

文章编号: 0253-2239(2010)03-0768-04

天基红外探测系统的杂散光分析与计算

牛金星^{1,2} 周仁魁¹ 刘朝晖¹ 蔡占恩^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 探讨了天基红外探测系统的杂散光来源,运用黑体辐射的理论分别对其大小进行了分析和计算。分析地气杂光在探测器靶面的辐照度时,通过在仿真软件中建立模型,应用追迹光线的方法得到了地气表面对相机所张的立体角,从而求出地气杂光在探测相机靶面上的辐照度,减小了计算的复杂度。然后对探测系统的噪声进行了分析,计算了某一个型号 Sofradir 焦平面器件的噪声等效辐照度(NEI),通过比较发现,杂散光在探测器靶面的辐照度远大于热像仪的 NEI,必须对杂散光采取抑制措施。最后对地气杂光的抑制比和光学系统的致冷温度要求进行了分析,结论为系统的设计提供了参考。

关键词 红外探测;杂散光;仿真软件;等效噪声辐照度

中图分类号 TN215 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0768

Analysis and Calculation of Space-Based Infrared Detecting System

Niu Jinxing^{1,2} Zhou Renkui¹ Liu Zhaohui¹ Cai Zhan'en^{1,2}

(¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The sources of stray sight of space-based infrared detecting system are studied. They are analyzed and calculated by use of blackbody radiation. The irradiance of the focal plane which arises from earth and atmosphere is analyzed by model established in TracePro. The projected solid angle subtended by the surface of earth and atmosphere to the camera can be known by the method of ray-tracing. The method makes the complex calculation become easy. Then the noises of detecting system are analyzed. The noise-equivalent-irradiance (NEI) of a certain Sofradir infrared-focal-plane-array is calculated and compared with irradiance induced by other stray lights. The result proved that the irradiance of the focal plane which arises from stray light is far bigger than the NEI of the infrared-focal-plane-array. Methods should be adopted to suppress stray light. The demand of rejection of the stray light from earth and atmosphere and the demand of the temperature of optical system are given. This result can be a reference for system design.

Key words infrared detection; stray light; TracePro software; noise equivalent irradiance (NEI)

1 引言

天基红外探测技术是利用目标和背景之间的温差和发射率差形成的红外辐射特性进行探测,具有识别目标能力强、观察范围广的优势。探测系统一般有扫描型和凝视型两种探测器。扫描型探测器用于对目标的捕获,凝视型探测器用于对目标的精确跟踪。通过对空间飞行目标的探测跟踪,能够更准确地预报目标的位置和落点。目前,世界上发达的

国家都在致力于天基红外探测系统的研制和部署,美国和俄罗斯已拥有了比较完善的天基红外探测系统^[1]。

杂散光,是指到达探测器靶面的非目标像的辐射能量。天基红外探测系统的杂光环境很恶劣,杂光引起的噪声很大,而目标信号比较弱,结果是目标信号往往被噪声所淹没^[2],严重地影响了系统的探测距离和分辨能力。在探测器一定的情况下,系统

收稿日期: 2009-03-26; 收到修改稿日期: 2009-04-30

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

导师简介: 周仁魁(1944—),男,研究员,博士生导师,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(中国光学学会会员号:7109019)

杂光的分析与抑制就成为提高系统探测能力的关键因素。

2 杂散光环境的分析

天基红外探测系统的杂散光概括起来分为 3 类^[3~5]:第 1 类是外部杂光,是由外部光源产生,经反射、散射或直接照射到光学系统入口面并传递到探测器靶面;第 2 类是由光学系统自身的热辐射引起的杂光,也称内部杂光;第 3 类是由于污染或制造原因,光学窗口、透镜和反射镜等光学元件对视场内目标光线的散射,形成杂散光。只考虑前两类杂散光,可能存在的杂光源有太阳杂光、月亮杂光、地气杂光和光学系统自身热辐射杂光。对空间自由飞行目标进行探测的中低轨探测卫星工作时一般都背对着太阳,而且卫星的轨道周期远小于月亮的公转周期,月亮杂光直接照射到光学系统入瞳上的概率很小。所以,探测系统的杂光主要为地气杂光和光学系统自身的热辐射杂光。地气杂光是把地球和低层大气看成一个整体来研究其在探测器上形成的杂散光。地气杂光包括反射的太阳光能量和自身的热辐射两部分,太阳光能量主要集中在可见光波段,而对于地球低层大气外的自由飞行的空间目标,其表面温度较低,辐射主要集中在长波红外波段。该波段内的地气杂光主要是地气表面的热辐射引起的杂散光。对地气的热辐射杂光和光学系统的热辐射杂光在探测器靶面的辐照度分别进行了计算。

