

基于光线追迹的红外探测光学系统杂散辐射研究

张发强, 张维光, 万文博

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要: 杂散辐射分析与抑制是红外探测光学系统设计的重要环节, 杂散辐射增加了系统的噪声, 降低了红外探测系统对目标的探测能力。首先对红外探测系统杂散辐射源进行了分析, 对基于光线追迹的杂散辐射分析理论进行了介绍, 并结合具体的红外探测光学系统实例, 提出了反向光线追迹的思路, 分析系统关键表面的特性, 提出了给机械表面涂覆吸收膜的方法来抑制系统的杂散辐射, 分析结果满足杂散辐射抑制的要求。

关键词: 红外探测光学系统; 杂散辐射; 反向光线追迹; 关键表面

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0904006

Research on stray radiation of infrared detection optical system based on ray-tracing

Zhang Faqiang, Zhang Weiguang, Wan Wenbo

(Department of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Analysis and suppression of stray radiation are significant component to infrared detection optical system design. Stray radiation will add the noise of system, and reduce the system detection ability of system on target. The stray radiation sources of infrared detection system were analyzed in this paper, and the theory of stray radiation based on ray-tracing was introduced. Then, the thought of backward ray-tracing based on an infrared detection optical system was advanced. After the characteristics of key surfaces were analyzed, the absorbing membrane of mechanical surface was introduced to suppress the stray radiation. The analysis results meet the requirements of stray radiation suppression.

Key words: infrared detection optical system; stray radiation; backward ray-tracing; key surface

收稿日期: 2019-05-07; 修订日期: 2019-06-20

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS051)

作者简介: 张发强(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事红外探测和光学设计方面的研究。Email: zhui_1981@163.com

0 引言

红外探测光学系统的杂散辐射分析和抑制是系统设计的重要环节,对探测微弱目标信号、提高系统的探测距离和分辨力具有十分重要的意义^[1-2]。杂散辐射是系统中按非成像光路传输而到达探测器表面的光线,相当于系统中的噪声,杂散辐射能导致红外光学系统的成像质量下降,严重时可以使目标信号被杂散辐射所产生的噪声淹没。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,因此红外光学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是红外探测光学系统设计的一个重要方面^[3]。

目前,常用的红外光学系统杂散辐射抑制方法主要有光阑法、挡光环法、消杂光涂料法和污染控制法,其中消杂光涂料法结构简单,效果明显,是红外光学系统杂散辐射抑制最常用的方法之一。

1 理论分析

1.1 杂散辐射源分析

红外探测光学系统的杂散辐射按照来源可以分为三类:第一类是由外部辐射源产生,经反射、散射或直接照射到光学系统并传递到探测器表面,一般由太阳辐射引起;第二类是视场内大气背景经过光学系统到达探测器表面形成的背景辐射;第三类是系统自身的热辐射,经过光学系统组件表面的反射、折射或衍射传播而进入探测器,尤其是系统内部有热源时,必须考虑自身的热辐射。对于地基红外探测光学系统,内部一般没有热源,所以主要考虑前两种杂散辐射,下面对这两类杂散辐射进行简单分析^[4-5]:

(1) 太阳杂散辐射

太阳是自然界中最强的红外辐射源,其对红外探测系统的影响尤为明显,太阳的平均半径为 $R_s=6.96 \times 10^5 \text{ km}$,平均日地距离为 $1.496\ 8 \times 10^8 \text{ km}$,一般在实际计算中,将太阳简化成一个温度为 $5\ 900 \text{ K}$ 的黑体,由于太阳与地球的距离远大于地球半径,可以认为空间的太阳光是辐射度均匀的平行光。太阳对红外探测系统产生的杂散辐射与它们之间的方位

有关,图 1 为红外探测系统与入射太阳辐射的方位关系图^[6]。

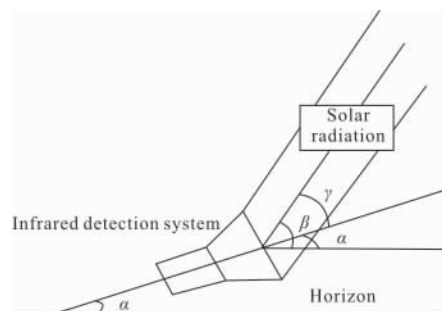


图 1 红外探测系统与太阳辐射方位示意图

Fig.1 Orientation between infrared detection system and solar radiation

图 1 中, α 表示探测系统轴线和地平面之间的夹角,即探测系统的仰角; β 表示太阳辐射的入射方向与地平面之间的夹角,称为太阳高度角; γ 表示太阳入射方向和探测系统的轴线之间的夹角。当探测系统的轴线和入射太阳辐射在同一平面内时,三角之间的关系为^[7]:

