

文章编号 1674-2915(2010)06-0665-06

# 利用蒙特卡洛法分析红外光学系统的杂散辐射

赵楠 薛育 王晶

(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:** 介绍了杂散辐射的概念及其对光学系统成像质量的影响。以一透视式红外系统为例, 通过对系统的光机结构的合理简化, 利用杂散辐射分析软件 Light tools 中已有的蒙特卡洛分析方法, 对已建立的红外系统光机结构的三维模型进行光线追迹分析, 得到了系统像面的照度分布结果。同时, 基于辐射度学相关理论对该系统中各结构表面的热辐射进行了定量计算, 分析了结构中不同组成部分对系统像面的杂散辐射影响, 提出本文系统中前镜框内表面为主要杂散辐射源。针对分析结果, 探讨了红外系统的杂散辐射抑制方法, 提出的方法可为后续设计提供参考。

**关键词:** 红外光学系统; 杂散辐射; Light tools; 蒙特卡洛法

中图分类号: TN216 文献标识码: A

## Analysis of stray radiation from infrared optical system with Monte-Carlo method

ZHAO Nan, XUE Yu, WANG Jing

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

**Abstract:** This paper introduces the concept of stray radiation and its influence on the image quality of a optical system. By taking a refractive infrared optical system as an example, it simplifies the 3D optical-mechanical system properly and uses the Monte-Carlo model built-in Light tools to analyze the stray radiation of the system and to obtain the illuminance distribution of image in the system. Meanwhile, it calculates the radiation of surfaces in different parts of the system, and compares their influences on the image quality of the system. Furthermore, it points out that the inter surface of fore frame in the proposed system is a main source of stray radiation. Corresponding to the results, this paper finally investigates the restraint ways for the stray radiation, which can be a reference for the following designs.

**Key words:** infrared optical system; stray radiation; light tools; Monte-Carlo method

## 1 引言

杂散辐射是光学系统中非正常传输能量的总称<sup>[1]</sup>,在红外系统中,亦指到达探测器上的非成像辐射能。杂散辐射的危害性在于降低像面的对比度和调制传递函数,使整个像面的层次减少,清晰度变坏,能量分布混乱甚至形成杂光斑点,严重时使目标信号完全被杂散辐射噪声所淹没。

杂散辐射按照来源可以分为三类<sup>[2]</sup>:第一类是光学系统外部的辐射源,如太阳光、地球表面的散射、漫射光及大气漫射光等进入系统,经系统内部构件的多次反射、折射或衍射到达探测器,成为外部杂散辐射或外杂光;第二类是光学系统内辐射源,如控制电机、温控热源及温度较高的光学元件等产生的红外辐射,经过系统表面的反射、折射或衍射传播而进入探测器,称为内部杂散辐射或内杂光;第三类是成像光经非光路表面散射,或经光路表面的非正常传播而进入探测器的辐射能量,称为成像杂散辐射。对目标光谱是可见光的光学系统,外部杂散辐射起主要作用;而对红外光学系统或多光谱遥感仪的红外波段,内部杂散辐射的作用显得尤为突出<sup>[3]</sup>。随着红外探测器的灵敏度日益提高,其分辨本领已接近或达到衍射极限,因此红外系统的杂散辐射问题成为影响系统成像质量的重要因素,如何消除或抑制杂散辐射也显得尤为令人关注<sup>[4]</sup>。

本文介绍了杂散辐射的概念,讨论了杂散辐射对光学系统成像质量的影响。对一透射式红外光学系统进行了杂散辐射分析,利用 Light-tools 软件和相关辐射理论确定了它的主要杂散辐射来源,并提出了抑制杂散辐射的方法。

## 2 蒙特-卡洛法

蒙特-卡洛法的实质是数学上的一种随机过程统计方法<sup>[5]</sup>,由随机性的不确定分析得到较为稳定的统计值。将蒙特-卡洛法应用在杂光分析中,首先需要建立系统的三维模型,包括光学和机械模型。根据实际情况为结构表面赋予光学特性,通过辐射能量光束的无序追迹,由一系列随机

