

文章编号: 1672-8785(2014)09-0010-05

空间可见光相机的杂散光分析与抑制

张 凯 何 欣 刘 强

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 当空间可见光相机对地物目标进行成像时, 视场内外的辐射会引起像面上产生杂散辐射, 从而降低相机的成像质量, 严重时可能会造成相机无法正常工作。为了提高相机的成像性能, 介绍了可见光系统中杂散光的产生机理及其抑制措施, 建立了相机的光机模型, 分析了系统的杂散光, 改进了遮光系统的设计。利用建立的杂光系数测量装置测量了相机镜头的杂光系数, 并验证了建模分析结果。

关键词: 空间相机; 杂散光; 遮光系统; 杂光系数; 黑斑法

中图分类号: TH745; V19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.09.003

Analysis and Suppression of Stray Light in Spaceborne Visible Light Camera

ZHANG Kai, HE Xin, LIU Qiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: When a spaceborne visible camera is imaging the objects on the ground, the radiation both inside and outside its field of view may bring stray light to the image plane of it. The stray light may degrade the imaging quality of the camera and even affect the normal operation of the camera. To improve the imaging performance of the camera, the generation mechanism and suppression measures of the stray light in a visible light system are presented. An optical and mechanical model of the camera is established. The stray light in the system is analyzed. The design of the baffle system is improved. Finally, a stray light measurement setup is used to measure the veiling glare index of the camera lens. Thus, the modeling analysis result is verified.

Key words: remote sensing camera; stray light; baffle system; veiling glare index; black-patch measurement

0 引言

空间遥感相机通常工作在系统视场外存在强烈辐射源(如太阳、月亮和地球等)的恶劣环境中, 而传感器需要探测的目标信号往往又非常微弱。这些强烈的杂光辐射比所探测目标的辐射强度常常要高出几个数量级。这类光线进入系统后, 经过光学元件表面的反射以及机械

构件表面的散射和衍射等形成非成像光线^[1]。

非成像光线相当于系统的“噪声”, 到达探测器表面并形成杂散辐射后, 会降低图像的对比度、清晰度和调制传递函数。它不仅会影响图像色彩的还原, 而且有时还会在像面上产生或大或小的光斑, 严重时目标图像会被杂散辐射噪声湮没。随着空间光学技术的飞跃发展, 大口径、长焦距光学系统和高灵敏度、低探测阈值的

收稿日期: 2014-07-04

作者简介: 张凯(1981-), 男, 吉林长春人, 主要从事机械结构设计、机械制造和系统装调等方面的研究。

E-mail: zhangkaihai@sohu.com

光学系统越来越多, 因此杂散光的抑制与分析也被提高到了一个重要地位。

光学系统的杂散光抑制要求应当由目标强弱和工作背景视场外的光源情况共同确定。系统的杂光抑制贯穿了整个系统的设计、加工、装配和测试的全过程。

1 杂散光的产生

杂散光产生的原因错综复杂, 不仅与光学系统的制作工艺及材料有关, 而且还与像差特性、衍射现象以及目标特性有关。

如图 1 所示, 根据产生机理的不同, 杂散光可以分为以下几类^[2]:

