

空间碎片天基探测相机光学系统设计

佟静波, 张宏伟, 吴建福

(北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘要: 论述了空间碎片探测的方式和特点。通过讨论天基光学探测系统的应用要求, 确定了系统的技术指标, 实现了对亮度不小于六等星目标的探测, 目标定位精度可达 $3.5''$ 。通过分析, 在设计过程中有效控制了视场内强光源形成的杂光影响, 实现可同时观测亮暗目标的性能。系统焦距 82 mm, 入瞳直径 70 mm, 视场 $10^\circ \times 10^\circ$, 在 450~900 nm 谱段范围, 2 600~9 800 K 色温范围内, 0.85 视场内像点能量质心偏差优于 $3 \mu\text{m}$, 各色温之间质心偏差优于 $1 \mu\text{m}$, 2×2 像元内弥散斑能量集中度不大于 75%, 3×3 像元内弥散斑能量集中度不小于 90%。采用遮光罩和镜头结构消除杂光, 通过仿真分析表明在太阳抑制角大于 50° 时, 系统 PST 不高于 10^{-8} 量级, 可以满足暗目标观测要求。

关键词: 光学设计; 天基探测; 杂光分析

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S229004

Optical system design of space-based detection camera of space debris

Tong Jingbo, Zhang Hongwei, Wu Jianfu

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract: The way and characteristics of space debris detection was analyzed. Based on the discussion of the requirements of space-based optical detection system, the system's technical specifications were presented. The detection of brightness higher than sixth-magnitude stars target was achieved, the target positioning precision could reach $3.5''$. Through the analysis, the influence of stray light which produced of the strong light source in the field of view was controlled in the design process, and the performance of the bright and dark objects could be observed simultaneously. Technical specifications of optical system were: 82 mm effective focal length; 70 mm pupil diameter; $10^\circ \times 10^\circ$ field of view; under the condition of 450–900 nm wavelength range, 2 600–9 800 K color temperature range, the deviation of energy centre is better than $3 \mu\text{m}$ in the field of view of 0.85, the deviation of energy centre between the various temperature color is better than $1 \mu\text{m}$, meanwhile, spot diagram energy concentration is greater than 75% in the 2×2 pixel and the spot diagram energy concentration is not less than 90% in the 3×3 pixel. The requirements of dark targets observation can be met by the sun to suppress the angle is greater than 50° , and the PST is not higher than 10^{-8} which are indicated by the simulation and analysis with the design of baffles and camera lens structures.

Key words: optical design; space-based detection; stray light analysis

收稿日期: 2016-08-24; 修订日期: 2016-09-27

作者简介: 佟静波(1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光机系统设计等方面的研究。Email: tjbc1@sohu.com

0 引言

航天技术的日益发展有利地促进了世界各国的经济建设和社会进步,但与此同时由于航天器发射数量的增加,失效的航天器,以及脱落、碰撞、爆炸等形成的空间碎片的数量也在逐年增加。空间碎片的存在严重地威胁着在轨运行航天器的安全,为了安全、持续地开发和利用空间资源,就必须不断提高对空间碎片的跟踪监视技术,增强对空间碎片环境的分析预测能力^[1-2]。

探测识别是掌握空间碎片分布情况的基础,因此探测识别是空间碎片研究中一项至关重要的工作。空间碎片的探测分为地基观测和天基观测两类,其中质量很大的大碎片主要在地面观测,测量方法主要是雷达观测、可见光观测等。对于数量众多的中小空间碎片,地面测量由于受观测过程中大气传播抖动、蒙气差、电离闪烁等因素的影响,使得对小尺度的目标以及目标细节的观测受到限制,所以中小空间碎片主要依赖天基探测^[3]。为了克服地基系统的各种缺点,美国等航天大国部署了天基空间目标监视系统。该系统包括一个专用天基传感器,它被称为天基可视传感器(SBV, Space Based Visible)^[4-5]。

