

红外遥感器自身引起的背景辐射研究

陈永和^{1,2}, 陈洪达^{1,2}, 傅雨田¹

1.中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

2.中国科学院大学, 北京 100049

摘要:针对折反射光学型式的红外遥感器,结合各组件辐射的传输特性,建立系统自身辐射的计算模型,分析了遥感器自身热辐射所形成的背景辐射。通过将背景辐射与目标辐射相比较,分析其对红外探测的影响,并讨论了背景辐射影响的消除方法。最后,利用该模型分析了天宫一号高光谱成像仪红外观测谱段的背景辐射,并讨论了光瞳像差的影响。

关键词:热辐射,背景辐射,红外光学系统

中图分类号:O434.11 **文献标志码:**A

引用格式:陈永和,陈洪达,傅雨田. 2014. 红外遥感器自身引起的背景辐射研究. 遥感学报, 18(增刊): 25-29

Chen Y H, Chen H D and Fu Y T. 2014. Study on background of space infrared optical system caused by self-emission. Journal of Remote Sensing, 18(Sup): 25-29 [DOI: 10.11834/jrs.2014z04]

1 引言

空间光学遥感器的信噪比受探测器暗电流、读出噪声和量子噪声的制约。随着探测器技术的发展,暗电流和读出噪声越来越低,量子噪声成为主要噪声。量子噪声与探测器接收的辐射成正比。对于红外遥感器,探测器接收的辐射除了目标辐射外,还有背景辐射。而背景辐射的一个主要来源是系统自身的热辐射。因此在系统设计时,分析红外遥感器自身热辐射引起的背景辐射非常必要。

热辐射的一种分析方法是建立光机系统的详细模型,用光线追踪方法分析各个表面的热辐射到达探测器的辐射量,最后综合形成背景辐射(方丹, 2006; Strojnik, 1994; 夏新林等, 1996)。这种方法可以给出每个部件对背景辐射的贡献,但是它基于概率统计模型,其精度取决于所追踪的光线数量,通常需要较长时间。另外,该方法所需要的光机模型通常需要在详细设计之后才能获得。基于此,本文研究如何在光学系统设计过程中快速评估背景辐射并决定优化措施。

本文针对采用折反射光学结构型式的红外遥

感器,结合不同组件的传输特性,建立系统自身热辐射所形成的背景辐射的计算模型。在此基础上,将背景辐射与目标辐射相比较,分析其对红外探测的影响,并讨论消除影响的方法。

2 背景辐射计算模型

2.1 红外光学系统模型

空间红外遥感器为了实现一定的分辨率和灵敏度,通常具有较大的光学口径和较小的F数(f -ratio)。在光学结构选型上,通常选择折反射结构或全反射结构。

图1所示为折反射光学结构的型式图。它主要由双反射式主光学系统和透射式中继校正镜组组成。这种结构可广泛用于从紫外、可见到红外等多种场合,是空间光学遥感器常用的一种结构型式。当应用于红外谱段尤其是中长波红外谱段时,通常采用图1所示二次成像的方式,将系统的出射光瞳控制在像面附近,并在该位置设置冷屏。这样可最大限度的抑制系统的自身热辐射,尤其是结构件的热辐射。

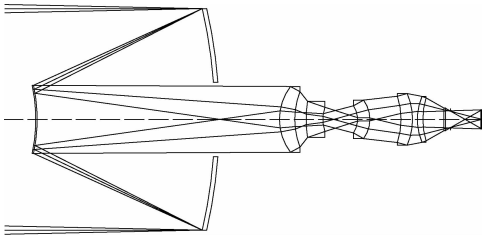


图1 折反射光学结构型式图

Fig.1 Layout of catadioptric optical system

2.2 背景辐射源

红外探测器自身的背景辐射源主要有光学元件、结构元件和探测器杜瓦内部腔体。其中,光学元件包含反射镜、透镜、杜瓦窗口和低温滤光片。低温滤光片位于探测器杜瓦内,与杜瓦内部腔体及探测器共同工作于 100 K 以下的深低温环境,它们的热辐射同光学系统的辐射相比,属于小量,可以忽略。因此,本文主要考虑光学系统中光学元件热辐射引起的背景辐射 P_{opt} 和结构元件引起的背景辐射 P_{mch} 。总的背景辐射量 $P_{bkg} = P_{opt} + P_{mch}$,这里采用辐射通量 P 作为衡量指标,单位为 W。

