

文章编号: 0253-2239(2010)08-2267-05

红外探测系统自身热辐射杂散光的分析

牛金星^{1,2,3} 周仁魁¹ 刘朝晖¹ 杨建国^{1,3} 蔡占恩^{1,3} 林福跳^{1,3}

(¹中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; ²华北水利水电学院机械系, 河南 郑州 450011)

³中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 设计了 Ritchey-Chretien(R-C)型红外探测系统及其遮光罩,运用软件 TracePro 建立了结构模型,通过光线追迹分析了系统的几个关键内表面自身热辐射杂散光。给出了温度范围为 250 K~320 K 时,几个关键内表面热辐射产生的杂散光光子数随温度变化的关系。计算了天空背景的杂散光,同时给出了单像元接收到的杂散光光子数增加的速率随温度变化的关系。分析结果表明,常温下使用没有主镜筒的开架式望远镜结构对减小杂散光的效果并不明显。如果要实现背景限探测,系统主镜内遮光罩的温度至少降低至 230 K。

关键词 红外探测;杂散光;TracePro 软件;热辐射;里奇-克雷季昂系统

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2267

Analysis of Stray Light Caused by Thermal Radiation of Infrared Detection System

Niu Jinxing^{1,2,3} Zhou Renkui¹ Liu Zhaohui¹ Yang Jianguo^{1,3} Cai Zhan'en^{1,3} Lin Futiao^{1,3}

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

² School of Mechanics, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou, Henan 450011, China

³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A typical infrared detection system [Ritchey-Chretien (R-C) system] and its baffles are designed. Its structure model is established with the TracePro software. Stray lights caused by thermal radiation of critical inner surface are analyzed by a ray tracing program. The relation of photons of stray lights and temperature which varies from 250 K to 320 K is given. The stray light caused by sky background is calculated. The curve of increasing rate of photon number of stray lights received by single pixel versus temperature is given. The results show that an open telescope without main tube cannot do well obviously in reducing stray lights. The temperature of the inner baffle of main mirror should be less than 230 K in order to detect the background-limited target.

Key words infrared detection; stray light; TracePro software; thermal radiation; Ritchey-Chretien(R-C) system

1 引言

在红外探测系统中,当目标信号比较弱时,少量的杂散光引起的噪声就会大大降低系统的输出信噪比,从而降低系统的探测能力。红外探测系统的杂散光来源主要有三类:1)视场外的光源通过散射或衍射到达探测器表面;2)系统本身的热辐射直接或通过散射到达探测器表面;3)视场内的背景光到达探测器表面。第三类杂散光通常在信号处理阶段加以消除^[1~4]。需要抑制的杂散光通常指前两类杂散光。

对于第一类杂散光,红外系统和可见光系统有着相似的抑制方法,常采用遮光罩和挡光环等措施加以抑制^[5~7]。第二类杂散光是红外系统特有的杂散光,当目标信号比较弱时,对它的抑制显得尤其重要^[8~10]。

红外探测系统对弱目标进行探测时,为了在探测器表面得到足够的辐照度,光学系统往往要求口径比较大,工作波段比较宽,常采用反射式光学系统。里奇-克雷季昂(Ritchey-Chretien, R-C)系统是典型的双反射系统,是校正了球差及彗差的改进的

收稿日期: 2009-10-15; 收到修改稿日期: 2009-11-27

作者简介: 牛金星(1981—),男,博士研究生,助教,主要从事红外探测技术方面的研究。E-mail: njx.mail@163.com

导师简介: 周仁魁(1944—),男,研究员,博士生导师,主要从事动态光电测试设备总体技术及其理论等方面的研究。

E-mail: rkzhou@opt.ac.cn

卡塞格林式系统,具有大口径、无色差、反射波段宽的特点,成为大口径探测系统常用的光学系统型式。本文就以典型的 R-C 系统为例,研究系统自身热辐射引起的杂散光的影响以及由此引起的对系统工作温度的要求。