天基探测设备包括光学观测和雷达观测。在天基探测中,大尺寸目标的发现和测量,比较有效的方法是雷达观测^[6],但当目标尺寸较小时,雷达系统一般不能发现目标,此时只有光学遥感探测才能发现目标和成像。对于光学探测系统,为了使系统具有更强的探测能力,捕获更远、更小的物体,光学系统需要有更宽的谱段范围,更大的入瞳直径以及更长的焦距,并且为了消除视场内和视场外强光源的影响,观测系统在遮光罩设计、结构设计和光学设计过程中需特别注意优化消杂光设计。文中通过综合分析,确定了系统的设计指标,通过对光机系统的设计分析和消杂光优化设计,使所设计的系统在视场内有较亮目标时,也具有探测六等星亮度物体的能力,物体方位确定精度可达 3.5”。

1 光学系统研究

1.1 光学系统参数与技术指标

天基探测相机的工作原理主要是通过星图匹配

图像中恒星,排除恒星等不关注的目标,提取空间碎片信息。系统的技术参数和技术指标主要由空间碎片的亮度、恒星的星等、恒星和物体的光谱分布以及所选取的光学传感器的参数等因素决定^[2,6]。

(1) 视场角与焦距

系统视场角决定了图像所能观测的范围和图像中含有的恒星数量,此相机有光轴指向引导,为了实现星图匹配识别、排除恒星,要求每一时刻视场中至少要有三颗以上的星成像,并考虑相机可以实现星上光轴标定等因素,在某一时刻视场中需要至少有五颗星成像。

虽然在探测器尺寸和相机视场角确定的情况下,相机焦距也随之确定,但是对于天基探测相机,焦距会决定观测物体的定位精度,所以在确定焦距和视场角时,需综合考虑以上因素。

要求探测相机具有探测六等星照度的能力,根据史密森天文台星表(SAO 星表)中的恒星进行统计不小于六等星亮度的恒星一共为 5 103 颗。根据球面公式,10°×10°视场内亮度高于六等星的平均恒星数为 10.4 颗^[2]。

恒星探测概率是在天球恒星分布的基础上,星敏传感器视场大小、视场指向和星等探测灵敏度的函数。由于天球恒星分布近似服从泊松分布,视场内探测到 N 颗星的概率为:

$$P(N=K)=1-\sum_{k=0}^{N-1} \frac{\exp(-N_{2\omega})(N_{2\omega})^k}{K!} \quad (1)$$

式中: N 为视场 2ω 中出现的导航星个数(N 近似服从均值为 $N_{2\omega}$ 的泊松分布); $N_{2\omega}$ 为大于给定星等的视场内的平均恒星数目。

根据计算视场内出现 6 等星以上恒星个数概率分布如表 1 所示。

表 1 视场中亮度高于 6 等星的恒星出现不同数量时概率
Tab.1 Probability of varying the number of stars in the field of view with the brightness above sixth-magnitude stars

Number of stars	$X \geq 3$	$X \geq 4$	$X \geq 5$
Probability	0.994	0.985	0.969

通过计算可得,当视场为 10°×10°时,视场内出现 3 颗亮度高于 6 等星的恒星概率为 99.4%,出现 5

颗星的概率为 96.9%, 可以满足要求。

探测器选取像元数量 $1\ 024 \times 1\ 024$, 像元尺寸 $14\ \mu\text{m} \times 14\ \mu\text{m}$ 的 CMOS 探测器, 经过计算得系统焦距为 82 mm。像点质心位置确定可精确到 1/10 个像元, 则物体位置指向精度为 3.5"。

(2) 谱段范围

探测相机的谱段范围选择主要综合考虑探测物体和恒星的谱段, 以及所选探测器对各波长的响应^[7]。由于观测物体基本都是反射太阳光, 并且可能物体表明特性差异较大, 所以谱段尽可能的选取宽一些。同一视星等下, 恒星具有不同的色温, 不同色温恒星具有不同的峰值波长, 为了使提高辐照度的转化效率, 恒星谱段也不适宜选取太短。综合考虑探测器响应, 最终谱段范围选取为 450~900 nm。