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (1)$$

其中,太阳高度角和系统所处的地理位置和时间有关,一般用下式计算:

$$\sin \beta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2)$$

式中: φ 为地理纬度; δ 为太阳赤纬; ω 为时角^[8]。

太阳辐射在红外探测光学系统入口处的照度为:

$$E = \zeta E_{\text{sun}} \cos \gamma \quad (3)$$

式中: $E_{\text{sun}}=1\ 353 \text{ W/m}^2$ 为太阳常数; ζ 为日地间距引起的修正值。

设光学系统的口径为 D ,则太阳辐射在光学系统入口处产生的辐射通量为:

$$\Phi = \frac{\pi}{4} D^2 E \quad (4)$$

设探测器单个像元的面积为 A_d ,对应的视场立体角为 Ω_d ,则单个像素接收到的辐射通量为:

$$\Phi_d = \Phi \frac{\Omega_d}{\pi} \tau_0 \quad (5)$$

式中: τ_0 为光学系统的透过率。

从上面的分析可以看出,太阳辐射直接照射到光学系统入口处并传递到探测器靶面产生的杂散辐

射和太阳入射方向与探测系统的轴线之间的夹角 γ 有很大的关系,所以在红外探测系统工作时要避免太阳出现在系统的视场内,尽量增大角度 γ 的数值,也就是避免太阳光直射红外探测系统。

(2) 天空背景杂散辐射

在研究天空背景的杂散辐射时,可将其分为晴空和有云两种情况。晴空条件下天空背景辐射主要由两部分组成,即天空中的气体分子和气溶胶粒子对太阳光的散射和大气分子自身的辐射;有云条件下,要考虑云对太阳光的散射和云自身的辐射。

太阳光的散射和大气自身的辐射在不同波段内是不一样的。太阳光的散射主要集中在可见光范围,在波长大于 $3 \mu\text{m}$ 的范围内,太阳光的散射很小;而大气辐射由于其自身温度较低,有效温度在 $200\sim 300 \text{ K}$ 范围内,因此在小于 $3 \mu\text{m}$ 的波长范围内的辐射量很小。天空背景辐射是上述两种辐射的叠加,这种辐射在 $3 \mu\text{m}$ 以下以太阳光的散射为主,而在 $3 \mu\text{m}$ 以上以大气自身辐射为主。所以,在红外探测系统的工作波段内,天空背景的杂散辐射主要是由大气自身的辐射通过非成像路径经光学系统到达探测器靶面产生的^[9]。

1.2 杂散辐射分析理论

在红外探测光学系统设计中要进行杂散辐射分析,以降低设计成本,保证设计质量,杂散辐射的分析通常有数学计算和软件模拟分析两种方法,早期一般采用数学计算,工程量很大,后来随着计算机辅助设计(CAD)普及,光学系统的杂散辐射分析也主要采用软件分析的方法^[10]。

红外探测光学系统的杂散辐射分析实质是确定系统中主要的杂散辐射传输路径和参与杂散辐射传输的表面,然后对主要的传输路径和参与杂散辐射传输的表面进行处理,达到抑制杂散辐射的目的。在进行杂散辐射分析时,通常采用蒙特卡洛法。该方法是一种基于统计理论的方法,把辐射能量用大量光束来表示,在传播过程中,利用光线追迹对杂散辐射进行分析。对光学系统入口处的光束数、像面接收的光束数、各个面上光束的消失数和射出数、射到像面上的光束数经过统计之后,可估计出像面上的杂散辐射量级及各面对杂散辐射的贡献。其计算精度与光束的数目多少成正比,分析流程如图 2 所示。

