

文章编号 1004-924X(2011)11-2603-06

## 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制

李晓平\*, 沙晟春, 胡亭亮

(中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**对有中间像的长焦距离轴三反系统的杂散光特性进行了模拟分析,并提出了相应的杂散光抑制方法。通过正追和倒追的分析方式,确定系统杂散光的主要来源,找到系统的重要面;根据分析结果,提出了杂散光抑制措施,用系统重要面的变化定性评价杂散光的抑制效果。分析结果表明,采用抑制措施后很好地抑制了系统的一次散射杂散光。用点源透过率(PST)定量评价光学系统的消杂散光能力,分别计算东西、南北方向离轴角为 $\pm 40^\circ$ 的PST值,并结合光机系统的应用环境对系统的杂散光抑制能力进行了定量分析。

**关键词:**长焦距光学系统;中间像;离轴三反光学系统;杂散光;点源透过率

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2603

## Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system

LI Xiao-ping\*, SHA Sheng-chun, HU Ting-liang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai  
200083, China)

\* Corresponding author, E-mail: lxp0207@126.com

**Abstract:** Stray light characteristics of an off-axis three-mirror optical system with a middle image and long-focus was simulated and analyzed, and corresponding suppression method for the stray light was proposed. By a forward and reverse ray tracing method, the main source of stray light was identified and an important surface of the system was found out. According to the analysis results, some corresponding suppression measures were proposed to reduce the stray light of the optical system. The effect of stray light reduction were evaluated by comparing the number of important surfaces before and after the measures. The analysis results show that the first-order scattering stray light has been well suppressed. Furthermore, the Point Source Transmittance (PST) was used to evaluate the stray light suppression capability, and its quantitative analysis was implemented by calculating the PST of  $\pm 40^\circ$  off-axis angles in EW and NS, respectively.

**Key words:** long-focus optical system; middle image; off-axis three-mirror optical system; stray light; Point Source Transmittance (PST)

收稿日期:2011-06-02;修订日期:2011-07-06.

基金项目:上海技术物理研究所创新专项(No. Q-ZT-1)

## 1 引言

遥感技术发展到现在,对分辨率的要求越来越高。在波长、平台高度和探测器尺寸确定后,光学系统的分辨率与相对口径有关。口径决定了光学系统的极限分辨率,其确定后,增大焦距可以提高光学系统的空间分辨率。为了尽可能提高光学系统的空间分辨率,要求光学系统达到衍射极限。离轴三反结构形式不存在色差和遮拦问题,同时可以满足大口径、长焦距,达到衍射极限等要求,现已有很多空间光学系统采用这种结构形式,如美国的 QuickBird1、Quick Bird2<sup>[1]</sup>, GIFTS, CRIS;法国的 SPOT6;印度的 Cartosat1<sup>[2]</sup>等。国内对离轴三反结构的研究也很多<sup>[3-4]</sup>,但实际应用的例子比较少。

离轴三反结构的设计方法现已逐渐成熟,但因探测系统精度的提高,杂散光成为影响像质的重要因素。目前对杂散光的分析大都集中于两反系统<sup>[5-6]</sup>和折射系统<sup>[7-8]</sup>,也曾有对无中间像的离轴三反系统的分析<sup>[9-10]</sup>,但还未见关于成中间像的长焦距离轴三反系统杂散光的分析。中间成像的长焦距离轴三反系统有其自身的结构特点,其杂散光的来源也与上述几类系统有所不同。本文根据成中间像的长焦距离轴三反系统的结构特性,建立了杂散光分析模型,通过模拟计算,分析杂散光的来源,并针对不同的杂散光源,提出了相应的抑制措施,为这类系统的实际应用奠定了基础。

## 2 光机模型的建立

### 2.1 光学系统的设计

根据系统设计的要求,采用光阑离轴和视场离轴的方式设计成一次中间像的离轴三反系统,光路结构如图 1 所示。PM、SM、TM 分别为主镜、次镜、三镜。因为系统焦距比较长,在保证成像质量的前提下尽量压缩了主次镜间距;但这导致了次镜和三镜的间距加长,为了缩短系统长度,在次镜和三镜间增加了折镜 ZM<sub>1</sub> 来以压缩次、三镜间的距离,使结构紧凑。用折镜 ZM<sub>2</sub> 将系统的像面转折到主镜的后面,这样的布局可以减少探测器看到机械面,理论上可以减少系统的杂散光。FS 为视场光阑位置,AS 为孔径光阑。光学系统参