(3) 入瞳直径

入瞳直径的大小直接决定系统入射能量的多少, 它主要由目标物体辐射特性、探测器电子学特性决定。为了求得系统入瞳直径, 需先确定系统信噪比阈值。

根据系统捕获概率和虚警率数值公式

$$P_D = 1 - \Phi\left(\frac{Th - \mu}{\delta} - \text{SNR}\right) \quad (2)$$

$$P_{FA} = 1 - \Phi\left(\frac{Th - \mu}{\delta}\right) \quad (3)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为正态分布随机变量的概率积分函数; δ 为背景高斯噪声均值; μ 为背景高斯噪声的均方差估计值。

计算可得当 $P_{FA} = 10^{-5}$, $P_D = 95\%$ 时, 信噪比 $\text{SNR} = 5.91$, 故取信噪比阈值 $\text{SNR}_{th} = 6$ 。

综合考虑碎片目标辐射特性、探测器电子学特性、光学系统透过率等因素, 可得公式^[2]

$$D \geq \left[\frac{\text{SNR}_{th}^2 + \sqrt{\text{SNR}_{th}^4 + 4\text{SNR}_{th}^2(B + N_c^2)}}{2 \times E_m \times \tau \times \frac{\pi}{4} \times t \times \frac{1}{E_{ph}} \times QE} \right]^{1/2} \times \frac{d}{a} \quad (4)$$

式中: SNR_{th} 为信噪比阈值; B 为非抑制杂光辐射在单个像元上产生的电子数; N_c 为噪声电子数; E_m 为目标在入瞳处的辐照度; E_{ph} 为单个光子的能量; τ 为光学系统透过率; QE 为 CMOS 传感器量子效率; a 为像元边长; d 为单视场像点直径。

根据分析, 取目标在入瞳处照度为六等星照度, 成像弥散斑为 3×3 像元, 光学系统透过率 0.8, 非抑

制杂光辐射在单个像元上产生的电子数约为成像像点电子数的 10^{-6} , 计算可得相机入瞳直径取 70 mm。

(4) 光学系统成像质量要求

天基探测相机的输出图像主要用于相关算法解算, 排除恒星等不关注目标, 提取空间碎片位置等信息。为了提高恒星位置和目标位置提取精度, 与一般成像系统相比, 探测相机光学系统在具有一定的空间分辨率的情况下进行散焦, 综合考虑算法精度和离焦后恒星信噪比下降问题, 最终选定最常用的 3×3 像元的弥散斑大小作为成像质量评价标准。

1) 形状及能量分布

当光学系统对来自无穷远的点光源成像时, 落在最佳像面上的弥散圆形状应尽量接近圆形, 其能量分布应尽量接近正态分布。

2) 对弥散斑能量集中度要求

在 2 600~9 800 K 色温范围内, 在 0.85 归一化视场内, 像面上弥散斑集中在 $28\ \mu\text{m} \times 28\ \mu\text{m}$ 范围内的能量不大于总能量的 75%, 集中在 $42\ \mu\text{m} \times 42\ \mu\text{m}$ 范围内的能量不小于总能量的 90%。

3) 对弥散斑能量质心偏差要求

在 2 600~9 800 K 色温范围内, 在 0.85 归一化视场内, 像面上形成的弥散圆均应满足: 各色温所得弥散斑能量质心与无像差时理想成像位置之间的距离 $\leq 3\ \mu\text{m}$; 各色温恒星光所得弥散斑能量质心之间的距离 $\leq 1\ \mu\text{m}$ 。

1.2 光学系统分析

(1) 视场内消杂光分析

对于天基探测相机, 需具有观测亮度较暗物体的能力, 所以需在各设计阶段都做好杂光抑制措施。在光学设计阶段, 主要需考虑的是视场内亮光源形成的杂光抑制设计。

由于探测空间碎片时, 可能出现亮度远高于六等星的卫星、行星或目标物体进入视场。如果在光学设计阶段杂光抑制设计考虑不充分, 不仅会降低目标与背景的对比度, 降低光学系统的信噪比, 严重时系统电学部分可能将入射到图像探测器上的杂散光像错误解读为恒星像, 或产生更加严重的鬼像。为了在光学设计阶段消除视场内亮目标源的影响, 需在设计过程中考虑以下因素