函数确定每一能束在系统内的传递。辐射能量进入系统后,经过一系列的折射、反射、透射、散射等过程,被衰减和吸收后,通过最终达到像面上辐射能量的概率统计来分析杂散光的作用<sup>[6]</sup>。这种方法的可靠性与所追迹的光线数量有关,追迹光线的数量越大,计算结果越可靠。

Light tools 中使用蒙特-卡洛法实现了对杂散辐射的分析。该软件通过在光源辐射的有效范围内或被分析表面内随机选取采样点,对一定数量的所需光线向所选取的空间角内追迹光线来实现对系统杂散辐射的分析。通常情况下,追迹光线的数量与结果的准确程度相关,光线数量越多,结果越接近实际情况,但同时会消耗更多的计算时间且对计算机的性能要求也越高<sup>[7]</sup>。光线的起始点与光线方向是基于描述光源辐射特性的概率分光原理。光源特性决定了每条光线带有一定的功率,在该光线经过系统不同表面的过程中,可能发生折射、反射(漫反射、镜面反射或二者结合),改变了光线的功率。通过设在系统不同位置的接收器上接收到的信息,可以用数据生成图标来定量、定性分析系统的杂散辐射。

在杂散辐射分析中光线追迹遵循无序原则,即光线行进的过程依据光的传播原理,而非一系列有序表面,这与系统中光线传播的实际情况相符合。在光机系统中,光线在发生折、反射的基础上,也会被机械结构所吸收、折射或散射<sup>[8]</sup>。

## 3 光学系统及机械模型

用于分析的红外光学系统结构参数如下:入

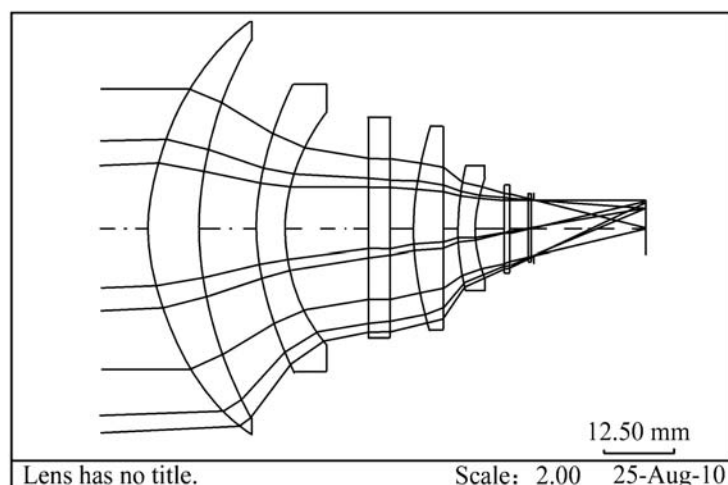


图1 光学系统结构图

Fig. 1 Structure of optical system

瞳直径  $D = 50 \text{ mm}$ , 焦距  $f = 100 \text{ mm}$ , 出瞳距离  $EXPP = -20 \text{ mm}$ , 工作波段  $\lambda = 3.6 \sim 4.8 \text{ }\mu\text{m}$ , 视场角  $\theta = \pm 2.75^\circ$ , 系统采用硅和锗的光学材料, 靶面采用斯特林方式制冷的红外探测器, 其工作波段在  $3 \sim 5 \text{ }\mu\text{m}$ , 像元数为  $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ,