数如下:焦距为 2 130 mm,  $F$  为 7.1,视场为 2°,工作波段为 0.4~0.9  $\mu\text{m}$ 。

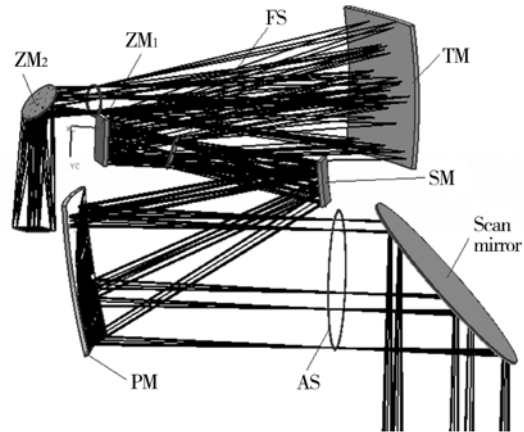


图 1 光学系统的几何结构

Fig. 1 Geometric structure of optical system

### 2.2 光机模型的建立

根据 Zemax 的光学设计结果,利用 UG 软件建立初始的光机结构三维模型如图 2 所示。为使关键问题清楚明了,对模型进行了一定的简化。图中的遮光罩是根据扫描视场,并考虑整个结构的尺寸综合设计的。光学系统的扫描视场要求为  $\pm 10^\circ$ 。主要光学镜面拟采用背部支撑方式,不会引起重要面的变化,对杂散光的分析影响不大。

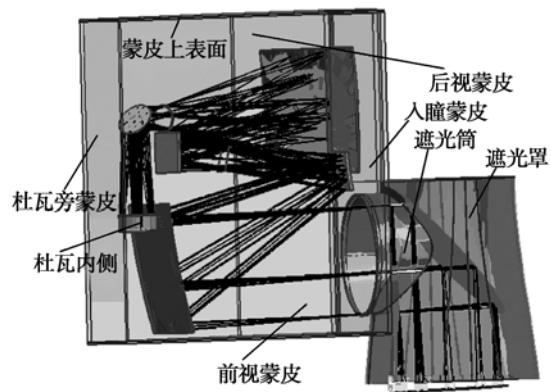


图 2 光机结构的三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of opto-mechanical structure

## 3 杂散光分析模型的参数设定

对光机系统进行杂散光分析,首先要设定光

机系统中各个元件的表面特性。元件的表面特性决定了杂散光在光机系统中的传输特性,是影响杂散光的重要因素,需要根据实际应用进行设定。

在光机系统中,光学元件的表面散射通常是杂散光的主要传播路径。反射镜面的表面散射特性与镜面的微观粗糙度和镜面的污染等密切相关。根据现有的加工工艺,镜面的粗糙度一般都远小于系统工作波段的波长,可以用哈维模型来描述光学元件表面的杂散光特性:

$$BSDF(\theta, \theta_0) = b_0 \left[ 1 + \left( \frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{L} \right)^2 \right]^{\frac{s}{2}} \quad (1)$$

其中,  $\theta, \theta_0$  为散射角和镜面反射角,  $b_0$  为常量,  $s$  为斜率,  $L$  为下跌角,  $BSDF$  为双向散射分布函数。鉴于当前的加工水平,计算时取  $s = -1.5$ ,  $L = 0.001$ ,  $b_0 = 1.741$ 。对式(1)半空间积分得镜面微观粗糙度为 3 nm 时,中波红外的总散射为 0.000 999 8。

在 TracePro 中,一般采用 ABg 模型描述表面散射特性:

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

对于光学反射表面,式(2)中的  $g$  一般取 1~3,主要依赖于材料特性,抛光方法等。对于理想漫反射体  $g = 0$ 。在此,光学元件的  $g$  取 3,  $A$  取  $2.886 5 \times 10^{-6}$ ,  $B$  为  $1 \times 10^{-5}$ 。

对于非镜面元件的表面,文中采用发黑和镀镍来改善特性。在分析中,假设机械表面为理想漫反射面  $g = 0$ 。外遮光罩是阻挡外部杂散光来源的主要方式,需要采用高吸收的蜂窝结构涂层,吸收系数为 0.99。ABg 模型中  $A$  取 0.006 366,  $B$  为 1。为了降低其对杂散光的影响,靠近探测器的关键面采用比辐射率较低的黑镍。黑镍涂层的吸收系数为 0.86,  $A$  为 0.089 12,  $B$  为 1。其它的机械件表面涂吸收系数比较高的 Z306 黑漆。在工作波段它的吸收系数为 0.905,  $A$  为 0.060 47,  $B$  为 1。