1) 避免平行光路中出现平板玻璃

根据鬼像形成原理,当物体较亮,曝光时间较长时,如果平行光路中出现平板玻璃,会导致鬼像的产生。

由于空间抗辐照要求,光学系统第一片玻璃必须使用具有一定抗辐照能力的玻璃材料,例如石英玻璃、K509 和 BK7G18 等材料,由于材料总类有限,当光学系统设计难度较高时候,很难保证第一片透镜使用以上材料,为了达到抗辐照的目的,通常会加入一片平板抗辐照玻璃。如果相机视场内出现较亮物体,这片平板玻璃会造成像面存在鬼像。其产生的主要原因是所使用的传感器感光面不是完全 100%吸收的表面,由于它的微观结构决定了其表面是具有 10%~15%反射率的漫反射表面。根据光路可逆原理,当成像光束被反射后,经过光学系统一系列透镜会以平行光入射至窗口玻璃,经过镜面反射在光轴对称位置形成清晰鬼像。

为了避免此问题,抗辐照窗口玻璃需设计成带有一定曲率的弯月透镜,其自身光焦距很小,对系统成像质量影响很小,窗口玻璃初始最小曲率半径可根据以下公式可求得,

$$\frac{D}{2f_2'} = \frac{R}{|f_1' - f_2'|} \quad (5)$$

$$f_1' = -\frac{f_1' f_2'}{\Delta} \quad (6)$$

式中: D 为入瞳直径; R 为所期望的窗口玻璃形成的杂光弥散斑半径; f_1' 为窗口反射面焦距; f_2' 为光学系统焦距; Δ 为光学间隔。后期还需通过杂光分析仿真验证其有效性。

2) 控制透镜表面入射角度

当较亮物体的成像光经过探测器表面反射后,会入射至各透镜表面,经过透镜表面反射后会在探测器表面形成杂散光。此类杂散光照度相对于鬼像会弱很多,但如果物体较亮时,并且杂光在像面覆盖范围较小,依然会对观测六等星造成一定影响。为了避免此类杂光,需在设计时控制各透镜表面光线的入射角度,使反射光在像面形成的杂光具有较大的尺寸,最终可通过减底校正标定图像消除影响。

因此在光学系统设计过程中,需根据避免透镜表面反射光线会聚的相关公式, $YNI > 1$ 和 $I/Ibar > 1$ 对光学系统进行一定控制^[8]。

YNI 主要反映的是像面轴上点的反射杂光大小; $I/Ibar$ 主要反映的是轴外视场的变化。式中: N 是物空间的折射率,为透镜折射率或真空折射率; Y 是近轴光线在入射面的入射高; I 是中心视场边缘入射光线在入射面的入射角。 $Ibar$ 是轴外视场主光线在入射面上的入射角。

这里需注意, YNI 与 $I/Ibar$ 是为了使运算简单而取的近轴解,所以这两个值只能作为设计参考,当这两个值都大于 1,可以说明镜面反射杂光已经校正的很好,但如果二者都小于 1,并不能说明杂光消除效果很差,此时,需利用杂光分析软件代入 CMOS 探测器反射特性,考察透镜表面反射光线形成的杂光在像面的状态。

(2) 光学结构设计原理

通过分析天基探测光学系统的技术指标可知,光学系统具有较大相对孔径和较宽的谱段范围,并且为了得到较高精度的质心位置,对垂直色差和轴外像差要求较非常严格。典型的双高斯对称物镜可使垂轴像差自动校正,但轴向像差相互叠加,本文以双高斯系统为初始结构,通过在前后各组加入相关透镜组,有效的提高了系统校正球差、慧差的能力^[9]。通过在前组加入双分离结构,可以有效校正系统高级球差与高级慧差,并且在最前端加入抗辐照窗口玻璃改进的凸面朝向光阑的弯月透镜,不仅可以消除平板窗口的杂光影响,还可以起到校正一定慧差的作用。通过后组加入正光焦距弯月透镜,有效的减小了系统高级球差,并使其弯向像面,自身产生较小球差,此处需注意,靠近像面的弯月透镜易产生照度较高杂光,设计时尽量增大弯月透镜曲率半径。为了校正色差,特别是二级光谱,系统自身选用了双胶合透镜结构型式和德国 SCHOTT 公司的特殊色散玻璃作为透镜材料。最终光学系统结构型式如图 1 所示,共 10 片透镜,系统长度 175 mm。

