

文章编号 1004-924X(2009)03-0621-05

空间相机消杂光设计及仿真

钟 兴^{1,2}, 贾继强¹

- (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:针对空间相机中的杂光会引起像质模糊和对比度下降问题,设计了空间相机消杂光机构。研究的空间相机基于同轴三反系统,消杂光机构主要由内外镜筒、视场光阑、里奥光阑和挡光板组成。在内外镜筒的设计中参考了卡塞格林系统的设计方法并利用 CAD 建模进行辅助设计。为了对消杂光效果进行评价,采用了基于计算机随机光线 Monte-Carlo 仿真方法。介绍了对表面的散射特性进行描述的双向散射模型、关键面的选取和模型的建立。利用计算机分析得到了空间相机的杂光系数和点源透射比的曲线,子午方向 $+10^\circ$ 入射的杂光在像面造成的杂光系数在 0.35% 以下, $0\sim 20^\circ$ 的非成像视场点源透射比为 10^{-6} 量级,该结果可作为进一步优化设计消杂光系统的参考依据。

关键词:空间相机;同轴三反;杂光;仿真

中图分类号:V475.2;V241.03 **文献标识码:**A

Stray light removing design and simulation of spaceborne camera

ZHONG Xing^{1,2}, JIA Ji-qiang¹

- (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: A stray light removing mechanism is designed for improving image contrast and image de-blurring in a spaceborne camera. The spaceborne camera researched in this paper is based on on-axis Three Mirror Anastigmatics(TMA), and the stray light removing mechanism consists of inner and outer baffles, field stop, Lyot stop and blocking board. Cassegrain system is taken as a reference in the CAD modeling for design of inner and outer baffles and the random light Monte-Carlo simulation method is adopted to evaluate the effect of stray light removing. Moreover, the Bidirectional Scattering Distribution Function(BSDF) for describing the scatter character of surfaces, choice of key surfaces and the establishment of model are introduced and the stray light ratio and Point Source Transmittance (PST) curves are acquired by computer analysis. Results show that the stray light ratio is below 0.35% when stray light incidents at $+10^\circ$ meridional direction and the PST is at the level of 10^{-6} in $0\sim 20^\circ$. These results can offer a good reference for the further optimization design.

Key words: spaceborne camera; on-axis Three Mirror Anastigmatics(TMA); stray light; simulation

1 引言

空间相机的杂光指到达光学系统像面的非成像光线,它对光学系统的影响表现为像面对比度的下降,从而引起传递函数的退化和信噪比的降低。特别是对于以光谱细分应用为目的的光学遥感设备如成像光谱仪,杂散光可引起光谱响应的失真。杂散辐射的主要来源分为 3 类^[1]:(1)外部辐射。对空间光学遥感器而言主要指太阳光、地物散射光和大气漫射光。外部辐射经光学系统内部多次折反射到达探测器。(2)内部辐射。指电机、温控热源等产生的红外辐射。(3)成像光线非正常传递。指由于路径中光学表面引起的杂散辐射。第二类和第三类杂散光主要针对特定的成像系统而言,而第一类杂散光则普遍存在于所有的成像光学系统中。

本文研究的空间相机基于同轴三反光学系统,其口径达到 $\Phi 500$ mm。同轴三反系统具有筒长短、焦距长和相对孔径小的特点,可以看作是从卡塞格林系统演化而来,它与卡塞格林系统的共同点是具有同轴安装的主镜和次镜。因此,在本文的研究中,主镜和次镜间的消杂光设计借鉴了卡塞格林系统的设计方法。

对于消杂光效果的测试,实验室主要采用整体包覆后用积分球测试的办法。本文采用计算机仿真评价消杂光效果,得到了该光学系统加上消杂光措施后的特定入射角度杂光的杂光系数曲线和大角度范围内的点源透射比曲线。根据得到的结果,认为本文的消杂光设计可满足空间遥感的应用要求。

2 消杂光设计

消杂光机构主要由内外镜筒、视场光阑、里奥光阑和挡光板组成。内外镜筒可消除大部分一次杂光,其内部挡光环采用多级设计;视场光阑放置在一次像面处;里奥光阑放置在出瞳处,消杂光的同时可控制轴外像点弥散;挡光板位于光路的折叠部分,可消除直接入射到焦平面上的残余一次杂光。光路和内外镜筒的示意图如图 1 所示。