## 4 系统杂散光分析及抑制

### 4.1 确定光机系统的杂散光来源

在 TracePro 中通过倒追和正追的方式确定光机系统的关键面、照明面和重要面。照明面是

指光学系统中被外界杂散光源照亮的面;关键面是可以从探测中看到的面;关键面和照明面的重叠面即为重要面。重要面是光机系统中一次杂散辐射的主要来源,杂散光的抑制也就是努力减少重要面的数量。

在未采用任何抑制措施的情况下对系统进行分析。分析结果如表 1 所示。系统中的光学表面均为重要面,在表中不再单独列出。

表 1 系统关键面和照明面

Tab. 1 Critical and illuminated surfaces of opto-mechanical system

序号	关键面	所占比例/%	照明面	所占比例/%
1	杜瓦内侧	44.18	遮光罩内侧	90.81
2	杜瓦窗口	12.26	遮光筒内侧	4.36
3	杜瓦旁蒙皮	11.16	入瞳蒙皮	1.19
4	蒙皮上表面	10.74	蒙皮上表面	0.96
5	前视蒙皮	2.48	杜瓦旁蒙皮	0.76
6	后视蒙皮	1.26	后视蒙皮	0.67
7	ZM1 背光面	0.73	蒙皮下表面	0.61

根据关键面和照明面的模拟结果可知,在这个光机系统中的重要面主要为:杜瓦旁的蒙皮,蒙皮上表面,后视蒙皮。外界杂散光主要通过这几个面的一次散射到达探测器,从而影响系统的成像质量。

### 4.2 杂散光的抑制措施

要减小系统的杂散光,主要通过减少系统中重要面的数量来实现,也就是要将关键面和照明

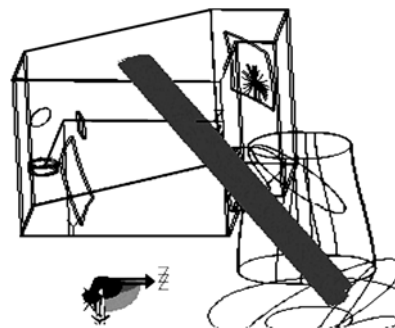


图 3 蒙皮上表面的漏光分析

Fig. 3 Light leakage analysis on the above mechanical surface

面隔离开。对光机系统关键的几个离轴角进行分析,得到如下结果:蒙皮上表面和后视蒙皮的重要面主要是由光线直射(漏光)引起的;而杜瓦旁蒙皮的重要面主要是经扫描镜一次反射引起的,分析过程如图 3 和图 4 所示。

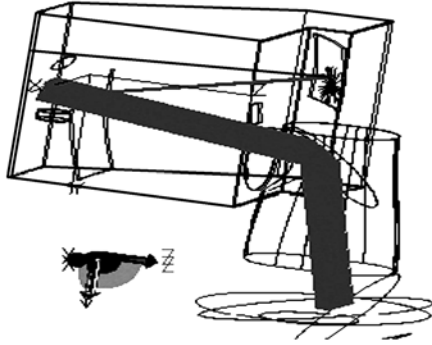


图 4 杜瓦旁蒙皮的漏光分析

Fig. 4 Light leakage analysis on the left mechanical surface besides Dewar

根据重要面的不同散射传递方式,采取不同的抑制措施。对于这种结构主要采用以下几种方式抑制系统的一次散射杂散光:

(1) 尽可能大地增加遮光筒的长度

光学设计过程中尽量增大主镜和次镜间的纵向距离,这样可以在不阻挡成像光线的前提下使遮光筒比较长。遮光筒长到一定程度就可以仅用这一种措施来完全消除光学表面以外的重要面。这种方式比较简单,系统重量增加也不大。在这个系统中增大遮光筒的端面到次镜前 23 mm 处,遮挡一部分的漏光。

(2) 在主镜和视场光阑间加挡光板

这种方式主要是用来阻挡入射到杜瓦旁蒙皮的光线,即为消除杜瓦旁的重要面而设计的。这种方式不会增加系统的关键面,所以不会因挡光板的加入而使系统的自身背景辐射引起的杂散光增大。