(1) 由反射引起的杂散光。比如入射光在光学元件表面之间的反射、光阑表面的反射以及机械元件内壁的反射等。

(2) 由散射引起的杂散光。比如由光学元件表面缺陷及内部气泡引起的散射、机械元件内壁的散射以及由胶合元件中的胶合剂引起的散射等。

(3) 由衍射引起的杂散光。比如由透镜边缘和挡光环等机械结构边缘衍射形成的杂散光。

(4) 视场外入射光的直接照射。比如由大气散射光和太阳光等光线的直接照射形成的杂散辐射。

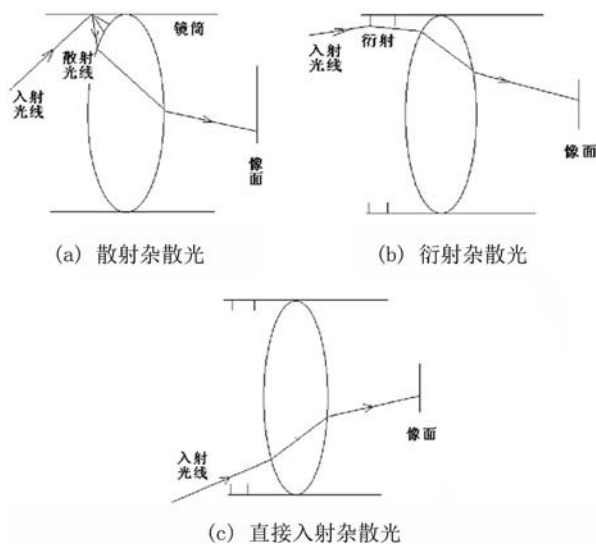


图 1 部分杂散光的产生机理

图 2 为杂散光的能量传递理论图。其理论计算公式如下^[3]:

$$d\Phi_c = BRDF(\theta_i, \psi_i, \theta_o, \psi_o) \cdot d\Phi_s \cdot d\Omega_{sc} \quad (1)$$

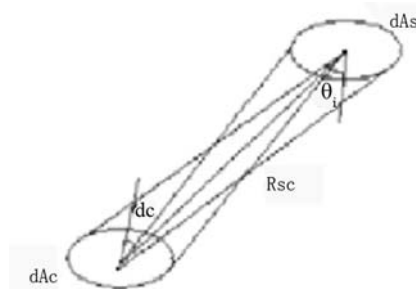


图 2 杂散光的能量传递理论图

若要减少接收面 dA_c 所接收到的杂散辐射通量, 则可通过以下措施实现:

(1) 减少杂散光入射能量或上一级表面的出射能量 $d\Phi_s$;

(2) 减小材料表面的双向反射分布函数 (BRDF), 如涂覆吸收涂层;

(3) 采用遮挡措施, 减小几何结构因子, 如设计专门的遮光罩和光阑等。

在 3 个影响杂散光的因素中, 只有第三个因素需要通过追迹光线来详细设计。

2 杂散光的抑制

关键表面是指能够从探测器直接看到的系统内表面。如果系统内某一个结构表面既是光源直接照射表面同时又是关键表面, 那么该表面就被定义为一次散射表面。视场外光源所发出的光经过该表面的一次散射后就能到达像面。如果系统内某一个结构表面仅是光源直接照射表面或者仅是关键表面, 那么该表面就被定义为二次或二次以上散射表面。通常进行消杂散光设计的具体步骤如下^[4]:

(1) 从像面开始反向进行光线追迹, 以确定关键表面。

(2) 由杂散光源方向上的入射光线确定系统的光源直接照射表面。

(3) 从关键表面和光源直接照射表面中找出相同表面, 即确定一次散射表面。

(4) 分析主要的一次散射路径, 确定是否能够将这些表面从一次散射路径中移出。若不能

移出,则需采取遮拦措施。若不易或无法遮拦,则需进行计算分析。

(5) 确定二次散射路径。

(6) 计算杂散光抑制水平。

图 3 所示为本文介绍的可见光相机的光学设计。其中,光学系统为离轴三反结构,在第三反射镜与焦面之间设有一个平面镜折转光路。

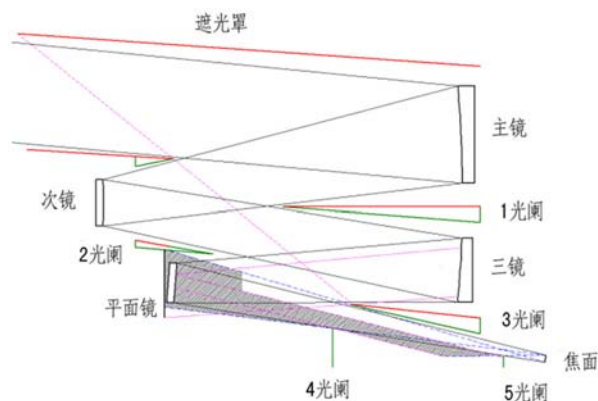


图 3 可见光相机的光学系统

主遮光罩是抑制杂散光的首要手段。该方法可以避免非成像光线(即一次杂光)直接到达光学系统表面,并能抑制大角度入射光线,但却无法抑制由系统内部原因产生的杂散辐射以及视场外小角度光线的直接照射。

