

大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制

陈 醒^{1,2}, 胡春晖^{1*}, 颜昌翔¹, 孔德成^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:空间相机用于对空间暗弱目标的探测与监视,视场外杂散光的进入会降低像面对比度,严重时甚至会导致相机无法工作。大视场光学系统对杂散光尤为敏感。针对此问题,本文以一大视场空间相机为例,分析其杂散光的来源,通过研究杂光传输机理并总结抑制措施。为满足其轻小型的指标要求,在尺寸限制下分别设计挡光环垂直光轴和倾斜的遮光罩及光阑等消杂光结构。TracePro 软件仿真结果显示:倾斜挡光环遮光罩的效果更好,该结构在杂光抑制角外的点源透过率(PST)均达到 10^{-7} 量级,系统至少可以满足6.5星等目标的探测,验证本文消杂光结构方案的有效性,为后续的系统优化提供了一定的参考。

关键词:大视场空间相机,遮光罩,杂散光分析,点源透过率(PST)

中图分类号:V245.6; V19 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20191203.0678

Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view

CHEN Xing^{1,2}, HU Chun-hui^{1*}, YAN Chang-xiang¹, KONG De-cheng^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China ;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail:famous226@163.com*

Abstract: Space cameras are used for the detection and observation of a faint target in space. Image contrast degrades once stray light arrives at the detector such that the camera can sometimes fail. Optical systems with wide fields of view are particular sensitive to the stray light. Therefore, this paper analyzes the source of stray light for a space camera with a large field of view and summarizes suppression measurements through the research of stray radiation energy transmission theory. To satisfy the required size indicators, a vertical optical axis and the inclined hood are designed within a limited size so that the light shading structure can be discontinued. Results from a Tracepro simulation show that baffle with lean vane leads to better suppression of stray

收稿日期:2018-10-05;修订日期:2018-12-01

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2011AA12A103)

Supported by National High Technology Research and Development Program (863 Program) (No. 2011AA12A103)

light, and that the point source transmittance out of the rejection angles of the system is at 10^{-7} . The system can detect at least 6.5M stars. The suppression technique is proven to be effective and can be used as a reference for further optimization and design.

Key words: wide-field of view space camera; baffle; analysis of stray light; point source transmittance (PST)

1 引言

随着空间光学技术的飞速发展,各类航天器的发射数量日益增加,与此同时失效的航天器、人造卫星以及脱落的空间碎片也与日俱增,因此也加大了对空间安全的要求^[1]。为了保证航天器的正常运行与工作,且便于持续开发利用空间资源,对此类空间目标的探测与监视技术的研究也就愈发重要^[2]。高重访、高效能、长弧段是空间目标天基监视系统的重要特点,而大视场又是实现长弧段的主要手段^[3],因此探测视场的大小直接影响着系统的监视效能。而且要实现大天区目标的快速搜索,大视场光学系统是十分必要的,大视场、小型化空间载荷也是如今天基空间目标探测系统的发展趋势^[4]。

采用空间相机探测上述空间目标时,属于暗弱目标探测系统,对杂散光十分敏感。对于大视场光学系统而言,杂散光的影响则尤其严重。一旦杂光到达像面,会在探测器表面形成杂散辐射噪声,轻则降低像面对比度,降低信噪比,严重时会让目标完全淹没,致使相机无法正常工作^[5]。因此,对杂散光的有效抑制是保证大视场空间相机探测性能的关键技术之一。

本文所研究的空间可见光相机不仅具有超大的视场,而且由于工程限制,其对遮光罩尺寸具有一定的要求,导致杂光的抑制工作具有相当大的难度。为满足其轻小型、轻量化的要求,本文对其展开杂散光的分析,结合具体指标分析杂散光来源,总结杂光抑制手段,并完成遮光罩、挡光环以及光阑等消杂光结构的设计,并使用 TracePro 软件进行光线追迹仿真,利用点源透过率 (PST) 作为评价杂光抑制水平的指标。仿真结果表明本文的消杂光设计具有很好的效果,可以兼顾杂散光抑制。

2 光学系统基本参数

本文研究的大视场空间探测相机光学系统的主要指标如下:(1)入瞳直径 60 mm;(2)视场为 $30^\circ \times 60^\circ$ 超大视场;(3)工作波段为 545 ~ 575 nm;(4)焦距为 185 mm。