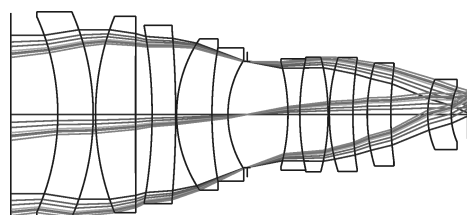


图 1 光学系统图

Fig.1 Layout of optical system

(3) 成像质量评价

在成像像质方面,分别给出了系统点列图、能量集中度曲线、各色温质心位置偏差值。由于色差校正较好,所以各色温下成像质量一致性较好,由于篇幅所限,这里只给出 2 600 K 和 9 800 K 两色温下成像质量值。同时还给出了 9 个单谱线质心位置在各归一化视场下的最大偏差值。

在像面杂散光评估方面,利用杂光分析软件进行仿真,分析了视场内单视场的杂光情况,确定了在观测六等星暗目标时,视场内允许出现的点源强光源星等照度。

1) 点列图如图 2~3 所示。

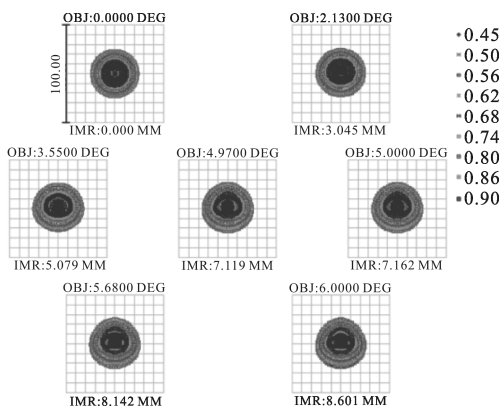


图 2 2 600 K 色温点列图

Fig.2 Spot diagram for 2 600 K colour temperature

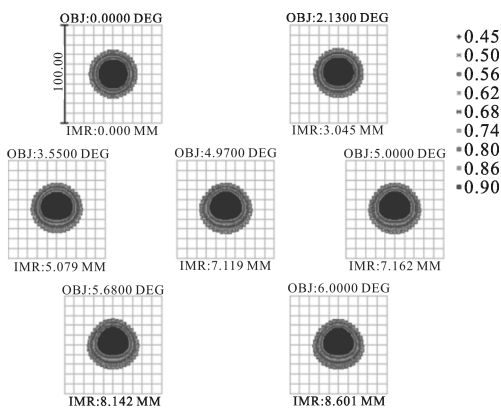


图 3 9 800 K 色温点列图

Fig.3 Spot diagram for 9 800 K colour temperature

2) 能量分布曲线如图 4~5 所示。

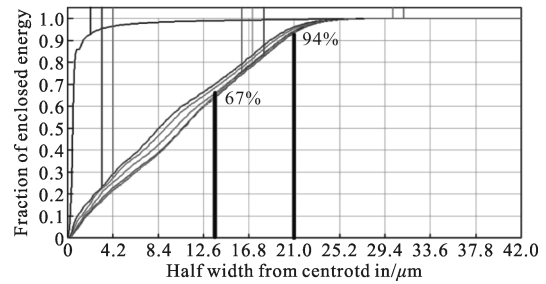


图 4 2 600 K 色温环内能量分布曲线

Fig.4 Curves of concentration energy for 2 600 K colour temperature

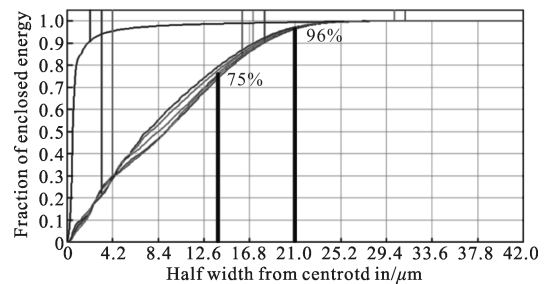


图 5 9 800 K 色温环内能量分布曲线

Fig.5 Curves of concentration energy for 9 800 K colour temperatur

3) 质心位置偏差如表 2~5 所示。

综上所述,光学系统在 0.85 视场内环内能量分布满足 28 μm×28 μm 范围内的能量不大于总能量的 75%,42 μm×42 μm 范围内的能量不小于总能量的 90%的要求。弥散斑能量质心与理想像高之差在 2 600 K 色温 0.5 视场偏差值最大约 1.1 μm,各色温之间弥散斑质心位置偏差不大于 0.3 μm,均满足指标要求。0.85 视场内,单波长之间质心位置偏差最大值为 2.1 μm。

4) 杂光分析

利用杂光分析软件,对某一入射角度光线进行杂光分析,设置各透镜镀减反膜反射率 0.5%,镀滤光膜表面反射率为 5%,CMOS 传感器表面反射率 15%。

通过分析可知,各透镜表面综合形成的杂散光无会聚现象,像面 10°圆视场成像范围内杂光照度

表 2 2 600 K 色温时能量质心位置和偏差

Tab.2 Energy centroid position and aberration of 2 600 K colour temperature

Technical paramete	Normalized field of view					
	0	0.3	0.5	0.7	0.8	0.85
Centroid position/mm	0.000 0	3.049 0	5.086 1	7.130 1	8.155 3	8.669 6