2.3 光学元件热辐射引起的背景辐射 P_{opt}

折反射式光学结构的元件通常包括 2 个反射镜和 n 个透镜(含杜瓦窗口)。 P_{opt} 的值取决于光学表面比辐射率及其相对探测器的张角。不同透镜在镀制增透膜后,其透过率接近,为简化计算,假定透镜的透过率均为 τ ,比辐射率均为 ε_L 。同理假定反射镜的反射率均为 ρ ,比辐射率均为 ε_M 。根据基尔霍夫定律,有 $\varepsilon_M = 1 - \rho$ 。

图 2 所示为典型的红外探测器杜瓦结构示意图。光学系统的出瞳与位于杜瓦内的冷屏重合。探测器光敏元的可视张角与光学系统的孔径角 U 相匹配。因此,光学元件相对探测器光敏元的可视张角完全由 U 限定。孔径角 U 的大小由光学系统 F 数决定。

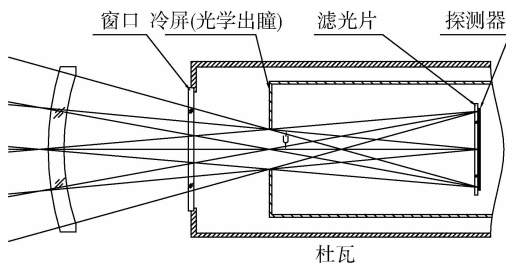


图2 探测器杜瓦结构示意图

Fig.2 Interface of detector dewar

对于某个透镜,不考虑透过率的影响,根据辐射传输特性(郁道银和谈恒英,2002),其热辐射所形成的背景辐射为:

$$P_i = \pi \cdot L \cdot dA \cdot \sin^2 U \quad (1)$$

式中, dA 为探测器光敏元面积, $L = \varepsilon_L \cdot L_B$ 为透镜的辐亮度, L_B 为工作波段内黑体的波段辐亮度。根据普朗克定律,

$$L_B = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda$$

式中, $c_1 = 2\pi hc^2$, $c_2 = hc/k_B$ 。这里, h 为普朗克常数, c 为光速, k_B 为玻尔兹曼常数。 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ 定义系统工作谱段。

考虑透过率的影响, n 个透镜所形成的背景辐射为:

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \tau^{i-1} \tau_{fl} \cdot \pi \cdot \varepsilon_L \cdot L_B \cdot dA \cdot \sin^2 U = \pi \cdot \varepsilon_L \cdot L_B \cdot dA \cdot \sin^2 U \cdot \frac{1 - \tau^n}{1 - \tau} \tau_{fl} \quad (2)$$

式中, τ_{fl} 为滤光片透过率。

式(1)同样适用于反射镜,这里, $L = \varepsilon_M \cdot L_B$ 。于是,双反射主光学系统所形成的背景辐射为:

$$P_M = P_{PM} + P_{SM} = \pi \cdot L \cdot dA \cdot \sin^2 U \cdot \rho \cdot \tau^n \tau_{fl} + \pi \cdot L \cdot dA \cdot \sin^2 U \cdot \tau^n \tau_{fl} = \pi \cdot \varepsilon_M \cdot L_B \cdot dA \cdot \sin^2 U \cdot (1 + \rho) \tau^n \tau_{fl}$$

式中, P_{PM} 、 P_{SM} 分别为主、次镜引起的背景辐射。将 $\varepsilon_M = 1 - \rho$ 代入上式,有

$$P_M = \pi \cdot L_B \cdot dA \cdot \sin^2 U \cdot (1 - \rho^2) \tau^n \tau_{fl} \quad (3)$$

对式(2)(3)求和,可得光学元件引起的背景辐射为

$$P_{opt} = \pi \cdot L_B \cdot dA \cdot \sin^2 U \cdot \tau_{fl} \left[\varepsilon_L \frac{1 - \tau^n}{1 - \tau} + (1 - \rho^2) \tau^n \right] \quad (4)$$

与反射镜不同,透镜表面由于存在一定的反射,所以 $\varepsilon_L \neq 1 - \tau$ 。

2.4 结构元件热辐射引起的背景辐射 P_{mch}

折反射式光学结构中,结构元件引起的背景辐射 P_{mch} 可分解为两部分。一部分是次镜支撑结构的辐射 P_{mch1} ,由于次镜支撑结构直接位于系统的有效光学口径内,对系统形成遮拦,因此其辐射可以随成像光束一起,直接进入探测器;另一部分是除次镜支撑结构外的其他结构元件的辐射 P_{mch2} ,这部分辐射将通过有效光学口径外的部分到达探测器。