光学系统的结构见图1所示。

在 Light tools 中, 对系统的光机结构进行适当合理的简化, 兼顾系统光线追迹的准确度和追迹效率, 简化后的结构如图2所示。

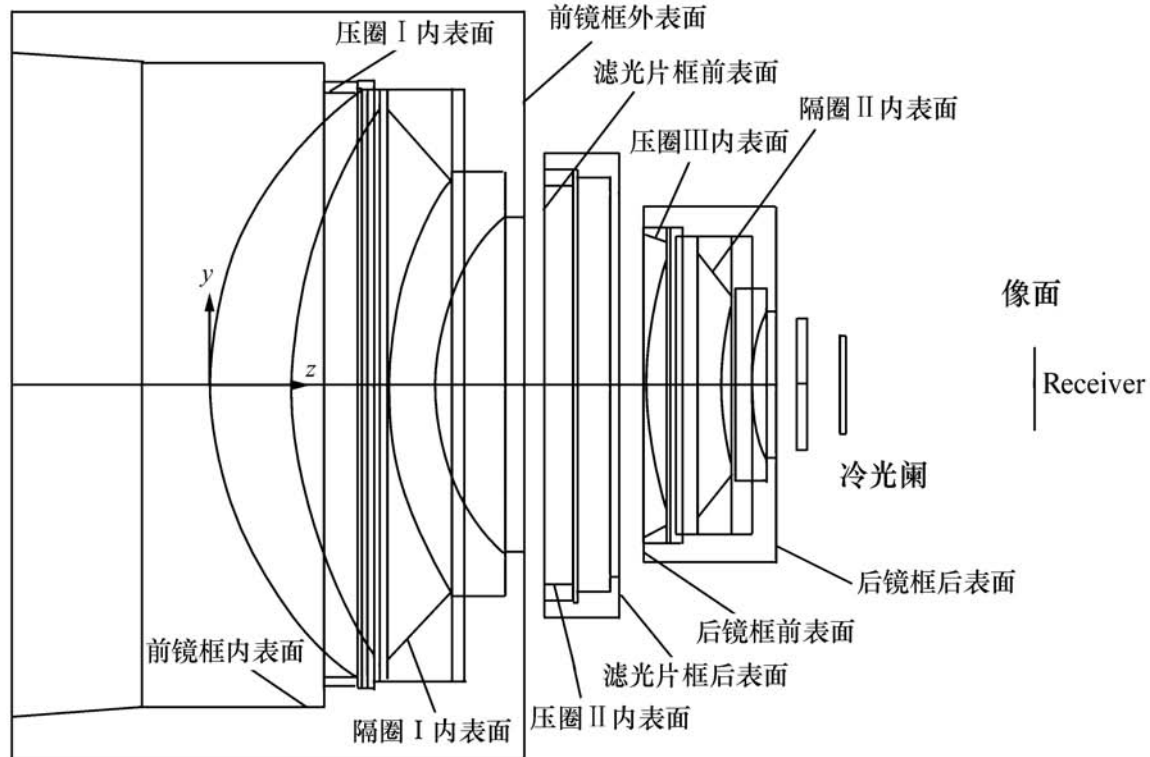


图2 Light tools 中建立的光机结构图

Fig.2 Model of system in Light tools

## 4 杂散辐射分析

在分析光学系统内部元件杂散辐射时, 在光学系统像面探测器上可以看见被称之为关键表面的系统内部表面(实际物体及其像), 它是系统轴外杂散光源传递到像面的媒介<sup>[9]</sup>。因此, 需从像面向物方逆向追迹光线, 寻找系统内的关键表面, 设计遮光结构阻止关键表面反射的光进入像面, 或使其移出系统。

在光学系统中, 除了散射杂散辐射直接到达系统探测器的实物与虚像关键表面外, 有些内部表面, 其散射杂散辐射虽然不能直接到达探测器, 但却可以直接到达系统的关键表面, 这些表面成为间接表面。降低间接表面的出射辐射通量, 可以降低关键表面的入射辐射通量, 同样可以有效减小到达像面的杂散辐射通量。间接表面的寻找应从关键表面向物方逆向追迹光线, 所见到的内部表面或实物所成的虚像为间接表面<sup>[10, 11]</sup>。

依据寻找到的系统的关键表面和间接表面, 设计遮光系统可以有效地阻止进入到探测器像面的杂散辐射<sup>[12]</sup>。利用 Light tools 软件的杂散辐射分析功能, 可以分析各个表面到达像面的杂散辐射能大小, 从而得到像面接收杂散辐射的总量。合理地设置各个表面的发射率、吸收率的数据, 在待分析的表面上加上光源, 追迹光线, 则可以得到像面上的辐射能量。图3中在系统采用距离第一透镜表面1 km处设置光源, 设其为单位功率, 采