Deviation from ideal image height/μm	0	-0.8	-1.1	-0.7	-0.5	0.4

表 3 9 800 K 色温不同视场弥散斑能量质心位置和偏差

Tab.3 Energy centroid position and aberration of 9 800 K colour temperature

Technical paramete	Normalized field of view					
	0	0.3	0.5	0.7	0.8	0.85
Centroid position/mm	0.000 0	3.049 2	5.086 5	7.130 2	8.155 1	8.669 8
Deviation from ideal image height/ μm	0	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	0.6

表 4 不同色温之间能量质心最大偏差值

Tab.4 Maximun deviation between the energy centroid values of different colour temperature

Normalized field of view	0	0.3	0.5	0.7	0.8	0.85
Biggest difference between the different color of the centroid position/ μm	0	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2

表 5 不同单波长能量质心偏差最大值

Tab.5 Maximun deviation between the energy centroid values of different wavelength

Normalized field of view	0	0.3	0.5	0.7	0.8	0.85
Maximum difference of the centroid position of each single wavelength/ μm	0	1.4	1.8	2.1	1.6	1.7

与像点照度最大比值为 1.7×10^{-6} 。去除成像像点后,像面杂光照度图如图 6 所示。

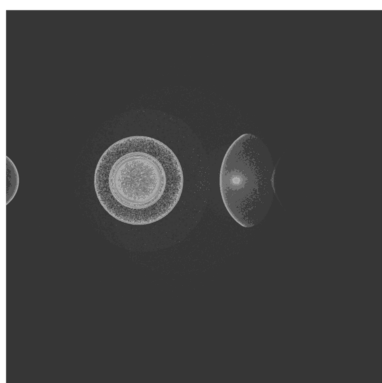


图 6 去除成像点后的像面照度图

Fig.6 Image plane illumination map for removing image points

当信噪比为 6 时,杂散光占信号电子数的 13%,因此若要分辨目标像,杂散光能量需低于成像能量的 13%,即有杂散光照度:

$$E_c < E \times 0.13 \quad (7)$$

式中: E 为观测的物体在像面的照度^[2]。

假设天基探测相机观测目标时,视场内出现行星或卫星等亮物体,此物体在像面的照度为 E_T ,同时

相机需对六等星成像,六等星在像面照度为 E_0 ,则对于此系统,根据公式 7,亮物体产生的杂光不影响观测六等星的条件为 $E_T < \frac{0.13E_0}{1.7 \times 10^{-6}} = 7.647 \times 10^4 E_0$, 则 $\frac{E_T}{E_0} < 7.647 \times 10^4$ 。