对于 P_{mch1} ,由式(1)有

$$P_{mch1} = \pi \cdot \varepsilon_{mch} \cdot L_B \cdot dA \cdot \sin^2 U \cdot \eta \tau^n \tau_{fl} \rho^2 \quad (5)$$

式中, η 为次镜结构产生的面积遮挡比, ε_{mch} 为结构的比辐射率。

对于 P_{mch2} (图3), 当光学系统出瞳位置不与冷屏重合时, 探测器光敏元的可视张角 U_d 大于光学系统的孔径角 U , 此时 P_{mch2} 将通过图中阴影部分到达探测器, 近似为

$$P_{mch2} = \pi \cdot \varepsilon_{mch} \cdot L_B \cdot dA \cdot (\sin^2 U_d - \sin^2 U) \cdot \tau \tau_{fl} \quad (6)$$

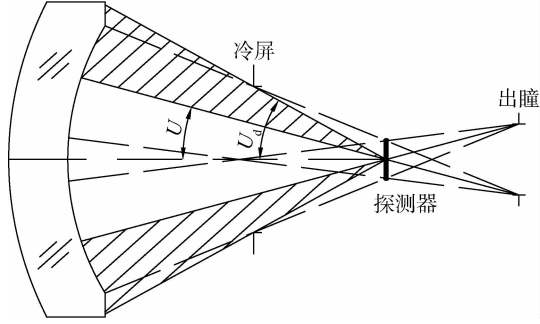


图3 镜筒热辐射的传递路径

Fig.3 Thermal emission transmitting path of lens mounts

由式(5)(6)可得光学元件引起的背景辐射为

$$P_{mch} = P_{mch1} + P_{mch2}$$

折反射式光学系统设计时通常都要求光学出瞳的尺寸、位置与冷屏匹配, 即有 $U_d = U$, 此时由式(6)有 $P_{mch2} = 0$, 故 $P_{mch} = P_{mch1}$ 。

2.5 总背景辐射 P_{bkg}

综合上述分析, 对于折反射式光学结构, 总背景辐射

$$P_{bkg} = P_{opt} + P_{mch1}$$

式中, P_{opt} 、 P_{mch1} 分别由式(4)(5)计算。

3 背景辐射对红外探测的影响

3.1 目标辐射计算模型

记光学系统口径为 D , 焦距为 f , 像元角分辨率为 β 。则探测器光敏元接收的目标辐射为

$$\begin{aligned} P_{obj} &= L_{obj} \cdot \Omega \cdot A_d \cdot \kappa = \\ &L_{obj} \cdot \tan^2 \beta \cdot \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot \rho^2 \tau^n \tau_{fl} (1 - \eta) = \\ &\frac{\pi \cdot L_{obj} \cdot dA}{4F^2} \rho^2 \tau^n \tau_{fl} (1 - \eta) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, L_{obj} 为目标辐亮度, $\kappa = \rho^2 \tau^n \tau_{fl} (1 - \eta)$ 为系统的光学效率, F 为光学系统的 F 数。 F 与孔径角 U 的

近似关系为

$$\sin^2 U \approx \frac{1}{4F^2}$$

代入式(7)可得

$$P_{obj} = \pi \cdot L_{obj} \cdot dA \cdot \sin^2 U \cdot \rho^2 \tau^n \tau_{fl} (1 - \eta) \quad (8)$$

3.2 背景辐射对红外探测的影响

不考虑背景辐射的影响时, 系统的信噪比 SNR 表示为(李春来 等, 2006; Lombeim, 2002):

$$SNR = \frac{N_{obj}}{\sqrt{N_{obj} + N_{read}^2 + I_{dark} t}} \quad (9)$$

考虑背景辐射的影响时, 系统的信噪比表示为:

$$SNR = \frac{N_{obj}}{\sqrt{N_{obj} + N_{bkg} + N_{read}^2 + I_{dark} t}} \quad (10)$$

式中, N_{obj} 为目标信号产生的电子数, N_{bkg} 为光学系统背景辐射产生的电子数, N_{read} 为探测器读出噪声, I_{dark} 为暗电流, t 为积分时间。