2 系统的设计

2.1 光学系统的设计

设红外探测系统的参数要求为:口径为 800 mm,焦距为 4000 mm,视场角为 0.2° ,系统焦点伸出量为 100 mm,探测波段为 L 波段(中心波长为 $3.55 \mu\text{m}$,波宽为 $0.57 \mu\text{m}$),探测器像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,空间截止频率处调制传递函数(MTF)大于等于 0.4。根据要求设计了一个两反射镜的 R-C 系统,选主镜的焦比为 1.5,则根据文献[11]可计算得到系统的光学参量:主镜半径 $R_1 = -2400 \text{ mm}$,次镜半径 $R_2 = -857.143 \text{ mm}$,主镜圆锥系数为 -1.06 ,次镜的圆锥系数为 -4.149 mm 。然后在 Zemax 软件中进行光线追迹,设计参数满足系统的要求。

2.2 遮光罩的设计

为了抑制视场外的杂散光,为该系统设计了外遮光罩和内遮光罩。外遮光罩用于视场外杂散光(如太阳光)能量的衰减,其长度应根据杂散光源的入射角设计。这里设计的外遮光罩的长度为主次镜的间隔,即镜筒的长度。外遮光罩和镜筒的锥角都等于系统的视场角,把外遮光罩和镜筒作为一个整体考虑,称其为主镜筒。内遮光罩根据以下的原则设计^[5,12]:
1)边缘视场光线刚好不被次镜上的内遮光罩遮挡;

2)边缘视场光线刚好不被主镜上的内遮光罩遮挡;
3)次镜边缘的光线刚好不被主镜上的内遮光罩遮挡;
4)不能产生一级杂散光,即光线不能直接到达探测器表面;5)系统的遮拦比越小越好。设计好的红外探测系统在 TracePro 中的模型如图 1 所示。

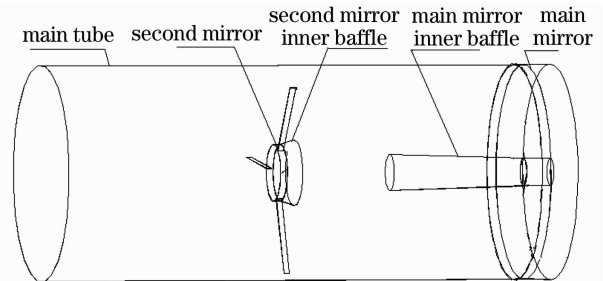


图 1 TracePro 中建立的红外探测系统(R-C 系统)模型
Fig. 1 Model of infrared detection system (R-C system) in TracePro

3 仿真结果

使用 TracePro 软件建立了红外探测系统的光机模型,把系统内表面设置成灰体朗伯辐射光源,通过光线追迹,可以得到到达探测器表面的辐照度。设主、次镜表面的发射率为 0.04,主镜筒、主次镜内罩内表面的发射率为 0.20。通过光线追迹,可以得到系统的几个关键表面(被探测器直接看到的表面)的热辐射到达探测器表面的杂散光能量。图 2 为在 TracePro 中主镜筒内表面热辐射和次镜内罩内表面热辐射的光线追迹结果图。主镜筒内表面和主镜内罩内表面热辐射光线追迹结果图类似。

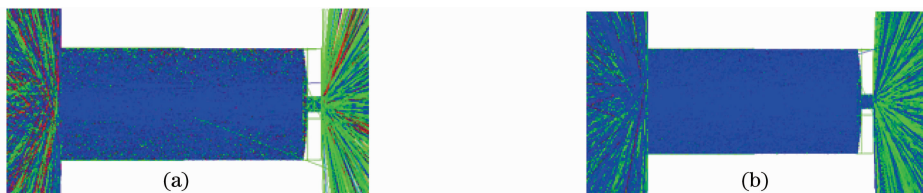


图 2 TracePro 追迹结果图。(a)主镜筒内表面和(b)次镜内罩内表面热辐射仿真结果图
Fig. 2 Simulation results in TracePro. Simulation result of the thermal radiation of (a) the main tube's inner surface and (b) the second mirror baffle's inner surface