按照光学设计留出的空间,将遮光罩安置在主镜上方,较相机延伸出 350 mm,并与成像光路之间保留 15 mm 间距。光阑主要分布在主镜与三镜之间(1 光阑)、次镜与平面镜之间(2 光阑)、三镜与焦面之间(3 光阑),3 组光阑与成像光路之间保留 5 mm 间距。遮光罩与 3 组光阑配合使用,可以完全阻挡一次杂光照射焦面。

在遮光罩和 3 组光阑的基础上,我们对可见光相机的消杂光系统进行深入设计。首先从焦面出发进行光线追迹,确定重要表面。图 2 中双点划线圈定的区域为重要表面。然后通过杂散光追迹确定光源直接照射表面。通过追迹,发现近轴杂光可以经三镜和平面镜的反射照射到 2 光阑和 3 光阑的下方区域。图 2 中虚线圈定区域为光源直接照射表面。最后通过分析重要表面和光源直接照射表面的共有区域,确定了一

次散射表面。图 2 中剖面线覆盖区域为一次散射表面,主要包括平面镜后方的机械结构表面(大部分被平面镜遮拦)、平面镜与焦面之间的机械结构侧壁表面。通过设置 4 光阑和 5 光阑,尽量减小一次散射表面的面积。剩余的一次散射表面主要是侧壁区域,阻挡起来相当困难。而且侧壁区域中入射杂光和出射杂光的角度都很小,属于能量衰减较大的角度范围,所以对相机的杂光系数影响有限,暂时无需采取控制措施。

通过光线追迹方法确定二次散射路径的过程相当复杂,而且其对相机的杂光系数影响较小,所以可在计算机进行分析时再进行追迹。

为了减少由挡光阑边缘产生的衍射,将光阑边缘设计成 30° 倾角,且倾角朝向入射光方向[5]。

3 杂散光的计算分析

经过设计,可见光相机采用遮光罩和光阑进行杂光抑制,并在相机内表面上喷涂消杂光黑漆,其吸收率为 90%,反射率为 6%,散射率为 4%。该相机仍有一次散射表面没有遮拦,二次散射路径也没有追迹,所以需要通过对分析软件进行建模分析才能得出精确结果。

分析过程如下:(1) 对反射镜的光学特性和光机结构的散射特性进行准确建模;(2) 利用蒙特卡洛法进行光线追迹;(3) 计算点源透过率(Point Source Transmittance, PST);(4) 通过 PST 值计算杂光系数[6]。

采用 APEX 杂散光分析软件对系统杂光进行分析。首先建立系统模型,对各表面进行光学属性赋值(包括反射、散射及吸收),并通过追迹光线确定所建系统模型的准确性。然后计算不同入射角度下的 PST 值。PST 的定义如下:视场外离轴角为 θ 的光源在像面上产生的辐照度 E_d 与垂直于该点源的输入孔径上的辐照度 E_i 之间的比值,即

$$PST(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i} \quad (2)$$

PST 值是评价光学系统的杂散光抑制能力的重要指标之一。它与视场外杂散光源的强度无关,其描述的是光学系统自身对杂散光的衰减能力,是一个可检测指标。当系统的 PST 值

确定以后, 同时已知入瞳处的杂散光照度值, 即可计算出系统像面处的杂散光数值。

作为一个离轴三反系统, 可见光相机在孔径偏置方向上并不对称, 需要在正负角度上独立建模, 分开追迹光线。该系统在成像视场方向上是对称的, 只需在一侧建模即可表征在正负入射角度上的杂散光情况。在建模时, 杂散光为以一定角度入射的准直光。

3.1 一次杂光分析

一次杂光是指不经过散射而直接照射或者通过镜面反射照射到焦面的杂光。一次杂光的能量没有经过衰减, 与探测目标的信号强度相当, 所以在光学系统中是不允许出现一次杂光的, 而且一次杂光也是杂光分析中首先要分析的项目。通过光学追迹可以看出, 可见光相机不存在一次杂光, 已经完全被遮光罩和 3 组光阑遮挡。