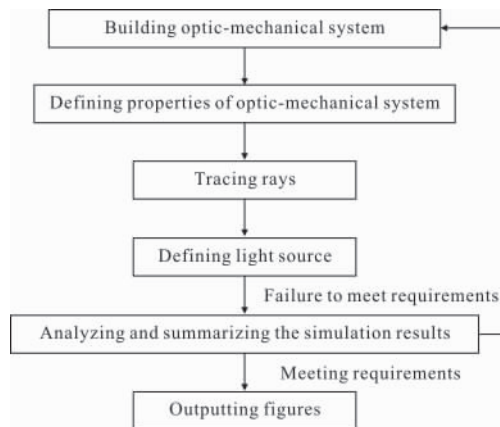


图 2 杂散辐射分析流程图

Fig.2 Flow chart of stray radiation analysis

从图 2 可以看出,在分析红外探测光学系统的杂散辐射时需要先建立系统的光机结构模型,之后要定义系统的光学属性,主要包括光学元件和机械组件的材料特性及其表面属性,比如表面的透过率、吸收率、反射率、表面粗糙度以及散射特性等;接着定义相应的杂散辐射分析使用的光源属性,在完成建模和光学属性以及光源定义后,可以进行光线追迹,并对其结果进行分析,如果满足设计要求,就输出杂散辐射的分析图表,如果不满足设计要求,则需重新进行建模分析。

2 实例应用

某红外探测光学系统的结构图以及光机结构剖面图分别如图 3 和图 4 所示,系统由 4 块透镜组成,设系统工作在 300 K 的环境中,内部没有热源。

在红外探测光学系统的光机结构模型建立以后,定义各透镜的表面透过率为 98% ,反射率 1% ,吸收率为 1% ,不考虑透镜表面粗糙度对杂散辐射分析的影响;所有的镜筒和压圈表面设为郎伯体,定义其吸收率为 97% ,反射率为 3% 。

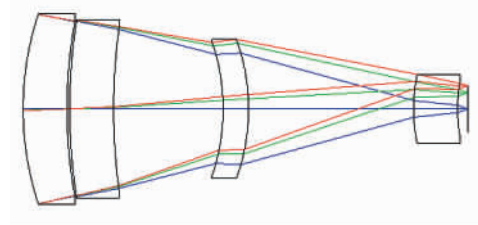


图 3 某红外探测光学系统结构图

Fig.3 Structure drawing of an infrared detection optical system

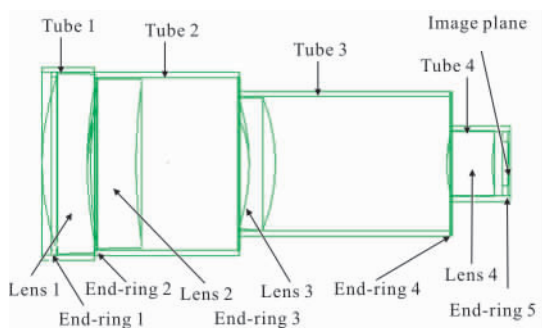


图 4 某红外探测光学系统光机结构剖面图

Fig.4 Cross-section of optico-mechanical structure of an infrared detection optical system

2.1 杂散辐射分析

杂散辐射分析的关键是要找出杂散辐射的传输路径以及参与杂散辐射传输的“关键表面”，为了找出哪些光线没有参与成像而成为杂散辐射，文中利用光路可逆的原理，采用反向光线追迹的思路：将红外光学系统的像面设置为面光源，在系统前面加

入一个辐射接收面，分析从光源发出的光线经光学系统后的传输情况，根据接收面上的光线的来源，可以分为参与成像和没有参与成像，可将到达接收器上的光线按传输路径分类，同时计算出各路径传输的能量占接收面上总能量的百分比，并详细给出各路径的传输过程中所经过的系统组件，分析杂散辐射的传输路径及其关键表面，并采取相应的杂散辐射抑制措施。在实际的追迹过程中为了保证微弱光线能够到达接收面，光线阈值不能太大，在文中设置为 10^{-7} W，要经过反复追迹。将像面设置为面光源(SS)，波长取 $4 \mu\text{m}$ ，系统前面的接收面经大量的光线追迹后，有一部分光线会经过镜筒内壁或透镜等组件的表面反射而到达接收面，从而产生杂散辐射，为了分析系统中光线的传输路径，对追迹图中的接收面处的光线进行分析，找出产生杂散辐射的传输路径和其中的关键表面，一共给出了 156 种光线传输路径，限于篇幅仅对其中占传输能量较大的前 10 条路径进行分析，其路径清单如表 1 所示。

