

文章编号 1004-924X(2010)02-0289-05

# 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制

颜昌翔<sup>1</sup>, 许杰<sup>1,2</sup>, 彭岩<sup>1,2</sup>

(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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**以点源透过率(PST)为评价标准,对一个离轴三反空间望远系统的杂散光进行了分析,并给出了分析结果。通过建立系统的实体模型,确定了一次、二次散射路径,采用改进的蒙特卡洛法,对 $20^\circ$ 之间各离轴角分别进行光线追迹。对模型的分析结果表明,系统产生杂散光的主要原因为一次散射,与光学系统结构密切相关。离轴角为 $\pm 0.1^\circ$ 时,PST分别等于3.56和4.02,离轴角为 $\pm 20^\circ$ 时,PST分别为 $6.63 \times 10^{-5}$ 和 $4.58 \times 10^{-5}$ 。实验表明,通过加入遮光罩及减小镜面散射率可减少杂散光。与离轴两反望远系统相比,三反系统的杂散光水平在大离轴角时偏大1到2个数量级,但可满足使用要求。

**关键词:**离轴三反望远镜;杂散光;散射路径;点源透过率(PST)

中图分类号:TH743 文献标识码:A

## Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope

YAN Chang-xiang<sup>1</sup>, XU Jie<sup>1,2</sup>, PENG Yan<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

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

**Abstract:** Stray light analysis on a three-mirror off-axis space telescope was presented in this article based on the measurement of Point Source Transmittance(PST). The entity model of the system was established to determine the first and second order scattering paths, and then different off-axis angles in ranges of  $20^\circ$  were calculated by the improved Monte Carlo ray trace method. Results indicate that the stray light mainly is composed of the first order scattering, which is related closely to the structure of the optical system. Furthermore, the PSTs are 3.56 and 4.02 at  $\pm 0.1^\circ$  off-axis angles,  $6.63 \times 10^{-5}$  and  $4.58 \times 10^{-5}$  at  $\pm 20^\circ$  off-axis angles. Experiments also show that the stray light can be reduced by modifying the baffles and changing the mirror's scattering rate. Compared with that of the two-mirror off-axis telescope, the stray light of three-mirror system is graveness at the big off-axis angle, but it can meet the design requirements.

**Key words:** three-mirror off-axis telescope; stray light; scattering path; Point Source Transmittance (PST)

收稿日期:2008-11-04;修订日期:2008-12-10.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. 05001SA050)

# 1 引言

空间望远镜是航天领域重要的遥感器。利用搭载在航天器上的光学遥感器进行对地观测,具有速度快、视野广、覆盖范围大等优点。空间望远镜的选型由最初的卡塞格林式、格里高里式向离轴三反系统改进,后者的优点在于视场大、相对孔径大和光学系统无中心遮拦<sup>[1-2]</sup>。杂散光对光学系统的影响是非常有害的,其直接表现在降低像面的对比度,降低信噪比,并且可能会在像面上产生光斑,导致像质下降,某些情况下甚至会造成系统失效<sup>[3]</sup>。因此,杂散光的分析与抑制在离轴三反系统的应用过程中非常重要,消除的方法主要包括光机结构的改进以及后期的图像处理<sup>[4]</sup>。国外的相关工作开始于上世纪 90 年代,目前已经发展到了定量认识阶段,国内的研究主要集中在系统各个镜面对结果的影响方面<sup>[5]</sup>。

目前,国内外对两反系统的杂散光分析研究已经非常深入,长春光机所的史光辉对卡塞格林系统的遮光罩,挡光环等消杂散光措施的设置给出了详细的分析<sup>[6]</sup>;西安光机所的李婷等定量计算了同类系统的杂散光数值<sup>[7]</sup>;美国国家天文台的史蒂芬等人对地基天文望远系统的杂散光抑制方法进行了研究<sup>[8]</sup>。这些工作使用的主要方法是建立实体模型,包括给定各个光学、机械结构表面的光学参数,通过改进的蒙特卡洛法进行光线追迹,确定各离轴角度的杂散光传输路径,得到最初的分析结果。然后,根据结果改进模型,修改遮光罩的设计,在散射路径上加入遮光叶片等,最终减小光学系统杂散光水平<sup>[9]</sup>。本文在总结上述原理的基础上,通过对星载离轴三反望远系统进行建模,确定散射路径,进行重点采样分析,得到该系统的 20°离轴角之间的杂散光 PST 结果,并提出了改进方法。