表 1 为温度为 300 K 时系统几个关键表面热辐射到达单像元表面的光子数。从表 1 中可以看出,次镜表面和次镜内罩内表面的热辐射在探测器表面的杂散光大小在一个数量级上,主镜内罩内表面热辐射形成的杂散光最大,主镜筒内表面热辐射形成的杂散光最小。图 3 分别为这几个表面自身的热辐射到达单像元表面的光子数与温度的关系。可以看出,随着温度的升高,各个表面的热辐射到达单像元

表面的杂散光光子数都增加得很快。

图 4 为各表面热辐射到达单像元表面的杂散光光子数增加的速率随温度变化的关系。从图中可看出主镜内罩内表面热辐射到达探测器表面的杂散光光子数增加速率远大于其他表面,要想减小系统的热辐射杂散光,在表面特性不变的情况下,必须对其进行致冷。

表 1 温度为 300 K 时系统几个关键表面热辐射到达单像元表面的光子数

Table 1 Photon number on single pixel emitted from some critical surfaces at temperature of 300 K

Name of surface	Second mirror's surface	Second mirror inner baffle's inner surface	Primary mirror inner baffle's inner surface	Main tube's inner surface
Photons received by a pixel /s ⁻¹	2.87×10^6	7.15×10^6	1.74×10^8	4.29×10^3

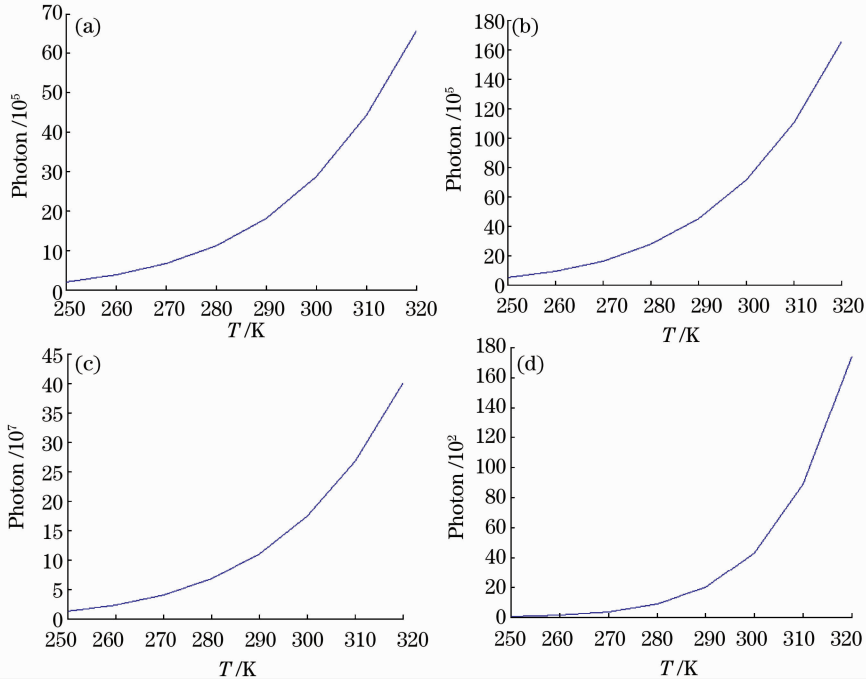


图 3 几个关键表面热辐射到达单像元表面的光子数随温度的变化曲线。(a)次镜表面；(b)次镜内罩内表面；
(c)主镜内罩内表面；(d)主镜筒内表面

Fig. 3 Photon number on single pixel emitted from several critical surfaces versus temperature. (a) second mirror's surface; (b) second mirror inner baffle's inner surface; (c) primary mirror inner baffle's inner surface; (d) main tube's inner surface