为满足大视场、大相对孔径、轻小型的要求,该相机选用结构紧凑的同心物镜系统。如图 1 所示,该系统的所有光学面都严格共心,入瞳位于球心位置,不存在轴外像差,整个系统仅需要矫正初高级球差和色差,便能在大相对孔径、大视场下实现较高的成像质量。然而在如此大视场下要满足其对空间目标的探测能力^[6],杂散光的分析和抑制则是首要解决的难题。

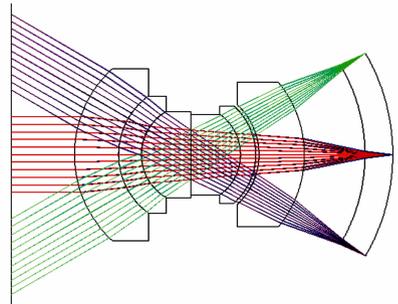


图 1 大视场同心光学系统布局图

Fig. 1 Layout of concentric optical system with large field of view

3 杂散光的分析和抑制

3.1 杂散光来源

杂散光主要分为以下 3 种:(1)外部杂散光,对空间相机而言为视场外环境中太阳光、地气光、月光等强辐射源所发出的辐射能量。(2)内部杂散光,主要是控制电机、温控热源、温度较高的光学元件等产生的热辐射。(3)成像杂散光,此类

杂光是成像光线的非正常路径传播导致的,如其在光学元件表面发生的残余反射、散射及衍射,其中偶数次反射在探测器形成的光斑即为鬼像。在以上 3 种杂光中,内部杂散光主要在红外光学系统中存在,成像杂散光也仅存在于特定的一些系统中,只有第一类外部杂散光能够普遍影响所有的光学系统。本文中的空间相机应用于可见光波段,因而仅对其进行外部杂散光的分析。相比之下太阳光的强度要远高于其他杂光光源的强度,所以只考虑太阳光为杂散光的主要来源。

3.2 表面能量传输模型分析

图 2 为杂散光辐射能量传递理论模型图,杂散光在光学系统的不同表面之间的传递过程都满足辐射能量传递公式:

$$d\phi_c = \text{BRDF}(\theta_i, \psi_i, \theta_o, \psi_o) \cdot d\phi_s \cdot \text{GCF}, \quad (1)$$

式中:BRDF($\theta_i, \psi_i, \theta_o, \psi_o$)是辐射面元的双向反射分布函数,用于表征材料的表面散射属性,其中 $\theta_i, \psi_i, \theta_o, \psi_o$ 分别表示入射及出射辐射的方位角和俯仰角; $d\phi_s$ 是面元 dA_s 出射的辐射通量;GCF为几何构成因子,包含面元对接收表面所张的投影立体角,是一个仅与元件表面相关,由系统结构所决定的参量。

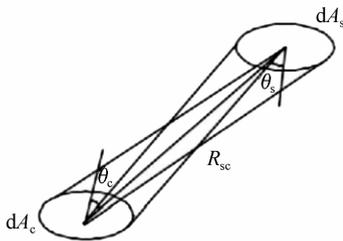


图 2 辐射能量传递理论模型

Fig. 2 Model of radiation energy transfer theory

从以上辐射能量传递模型和公式可得出:要抑制接收面 dA_c 收到的杂散光通量,可从以下的几个方面来实现:

- (1) 减小入射的杂光能量或减小上一级表面所出射的杂光通量 $d\phi_s$;
- (2) 研究机械表面处理的新方法,或寻找 BRDF 值更小的涂层,及使用消光漆等;
- (3) 给系统加上挡光结构,如遮光罩、光阑等,以减小几何构成因子 GCF。

在以上 3 种手段中,遮光罩和光阑的设计是抑制杂散光到达探测器的最直接、最有效的方法,针对本文中空间相机的大视场探测以及轻小型、轻量化的指标要求,提出以下的消杂光结构设计方案。

3.3 挡光结构设计

3.3.1 遮光罩设计

遮光罩是抵挡外部杂光进入光学系统的首要屏障,能在不改变光学系统的情况下,有效抵挡大角度杂散光^[7]。其设计原则为:应至少满足一次杂光不能直接进入光学系统,同时不可遮挡视场内光线^[8]。遮光罩的形状通常分为两种:圆柱型和锥型,而本文中光学系统的视场角较大,因此选用锥型的遮光罩更有利于减小整体结构体积。图 3 为一级遮光罩几何结构图。