## 2 杂散光分析模型的建立

### 2.1 离轴三反望远系统的实体模型

用于杂散光分析的离轴三反望远系统的简化模型如图 1 所示,光学系统由前反射镜和 3 块非球面反射镜组成,机械结构部分主要分为遮光罩,前反射镜罩和主体外壳。

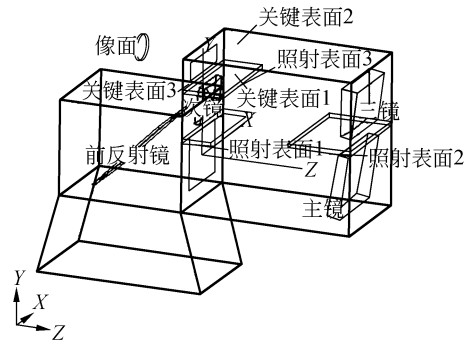


图 1 光机系统的简化模型图

Fig. 1 Simplified model of optical and mechanical system

### 2.2 光机系统结构的表面属性

模型内部表面双向反射分布系数(BRDF)的模型采用下式定义:

$$\text{BRDF}(|\boldsymbol{\beta}-\boldsymbol{\beta}_0|) = \frac{A}{B+|\boldsymbol{\beta}-\boldsymbol{\beta}_0|^g}, \quad (1)$$

其中,  $\boldsymbol{\beta}$  为表面散射的出射方向,  $\boldsymbol{\beta}_0$  为表面镜面反射的出射方向,  $A$ 、 $B$ 、 $g$  为需要拟合的参数。经过查阅大量资料,本文模型中的镜面参数确定为,  $A=0.0015$ ,  $B=1.5 \times 10^{-5}$ ,  $g=1.92$ , 该模型的总散射率为 4%。其余表面采用 AeroglazeZ-306 涂层<sup>[6]</sup>。

### 2.3 杂散光路径分析

造成杂散光的因素主要包括外部辐射源、内部辐射源及非成像杂散光 3 部分。本文中的离轴三反望远系统用于地球表面观测,不存在太阳直射或月球反射等背景光源,工作波段为可见光近红外,不涉及中波和长波红外部分,因此仅需讨论非成像杂散光一方面的影响。对光学系统模型的路径分析工作可用于了解这部分杂散光的传播过程,以使分析结果更加准确。

通过对模型进行光线追迹,得到可直接将光线反射到系统像面的关键表面有 7 个,见表 1。关键表面 1、2、3,如图 1 所示,分别为像面前方主体外壳上的下表面、左侧表面和右侧表面。

表 1 系统关键表面

Tab. 1 Critical surfaces of system

序号	关键表面	序号	关键表面
1	关键表面 1	5	望远系统次镜
2	关键表面 2	6	望远系统主镜
3	关键表面 3	7	前反射镜
4	望远系统三镜		

入射光可以直射或反射到的表面,即系统的照射表面,会根据离轴角的变化而变化,这里仅列出有代表性的  $5^\circ$  离轴角的相关情况。通过光线追迹得到 6 个照射表面,列于表 2。照射表面 1 为前反射镜后方挡块的下表面,照射表面 2 为主镜后方挡块下表面,照射表面 3 为次镜后方挡块下表面,同样示于图 1。

