8] 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.
- YANG Lin, LI Da, CUI Tiangang, et al. Stray light measurement and elimination in ultraviolet band imaging detection by space solar telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1456-1463.
- [9] 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: 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2016.
- LU Qiang. Research on stray light analysis and application technology of geosynchronous orbit space camera[D]. Shanghai: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2016.
- [10] 孙林. 成像光学系统杂散光系数分析与计算[D]. 吉林: 长春理工大学, 2019.
- SUN Lin. Analysis and calculation of the veiling glare index in optical systems[D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [11] 陈醒, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. *中国光学*, 2019, 12(3): 678-685.
- CHEN Xing, HU Chunhui, YAN Changxiang, et al. Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 678-685.
- [12] 张燕. 杜瓦中冷光阑的杂散光抑制研究[J]. *红外*, 2010, 31(7): 1-8.
- ZHANG Yan. Study of stray light suppression by cold shield in Dewar[J]. *Infrared*, 2010, 31(7): 1-8.
- [13] 邱瑜, 秦龚龙, 王世华. 用激光散射法非接触在线检测表面粗糙度[J]. *工具技术*, 2000, 34(4): 36-38.
- QIU Yu, QIN Gonglong, WANG Shihua. Non-contact in-process measuring surface roughness by laser scattering measuring device[J]. *Tool Engineering*, 2000, 34(4): 36-38.
- [14] 黄强. 空间光学系统的杂散光分析[J]. *红外*, 2006, 27(1): 26-33.
- HUANG Qiang. Analysis of stray light in space optical system[J]. *Infrared*, 2006, 27(1): 26-33.
- [15] 尚玲. 天基可见光探测相机光学系统设计及杂散光分析[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2011.
- SHANG Ling. Optical system design and stray light analysis of a space-based visible camera[D]. Xi'an: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2011.
- [16] 舒星星. 可见光光学系统杂光分析及抑制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- SHU Xingxing. Analysis and suppression of stray light in visible light optical system[D]. Beijing: University of

- Chinese Academy of Sciences, 2015
- [17] 李春菊. GT-7漆墨涂透镜的工艺[J]. [中国高新技术企业](#), 2012(21): 75-76.
- LI Chunju. GT-7 the process of paint ink coated lenses[J]. [China High Technology Enterprises](#), 2012(21): 75-76.
- [18] 陈玉芳, 吴振聪, 王敏. 高分辨率微型星载相机光学系统的设计及应用[J]. [应用光学](#), 2020, 41(2): 235-241.
- CHEN Yufang WU Zhencong, WANG Min. Design and application of optical system for high-resolution micro space-borne camera[J]. [Journal of Applied Optics](#), 2020, 41(2): 235-241.