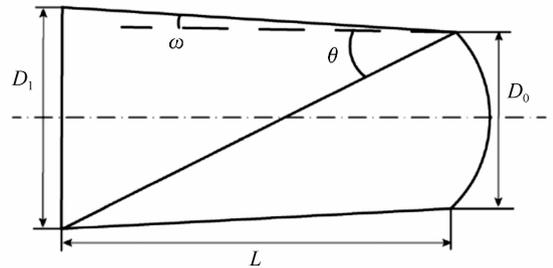


图 3 典型遮光罩几何结构图

Fig. 3 Geometric structure of typical baffle

图中, D_0 为光学系统通光口径, D_1 为遮光罩外口径, ω 是光学系统的视场角, θ 是杂散光源的抑制角, L 为遮光罩的总长。光学系统口径、视场角及杂光的抑制角决定了遮光罩的长度:

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{D_0}{\tan\theta - \tan\omega} \\ D_1 &= D_0 + 2L\tan\omega \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

本文所分析的空间相机具有 $30^\circ \times 60^\circ$ 的超大非对称视场, Y 方向的视场大于 X 方向,因此遮光罩需要分别设计。该相机的光学系统入瞳为圆形,而视场近似为一个长方形。在 30° 视场方位处,成像光线并不会充满光学系统入口处的半球形透镜的全部表面,换言之-第一片透镜的部分边缘在 30° 视场处是不参与成像的,是多余的。若通光口径与透镜直径一样,则不仅会增加 X 方向的杂光,还导致遮光罩体积增大。因此 D_0 直接选

取两视场方向光线通过的有效通光孔径,按公式(2)计算可得遮光罩长度分别为 123.4 mm 和 70.9 mm。通常此类情况应选取较长的长度进行遮光罩的设计以满足抑制要求,然而由于工程上轻小型的要求以及整体体积的尺寸限制,使得该系统遮光罩不能够长于 100 mm。在满足 60° 视场杂光抑制要求的前提下最终选定遮光罩长度为 95 mm。长度的不足将通过其他设计途径进行补偿,以保证遮光罩的杂光抑制性能。

考虑到该相机视场的特殊性,在消杂光设计上存在一定难度,因而其杂散光抑制角的选取也比常规的系统大许多,两视场杂光抑制角分别为 50° 和 70°,当太阳与光轴的夹角小于该角度,相机会进行主动的规避,后期分析中也主要考虑规避角以外的杂光抑制情况。遮光罩参数如表 1 所示。

表 1 最终遮光罩设计结果

Table 1 Final design results of baffle

$\omega/(\circ)$	D_0/mm	D_1/mm	L/mm
30°	114	204.9	95
60°	154	264.1	95

遮光罩的传统处理方法多是将其设计为二级结构来保证杂光在遮光罩内至少满足二次反射,以衰减最终进入光学系统的能量^[9]。而本遮光罩受尺寸限制仅为一节结构,因此需将内表面涂上吸收率较高的涂层,并通过合理设计挡光环,来实现杂光的多次反射和吸收,提高杂光的抑制能力。

3.3.2 挡光环设计

挡光环内部结构主要有蜂窝式和刀口式。经仿真对比分析,相较于蜂窝式结构,刀口式结构抑制能力更强,对大角度的杂散光有很好的抑制效果^[10]。且有研究指出,挡光环与遮光罩内壁存在一定的倾斜角度时,比竖直的挡光环能更有效地对杂光进行遮挡^[11]。基于本系统超大视场探测对杂光抑制能力的严苛要求,因此本文中分别设计了挡光环垂直光轴以及倾斜放置的两种结构的遮光罩,并分析对比二者的抑制能力。

竖直放置的挡光环较为常见,需保证在遮光

罩出射端看不到任何被照明的表面,并且光线应尽可能避免照射到刀口边缘部分^[12],在 AUTO-CAD 中利用图 4 的作图法即可确定其位置^[13]。首先画出遮光罩外轮廓 A,确定遮光罩入口和出口处挡光环高度分别为 10 mm 和 20 mm,连接挡光环 1 的底部和光学系统口径边缘 a,过连接线 D 与虚线 B 的交点 b 做一水平方向的垂线至遮光罩壁 A,确定挡光环 2 的位置。由光线边缘 o 点作与挡光环 2 边缘点 b 的连线,与外遮光罩相交于 c。再连接点 a 与点 c 交视场光线边缘于 d 点,由此画出挡光环 3。以此类推,确定全部挡光环的位置。