表 2  $-5^\circ$  离轴角的系统照射表面

Tab. 2 Illuminated surfaces with off-axis angle of  $-5^\circ$

序号	照射表面	序号	照射表面
1	前反射镜	4	照射表面 2
2	照射表面 1	5	望远系统次镜
3	望远系统主镜	6	照射表面 3

既是关键表面又是照射表面的表面就会形成一次散射,能够将光线反射到关键表面的照射表面,两者联系在一起构成二次散射路径。由此可以看出,在离轴角  $-5^\circ$  的情况下,系统一次散射路径有 3 条,分别是前反射镜、主镜和次镜的一次散射。二次散射路径有 3 条,分别为照射表面 1 与主镜的散射,照射表面 2 与次镜的散射,照射表面 3 与三镜的散射。其它离轴角的杂散光传播路径分析过程与本节相同。

### 3 杂散光分析与讨论

#### 3.1 杂散光分析

本文对望远系统  $\pm 20^\circ$  离轴角之间的杂散光进行分析,结果用点源透射率(PST)来表示。分别取  $\pm 0.1, \pm 0.5, \pm 1, \pm 2, \pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20^\circ$

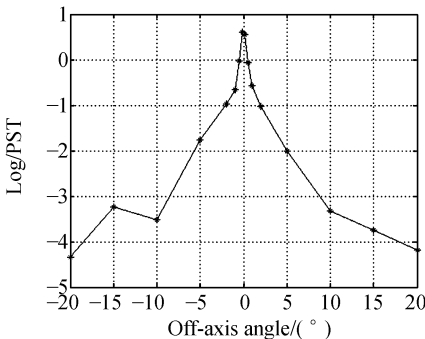


图 2  $\pm 20^\circ$  离轴角内的系统 PST 结果

Fig. 2 PST curve in the off-axis angles of  $\pm 20^\circ$

离轴角进行计算,得到结果如图 2 所示,数值列于表 3。角度的确定主要是考虑到遮光罩的张角,对于孔径光阑,  $> 20^\circ$  的入射光线,将被遮光罩遮挡,因此不予考虑。离轴角很小的情况下, PST 的对数值略大于 0,说明此时的像面照度比入瞳照度略大,但在同一数量级。随着离轴角的增大,系统 PST 显著减小。

表 3  $\pm 20^\circ$  各离轴角的 PST

Tab. 3 PST results in the off-axis angles of  $\pm 20^\circ$

角度/(°)	PST	对数值	角度/(°)	PST	对数值
-0.1	4.02	0.60	0.1	3.56	0.55
-0.5	$9.46 \times 10^{-1}$	-0.02	0.5	$8.54 \times 10^{-1}$	-0.07
-1	$2.25 \times 10^{-1}$	-0.65	1	$2.69 \times 10^{-1}$	-0.57
-2	$1.07 \times 10^{-1}$	-0.97	2	$9.32 \times 10^{-2}$	-1.03
-5	$1.71 \times 10^{-2}$	-1.77	5	$9.69 \times 10^{-3}$	-2.01
-10	$3.02 \times 10^{-4}$	-3.52	10	$4.83 \times 10^{-4}$	-3.32
-15	$5.74 \times 10^{-4}$	-3.24	15	$1.48 \times 10^{-4}$	-3.83
-20	$4.58 \times 10^{-5}$	-4.34	20	$6.63 \times 10^{-5}$	-4.18

像面处各离轴角的总杂散光能量与一次散射杂散光能量列于表 4,从中可以看出,一次散射非常严重,一次散射杂散光占到全部散射杂散光的 90% 以上,是最主要的杂散光来源。在离轴角较小的情况下,所有镜面均有光线直接入射,形成一次散射。离轴角增大到  $20^\circ$ ,一次散射主要由前反射镜形成。

表 4  $\pm 20^\circ$  各离轴角的杂散光像面辐通量与一次散射辐通量

Tab. 4 Stray light flux in imaging plane in the off-axis angles of  $\pm 20^\circ$

