

红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的 综合抑制研究

李 岩 刘剑峰

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘要 红外光学遥感器杂散辐射源分为外部辐射源和内部辐射源,其杂散光分析与抑制原理均与可见光谱段的遥感器有较大差别。在红外光学遥感器杂散光抑制设计中,外杂散光和内杂散光的抑制措施通常相互矛盾,但又必须采取最优措施以达到对二者同时抑制的效果。通过研究同一抑制措施在不同状态时外杂散光和内杂散光的变化趋势,提出红外光学遥感器杂散辐射的综合抑制思想。对某红外预警相机的杂散辐射进行了实例分析,通过研究抑制措施输入值改变时内杂散光和外杂散光的变化趋势,并分析关键表面的特性,最终找出抑制措施的最优输入,分析结果满足内杂散光和外杂散光的综合抑制要求。

关键词 遥感;红外;外杂散光;内杂散光;发射率;综合抑制

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0928002

Research on Integrative Suppression of Internal and External Stray Light in Infrared Optical Remote Sensor

Li Yan Liu Jianfeng

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076, China)

Abstract The stray light of the infrared sensor consists of external stray radiation and internal stray light. The simulation analysis and suppressions of the stray light of the infrared optical remote sensor are very different from the remote sensors working in visible wavelength. The suppression of the internal and external stray light are usually contrary. However, the optimizing measures should be applied for the suppression of the external and internal stray light together. The conception of integrative suppression of the external stray light and internal stray light is introduced by studying the changing trend of the internal and external stray light for the same measure in different states. In an example about the suppression of the stray radiation in an infrared warning camera, the characteristic of the key surface is analyzed and the best measure is adopted by the conception of the integrative suppression. The analysis results can satisfy the requirement of the system.

Key words remote sensing; infrared; external stray light; internal stray light; emissivity; integrative suppression

OCIS codes 290.2648; 110.3080; 120.0280; 040.3060

1 引 言

红外光学遥感器消杂散光对其探测微弱的目标信号、提高分辨率具有十分重要的意义,在红外波段进行杂散辐射分析和抑制设计与可见光谱段有较大差别^[1-5]。根据与红外光学遥感器的相对位置关系,光源可分为外部光源和内部光源。从外部光源发出的光线形成的杂散光称为外杂散光,由自身表面辐射源产生的热辐射发出的光线形成的杂散光称为内

杂散光^[6-8]。然而,在采取同一种杂散光抑制措施时,对内杂散光和外杂散光的影响往往是相互矛盾的,因此,开展对红外光学遥感器杂散光的综合抑制研究成为提高其成像分辨率所亟待解决的问题。

2 理论分析

在红外光学遥感器中,产生自身热辐射的元件通常被看作灰体辐射源,计算灰体表面的辐射出射

收稿日期: 2013-03-04; 收到修改稿日期: 2013-05-01

作者简介: 李 岩(1982—),女,博士,工程师,主要从事遥感器光学设计、杂散辐射分析与抑制等方面的研究。

E-mail: liyan_bit@163.com

度和辐射功率具有重要的实际意义。灰体辐射出射度公式为^[9]

$$M'(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) M_0(\lambda, T) d\lambda, \quad (1)$$

式中 M_0 是黑体辐射函数, ϵ 是光谱发射率, T 是温度, λ 是波长, M' 是灰体波段辐射出射度。

图 1 为灰体表面光源辐射功率示意图, 在灰体表面光源上取微小面元 ds , 由微小面元的辐射出射度 dM' 可计算得到该微小面元的辐射功率为

$$d\Phi_e = \int_0^{\infty} dM' ds d\lambda, \quad (2)$$

则表面光源的辐射功率为

$$\Phi_e = \iint_S d\Phi_e ds. \quad (3)$$

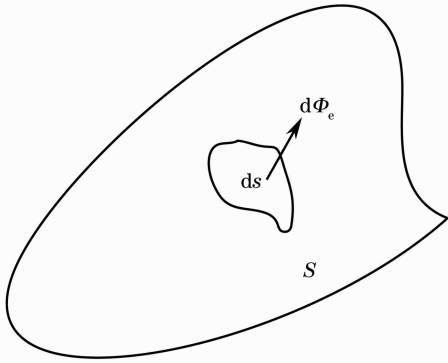


图 1 灰体表面光源辐射功率示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gray body radiation power