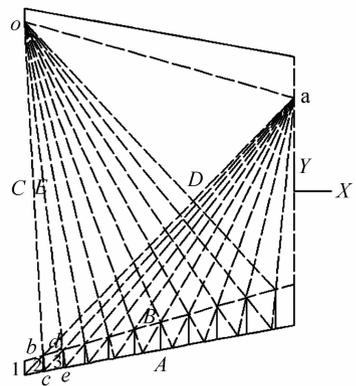


图 4 竖直挡光环设计原理图

Fig. 4 Design principle of vertical vanes

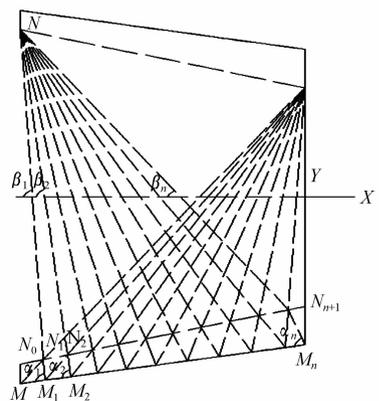


图 5 倾斜挡光环设计原理图

Fig. 5 Design principle of lean vanes

倾斜挡光环的设计原则是使挡光环的倾斜角度依次增大,且始终保证其不小于杂光光线与遮光罩内壁的夹角,即可避免一次散射光直接进入光学系统内^[14]。如图 5 所示,首先确定为 10 ~

20 mm 的梯度分布,杂散光线 NM 由左侧入射, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为入射光线与遮光罩中心轴的夹角, N 是杂散光的入口点, NM_1, NM_2, \dots, NM_n 为与中心轴夹角分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 的入射杂光光线所能到达的最边界处。为避免一次散射光的出现,即可在 M_1, M_2, \dots, M_n 处设置挡光环, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 即为挡光环与遮光罩内壁的夹角,此时满足 $\alpha_i = \beta_i (i = 1 \sim n - 1, \dots, \alpha_n > \beta)$ 。利用作图法分别确定两视场的位置与角度,根据所得结果选用更易加工的整数角度进行最后的建模。两种遮光罩的最终实体结构如图 6 所示。

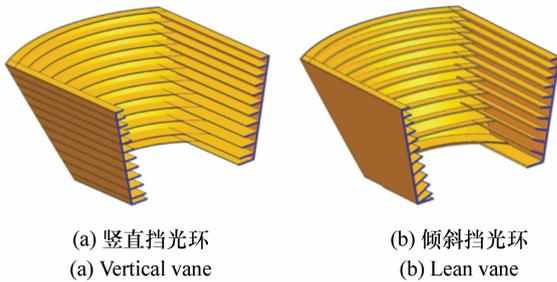


图 6 遮光罩实体结构模型
Fig. 6 Solid models of outer baffle

3.3.3 光阑设计

光阑也是透射式光学系统抑制杂光不可或缺的一部分。一般来说,孔径光阑的位置越靠近像面,杂光的抑制能力越好^[15]。但对于本文中的特殊结构,设计时已将光阑置于同心物镜球心处,从根本上抑制了整个系统的杂光水平,效果更好。但这也使得孔径光阑后方都是“关键表面”,即能将入射杂光直接反射到探测器的表面。探测器能看到的“关键表面”越多越不利于杂光的抑制。在初步仿真中发现,个别角度入射的杂光会在像面产生较为集中的辐射带,图 7(a)所示为 44° 杂光光线分布图,集中能量是由于像面上方亮点的散射光所形成的。因此拟在最后一块透镜前加入一个光阑防止亮点的形成,位置如图 7(b)所示,由图 7(b)可明显看出到达像面的杂光有所减少。这个光阑一方面能够遮挡个别角度入射的较为集中的散射杂光,另一方面其离像面很近,能有效减少探测器可见的“关键表面”。孔径光阑和消杂光光阑配合使用,可以有效抑制一些由系统前部分散射进入的杂光。同时需对“关键表面”进行