2.1 地气热辐射在探测器靶面的辐照度

把地球和低层大气看成一个整体来研究其在探测器靶面的辐照度,低层大气一般认为 80 km 以下的地球大气。因为地气杂光对光学系统的影响很大,一般都避免地气的热辐射直接进入光学系统。探测相机和地气系统的位置关系如图 1 所示。

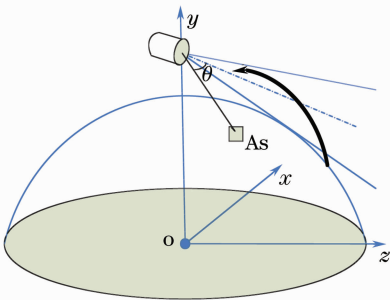


图 1 天基探测系统示意图

Fig. 1 Sketch of spaced-based infrared detecting system

地气杂光是探测光学系统的视场外扩展光源。其在光学系统入瞳处的辐照度可表示为

$$E_e = L_e \Omega_e \cos \theta,$$

式中 θ 为光源微面元和相机的连线与相机的视轴的夹角,设相机的半视场角 $\beta = 2^\circ$,则 $2^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 。 L_e 为地气表面的辐亮度,其大小可由普朗克公式计算得到

$$L_e = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_e) - 1} d\lambda.$$

式中 T_e 为地气表面的温度, c_1, c_2 为辐射常数, $c_1 = 3.741832 \times 10^4$ ($\text{W} \cdot \mu\text{m}$) / cm^2 , $c_2 = 1.438786 \times 10^4$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。 Ω_e 为地气杂光源对探测相机所张的立体角。

对于计算地气杂光在探测相机上的辐照度,相关文献[6~8]给出了计算的公式,并进行了公式的推导,但都比较复杂,计算量较大。这里使用了 Lambda 公司开发的具有强大建模能力的光机仿真软件 TracePro。在软件中建立了地气系统和相机的模型,把光学系统的入瞳面作为朗伯辐射源,利用蒙特卡罗方法追迹大量的 N 条光线,光线射向整个半球空间,半球空间的立体角为 π ,地气表面接收到的光线数为 M 条,则有

$$\frac{M}{N} = \frac{\Omega_e}{\pi} \quad (1)$$

在建立模型时把地气表面设置成完全吸收表面 (Perfect Absorber)。从软件的主菜单 (Reports) 中,可以找到到达地气表面的光线数 M 的大小。为了提高精度,追迹了 100 万条光线,光线追迹结果如图 2 所示。地气表面接收到的光线数 M 为 421524 条。代入(1)式得: $\Omega_e = M\pi/N = 1.3243$ rad。

设 D 为探测相机入瞳的直径,则 $A_o = \pi D^2/4$ 为相机入瞳的面积。探测相机入瞳处接收到的辐射通量为

$$\Phi_e = E_e A_o = L_e \Omega_e A_o \cos \theta,$$

若探测器单个像素的面积为 A_d ,对应的视场立体角为 Ω_d ,则 $A_d = f^2 \Omega_d$,单个像素接收到的辐射通量为: $\Phi_{ed} = \Phi_e \Omega_d \tau_o / \pi$, τ_o 为光学系统的透射率。

则地气杂光在单个像素上的辐照度为

$$E_{ed} = \frac{\Phi_{ed}}{A_d} = \frac{1}{4} L_e \Omega_e \tau_o \cos \theta \left(\frac{D}{f} \right)^2. \quad (2)$$