主次镜之间为了尽量减少杂散光到达一次像面,采取的措施是加上外镜筒、内镜筒和次镜遮

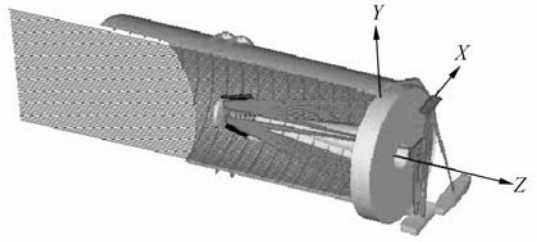


图 1 消杂光设计光路

Fig. 1 Optical path of stay light removing design

光罩^[2]。图 2 中,光线 1 为主镜外直径决定的视场边缘光线,光线 2 是由遮拦比决定的内孔径光线。

次镜遮光罩点 C 是由光线 2 和光线 1 经主镜反射后光线的交点。内镜筒点 A 是由光线 1 经主镜、次镜依次反射后的光线和光线 2 经主镜反射后的光线交点。外镜筒的边缘点 D 是由 AC 连线延长线与外镜筒的交点^[3-5]。

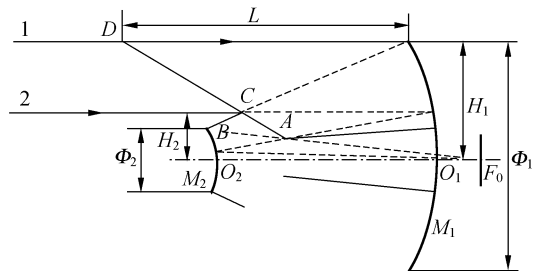


图 2 遮光罩与杂光路径

Fig. 2 Baffle and pathway of stray light

外镜筒可以阻止外界杂散光直接入射到像面,但外镜筒本身具有一定的反射率,射到外镜筒上的光线有可能反射到反射镜面,多次反射后到达像面形成干扰。因此,除对外镜筒内壁的吸光涂层有一定要求外,还要进行内挡光环的设计。

如图 3 所示,虚线为不加挡光环时外镜筒的位置,采用等高挡光环设计,挡光环的高度为 h 。外界杂散光由次镜遮光罩边缘点 B 入射,挡光环设置的目的是隔断 B 点射到镜筒壁上的绝大部分杂散光到达主镜的路径。在加上高度 h 后的外镜筒壁(实线表示)上选择靠近 F 的一点与 E 点和 B 点连接作为外镜筒接收杂散光的最小角度路径。在此路径与虚线的交点处设置两个挡光环,与外镜筒壁交点为 H 和 G 。推广下去,由最小角度路径与虚线的交点进行 B 、 E 点的连接,便

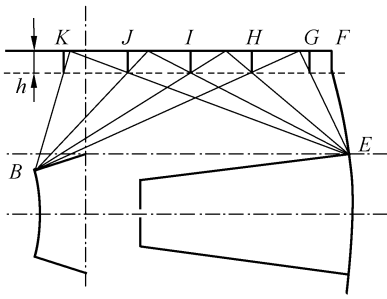


图3 外镜筒挡光环位置确定示意图

Fig. 3 Position of blocking rings

可确定其余挡光环的位置,直到接近外镜筒边缘,设置最外一级挡光环。本文在 1 180 mm 的长度内一共设计了 12 级挡光环。

通过在 CAD 中精确建模,分析杂散光的路径,可以容易地得到各级挡光环的间隔距离,从而避免繁琐的数学计算和公式推导。

遮光罩采用高比刚度的碳纤维复合材料,其质量仅为 5.3 kg。

3 随机光线 Mento-Carlo 仿真

3.1 基于计算机仿真的杂光分析

传统的积分球检验的办法很难应用于此类大口径的光学系统,计算量也很大。近年来,人们越来越多地采用计算机仿真的方法对光学系统的杂散光进行计算,特别是对于大口径的光学系统。目前使用较多的有光学设计软件 CODE V 的杂散光分析模块 LightTools、杂散光分析软件 ASAP 和 SOLID WORKS 光学插件 OPTI WORKS。此外,由 Lambda Research 公司编写的在车灯及背光源设计行业广泛应用的 TracePro 软件,也可以用于光学系统杂光的分析。

对杂光进行计算,主要采用基于随机模拟的 Mento-Carlo 统计法和基于光传播规律的光线追迹法,本文使用前者。仿真软件一般以杂光系数和点源透射比(Point Source Transmittance, PST)作为杂散光评价的输出结果。一般而言,杂光系数体现的数据比较详细,可用于细部分析;但对于整体消杂光性能分析而言,PST 更有意义。杂光系数 η 定义为:

$$\eta(x, y) = \frac{L_s(x, y)}{L_s}, \quad (1)$$

式中, $L_s(x, y)$ 表示杂光在焦点坐标为 (x, y) 处引起的亮度, L_s 为入射杂光原始亮度,而点源透射比由(2)式定义^[6]:

$$\text{PST}(\phi) = \frac{P_d(\phi)}{P_d(0)}, \quad (2)$$

式中, $P_d(\phi)$ 是从离轴为 ϕ 的点源落在探测器上的辐射通量; $P_d(0)$ 是从位于轴上的同一点源落在探测器上的辐射通量。

3.2 表面散射属性

在计算机分析中,需要准确地描述与杂光有关的散射表面如粗糙内壁、碳纤维表面的散射属性。因此,定义了双向散射分布函数(Bidirectional Scattering Distribution Function, BSDF)^[7]。