普朗克公式最常用的形式是以波长表示的公式, 即

$$M_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1}, \quad (4)$$

式中, 第一辐射常数 $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; 第二辐射常数 $c_2 = hc/k = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; k 为玻尔兹曼常数; c 是光速。

因此, 根据(3)式和(4)式, 灰体辐射功率的计算公式为

$$\Phi = \epsilon \int_A \frac{1}{\lambda^5} \frac{c_1}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} ds, \quad (5)$$

式中 A 为辐射源表面面积。

根据(5)式可知, 自身辐射源表面的发射率增大, 将增大辐射源自身产生的灰体辐射功率, 进而增大了自身热辐射功率。然而, 抑制外杂散光时, 通常采用增大关键表面光谱吸收率的措施, 但是增大光谱吸收率等同于增大了光谱发射率, 导致杂散光增多。

因此, 若以选取关键表面的发射率为抑制措施, 对内杂散光和外杂散光的影响是相互矛盾的, 需要对红外光学遥感器内杂散光和外杂散光进行综合抑制。

3 内杂散光与外杂散光的综合抑制研究

首先要找到对外杂散光和内杂散光同时造成影响的关键灰体辐射源表面, 在对该表面的发射率取值时, 要分别进行整个系统外杂散光和内杂散光的仿真分析和计算。

假设红外遥感器的探测谱段共分为短波红外谱段 ($2.7 \sim 2.9 \mu\text{m}$), 中波红外谱段 ($4.2 \sim 4.4 \mu\text{m}$), 以及特殊对地观测 (STG) 谱段 ($2.7 \sim 3.2 \mu\text{m}$), 其外杂散光源为太阳, 取系统在太阳抑制角处的点源透射率 (PST) 值, 也就是 PST 的最大值。内杂散光为自身热辐射, 采用系统自身热辐射在像面处的辐照度作为评价指标。图 2 为系统杂散光的综合抑制流程图。首先找到同时影响外杂散光和内杂散光的某关键表面 S_1 , 给定该表面某一发射率值, 对系统进行外杂散光分析后获得系统在太阳抑制角处的 PST 值, 改变发射率后, 再进行同样的分析, 从而得到一组随发射率变化而改变的 PST 值, 将该组值转化为权重之比。对系统进行内杂散光分析时, 获得系统随发射率变化而变化的一组自身热辐射辐照度量值, 并转化为权重之比。对仿真结果进行分析、比较后, 找出一个同时对外杂散光和内杂散光影响较小的最合理的发射率值。

选取关键表面发射率的值分别为 0.95、0.9、0.85、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1, 并进行外杂散光和内杂散光的分析和计算, 其中外杂散光取不同发射率时最小临界角对应的 PST 值, 内杂散光取系统自身热辐射在像面上辐照度值, 并分别在短波、中波和 STG 谱段下进行分析。最后按比例列出不同谱段下 PST 最大值和系统热辐射杂散光的权重 W_1 和 W_2 , 如表 1 所示。从该表可以得到如下结论:

- 1) 短波谱段表面 S_1 发射率推荐为 0.3, 此时热辐射和太阳杂散光均较小;
- 2) 中波谱段表面 S_1 发射率推荐为 0.85, 此时热辐射和太阳杂散光均较小;
- 3) STG 谱段表面 S_1 发射率推荐为 0.6, 此时热辐射和太阳杂散光均较小;
- 4) 综合衡量各个谱段热辐射和太阳杂散光, 表面 S_1 发射率推荐为 0.85, 此时三个谱段的总权重之和相比其他发射率达到最小。