(3) 在次镜和视场光阑间加挡光板

在这两者间增加挡光板,可以消除入射的蒙皮上表面和后表面的漏光。这样蒙皮上表面和后表面就不再是系统的重要面。

通过上面 3 个措施就可以抑制光机系统的一次散射。添加抑制措施后的光机系统如图 5 所示。

#### 4.3 抑制措施的定性评价

对添加遮光措施的光机结构进行倒追、正追,

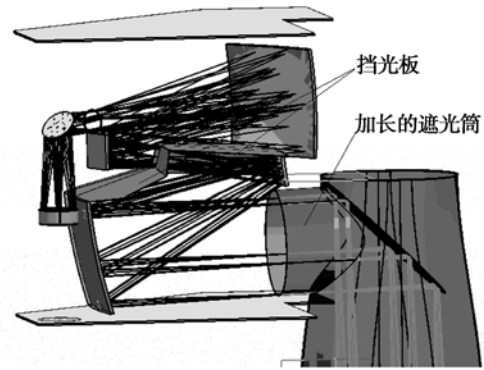


图 5 增加抑制措施后的结构图

Fig. 5 Opto-mechanical structure diagram after using suppression measures

确定系统的关键面、照明面和重要面,结果如表 2 所示。通过表中的数据对比分析可知,采取杂光抑制措施后,除光学表面外只剩前视蒙皮为重要面。但通过进一步分析可以发现,虽然前视蒙皮即是关键面又是重要面,但两者的区域不同,所以前视蒙皮不是系统的重要面,从而说明上述的杂散光抑制措施可以很好地抑制系统的一次散射杂散光。

表 2 增加抑制措施后系统的关键面和照明面

Tab. 2 Critical and illuminated surfaces after adding suppression measures

序号	关键面	所占比例 / (%)	照明面	所占比例 / (%)
1	杜瓦内侧	44.10	遮光罩内侧	96.38
2	杜瓦窗口	16.49	挡光板	1.85
3	杜瓦旁蒙皮	12.24	蒙皮下表面	0.57
4	蒙皮上表面	11.13	入瞳蒙皮	0.53
5	前视蒙皮	10.72	前视蒙皮	0.52
6	后视蒙皮	2.47		
7	ZM1 背光面	1.26		

## 5 系统点源透过率分析

系统杂散光主要是由非成像光线进入系统,被系统中的光机表面散射到达探测器引起的。点源透过率是评价一个光学系统抑制杂散光能力的重要指标。通常定义为:视场外离轴角  $\theta$  的点源

目标辐射,经光学系统后在像面产生的辐射照度  $E_d(\theta)$  与入瞳处辐照度  $E_i$  的比值:

$$PST(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i} \quad (3)$$

对不同的离轴角进行计算,并给出离轴角-PST 曲线,便可定量评价光机系统的杂散光抑制水平。PST 体现了光学系统抑制杂光的能力,与杂散光源的辐射强度无关。显然, PST 越小,系统的杂光抑制能力越强,系统性能越好。

根据前面所述的表面参数的设定方式,对系统的光机表面进行设置,以分析采用抑制措施后的光机系统的杂散光水平,定量评价抑制措施的有效性。在 TracePro 中,分别计算东西、南北方向离轴角  $\pm 40^\circ$  内的点源透过率,计算过程中以  $1^\circ$  为间隔。光机系统的点源透过率曲线如图 6,7 所示。

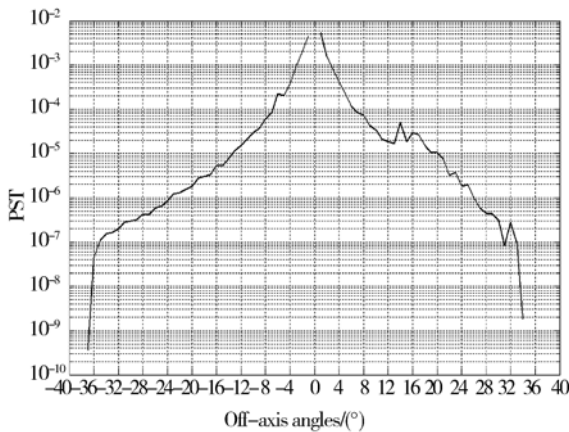


图 6 东西方向的点源透过率

Fig. 6 PST graph of east-west direction

计算目标信号入射到探测器上每个像元的能量为  $9.775 \times 10^{-10} \text{ W/pixel}$ ,整个焦平面的平均辐照度为  $1.086 \text{ W/m}^2$ 。考虑太阳是杂散光源,其在