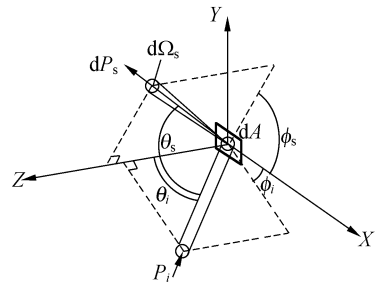


图4 双向散射函数定义示意图

Fig. 4 Definition of BSDF

如图 4 所示,对于一个小的照亮区域 dA 而言,BSDF 被定义为从给定方向入射的光被该表面散射后从另一给方向出射的辐射通量。图 4 中, θ_i 和 ϕ_i 定义了入射方向的天顶角和方位角, λ_s 为入射光的波长;而 θ_s 和 ϕ_s 定义了散射观察方向的天顶角和方位角, λ_i 为散射光的波长。BSDF 被写成与天顶角、方位角和波长有关的函数:

$$\text{BSDF} = \rho(\theta_i, \phi_i, \lambda_i; \theta_s, \phi_s, \lambda_s) = \frac{L(\theta_s, \phi_s, \lambda_s)}{E(\theta_i, \phi_i, \lambda_i)}, \quad (3)$$

其中, E 为入射照度,单位为 W/m^2 , L 为散射后的亮度,单位为 $\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$,因此 BSDF 的单位为 $1/\text{sr}$ 。

J. E. Harvey^[8-9]通过研究,认为光学抛光表面的粗糙度远小于光波长,其散射模型与粗糙表面也相同,当使用方向余弦代替角度时,光学表面的 BSDF 函数独立于入射方向,类似于线性系统理论中的平移不变性。根据这个原理,Harvey 发展了利用拟合系数和向量描述光学表面散射特性的 ABg 模型,可以大大提高计算机 Mento-Carlo

分析中反射面光线追迹的速度。

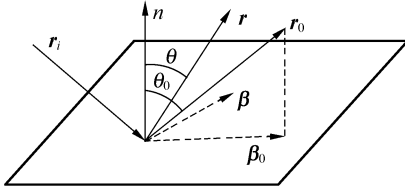


图 5 ABg 模型的向量定义

Fig. 5 Vector definition of ABg model

图 5 解释了 ABg 模型所表达的双向散射函数的向量定义。入射方向、镜面反射方向和散射观察方向分别用单位向量 r_i 、 r_0 和 r 表示。 β_0 和 β 分别是 r_0 和 r 在垂直法线平面的投影,由平移不变定理和 BSDF 的定义可知,BSDF 为 $|\beta - \beta_0|$ 的函数。表达如式(4)。

$$\text{BSDF}(|\beta - \beta_0|) = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g}, \quad (4)$$

其中, A , B , g 是拟合系数。在高精度应用场合,一般使用专门的测试仪器进行精密测量。Lambda Research 公司有专门的 BSDF 测试仪,测得的数据输入 Tracepro 软件自带的 BSDF Wizard 进行计算就可以直接得到材料的 ABg 系数。

一般而言, A , B , g 的取值与光学元件材料、抛光方法和抛光角度有关。 B 的典型值在 0.001 左右, g 一般取 1~3 之间,而 A 值的变化范围较大。

本文研究的空间相机反射镜采用 SiC,表面粗糙度 < 5 nm。参考文献[10]中,选取 $A = 0.0015$, $B = 0.0014$, $g = 2$ 进行分析。对杂散光有一定影响的非镜面元件采用 Z306 涂层,在所关注的波段内具有理想的漫反射的性质,平均半球全反射系数接近 9.5%。

3.3 关键面选取

关键面是所有散射光的来源。被照明面到关键面是杂散光的主要路径。在分析软件中指定关键面可以在等效前提下提高光线落在探测器上的概率。在所分析的系统中,视场分割反射镜、主镜、次镜、三镜和两个折叠镜都是关键面,即系统杂散光的主要来源。关键面边缘的散射,主镜孔内壁反射等也会产生杂光,在光线追迹过程中也应重点考虑。

3.4 模型建立

OPTIWORKS 和 TRACEPRO 都提供了丰富的 ACIS 机械转换接口,因此模型建立的工作可在其它工作者熟悉的三维建模环境如 UG 或 PROE 中进行。本文的光学系统加装与消杂光有关的结构后,在 TRACEPRO 中的状态如图 6 所示。在随机光线模拟中,一般要分析 10^6 条以上的光线才能得出与真实情况较为吻合的结果。