3.2 多次杂散光分析

为了分析系统的一次散射和多次散射杂光, 在建立系统模型时, 选取标准 Lambertian 模型, 总积分散射值设置为 10%, 光学散射级数为 3, 每条光线的散射条数为 10 条。

在子午和弧矢方向上的不同离轴角视场内追迹光线, 根据入射角选择 5° 步长进行光线追迹 (见图 4)。

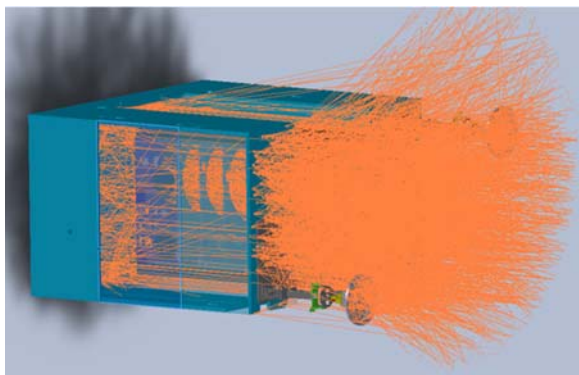


图 4 多次杂散光的追迹图

利用 Origin 软件对计算结果进行数据整理和曲线绘制 (见图 5 和图 6)。可以看出, 在子午方向上, 当入射角为 -35° 时, 杂散光的 PST 值最大, 为 1.9×10^{-4} ; 在大部分入射角度下, 杂散

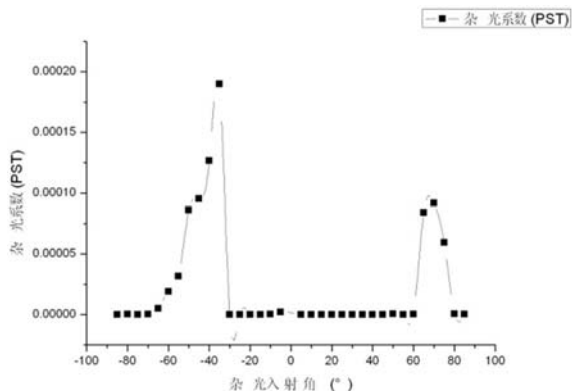


图 5 子午方向上杂散光的 PST 值统计图

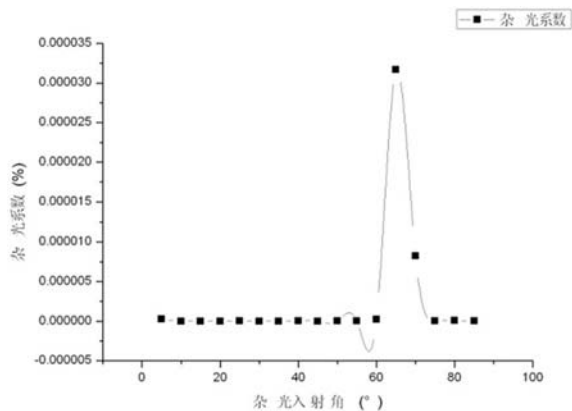


图 6 弧矢方向上杂散光的 PST 值统计图

光的 PST 值处在 1×10^{-8} 量级; 在正入射角下, PST 的最大值出现在 70° 入射角左右, 为 9.2×10^{-5} 。在弧矢方向上, 当入射角为 65° 时, 杂散光的 PST 值最大, 为 3.9×10^{-5} 。

3.3 系统 PST 值与杂散光系数的转换

杂光系数的定义如下: 放在亮度均匀的扩展光屏上的理想黑斑, 在被测光学系统的像面上形成的黑斑像中心的照度与黑斑移去时像面上的照度之比, 一般用百分数表示。其计算公式为