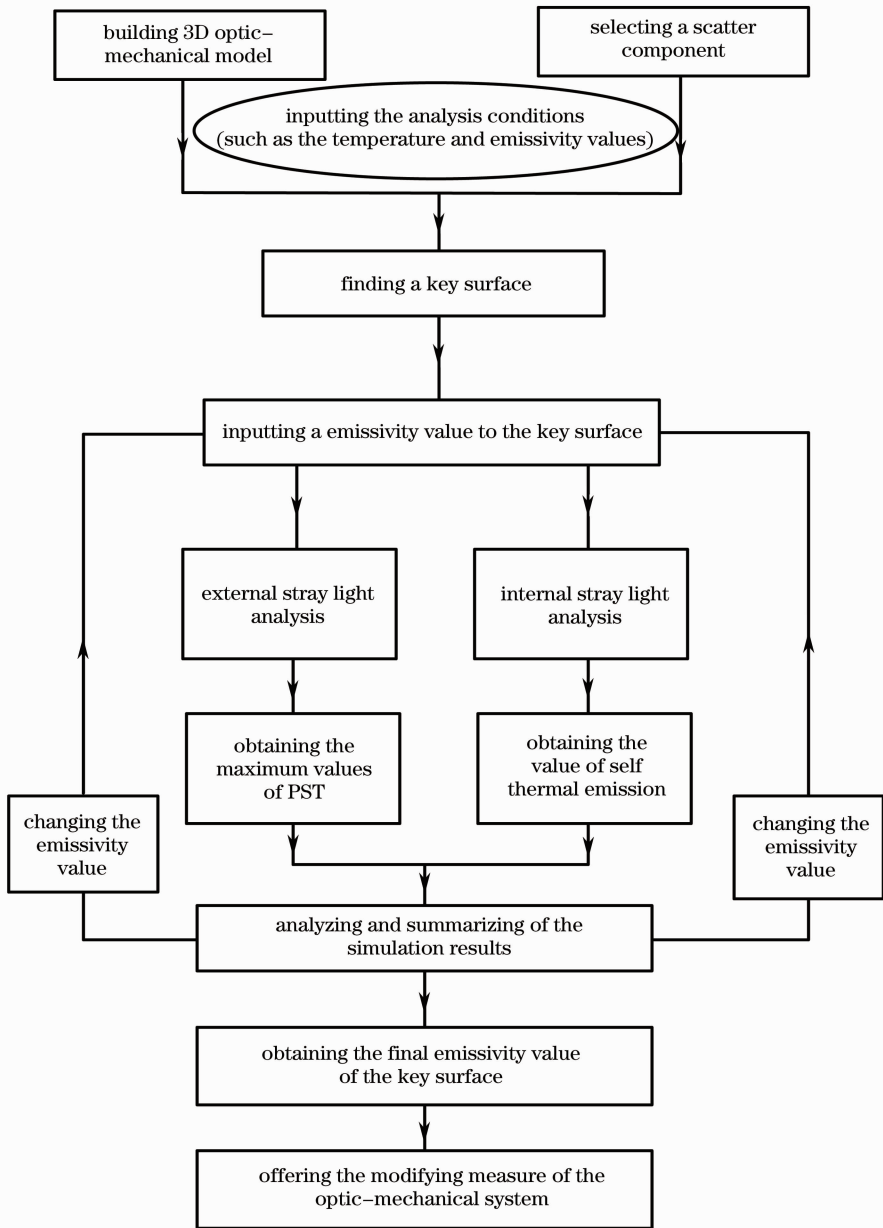


图 2 内杂散光与外杂散光综合抑制技术流程图

Fig. 2 Flow chart of integrative suppression of internal and external stray light

表 1 不同发射率各个谱段的内杂散光和外杂散光权重

Table 1 Weights of internal and external stray light at different emissivities and different wavelengths

| Emissivity | Shortwave | | | Midwave | | | STG wave | | |
|------------|-----------|-------|-----|---------|-------|-----|----------|-------|-----|
| | W_1 | W_2 | Sum | W_1 | W_2 | Sum | W_1 | W_2 | Sum |
| 0.95 | 6 | 1 | 7 | 5 | 5 | 10 | 4 | 3 | 8 |
| 0.9 | 5 | 5 | 10 | 3 | 6 | 9 | 8 | 6 | 14 |
| 0.85 | 1 | 10 | 11 | 1 | 2 | 3 | 5 | 2 | 7 |
| 0.7 | 10 | 8 | 18 | 9 | 7 | 16 | 6 | 4 | 10 |
| 0.6 | 8 | 6 | 14 | 10 | 10 | 20 | 2 | 1 | 3 |
| 0.5 | 7 | 1 | 8 | 8 | 4 | 12 | 10 | 5 | 15 |
| 0.4 | 9 | 4 | 13 | 6 | 9 | 15 | 7 | 9 | 16 |
| 0.3 | 2 | 2 | 4 | 7 | 3 | 10 | 1 | 8 | 9 |
| 0.2 | 4 | 3 | 7 | 2 | 8 | 10 | 9 | 7 | 16 |
| 0.1 | 3 | 7 | 10 | 4 | 1 | 5 | 3 | 10 | 13 |