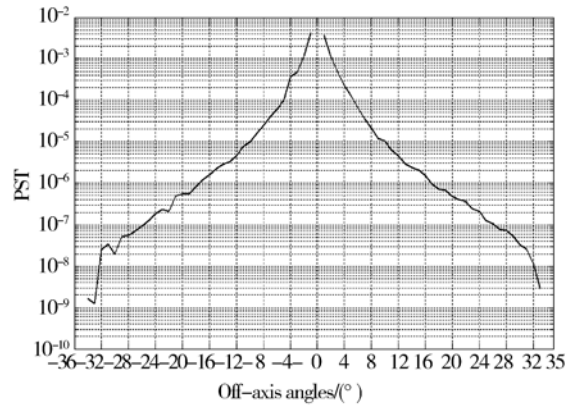


图 7 南北方向的点源透过率

Fig. 7 PST graph of south-north direction

光机系统入口处的辐照度为  $9.7 \text{ W/m}^2$ 。当点源透过率为 0.112 时,系统的信杂比为 1。根据计算结果,该系统的 PST 最大为  $3.80 \times 10^{-3}$ ,说明该系统的杂散光抑制方式可以完全满足系统需求。

## 6 结 论

本文详细分析了成一次中间像的长焦距离轴三反系统的杂散光特性。根据模拟分析结果,提出相应的杂散光抑制措施。采取抑制措施后,光机系统的重要面只剩下光学面,对杂散光有很好的抑制作用。总结归纳了成中间像长焦距离轴三反系统的杂散光抑制措施,有助于光学系统的应用。采用点源透过率的方法分析了光机系统消除杂散光的能力,通过计算可以发现:在离轴角为  $\pm 3^\circ$  时,东西、南北方向的点源透过率都已下降到  $10^{-3}$ ,远高于信杂比为 1 时的 PST 值。计算结果表明,采用抑制措施后的光机系统可以满足实际应用。

## 参考文献:

[1] FIGOSKI J W. The QuickBird telescope: the reality of large, high-quality, commercial space optics[J]. SPIE,1999,3779:22-24.  
 [2] SUBRAHMANYAM D, KURIAKOSE S A, KUMAR P, et al.. Design and development of the Cartosat payload for IRS P5 mission[J]. SPIE, 2006,6405(17): 1-7.

[3] 陈浩峰,李英才,樊超等. 宽视场长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. 光子学报,2007,36(增刊): 142-144.  
 CHEN H F, LI Y C, FAN CH, et al.. Design of off-axial three-mirror reflective optical system with large field-of-view and long focal length[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36 (supp.): 142-144. (in Chinese)  
 [4] 常军,翁志成,姜会林等. 宽覆盖、离轴空间相机光

- 学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 55-57.
- CHANG J, WENG ZH C, JIANG H L, *et al.*. Design of optical system for space camera with long focal length, wide coverage and high resolution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 55-57. (in Chinese)
- [5] 陈永和, 傅雨田, 沈学民. 红外光学系统内部构件热辐射分析[J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 73-79.
- CHEN Y H, FU Y T, SHEN X M. Stray radiation analysis caused by interior heat radiation in infrared optical system [J]. *Optical Technique*, 2006, 32 (supp.): 73-79. (in Chinese)
- [6] 钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. 红外激光工程, 2008, 37(2): 316-317.
- ZHONG X, ZHANG L, JIN G. Stray light removing of reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-317. (in Chinese)
- [7] 张红鑫, 卢振武, 夏利东. 白光日冕仪光学系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2009, 2(5): 402-407.
- ZHANG H X, LU ZH W, XIA L D, *et al.*. Stray light suppressing of optical system in white light coronagraph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 402-407. (in Chinese)
- [8] 张红鑫, 卢振武, 孙强等. 折衍混合长波红外凝视成像系统的杂散光分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 17(10): 2371-2375.
- ZHANG H X, LU ZH W, *et al.*. Stray light analysis of diffractive /refractive LWIR staring imaging system[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(5): 2371-2375. (in Chinese)
- [9] 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): 290-292.
- 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): 290-292. (in Chinese)
- [10] 王成良, 陈桂林, 孙胜利. 库克三反射离轴望远镜杂散光分析[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(18): 2822-2823.
- WANG CH L, CHEN G L, SUN SH L, *et al.*. Stray light analysis of the cook three-mirror off-axis reflective telescope[J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(18): 2822-2823. (in Chinese)

#### 作者简介:



李晓平(1982—),女,山东莱阳人,博士研究生,主要从事光电技术方面的研究。E-mail: lxp0207@126.com



沙晟春(1985—),男,上海崇明人,博士研究生,2007年于清华大学获得学士学位,主要从事机械结构设计与材料加工领域的研究。E-mail: jeson\_starlight@163.com



胡亭亮(1963—),男,山东临朐人,研究员,1989年于甘肃工业大学获得硕士学位,2007年于清华大学获得博士学位,主要从事大型空间遥感仪器的设计。E-mail: htl01@sina.com