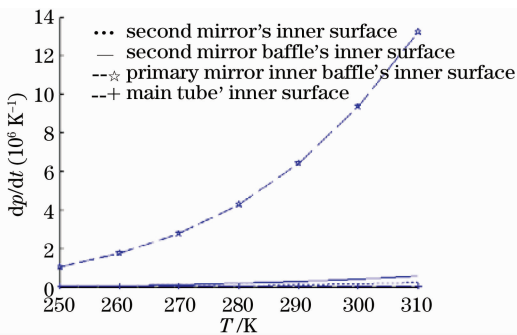


图 4 几个关键表面热辐射到达单像元表面的光子数变化率随温度的变化关系曲线

Fig. 4 Change rate of photon number on single pixel emitted from several critical surfaces versus temperature

4 系统的温度要求

4.1 探测系统的噪声分析

探测系统的极限探测能力都是由噪声决定的。噪声是一种无规则的电量输出,探测系统的噪声可

分为两部分,即探测器本身的噪声和入射光子的散粒噪声,也称光子噪声^[13]。探测器本身的噪声主要有暗电流噪声和读出噪声。光子噪声包括目标辐射引起的光子噪声和杂散光引起的光子噪声。为了提高红外探测系统的探测能力,就要使整个系统的输出噪声最小。在前面所述的三类杂散光中,视场内的背景光会全部到达探测器表面,背景光到达单像元表面的光子数为一定值。其他两类杂散光要尽量小,当它们和视场内的背景光相比可以忽略时,整个系统的噪声最小。

探测器的噪声由探测器的性能指标给出,选用的 Sofradir 的 Mars MW 焦平面探测器的性能指标如表 2 所示。

当对空间目标进行探测时,背景为天空。夜间天空背景的亮度在 L 波段的典型值为 $3.4^m, 0^m$ 星的光子通量密度为 $1.17 \times 10^9 (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ^[14]。星等之间的换算公式为

表 2 Sofradir Mars MW 的性能指标
Table 2 Performance of Sofradir Mars MW

Size of pixel / μm	Size of window	Spectral response / μm	Charge handling capacity	Readout noise	Dark current
30 \times 30	256 \times 256	0.8~5.0	12 \times 10 ⁶ e ⁻ or 37 \times 10 ⁶ e ⁻	1000e ⁻	30e ⁻ /s@77 K

$$m_1 - m_2 = 2.51g \frac{N_{\varphi_2}}{N_{\varphi_1}}, \quad (1)$$

$$N_{\varphi_2} = N_{\varphi_1} \times 10^{0.4(m_1 - m_2)}, \quad (2)$$

式中 $N_{\varphi_1}, N_{\varphi_2}$ 分别为星等为 m_1, m_2 时的光子通量密度。代入数值得到天空背景的光子通量密度为 $5.11 \times 10^7 (\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ 。经过计算得出每秒到达单像元表面的光子数为 3.50×10^7 个(假设光学系统透过率为 1)。设曝光时间为 100 ms 时,单像元产生的电子数为 2.45×10^6 个(其中量子转换效率为 0.7)。可以看出,背景光产生的电子数远大于探测器自身的噪声电子数。由表 1 可以看出,主镜筒内表面的热辐射到达单像元表面的杂散光光子数也远小于背景杂散光光子数,同时远小于其它三个表面热辐射在单像元上产生的杂散光光子数,所以常温下,采用没有主镜筒的开架式结构对杂散光的减小效果并不明显。

4.2 系统温度的要求

红外探测系统最佳的探测情况为:背景光产生的噪声为探测系统的最大噪声,其它两类杂散光要远小于背景引起的杂散光,即背景限探测^[15,16]。要想减小系统的热辐射杂散光,在表面特性不变的情况下,必须对其进行致冷。当系统自身的热辐射在单像元表面的光子数相比背景光在单像元表面的光子数低一个数量级时,即系统自身的热辐射到达单像元表面的光子数小于 3.50×10^6 时,自身热辐射产生的杂散光可以忽略,可认为该探测情形为背景限探测。由表 1 可以看出:在单像元表面,由次镜表面、次镜内罩内表面、主镜筒内表面的热辐射引起的杂散光光子数均小于背景光光子数,主镜内罩内表面热辐射引起的杂散光光子数大于背景光光子数。通过信真和简单的计算可以得到,当系统致冷到温度为 230 K 时,主镜内罩内表面热辐射到达探测器表面的光子数为 3.09×10^6 个,此时满足背景限探测的条件。