喷涂黑漆或增加表面粗糙度等工艺处理,保证其吸收率在 90% 以上,有利于减少像面杂光的照度。

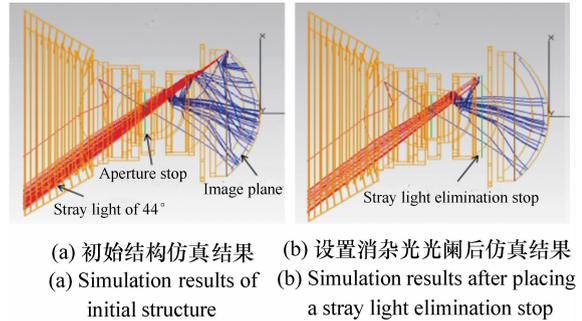


图 7 消杂光光阑的设计

Fig. 7 Design of stray light elimination stop

4 仿真分析

4.1 评价函数

点源透过率(PST)与视场外杂散光源的强度无关,而只表征系统本身的抑制杂光的能力,适用于对系统整体消杂光的分析,其值越小说明结构的抑制能力越好,是空间光学系统杂散光分析常用的评价函数^[16]。PST 的定义如公式(3)所示:

$$\text{PST}(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_0(\theta)}, \quad (3)$$

其中, $E_d(\theta)$ 是离轴角为 θ 的杂散光源发出的光线经过光学系统在探测器上的辐照度, $E_0(\theta)$ 为光源在光学系统入瞳处的辐照度。

星等为 m 的恒星照度 H_m 为^[17]:

$$H_m = 2.54 \times \exp(-0.92 \times m) \times 10^{-6}. \quad (4)$$

设光学系统透过率为 τ , 入瞳面积、像点面积分别为 S_0, S_1 , 则在像面上接收到的 m 星等目标的照度 H_c 即:

$$H_c = H_m \times \tau \times S_0 / S_1. \quad (5)$$

杂散光源太阳在 425 ~ 668 nm 波段内的光照度总量是 1.3×10^5 lx。本系统工作波段是 545 ~ 575 nm, 该波段内光照度占可见光照度总量的 0.287, 则太阳在可见光波段的平均照度 H 则为:

$$H = 1.3 \times 10^5 \times 0.287 = 3.73 \times 10^4 \text{ lx}, \quad (6)$$

通过 PST 定义可知像面接收到杂散光照度

H_s 为:

$$H_s = H \times \text{PST}(\theta), \quad (7)$$

根据探测器参数及信噪比不低于6的探测指标,计算得出满足6等星目标探测时,像面杂光能量不能超过探测目标能量的0.17,在规避角外实现探测要求的系统PST应满足:

$$H_s < H_c \times 0.17, \quad (8)$$

$$\text{PST}(\theta) < \frac{H_c \times 0.17}{H}. \quad (9)$$

4.2 建立模型

加装遮光罩及光阑等遮光结构,将整机光机系统一起导入分析软件TracePro中,建立杂光分析实体模型如图8所示。

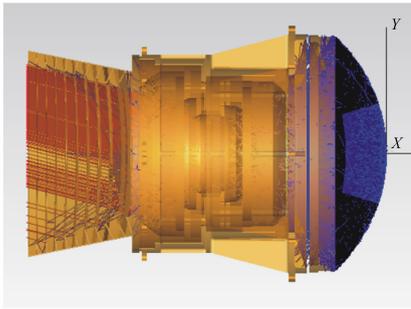


图8 杂散光分析模型

Fig. 8 Stray light analysis model

模型建立后需进行光学元件材料以及光机结构各表面参数设置,以准确描述与杂光相关的散射表面特性^[18]。在TracePro软件中用ABg模型来描述结构表面的双向散射分布函数(Bidirectional Scattering Distribution Function, BSDF)。ABg模型计算公式如下:

$$\text{BSDF}(|\beta - \beta_0|) = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g}, \quad (10)$$

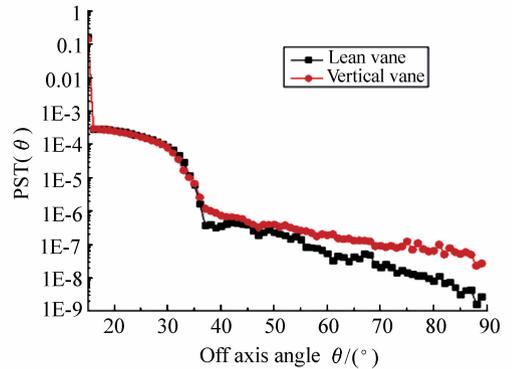
其中, β_0 、 β 分别为光线入射到材料表面,发生镜面反射及散射的单位向量在平面上的投影。A、B、g为模型所需拟合系数,利用软件自带的BSDF Wizard进行计算即可得到。