离轴角 / (°)	辐通量/W	一次散射 辐通量/W	离轴角 / (°)	辐通量/W	一次散射 辐通量/W
-0.1	$3.93 \times 10^{-1}$	$3.69 \times 10^{-1}$	0.1	$3.48 \times 10^{-1}$	$3.44 \times 10^{-1}$
-0.5	$9.23 \times 10^{-2}$	$8.93 \times 10^{-2}$	0.5	$8.36 \times 10^{-2}$	$8.04 \times 10^{-2}$
-1	$2.20 \times 10^{-2}$	$2.09 \times 10^{-2}$	1	$2.63 \times 10^{-2}$	$2.51 \times 10^{-2}$
-2	$1.04 \times 10^{-2}$	$1.01 \times 10^{-2}$	2	$9.12 \times 10^{-3}$	$8.91 \times 10^{-3}$
-5	$1.68 \times 10^{-3}$	$1.65 \times 10^{-3}$	5	$9.49 \times 10^{-4}$	$8.67 \times 10^{-4}$
-10	$2.96 \times 10^{-5}$	$2.56 \times 10^{-5}$	10	$4.72 \times 10^{-5}$	$4.50 \times 10^{-5}$
-15	$5.59 \times 10^{-5}$	$5.49 \times 10^{-5}$	15	$1.44 \times 10^{-5}$	$1.32 \times 10^{-5}$
-20	$4.47 \times 10^{-6}$	$4.07 \times 10^{-6}$	20	$6.47 \times 10^{-6}$	$6.07 \times 10^{-6}$

#### 3.2 几种望远系统的杂散光分析结果比较

图 3 为文献中的离轴两反月基光学天文望远系统 (LOT)<sup>[7]</sup>, 美国超新星和加速探测器

(SNAP)的 PST 曲线<sup>[10]</sup>与本文结果的比较。其中, LOT 为卡塞格林系统, SNAP 为有中心遮拦的三反射镜系统, 外形结构与卡塞格林系统类似。图中曲线表明, 本文中的离轴三反系统的 PST 值在小离轴角情况下, 与另外两种系统处于同一量级, 大离轴角时大 1 到 2 个量级。从系统光机结构上来说, 两反系统可以将遮光罩做得很长, 避免了较大离轴角光线直接入射关键表面, 消除了一次散射, PST 值很小。而小离轴角入射光线的一次散射, 几种系统都无法消除, 杂散光水平大体相当。

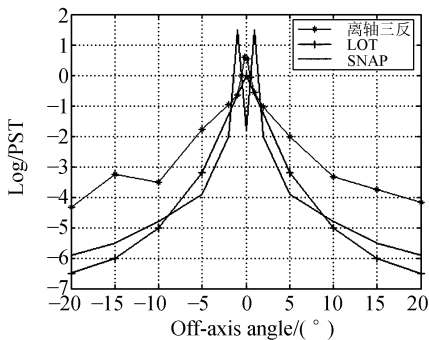


图 3 LOT、SNAP 系统与本文三反系统的 PST 对比  
Fig. 3 PST contrast among LOT, SNAP and three-mirror off-axis telescope

### 3.3 现有系统的改进

从计算结果中可以看出, 以  $-5^\circ$  离轴角为例, 像面辐通量为  $0.00168\text{ W}$ , 其中一次散射杂散光为  $0.00165\text{ W}$ , 为前者的  $98.2\%$ , 其他离轴角的一次散射比例也均在  $90\%$  以上, 系统的一次散射非常严重, 改进应从这方面入手。

### 参考文献:

- [1] 潘君骅. 光学非球面的加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.  
PAN J H. *The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 金光, 张亮, 胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 155-159.  
JIN G, ZHANG L, HU F S. Investigation on space

遮光罩所起的主要作用是减少大离轴角光线直射关键表面所形成的一次散射。对于现有的遮光罩,  $20^\circ$  离轴角的入射光线  $10\ 000\text{ W}$  有  $7\ 900\text{ W}$  可以入射到前反射镜上。在不影响前反射镜正常工作的情况下, 对遮光罩进行修改, 减小遮光罩的张角, 上述入射光线减小为  $3\ 900\text{ W}$ , 此时的像面辐通量为  $4.04 \times 10^{-6}\text{ W}$ , 比原值  $6.47 \times 10^{-6}\text{ W}$  减小了  $37.6\%$ 。