5 结 论

对典型的红外探测系统的自身热辐射产生的杂散光进行了仿真分析,得到了系统的几个主要关键表面热辐射到达探测器表面的杂散光光子数。主镜内罩内表面热辐射引起的杂散光光子最多,接着依

次是次镜内罩内表面、次镜表面、主镜筒内表面。同时对背景产生的杂散光进行了分析,主镜筒内表面热辐射产生的杂散光远小于其他三个表面的热辐射产生的杂散光,所以常温下一般使用带有主镜筒的望远镜。如果要求背景限红外探测,系统主镜内罩的温度要小于 230 K。文中给出的几个关键表面热辐射杂散光的大小和温度的关系曲线,可为系统温度和温度稳定性的分析提供参考。

参 考 文 献

- Bai Junqi, Chen Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 866~869
白俊奇, 陈 钱. 基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 866~869
- Xian Haiying, Fu Zhizhong, Li Zaiming. Integration detection algorithm of infrared small dim moving target based on strong complex noise [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, **23**(3): 438~442
鲜海滢, 傅志中, 李在铭. 强噪声背景红外微弱动目标集成检测 [J]. *电波科学学报*, 2008, **23**(3): 438~442
- Gao Yupeng, Huang Shucai, Bai Yun. Application of mathematical morphological filtering approach to infrared image noise elimination [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, **28**(3): 296~298
高育鹏, 黄树采, 白 云. 数学形态学滤波算法在红外图像噪声消除中的应用 [J]. *弹箭与制导学报*, 2008, **28**(3): 296~298
- Ding Xiaohua, Li You, Yu Qifeng *et al.*. CCD noise calibration and its application in edge location [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 99~104
丁晓华, 李 由, 于起峰 等. CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 99~104
- Yuan Xucang. Optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998: 337~342
袁旭沧. 光学设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 337~342
- Huang Zhiqiang, Xing Tingwen. Principle and realization of baffle and vane's programmable design [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 119~123
黄智强, 邢廷文. 遮光罩和挡光环程序化设计的原理及实现 [J]. *光电工程*, 2006, **33**(4): 119~123
- Du Baolin, Li Lin, Huang Yifan *et al.*. Optimum design and analysis of vane in satellite remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 233~236
杜保林, 李 林, 黄一帆 等. 星载遥感器的挡光环优化设计与分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 233~236
- 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
- Sun Chuang, Xia Xinlin. Suppression of infrared stray radiation in space optical system [J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(6): 337~340
孙 创, 夏新林. 空间光学系统的红外杂散辐射抑制特性 [J].

- 红外技术, 2007, **29**(6): 337~340
- 10 P. A. Lightsey, Zongying Wei. James webb space telescope observatory stray light performance [C]. *SPIE*, 2006, **6256**: 62650S
- 11 Pan Junhua. The design, manufacture and test of optical aspheric surface [M]. Beijing: Science Press, 1994: 41~43
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 41~43
- 12 Song Ning, Han Xinzhi, Li Runshun. Design and analysis of the baffle of the Ritchey-Chretien(R-C) system used in space remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 821~826
宋宁, 韩心志, 李润顺. 航天遥感器里奇-克雷蒂安系统遮光罩的设计和分析 [J]. 光学学报, 2000, **20**(6): 821~826
- 13 Yuan Jiahu, Gao Xiaodong. Analysis on detection ability of CCD opto-electric system limited by noise [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 1998, **13**(10): 79~82
袁家虎, 高晓东. CCD光电系统噪声受限的探测能力分析 [J]. 数据采集与处理, 1998, **13**(10): 79~82
- 14 P. Y. Bely. The Design and Construction of Large Optical Telescope [M]. New York: Springer-Verlag, 2003
- 15 Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared Radiation and the Control of Missile [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997: 216~218
徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 216~218
- 16 M. S. Scholl. Stray-light issues for background-limited far-infrared telescope operation [J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(3): 681~684