表 1 反向光线追迹路径清单

Tab.1 Inventory of backward ray-tracing

Path	Number of rays	Flux at receiving surface/W	Percentage of total flux	Reflection (scattering) times	Reflection (scattering) surfaces
1	148	0.125 912 927 342 104 0	92.835 553%	0	
2	271	0.009 222 271 164 786 5	6.799 577%	1	Tube 3
3	92	0.000 125 232 316 924 0	0.092 334%	2	Tube 3, tube 2
4	2	0.000 068 061 041 806 5	0.050 181%	1	Tube 4
5	1	0.000 034 030 520 903 3	0.025 090%	1	End-ring 1
6	168	0.000 014 292 818 779 4	0.010 538%	2	Front surface of lens 4, rear surface of lens 4
7	157	0.000 013 356 979 454 5	0.009 848%	2	Front surface of lens 3, rear surface of lens 3
8	155	0.000 013 186 826 850 0	0.009 723%	2	Front surface of lens 2, rear surface of lens 2
9	150	0.000 012 761 445 338 7	0.009 409%	2	Rear surface of lens 1, front surface of lens 2
10	149	0.000 012 676 369 036 5	0.009 346%	2	Front surface of lens 1, rear surface of lens 1

表 1 中规定靠近光源一侧的透镜表面为后表面，靠近接收面一侧的透镜表面为前表面，从表 1 可以看出，在系统的接收面上直接透射传输的辐射通量占接收面上总通量的 92.8% 以上，这部分通量是通过成像光线的传输路径到达，而经过一次及多次反射而到达接收面上的能量为 7.2% 左右，这部分光线的传输路径即为系统的杂散辐射传输路径，应该

对其进行分析，找出其中的“关键表面”。尤其是经过一次反射到达接收面的光线，其通量占接收面上总通量的 6.8%，远远大于经过二次反射到达接收面上的光线通量，所以应该对其进行重点分析，下面对上表中的杂散辐射的传输路径进行分析，找出含有机机械表面的组件(即镜筒或者压圈)，列出路径 2~5 的详细传输过程。

Path 2: 光源—Lens 4 后表面—Lens 4 前表面—管子 3 的反射—Lens 3 后表面—Lens 3 前表面—Lens 2 后表面—Lens 2 前表面—Lens 1 后表面—Lens 1 前表面—接收面

Path 3: 光源—Lens 4 后表面—Lens 4 前表面—管子 3 的反射—Lens 3 后表面—Lens 3 前表面—管子 2 的反射—Lens 2 后表面—Lens 2 前表面—Lens 1 后表面—Lens 1 前表面—接收面;

Path 4: 光源—Lens 4 后表面—Lens 4 前表面—管子 4 的反射—Lens 3 后表面—Lens 3 前表面—Lens 2 后表面—Lens 2 前表面—Lens 1 后表面—Lens 1 前表面—接收面

Path 5: 光源—Lens 4 后表面—Lens 4 前表面—Lens 3 后表面—Lens 3 前表面—Lens 2 后表面—Lens 2 前表面—Lens 1 后表面—Lens 1 前表面—压圈 1 反射—接收面;

从上面的分析可以看出, 在前 10 条光线路径中, Path 2 是主要的杂散辐射传输路径, 是杂散抑制的主要对象, 通过 Path 2 传输的杂散辐射能量占总的杂散辐射能量的 95%, 参与杂散辐射传输的机械组件有管子 2、管子 3、管子 4、压圈 1、压圈 2、压圈 4, 其中参与了一次杂散辐射的有管子 3、管子 4 和压圈 1, 尤其是管子 3, 绝大部分杂散辐射都是经其传输的。

2.2 杂散辐射抑制后结果分析

上述红外探测光学系统的机械组件中管子 3、管子 2、管子 4、压圈 1、压圈 2、压圈 4 参与了杂散辐射的传输, 重点对参与一次杂散辐射传输的表面进行处理。所以杂散辐射抑制就是要对上述机械组件的表面或者光线传输路径进行处理, 阻断或者降低杂散辐射的传输。

文中选择为机械表面涂覆吸收膜的方法来抑制系统的杂散辐射, 所选择的镜筒材料为铝, 可以在参与杂散辐射的镜筒表面涂覆特制的黑漆, 如 Lockheed-Martin 公司的工业黑漆, 其中波红外和长波红外的吸收率可以达到 99.5%, 但也不能给所有的红外光学系统机械组件的表面涂覆黑漆, 因为根据基尔霍夫定律, 吸收率高的表面发射率也高, 高的发射率必然增大系统的自发辐射, 所以文中仅对镜筒的管子 3 和压圈 1 涂覆吸收率为 99.5% 黑漆。

通过对光线追迹的结果进行分析, 经过消光处理后, 达到接收面处的光线传输路径剩下 91 条, 为简化分析选择传输能量较大的前 10 条路径进行分析, 其路径清单如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 直接透射传输的能量占接收面上能量总量的 99.72% 以上, 而杂散辐射仅为 0.28%, 约为消光处以前的 1/25, 杂散辐射大幅降低, 这主要是通过消光处理, 一次杂散辐射基本上被消除, 系统的成像质量得到很大改善, 能满足设计要求。