即,可允许亮暗程度像差 7.647×10^4 倍的两个物体同时出现在视场内。

相差一个星等,辐照度约相差 2.51 倍。根据以上分析可得,为了满足观测六等星暗目标的要求,视场内出现的亮目标不能低于 -6.2 等星。

2 视场外杂光抑制

根据以上分析可知,天基探测相机,需具有观测亮度较暗物体的能力,在各个设计阶段均需考虑消杂光设计问题。当探测相机在复杂的太空环境中使用时,光学系统视场外的非成像光(如太阳光、月球反射光、地气光、系统内部杂散光)经过光学系统内部到达像面,会对相机观测低亮度目标造成影响。尤其以太阳的影响最为严重,根据使用要求太阳抑制角定为 50° 。

相差一个星等,辐照度约像差 2.51 倍,太阳视星等为 -26.7,则太阳与六等星照度之比为 1.2×10^{13} 。根据照度比公式:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{S_0 \times \eta}{S} \quad (8)$$

式中: E 为像点在像面的照度; E_0 为像点在入瞳位置处照度; S_0 为入瞳面积; η 为光学系统透过率; S 传感器上像点面积。

由公式(8)可得点目标物体经过光学系统后像面照度增大 2.2×10^6 倍。

由于太阳抑制角为 50° ,当太阳与光轴夹角为 $\alpha = 50^\circ$,太阳在像面形成的杂光照度为:

$$E_c = E_T \cos \alpha \times PST(\theta) \quad (9)$$

式中: E_T 为太阳的照度; α 为太阳光线与相机光轴夹角。

根据公式(7)~(9)可知,为了使太阳在像面形成的杂散光不影响观测六等星亮度目标,在太阳抑制角 50°条件下,系统 PST 需满足小于 3.70×10^{-8} 的要求。

为了实现以上要求,除了在结构设计时,在镜头内部加工消光螺纹外,需对系统遮光罩进行严格设计。为了有效消除太阳带来的杂光影响,遮光罩除了采取表面喷涂高吸收率黑漆、各挡光环加工倾角,保证锐边之外,遮光罩设计为两级遮光罩(如图 7 所示),通过分析设计,第一级遮光罩能够完全有效的抑制太阳抑制角外的杂光,消杂光光阑设计如下图所示。第二级遮光罩主要作用为进一步消除太阳入射至第一级遮光罩产生的散射杂光,并可抑制太阳抑制角以为的亮目标杂光,其挡光环设计依据为在保证抑制更小角度的亮光源杂光前提下,可减小挡光环间距^[10]。

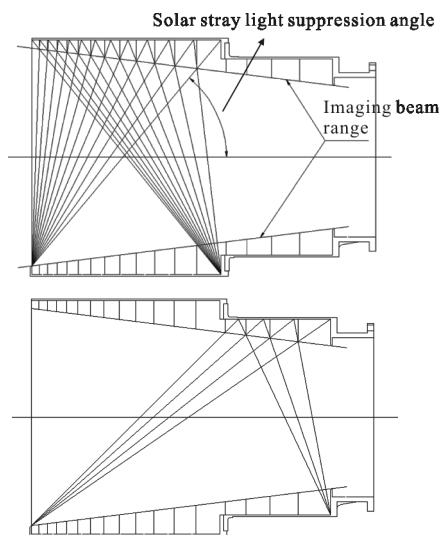


图 7 遮光罩设计示意图

Fig.7 Schematic diagram of the hood design

在太阳抑制角范围内,通过对遮光罩入光口和出光口照度值进行分析(见图 8),可知遮光罩自身最大 PST 值为 1.72×10^{-7} 如表 6 所示。遮光罩消光效果