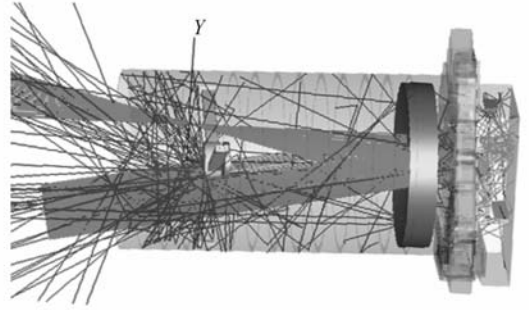


图 6 杂光分析光机结构模型

Fig. 6 Opto-mechanical model for stray light analysis

3.5 分析结果

光学系统的 y 向离轴视角为 0.65° , x 向工作视场为 $\pm 0.6^\circ$ 。在初步分析中,先研究了子午方向的消杂光性能。

图 7 是 $+10^\circ$ 入射的 500~800 nm 范围杂光在焦面 CCD 行方向形成的杂光系数曲线。可以看出,在这种情况下,杂光系数最大不超过 0.35%,对全色波段调制度的影响不大。

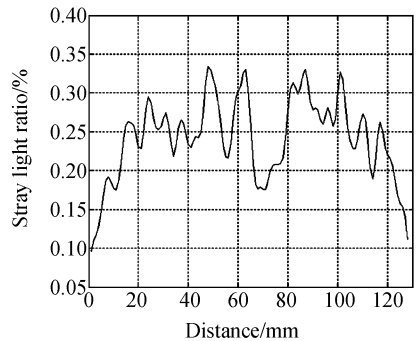


图 7 焦面 CCD 行方向杂光系数(杂光以 $+10^\circ$ 入射)

Fig. 7 Stray light ratio in linear CCD array direction

(stray light incident at $+10^\circ$)

根据 PST 的定义,用点源入射,在子午方向从光轴开始测试,每离轴 1° 测试一组数据,观察 $0 \sim 20^\circ$ 的消杂光情况,得到光学系统的 PST(点

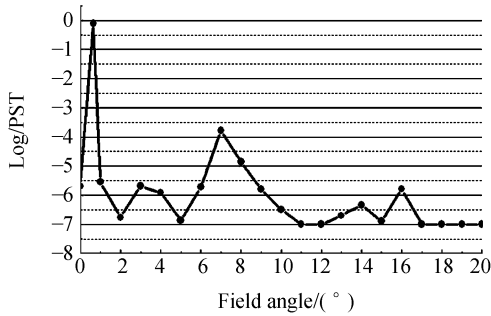


图8 点源透射比曲线

Fig.8 Curve of point source transmittance

源透射比)曲线如图8所示。分析曲线可以看出,系统无直接入射焦面的一次杂光;工作视场外多

参考文献:

- [1] 史光辉. 消除卡塞格林系统杂散光的措施[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)
- [2] 钟兴. 反射光学系统杂散光的消除[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316-318.
ZHONG X. Stray light removing of reflective optical system. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)
- [3] ANDREW T Y. Design of cassegrain light shields [J]. *App. Opt.*, 1967, 6(6): 1063-1067.
- [4] SONG N. Baffles design for an axial two-mirror telescope [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(9): 2353-2356.
- [5] ROBERT P B. Current technology of stray light [C]. *SPIE*, 1986, 675: 2-12.

作者简介:



钟兴(1982—),男,博士研究生,主要从事空间遥感光学系统的研究。E-mail: ciomper@163.com

次杂光的 PST 在 7° 处有最大值,但不超过 10^{-4} ; 其余视场的 PST 在 10^{-6} 量级。

4 结论

计算机辅助设计及仿真模拟是杂散光分析及消杂光设计的有利手段,可以解决在光学系统口径比较大的情况下,杂光测试费用过于高昂、实验过于繁琐的问题。本文初步得到的分析结果可作为空间相机消杂光机构的研制参考,按照本文的方法,计划在后续工作中进行更详细的分析,为消杂光设计提供更充分的依据。

- [6] 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)
- [7] BÄUMER S. SIOS- a contribution to standard procedures in stray light measurements [C]. *SPIE*, 1999, 3739: 414-421.
- [8] SCHLICK C. A Survey of shading and reflectance models [C]. *Computer Graphics Forum*, 1994, 13(2): 121-131.
- [9] HARVEY J E, KOTHA A. Scattering effects from residual optical fabrication errors [C]. *SPIE*, 1995, 2576: 155-174.
- [10] Lambda Research Corporation. EO-1 stray light analysis report No. 3 [R]. *Lambda Research Corporation*, 1998.



贾继强(1966—),男,吉林长春人,硕士生导师,研究员,研究方向为航空相机及机载平台的总体设计。E-mail: jiajiqiang@sohu.com

(本栏目编辑:李树军)