由式(9)(10)可知, 背景辐射的存在会明显影响红外系统的信噪比, 主要体现在两个方面: (1)背景辐射占据了探测器的动态范围, 降低了有效的积分时间 t , 从而减少目标信号电子数 N_{obj} ; (2)背景辐射与目标辐射一样, 会引起量子噪声。

背景辐射对红外探测的影响随着目标信号的减弱和探测器性能的提高而越加明显。在对地观测中, 背景辐射是限制红外系统温度灵敏度(噪声等效温差)的主要因素之一。在红外天文观测和空间弱目标探测中, 目标辐射微弱, 而探测器的噪声又极低(通常只有几个电子), 此时背景辐射更是限制信噪比的主导因素。背景辐射属于杂散辐射, 其对红外探测的影响还可用信杂比 SSR(目标信号与杂散辐射的比值)表征。由式(4)(5)(8)有:

$$SSR = \frac{P_{obj}}{P_{bkg}} = \frac{\rho^2 \tau^n (1 - \eta)}{\varepsilon_L \frac{1 - \tau^n}{1 - \tau} + (1 - \rho^2) \tau^n + \eta \varepsilon_{mch} \tau^n \rho^2} \cdot \frac{L_{obj}}{L_B} \quad (11)$$

当目标辐射特性可以等效为温度与仪器相同的黑体时, 有 $L_{obj}/L_B = 1$, 式(10)可进一步简化。

3.3 背景辐射影响的消除方法

综合背景辐射的形成特性, 红外遥感器可采取以下措施减小背景辐射的影响:

(1)优化光学系统设计方案。在光学设计中采取适当的光学结构, 使光学出瞳与冷屏匹配, 最大

限度的抑制背景辐射。

(2)背景辐射在探测器输出信号中主要是直流分量,因此可以在电子学处理中采用差分的方法降低其影响(张滢清,2005)。

(3)红外遥感器可在目标的驻留时间内,采用多次积分累加的方法延长等效积分时间,提高信噪比。

(4)若上述措施无法满足系统性能要求,则需采用低温光学技术,直接降低仪器自身的热辐射。这是目前红外天文观测普遍采取的措施。

4 背景辐射计算实例

天宫一号高光谱成像仪红外观测谱段采用了折反射光学系统,下面以该系统为实例进行计算。该系统由2个反射镜、5个透镜、1个窗口和1个滤光片组成,故 $n=6$ 。其中,反射镜反射率 $\rho=0.97$,透镜透过率 $\tau=0.97$,滤光片透过率 $\tau_{fl}=0.9$,次镜结构的遮挡比 $\eta=0.1$ 。取透镜比辐射率 $\varepsilon_L=0.02$,结构比辐射率 $\varepsilon_{mch}=0.65$ 。系统工作谱段为 $8-10.5\ \mu\text{m}$,工作温度为 $(18\pm 2)^\circ\text{C}$, $F=1.85$ 。光学系统设计使出瞳位置与冷屏重合。但是,考虑到系统设计所存在的光瞳像差会造成光束直径扩大,而冷屏加工、安装中也需要一定的余量,最后探测器杜瓦的 F 数设计为 $F_d=1.5$ (图4)。因此,计算背景辐射时,将式中的孔径角 U 用探测器可视张角 U_d 替代。同时,考虑 P_{mch2} 的贡献。

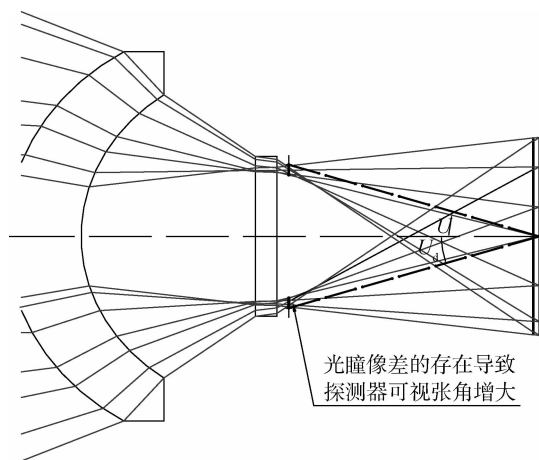


图4 光瞳像差对探测器 F 数的影响示意图

Fig.4 Relationship of pupil aberration and detector F-number

假定目标辐亮度等效为 18°C 的黑体。将以上参数代入式(4)–(8)进行计算,并将背景辐射与目标辐射比较可得: $P_{opt}=0.35P_{obj}$, $P_{mch1}=0.11P_{obj}$, $P_{mch2}=0.46P_{obj}$, $P_{bkg}=0.92P_{obj}$ 。即背景辐射达到了与目