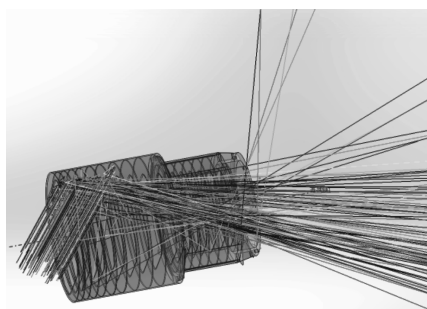


图 8 遮光罩杂光分析示意图

Fig.8 Hood stray light analysis diagram

表 6 不同太阳入射角度时的 PST 值

Tab.6 PST value at different solar incidence angles

Angle/(°)	Mean value of PST
50	2.89 E-08
55	2.61 E-08
60	2.37E-08
65	2.01 E-08
70	1.76 E-08
75	1.35E-08
80	1.12 E-08

良好。安装相机镜头后,相机结构消除了部分杂光,整体 PST 进一步降低,其值如表所示。最大 PST 为 2.89×10^{-8} 可以满足使用要求。

3 结论

采用合理的方法改进了双高斯光学结构型式,设计了能够观测较暗目标的大入瞳天基探测光学系统。通过分析,在光学设计阶段采用控制透镜表面光线入射角度和采用弯月窗口抗辐照玻璃等方式,有效的控制了视场内强光源形成的杂光影响,实现可同时观测亮暗目标的性能。此系统在 2600~9800 K 色温范围像点弥散斑能量分布和质心偏差均满足要求,目标定位精度优于 3.5",可实现对亮度大于 6 等星的目标物体进行探测,并可满足亮暗照度相差 7.4 万倍的物体同时成像。通过对两级外遮光罩相关消光设计,并通过随机光线蒙特卡罗仿真分析方法,在杂光分析软件中建模并分析了轴外强光源杂散光抑制能力。分析结果表明,该光学系统设计具有良好杂光抑制效果,满足天基空间碎片探测的系统要求。

参考文献:

[1] Wang Xiuhong, Li Junfeng, Wang Yanrong. Orbit determination and precision analysis of space object with space-based camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 32(6): 1394-1402. (in Chinese)
王秀红, 李俊峰, 王彦荣. 天基照相机监测空间目标定轨方法及精度分析[J]. 光学精密工程, 2013, 32(6): 1394-1402.

[2] Jin Yuzhu. Research on optical detection and recognition method of space debris [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
金玉竹. 空间碎片光学探测与识别方法研究 [D]. 哈尔滨:

- 哈尔滨工业大学, 2007.
- [3] Yuan Weiming, Zeng Lingqi, Zhang Bo, et al. A study on the surveillance of space debris[J]. *Modem Radar*, 2012, 34(12): 16–19. (in Chinese)
袁伟明, 曾令旗, 张波, 等. 空间碎片监测技术研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(12): 16–19.
- [4] Qiao Kai, Wang Zhile, Cong Mingyu. Analysis on space based and ground based surveillance system to space target [J]. *Optical Technique*. 2006, 32(5): 744–749. (in Chinese)
乔凯, 王治乐, 丛明煜. 空间目标天基与地基监视系统对比分析[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 744–749.
- [5] Tan Ying. Discussion of space-based space object detection technique[J]. *Space Electronic Technology*, 2006(3): 5–9. (in Chinese)
谭莹. 天基空间目标探测技术探讨 [J]. 空间电子技术, 2006(3): 5–9.
- [6] Li Zesi. Study of str map reconstruction and optical monitoring technology for space debris [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- 李泽思. 恒星目标重现与太空小碎片光学检测技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [7] Guo Yanchi, Xu Xiping, Qiao Yang. Optical system design of star sensor with wide field of view and wide spectra range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3969–3972. (in Chinese)
郭彦池, 徐熙平, 乔杨, 等. 大视场宽谱段星敏感器光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3969–3972.
- [8] Yang Le, Sun Qian, Wang Jian, et al. Design of long-wave infrared continuous zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 999–1004. (in Chinese)
杨乐, 孙强, 王健, 等. 长波红外连续变焦光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 999–1004.
- [9] Smith W J. *Modern Lens Design* [M]. US: McGraw–Hill Professional, 2004: 303–340.
- [10] Tian Yon gming. Study on the suppression of stray light instar sensors[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese)
田永明. 星敏感器消杂光技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005