本模型的光学元件均为透镜,其通光部分表面透过率设置为99%, $A = 0.00175$, $B = 0.1$, $g = 0$ ^[19];遮光罩内壁及挡光环采用吸收率较高的Z306涂层^[20];其余不参与成像的光学元件表面和机械结构表面均作涂黑处理,参数为软件默认

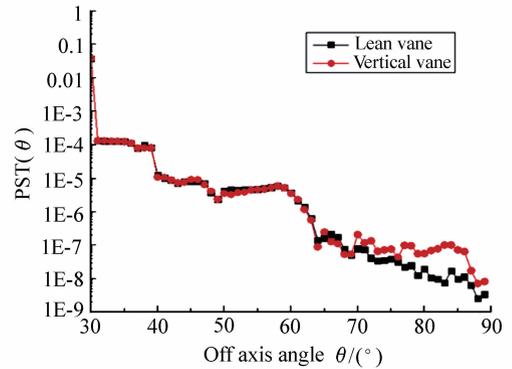
数值。

4.3 仿真分析与结果

在光学系统入口处设置一平行光出射的格点光源,令光线充满整个遮光罩。追迹200万条光线,视场外光线阈值为 10^{-12} 。分别对两个遮光罩从两个方向由半视场角至 90° 范围内每隔 1° 进行一次追迹,观察像面杂光的照度情况,并绘制PST曲线,对比结果如图9所示。



(a) 30°



(b) 60°

图9 俯仰(30°)与方位(60°)方向的视场外PST曲线

Fig. 9 PST curves of the system

由曲线结果可知像面无直接入射的一次杂光,两个遮光罩的俯仰与方位PST曲线在视场以外都呈现很好的下降趋势。可以看出倾斜挡光环的抑制能力总体来说还是优于竖直挡光环的,在太阳规避角为 50° 以及 70° 时PST都能达到 10^{-7} 量级,并持续下降,说明系统能够有效抑制大角度杂光。因此本文最后选用具有倾斜挡光环的遮光罩结构并进行进一步的分析。将得到的抑制角处的PST值由公式(4)~(9)进行反推,即可得到表2中该结构在两视场角方向能达到的探测星等。

数据表明系统整体至少可实现对6.5星等目标的探测,能够满足探测要求。验证了遮光结构的有效性。

表2 两视场方位可达到的探测星等
Tab.2 Detectability of two fields of view

视场角 ω	太阳规避角 θ	抑制角外 PST(θ)	可探测星等
30°	50°	2.34×10^{-7}	≥ 6.5
60°	70°	8.43×10^{-8}	≥ 7.5