表 2 反向光线追迹路径清单

Tab.2 Inventory of backward ray-tracing

Path	Number of rays	Flux at receiving surface /W	Percentage of total flux	Reflection (scattering) times	Reflection (scattering) surfaces
1	148	0.125 912 927 342 104 0	99.723 668%	0	
2	2	0.000 068 061 041 806 5	0.053 904%	1	Tube 4
3	13	0.000 055 299 596 467 8	0.043 797%	1	Tube 3
4	168	0.000 014 292 818 779 4	0.011 320%	2	Front surface of lens 4, rear surface of lens 4
5	157	0.000 013 356 979 454 5	0.010 578%	2	Front surface of lens 3, rear surface of lens 3
6	155	0.000 013 186 826 850 0	0.010 444%	2	Front surface of lens 2, rear surface of lens 2
7	150	0.000 012 761 445 338 7	0.010 107%	2	Rear surface of lens 1, front surface of lens 2
8	149	0.000 012 676 369 036 5	0.010 039%	2	Front surface of lens 1, rear surface of lens 1
9	155	0.000 012 664 628 506 8	0.010 030%	2	Front surface of lens 2, front surface of lens 3
10	151	0.000 012 337 799 384 0	0.009 771%	2	Rear surface of lens 1, rear surface of lens 2

3 结论

基于反向光线追迹的思路,通过对具体的红外探测光学系统的杂散光进行分析,在系统的像面处设置面光源,在系统的前面设置接收面,通过对大量的光线进行追迹,分析接收面上的光通量分布,对光线传输路径进行分类,得到系统杂散辐射主要的传输路径以及参与杂散辐射传输的“关键表面”。对其中部分“关键表面”的涂覆了高吸收率的吸收膜,通过处理,较好地抑制了系统的杂散辐射,提高了成像质量,满足系统的设计要求。

参考文献:

- [1] Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0928002. (in Chinese)
李岩, 刘剑峰. 红外光学传感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002. (in Chinese)
- [2] Niu Jinxing, Zhang Tao. Analysis of stray radiation of infrared system to detect dim and small target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 30(3): 768-771. (in Chinese)
牛金星, 张涛. 弱小目标红外探测系统的杂散辐射分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 30(3): 768-771.
- [3] Li Junlin, Zhang Liming, Si Xiaolong, et al. Scanning measuring system of stray light for optical remote sensing satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0913001. (in Chinese)
李俊麟, 张黎明, 司孝龙, 等. 光学遥感卫星杂散光扫描测试系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0913001.
- [4] Lv Tianyu, Ming Ming, Chen Baogang, et al. Interior stray light analysis of infrared refractive zoom optical system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(2): 10-17. (in Chinese)
吕天宇, 明名, 陈宝刚, 等. 折射式红外变焦光学系统内部杂光分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(2): 10-17.
- [5] Liu Yang, Fang Yonghua, Wu Jun, et al. Stray light analysis for a mid-infrared plane grating spectrometer system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1164-1171. (in Chinese)
刘洋, 方勇华, 吴军, 等. 中红外平面光栅光谱仪系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(4): 1164-1171.
- [6] Li Wenhao, Liu Zhaohui, Mu You, et al. Modeling and research of infrared characteristics of space target based on radiation dissipation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0604003. (in Chinese)
李文豪, 刘朝晖, 穆猷, 等. 基于辐射散热的空间目标红外特性建模与研究 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0604003.
- [7] You Xinghai, Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, et al. Effect of defects of component on stray radiation characteristics of infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0120004. (in Chinese)
游兴海, 胡小川, 彭家琪, 等. 元件缺陷对红外光学系统杂散辐射特性的影响 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0120004.
- [8] Niu Jinxing. Stray light analysis and suppressing of infrared detecting system [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
牛金星. 红外探测系统杂散辐射的分析与抑制技术研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2010.
- [9] You Xinghai, Zhang Bin. Influence of optical component quality on signal to noise ratio in infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0320004. (in Chinese)
游兴海, 张彬. 光学元件质量对红外光学系统信噪比的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0320004.
- [10] Tribble A C, Boyadjian B, Davis J, et al. Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community [R]. Alabama: Marshall Space Flight Center, NASA Contractor Report, 1996: 4740.