4 实例应用

某红外预警相机的光机结构的剖面图如图 3 所示。该系统温度为 230 K,经分析得知其关键表面为主镜筒内壁,该表面发射率为 0.85。根据其外杂散光和内杂散光的分析和评价可知,外杂散光的辐射基本满足系统技术指标要求,而内杂散光不满足

技术指标要求。在采取对内杂散光的抑制措施时,为避免该措施对外杂散光的抑制产生不利影响,需要采用内杂散光与外杂散光的综合抑制思想。本系统的技术指标要求内散杂光在像面的辐照度低于 $5 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$,而且前系统的内杂散光在像面辐照度为 0.12728 W/m^2 。

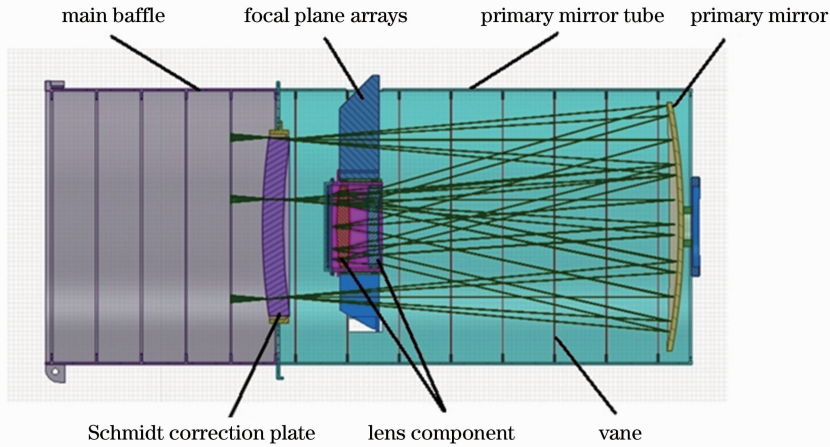


图 3 某红外预警相机光机结构剖面图

Fig. 3 Section plane of an infrared warning camera

针对不满足技术指标要求的内杂散光,主要采取两种抑制措施,分析如下:

1) 更改关键表面发射率值

将主镜筒内表面发射率取 0.1~0.85,计算系

统自身热辐射在像面上的辐照度,以及系统的外杂散光在太阳抑制角处的 PST 最大值,结果如表 2 所示。

表 2 主镜筒内壁为不同发射率时系统内杂散光和外杂散光总量

Table 2 Internal and external stray light of the system with different emissivity values of the inner surface of the main baffle

| Emissivity of the main baffle | Internal stray light $/(W/m^2)$ | External stray light (PST) |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 0.85 | 0.012728 | 9.86×10^{-7} |
| 0.8 | 0.012983 | 1.28×10^{-6} |
| 0.7 | 0.013239 | 3.76×10^{-6} |
| 0.6 | 0.013812 | 9.81×10^{-6} |
| 0.5 | 0.014587 | 1.36×10^{-5} |
| 0.4 | 0.014934 | 5.99×10^{-5} |
| 0.3 | 0.015732 | 2.32×10^{-4} |
| 0.2 | 0.016358 | 7.92×10^{-4} |
| 0.1 | 0.017459 | 3.90×10^{-3} |

根据表 2 可知,随着主镜筒内壁发射率的减小,系统的内杂散光量反而增大。原因是随着该表面光谱发射率的减小,虽然会使关键表面本身的辐射功率减小,但根据能量守恒定律,该表面的光谱反射率同时增大,此时,系统内辐射源的自身热辐射在该关键表面被反射和散射的因素占优势,所以导致整个系统内杂散光总量增大。同时,对于外杂散光来说,PST 的最大值也随着主镜筒内壁的光谱发射率的

减小而增大。因此发射率的减小无论对外杂散光还是内杂散光而言都是不利的,不宜改变主镜筒内表面发射率,该表面发射率依然取 0.85。

根据以上分析结果,结合(5)式可知,发射率为辐射功率的一个系数,降低发射率虽然可使关键表面本身辐射功率的降低,但对整个系统的内杂散光总量的降低不一定有帮助。根据以往的经验,该关键表面在系统中位置不同,其发射率的改变对系统的内杂散光

总量的影响也不同,需要具体情况具体分析。

对于该系统来说,由于关键表面主镜筒内壁位于像面之前,且其面积较大,因此系统内辐射源的辐射每经过主镜筒内壁时,该表面的高发射率(即高吸收率)会以该发射率的百分比衰减辐射源的辐射,即辐射源的辐射功率会被主镜筒内表面成几何量级地衰减,因此主镜筒内表面采用高发射率的材料有时并不会使热辐射变得更加糟糕,反而可能有益于热辐射的抑制。