5 结论

本文以一大视场空间相机为对象,在遮光罩长度有限的前提下进行消杂光结构的设计与杂散

光分析。讨论了杂散光的来源,并基于杂散辐射传递理论,探究了杂散光的抑制原理。结合本相机的特殊视场,为其分别设计了含有竖直和倾斜挡光环的遮光罩,详细表述了设计原理步骤以及光阑的设计。利用 TracePro 软件对整体光机结构进行仿真分析,并通过点源透过率对系统的杂光抑制能力进行评价。结果表明具有倾斜挡光环的遮光罩的杂光抑制能力优于竖直挡光环,其在太阳规避角以外的杂光能够被很好的抑制。在两个视场的 PST 均小于 10^{-7} 量级,并且可以至少满足6.5星等目标的探测要求。仿真结果验证了遮光结构设计的有效性,也实现了大视场系统在短小遮光罩情况下的杂散光抑制,具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 梁斌,朱海龙,张涛,等.星敏传感器技术研究现状及发展趋势[J].中国光学,2016,9(1):16-29.
LIANG B,ZHU H L,ZHANG T,et al.. Research status and development tendency of star tracker technique[J]. *Chinese Optics*,2016,9(1):16-29. (in Chinese)
- [2] 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):1394-1403.
WANG X H,LI J F,WANG Y R. Orbit determination and precision analysis of space object with space-based camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,32(6):1394-1403. (in Chinese)
- [3] 张科科,周峰,傅丹鹰.天基空间目标监视可见光遥感器研究[J].航天返回与遥感,2005,26(4):10-14.
ZHANG K K,ZHOU F,FU D Y. Research on space-based surveillance visible sensor[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*,2005,26(4):10-14. (in Chinese)
- [4] 冯凯,李丹明,李居平,等.空间碎片监测及清除技术研究进展[J].真空与低温,2016,22(6):335-339.
FENG K,LI D M,LI J P,et al.. Research status of space debris surveillance and removal techniques[J]. *Vacuum & Cryogenics*,2016,22(6):335-339. (in Chinese)
- [5] 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.
YAN CH X,XU J,PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(2):289-293. (in Chinese)
- [6] 徐亮,赵建科,周艳,等.长焦距、大视场空间观测相机光学系统设计[J].光学与光电技术,2010,8(6):64-66.
XU L,ZHAO J K,ZHOU Y,et al.. Optical design of space observation camera with long focal length and wide field of view[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2010,8(6):64-66. (in Chinese)
- [7] 廖志波,伏瑞敏,宗肖颖.星敏传感器反射式遮光罩设计[J].红外与激光工程,2011,40(1):66-69.
LIAO ZH B,FU R M,ZONG X Y. Design of specular baffle of star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2011,40(1):66-69. (in Chinese)
- [8] 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 D L,XIAO Q,LIAN M L. Research on stray light analysis and restrain of GF-4 satellite camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*,2016,37(5):49-57. (in Chinese)
- [9] PETERSON G L,JOHNSTON S C,THOMAS J. "Specular baffles"[J]. *Proceedings of SPIE*,1992,1753:65-76.
- [10] 王威,陈凡胜.静止轨道对地观测成像系统外遮光罩设计[J].中国激光,2014,41(9):0916001.
WANG W,CHEN F SH. Design of baffle of imaging system for earth observation on geostationary earth orbit[J]. *Chinese*

Journal of Lasers, 2014, 41(9):0916001. (in Chinese)

- [11] 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:中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
LU Q. Study on stray light analysis and application technology of the earth synchronous orbit space camera[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2016. (in Chinese)
- [12] 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):41-45.
LI Y, XIANG L B, LI L B. Design and simulation of the baffle of a new type space camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(7):41-45. (in Chinese)
- [13] 《光学仪器设计手册》编辑组. 光学仪器设计手册(下)[M]. 北京:国防工业出版社, 1971:618-621.
Editorial of Optical Instrument Design Manual. *Optical Instrument Design Manual(part 2)* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1971:618-621. (in Chinese)
- [14] 杨利华, 樊学武, 余舜京, 等. 一种新型挡光环的设计[J]. 应用光学, 2010, 31(1):29-33.
YANG L H, FAN X W, YU SH J, et al. Design of a new-style vane[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1):29-33. (in Chinese)
- [15] 李洋, 廖志波, 穆生博, 等. 星敏传感器杂散光抑制方法及仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12):2660-2664.
LI Y, LIAO ZH B, MU SH B, et al. Stray light suppressing technique and simulation for star sensor[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(12):2660-2664. (in Chinese)
- [16] 钟兴, 贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3):621-625.
ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera[J]. *Opt. Precision. Eng.*, 2009, 17(3):621-625. (in Chinese)
- [17] 姚亚萍. 天文知识[M]. 苏州:苏州大学出版社, 1999:21-28.
YAO Y P. *Astronomy* [M]. Suzhou: Soochow University Press, 1999:21-28. (in Chinese)
- [18] SUN CH M, ZHAO F, ZHANG Z. Stray light analysis of large aperture optical telescope using Tracepro[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9298:929181F.
- [19] 舒星星, 刘卫林. 可见光光学系统杂散光折制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12):121101.
SHU X X, LIU W L. Suppression of stray light in visible light optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12):121101. (in Chinese)
- [20] 李婷, 杨建峰, 阮萍, 等. 月基光学天文望远镜(LOT)的杂散光分析[J]. 光子学报, 2007, 36(增刊):136-141.
LI T, YANG J F, RUAN P, et al. Stray light analysis of lunar based astronomy optical telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(s1):136-141. (in Chinese)

作者简介:



陈醒(1993—),女,吉林公主岭人,硕士研究生,2015年于山东大学获理学学士学位,主要从事可见光光学系统的杂散光分析工作。E-mail: CX-ying712@163.com



胡春晖(1986—),男,河南信阳人,助理研究员,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,从事光学系统装调、检测方面的研究。E-mail:famous226@163.com



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,博士,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yan cx@ciomp.ac.cn