$$V = E_a / E \quad (3)$$

式中, V 为杂光系数; E_a 为有黑斑时像面上的照度; E 为无黑斑时像面上的照度^[7]。

3.3.1 有黑斑时的像面辐照度

黑斑法中的亮度均匀扩展到光屏上的每一面元 dS 上时可看作是 PST 计算中的点源, $d\alpha$ 为光屏上半径为 r 的环带上的面元, 则

$$dS = r \cdot dr \cdot d\alpha \quad (4)$$

若该面元与光学系统入口的中心连线和系统光轴的夹角为 ϕ ，则该面元在系统像面上引起的辐照度为

$$dE_d(\theta) = \tau \cdot \text{PST}(\theta) \cdot dE_i(\theta) \quad (5)$$

若垂直于该面元的光学系统输入孔径对该面元所成的立体角为 $d\Omega$ ，则由辐射度学可知，该面元在此立体角范围内发出的辐通量为

$$d\Phi = B \cdot dS \cdot d\Omega \cdot \cos \theta \quad (6)$$

用 L 表示面元 dS 的辐亮度，则

$$dS = L^2 \frac{\sin \theta}{\cos^3 \theta} d\theta d\alpha \quad (7)$$

用 A_0 表示垂直于该面元的光学系统输入孔径的面积，则

$$d\Omega = \frac{A_0}{r_{12}^2} \quad (8)$$

面元 dS 在像面上的辐照度可表示为

$$dE_i(\theta) = d\Phi/A_0 = B \sin \theta d\theta d\alpha \quad (9)$$

此时，光屏在像面上的照度可通过对式 (9) 进行积分得到，即

$$E_d(\theta) = 2\pi B\tau \int_0^{2\pi} \text{PST}(\theta) \sin \theta d\theta \quad (10)$$

3.3.2 无黑斑时的像面辐照度

若被测光学系统的焦距为 f' ，相对孔径为 $1/F$ ，像方孔径角为 U' ，入瞳直径为 D ，系统透过率为 Γ ，由辐射度理论可知，辐亮度为 L 的均匀光屏在光学系统像面中心的辐照度为

$$E = \pi B\tau \cdot \sin^2 U' \quad (11)$$

望远物镜的物距一般比焦距大得多，所以

$$E = \frac{\pi B\tau}{4F^2} \quad (12)$$

3.3.3 杂光系数 V 与 PST 的关系

由上面推导可得，杂光系数 V 与 PST 之间的关系为^[8]

$$V = \frac{E_d}{E} = 8F^2 \int_{\omega_0}^{2\pi} \text{PST}(\theta) \sin \theta d\theta \quad (13)$$

本文分析的光学系统在子午和弧矢两个方向上不存在对称性，因此需要分别对光学系统

的两个方向进行光线追迹。通过公式推导，得到杂光系数 V 与 PST 之间的关系：

$$V = \frac{E_d}{E} = 8F^2 \int_{\omega_0}^{\pi/2} \text{PST}(\theta) \cos \alpha \cos \beta d\alpha d\beta \quad (14)$$

式中， α 为子午角度； β 为弧矢角度。

根据式 (14) 分别对子午方向和弧矢方向上的 PST 进行积分计算，可以算得可见光相机在所有入射角范围内的 PST 积分和。子午轴方向上的 PST 值为 0.000404，弧矢轴方向上的 PST 值为 0.0039，所有角度下的 PST 积分总和 (即杂光系数) 为 2.39%。

4 结束语

本文基于辐射传递理论，研究了光学系统中杂散光的产生和抑制原理。然后结合可见光相机的实际情况，在光学系统设计的基础上，对消杂光系统进行了设计。以完全阻止一次杂光为原则，设计了遮光罩和部分光阑。通过光线追迹确定了一次散射表面，并使用光阑对部分一次散射表面进行了遮挡。

根据光学和机械系统的设计参数，建立了杂散光分析模型，分析和计算了系统的 PST 值。最后导出了点源透过率和杂光系数的计算公式，并计算出可见光相机的杂光系数为 2.39%。结果表明，该消杂光系统设计合理，可以使可见光相机的杂散光系数满足小于 5% 的指标要求。

参考文献

- [1] 卢秉恒. 机械制造技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 孙恒, 李继庆. 机械原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011.
- [3] 闻邦椿. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [4] 苗健宇, 张立平, 吴清文, 等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1649-1653.
- [5] 李威, 刘宏伟. 空间光学遥感器中碳纤维复合材料精密支撑构件的结构稳定性 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2174-2179.
- [6] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2486-2490.
- [7] 杨进松. 空间相机桁架结构末态相关性分析 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 25-28.
- [8] 程时远. 胶黏剂 (第二版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.