要想消除如  $0.1^\circ$  这样小离轴角的一次散射杂散光, 遮光罩需要做得非常长, 这是不可能也没有必要的。改变现有镜面的  $AB_g$  模型, 新模型的总散射率为  $0.57\%$ , 其他条件不变, 得到的结果像面辐通量为  $0.078\text{ W}$ , 而在之前以  $4\%$  散射率计算时该值为  $0.348\text{ W}$ , 可见降低镜面散射率对杂散光的减小非常有效。

## 4 结 论

本文定量地对离轴三反望远系统进行了杂散光分析, 结果表明,  $0.1^\circ$  离轴角杂散光的 PST 等于  $3.56$  和  $4.02$ , 为  $100$  数量级,  $20^\circ$  离轴角 PST 等于  $6.63 \times 10^{-5}$  和  $4.48 \times 10^{-5}$ 。三反系统的 PST 值对  $0.1^\circ$  离轴角与两反系统大体相等,  $20^\circ$  离轴角约大 2 个数量级。

表 4 表明, 系统杂散光形成的方式主要为一次散射。减小杂散光的方法可以分为以下两种: 大离轴角时, 主要考虑修改遮光罩, 使入射光线不能直射关键表面; 在小离轴角的情况下, 应降低反射镜表面的散射率, 使杂散光减小。

从现有研究工作得到的结果来看, 杂散光 PST 值在允许范围之内。

- optical system of high F number and high resolution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 155-159. (in Chinese)
- [3] 黄强. 空间光学系统的杂散光分析[J]. 红外, 2006, 27(1): 26-33.  
HUANG Q. Analysis of stray light in space optical system [J]. *Infrared*, 2006, 27(1): 26-33. (in Chinese)
- [4] 原育凯, 李欣耀, 裴云天. 基于模板的 FY-2 一级杂散光模拟[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 45-49.

- YUAN Y K, LI X Y, PEI Y T. Simulating first order stray light of FY22 VISSR using templates[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):45-49. (in Chinese)
- [5] 王成良, 陈桂林, 孙胜利, 等. 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):2822-2824.
- WANG CH L, CHEN G L, SUN SH L, *et al.*. Stray light analysis of the cook three-mirror of-axis reflective telescope [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(18):2822-2824. (in Chinese)
- [6] 史光辉. 消除卡塞格林系统杂光的措施[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(5):10-16.
- SHI G H. Methods preventing stray light emerged in Cassegrain systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(5):10-16. (in Chinese)
- [7] STEPHEN M P. A stray light analysis of the apache point observatory 3. 5-meter telescope system [J]. *SPIE*, 2003, 4842:128-138.
- [8] 李婷, 杨剑锋, 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, 137-142.
- Li T, YANG J F, RUAN P, *et al.*. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36:137-142. (in Chinese)
- [9] GARY L P. Stray light calculation methods with optical raytrace software [J]. *SPIE*, 1997, 3780:132-137.
- [10] SHOLL M J, GROCHOCKI F S, FLEMING J C, *et al.*. Stray light design and analysis of the SNAP telescope [J]. *SPIE*, 2007, 6675:66750C.

#### 作者简介:



**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工学博士学位, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。Email: yanxc@ciomp.ac.cn



**许杰** (1984—), 男, 北京人, 硕士研究生, 2006年于浙江大学获得工学学士学位, 主要从事可见光、近红外短波、红外宽波段光学系统的设计及杂散光的分析工作。E-mail: xujie027@126.com



**彭岩** (1983—), 女, 黑龙江虎林人, 硕士研究生, 2005年于燕山大学获得工学学士学位, 主要从事光学精密仪器的结构设计工作。E-mail: pengyan\_163@126.com