标辐射相当的水平。而在理想情况下,若 $F=F_d$,将以上参数分别代入式(11),可得 $P_{bkg}=0.30P_{obj}$ 。显然,由于光瞳像差的存在,探测器 F 数与光学系统 F 数不匹配,探测器可视张角大于光学系统孔径角,使得结构的热辐射能够进入探测器,显著增大了背景辐射。同时也可以看出,当光学系统出瞳位置与冷屏不匹配时,系统将存在更严重的背景辐射。

为了进一步减小背景辐射的影响,天宫一号高光谱成像仪红外观测谱段采用了多次积分累加和信号差分的处理方法。这些措施使得系统的温度灵敏度(信噪比)明显优于指标要求。若能降低仪器的工作温度,则可有效减小背景辐射,延长系统的积分时间,进一步提高温度灵敏度。

5 结论

本文建立的模型可在光学系统设计阶段快速评估系统的背景辐射,而无需详细的结构模型。因此,本文工作可用于指导光学系统的优化设计。在低温光学系统设计中,本文的工作可用于确定光学系统的工作温度。

参考文献 (References)

- Fang D. 2006. Research on background radiation suppression and in-orbit calibrating technology of long wave infrared push-broom system. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences: 20–27 (方丹. 2006. 长波红外推扫系统背景辐射处理及星上定标技术的研究. 北京: 中国科学院研究生院: 20–27)
- Li C L, Wu G, Liu Y N and Wang J Y. 2006. Study of Cryogenic Optics System's Radiation Characteristic. Laser and Infrared, 36(12): 1146–1148 (李春来, 吴刚, 刘银年, 王建宇. 2006. 低温光学系统辐射特性研究. 激光与红外, 36(12): 1146–1148)
- Lomheim T S and Hernandez-Baquero E D. 2002. Translation of Spectral radiance levels, band choices, and signal-to-noise requirements to focal plane specifications and design constraints. Proc. of SPIE, 4486 [DOI: 10.1117/12.455111]
- Strojnik M. 1994. Stray-light issues for background-limited far-infrared telescope operation. Optical Engineering, 33(3): 681–684 [DOI: 10.1117/12.163401]
- Xia X L, Tan H P, Xiao S Q, Yu Q Z and Tang M. 1996. Analysis on spectral stray radiation caused by thermal radiation from structural elements of space-applied optical system. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 17(1): 22–31 (夏新林, 谈和平, 肖淑琴, 余其铮, 唐明. 1996. 空间光学系统中内部构件热辐射引起的谱段杂散辐射. 航天返回与遥感, 17(1): 22–31)
- Yu D Y and Tan H Y. 2002. Engineering Optics. Beijing: China Machine Press: 70–71 (郁道银, 谈恒英. 2002. 工程光学. 北京: 机械工业

出版社: 70-71)

Zhang Y, Yu H and He Q R. 2008. Radiation from the target and background in the infrared imaging hardware-in-the-loop simulation system. *Infrared and Laser Engineering*, 37(Supplement): 377-380 (张盈, 虞红, 何秋茹. 2008. 红外成像仿真系统目标/背景辐射能量

计算. *红外与激光工程*, 37(增刊): 377-380)

Zhang Y Q. 2005. Research on key technology of high resolution infrared push-broom camera. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (张滢清. 2005. 高分辨率红外推扫相机关键技术研究. 北京: 中国科学院研究生院)

Study on background of space infrared optical system caused by self-emission

CHEN Yonghe^{1,2}, CHEN Hongda^{1,2}, FU Yutian¹

1. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract: Thermal emission from Infrared Radiation (IR) instrument is an important background source, which will reduce Signal-to-Noise Ratio (SNR) of the system. It is necessary to estimate background radiation due to instrument's thermal emission in opt-mechanical design phase. An analytic model about thermal emission of reflect/refract combined optical system is established here, which is used to calculate background of space IR systems. Object signal is compared with background to show how background affects SNR. Finally, methods about removing background are discussed.

Key words: thermal radiation, thermal emission, background radiation, infrared optical system