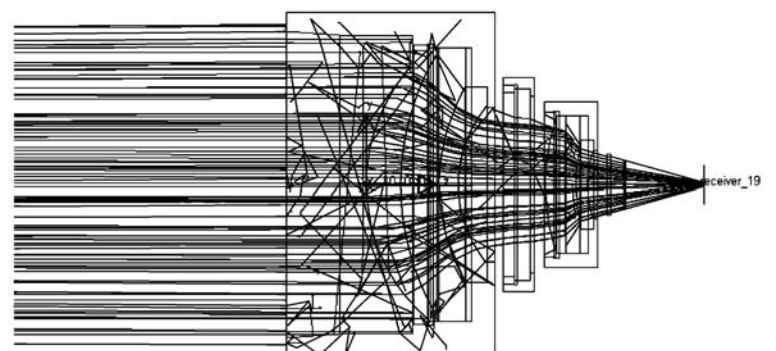


图3 对系统追迹  $10^7$  条光线

Fig.3 Simulation of system with  $10^7$  light rays

用  $10^7$  条光线对系统进行光路追迹。图 4 为系统像面处的伪彩色光栅图, 显示系统像面处的辐照

度分布。

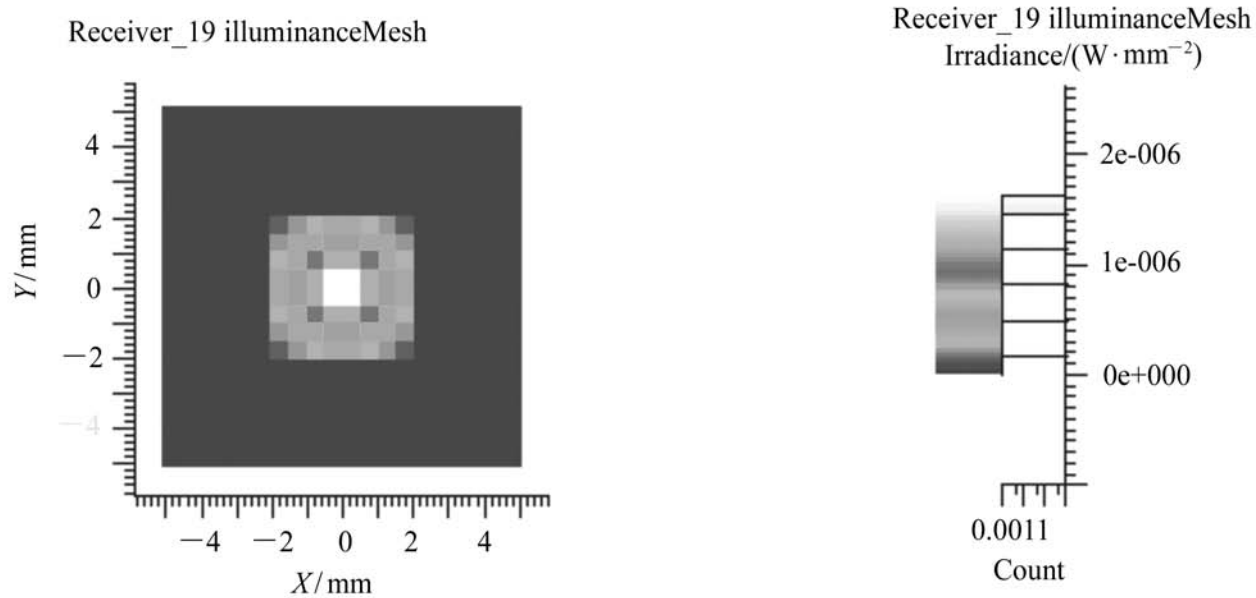


图 4  $10^7$  条光线追迹结果分析

Fig. 4 Raster chart of system with  $10^7$  light rays

由普朗克公式<sup>[13]</sup>可知, 绝对黑体的光谱辐射发射量为:

$$R_B = c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}. \quad (1)$$

式中  $R_B$  为绝对黑体的光谱辐射发射量 ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ );  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ );  $T$  为绝对黑体的温度 (K);  $h = 6.626\ 196 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$ , 为普朗克常数;  $k = 1.380\ 622 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ , 为玻尔兹曼常数;  $c = 2.997\ 925 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为真空中光速;  $c_1 = 2\ h c^2 = 3.741\ 844 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$ , 为第一辐射常数;  $c_2 = ch/k = 1.328\ 833 \text{ cm} \cdot \text{K}$  为

第二辐射常数。

由辐射度学可知, 在单位时间、单位面积内辐射体发出的能量为:

$$E = \int_1^2 R_B d. \quad (2)$$

其中  $\epsilon$  为物体的比辐射率, 其定义为, 相同温度下, 辐射体表面所辐射的能量与绝对黑体辐射能量之比。在常温下, 即  $T = 300 \text{ K}$  时, 设定比辐射率  $\epsilon = 1$ ; 在  $3.6 \sim 4.8 \mu\text{m}$  波段,  $E_{3.6 \sim 4.8} = 4.066\ 43 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 根据 Lighttools 中建立的光机模

表 1 各表面辐射面积及其功率

Tab. 1 Radiation area and power of each surface

辐射表面序号	辐射面积/ $\text{mm}^{-2}$	辐射功率/ $(\times 10^{-6} \text{ W})$
前镜框内表面	8 882.4	361.2
压圈 内表面	882.2	35.9
隔圈 内表面	2 144.5	187.2
前镜框外表面	4 050.6	164.7
滤光片框前表面	703.1	28.6
压圈 内表面	452.4	18.4
滤光片框后表面	1 165.5	47.4
压圈 内表面	331.71	13.5
后镜框前表面	339.3	13.8
隔圈 内表面	578.7	23.5
后镜框后表面	801.1	32.6
辐射总功率		826.8

型,可以计算出各辐射体表面所发出的辐射功率,计算结果如表1所示。当式(2)中的 $\rho$ 改变时,则各表面的辐射功率也要发生相应的改变,均乘以新的 $\rho$ 。

## 5 杂散辐射的抑制方法

目前,红外系统常用的消除杂散辐射方法主要包括<sup>[14~16]</sup>:(1)组合光阑抑制杂散辐射,这可以直接改变关键表面和被照射表面的面积。从杂散光传输的角度来讲,这是抑制系统杂散辐射的最有效方法。当系统的结构材料及所处环境的外部杂散辐射量一定的情况下,使用组合光阑可以有效减小杂光能量每一级传递的几何构成因子GCF。(2)采用消杂光涂料,利用涂料的表面粗糙度和多孔性散射和吸收杂散辐射。当微观结构的涂料散射尺寸接近于光波波长时,吸收效果最佳。但是,当结构表面的吸收率大幅增加时,其辐射率也将相应地增大,这个表面将向系统中辐射更多的能量。因此,通过物化手段改变材料表面特征的手段是柄双刃剑,需综合考虑辐射率的变化对像面杂散辐射的影响。(3)对光学元件做相应处理以消除其杂散辐射,如利用蒸镀增透膜来提高透镜的透射率,对透镜进行磨边处理,使其边缘粗

糙,降低杂散辐射的强度,将光学元件边缘用消光涂料染黑,吸收杂散辐射等。

通过对系统成像光路的追迹及采用的机械结构辐射功率可知,在此系统中,前镜框内表面为重要杂散辐射源。针对此分析结果,可采取如下优化措施:

- (1)通过对镜框内表面进行抛光及涂覆消杂光涂料处理,以降低其反射率;
- (2)适当增大透镜口径,通过增加镜筒及压圈口径降低杂散辐射进入探测像面的几率。

## 6 结 论

本文通过对系统的光线追迹得到像面辐照度的分布,利用辐射度学原理求得系统中各表面杂散辐射对像面质量的影响。对一个透射式红外光学系统进行了杂散辐射分析。利用Light tools软件对所建模型中光学表面的多次反射、镜筒内壁的反射等杂散辐射来源进行了讨论。同时,利用辐射度学的相关理论对系统中结构件的内、外表面辐射功率进行了计算,通过以上的分析与计算,确定了系统中杂散辐射的主要来源,提出了抑制杂散辐射的方法,本文的方法可为后续设计提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] 颜昌翔. 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 C X. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 289-293. (in Chinese)
- [2] 原育凯. 光学系统杂散光的消除方法[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 6-10.  
YAN Y K. Stray light suppressing measure of optical system[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(1): 6-10. (in Chinese)
- [3] 王骞, 张景旭, 郭劲. 红外系统中杂散辐射抑制方法[J]. 光机电信息, 2002(12): 21-24.  
WANG Q, ZHANG J X, GUO J. Radiation suppression method in infrared system[J]. *OME Information*, 2002(12): 21-24. (in Chinese)
- [4] 黄强, 钮新华, 沈学民. 红外光学系统内部热辐射引起的杂散辐射分析[J]. 红外技术, 2006, 28(6): 348-352.  
HUANG Q, NIU X H, SHEN X M. Stray radiation analysis caused by interior heat radiation in infrared optical systems [J]. *Infrared Technol.*, 2006, 28(6): 348-352. (in Chinese)
- [5] 马洁. 空间相机的环境适应性分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.  
MA J. The study of circumstance adaptability of space camera[D]. *Chanchun: Changchun University of Science and Technology*, 2009. (in Chinese)
- [6] BARTELL F O, DERENIAKE L, WOLFE W L. The theory and measurement of bidirectional reflectance distribution (BRDF) and bidirectional transmittance distribution function(BTDF) [J]. *SPIE*, 1980, 257: 154-160.

- [7] HANSEN E R, WOLFE W L. Baffling design of a three mirror off-axis celestial telescope[ J] . *SPIE*, 1992, 1762: 33-38.
- [8] BREault R P. Stray light technology overview of the 1980 decade[ J] . *SPIE*, 1990, 1331: 2-11.
- [9] PERRIN J-C. Methods for rapid evaluation of the stray light in optical system[ J] . *SPIE*, 2004, 5249: 392-399.
- [10] POMPEA S M, PFISTERER R N, MORGAN J S. A stray light analysis of the apache point observatory 3.5-meter telescope system[ J] . *SPIE*, 2003, 4842: 128-138.
- [11] 赵飞. 兴隆 1 m 光学望远镜消杂散光系统[ J] . *光学精密工程*, 2010, 18(3) : 513-520.  
ZHAO F. Stray light control lens for Xing Long 1 meter optical telescope[ J] . *Opt. Precision Eng.* , 2010, 18( 3) : 513-520. ( in Chinese)
- [12] BREault R P. Stray light analysis of the cassini telescope[ J] . *SPIE*, 1992, 1753: 210-227.
- [13] 张幼文编. 红外光学工程[ M] . 上海: 上海科学技术出版社, 1982.  
ZHANG Y W. *Infrared Optical Engineering*[ M] . Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1982. ( in Chinese)
- [14] THIBault S, RENAUD N, WANG M. Effects and prediction of stray light produced by diffractive lenses[ J] . *SPIE*, 1999, 3779: 334-343.
- [15] ROCK D F. The OARDAS stray radiation analysis software[ J] . *SPIE*, 1999, 3780: 138-147.
- [16] ARNOUX J J. Star sensor baffle optimization: some helpful practical design rules[ J] . *SPIE*, 1996, 2864: 333-338.

作者简介: 赵楠 (1983—), 女, 吉林长春人, 硕士, 研究实习员, 主要从事光电仪器结构设计及优化方面的研究。

E-mail: zhaonan830@ yahoo. com. cn