根据对该抑制措施的分析结果可知,当关键表面发射率取 0.85 时,内杂光依然不满足技术指标要求,需要采取其他抑制措施。

2) 降低关键表面温度法

在全波长内对普朗克公式进行积分,得到黑体辐射出射度与温度之间的关系——斯蒂芬-玻尔兹曼定律

$$M_0(T) = \int_0^{\infty} M_0(\lambda, T) d\lambda = \frac{c_1 \pi^4}{15c_2^4} T^4 = \sigma T^4, \quad (6)$$

式中, $\sigma = c_1 \pi^4 / (15c_2^4) = 5.6696 \times 10^{-8} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。

根据(6)式可知,辐射源的辐射功率跟温度的四次方成正比,因此如果温度稍有下降,辐射功率将以四次方的比例大幅降低,是热辐射的有效抑制措施。

表 3 主镜筒在不同制冷温度下系统内杂散光总量

Table 3 Internal stray light of system when main baffle is working at different temperatures

| Temperature of the main baffle /K | Internal stray light of the system /(W/m^2) |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 230 | 0.0127280 |
| 225 | 0.0098637 |
| 220 | 0.0079845 |
| 215 | 0.0064233 |
| 210 | 0.0049627 |
| 205 | 0.0034162 |
| 200 | 0.0029853 |

主镜筒工作于低温条件下,初始输入温度为 230 K,此时无法满足技术指标要求,因此,要采用内杂散光仿真分析的办法给系统输入一个更准确的制冷温度。将输入温度在 200~230 K 之间进行取值,每隔 5 K 输入一个值,计算不同温度时系统总的内杂散光量值,找出满足技术指标要求的温度值。

表 3 列出了系统制冷到不同温度时,内杂散光在像面的辐照度值。当系统制冷温度降至 210K 时,内杂散光在像面的辐照度值为 $0.0049627 \text{ W}/\text{m}^2$,可满足低于 $5 \times 10^{-3} \text{ W}/\text{m}^2$ 的技术指标要求。

根据对两种抑制措施的分析可知,通过对系统的温度控制以降低关键表面的温度可在不影响外杂散光的情况下有效抑制内杂散光。因此,需根据工程实际,将更改关键表面发射率和控温两种措施进行较好地结合。

5 结 论

基于外杂散光和内杂散光的综合抑制思想,研究杂散光抑制措施的输入条件改变时,内杂散光和外杂散光的变化趋势,通过比较关键表面在不同发射率时二者的权重之和,得出抑制措施的最优输入值。最后在实例中通过采用关键表面发射率分析和降低关键表面温度两种方法对相机系统的杂散辐射进行了有效抑制,通过定量和定性的分析,得出了关键表面发射率和温度控制的最优值。

参 考 文 献

- Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, *et al.*. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 768-771.
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 768-771.
- Tan Heping, Xia Xinlin, Liu Linhua, *et al.*. The Calculation of Infrared Radiation and Transfer [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. 330-331.
谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006. 330-331.
- Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322003.
曲贺盟, 张新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322003.
- Li Da, Meng Yanli, Chen Bo. Stray light analysis of reflective lyman-alpha coronagraph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0822006.
李达, 孟艳丽, 陈波. 反射式莱曼阿尔法日冕仪杂散光分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0822006.
- Liu Yang, An Xiaoqiang. Analysis and control of narcissus effect of cooling IR focal plane system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222007.
刘洋, 安晓强. 制冷型红外焦平面系统冷反射效应的分析与控制[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222007.
- Huang Qiang, Niu Xinhua, Shen Xuemin. Stray radiation analysis caused by interior heat radiation in infrared optical systems [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(6): 348-352.
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.
- Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Chaohui, *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2267-2271.
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2267-2271.
- Li Xinyao, Pei Yuntian, Wang Chengliang. Suppressing method of infrared stray radiation in space optical system [J]. *Infrared*, 2011, 32(1): 31-34.
李欣耀, 裴云天, 王成良. 空间光学系统中红外杂散辐射的抑制方法[J]. *红外*, 2011, 32(1): 31-34.
- Du Baolin, Lin Li, Cai Meng, *et al.*. Several factors affecting self-thermal radiation of cryogenic infrared optical system [C]. SPIE, 2010, 7849: 78490F.