2.2 光学系统热辐射在探测器靶面的辐照度

光学系统自身的热辐射包括镜筒辐射和镜组辐射。镜筒辐射在冷光阑严格匹配的情况下,可以不予考虑。对于镜组辐射,为便于分析,可将光学系统等效为直径为 D 、焦距为 f 的单透镜光学系统^[9]。

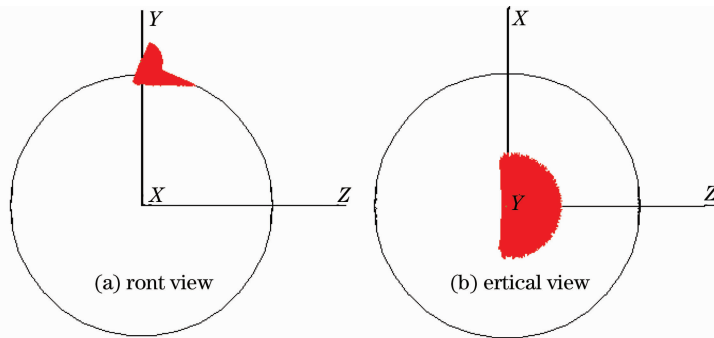


图 2 TracePro 光线追迹结果图

Fig. 2 Simulation result in TracePro

设透镜的发射率为 ϵ_0 , 温度为 T_0 , 则其辐射出射度 M_0 和辐射强度 I_0 分别为

$$M_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_0 \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_0) - 1} d\lambda,$$

$$I_0 = \frac{M_0 D^2}{4}.$$

单个像素相对透镜所张的立体角为

$$\Omega_d = \frac{A_d}{f^2}.$$

单个像素接收到的透镜辐射通量为

$$\Phi_{od} = \frac{M_0 A_d}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2.$$

透镜辐射在探测器靶面的辐照度为

$$E_{od} = \frac{\Phi_{od}}{A_d} = \frac{M_0}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2. \quad (3)$$

3 探测系统的噪声分析和杂光抑制要求

假设探测系统的参数为直径(入瞳) $D=0.25$ m, F 数 $F=2$, 透镜的发射率 $\epsilon_0 = 0.03$, 光学系统的透射率 $\tau_0 = 0.7$. 地气表面的等效温度 $T_0 = 220$ K, $\theta = 45^\circ$, 探测波段为 $8 \sim 9 \mu\text{m}$. 由(2)式计算得到: 地气杂光在探测器靶面的辐照度为 $5.003 \times 10^{-2} (\text{W}/\text{m}^2)$.

表 1 不同温度下光学系统自身热辐射在探测器靶面的辐照度

Table 1 The irradiance of the focal plane arose by the thermal radiance of lens in different temperature

temperature /K	150	100	90	80	77
irradiance /(W/m^2)	2.012×10^{-4}	7.505×10^{-7}	1.172×10^{-7}	1.157×10^{-8}	5.144×10^{-9}

由上面的计算结果可以看出, 天基红外探测系统在对自由飞行的目标进行探测时, 地气杂光和光学系统自身的热辐射杂光在探测器靶面的辐照度, 都远大于热像仪的噪声等效辐照度, 即由杂散光产生的噪声远大于热像仪的噪声。对于地气杂光和光

对空间自由飞行目标进行探测的天基红外探测系统的视场内背景, 是冷的外层空间。将空间背景的辐射亮度在全部外层空间(包括所有的恒星)上进行积分, 比较精确的计算表明, 有效温度约为 3.5 K^[10]. 其在探测系统靶面的辐照度非常小, 忽略不计。

下面计算探测器的噪声等效辐照度 E_{NEI} . 以 SOFRADIR MARS LW 热像仪为例, 其噪声等效温度 ΔT_{NETD} (300 K) 为 25 mK. 由(4)式^[11]可以求出 D^* .

$$\Delta T_{NETD} = \frac{4 \sqrt{A_d \Delta f}}{\tau_0 D^2 D^* \Omega_d \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \partial M_\lambda(T_B) / \partial T_B d\lambda}. \quad (4)$$

式中 D^* 为探测器的比探测率, Δf 为系统带宽, T_B 为测量时的背景温度(300 K).

而系统的噪声等效功率 P_{NEP} 为

$$P_{NEP} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{D^*}.$$

探测器靶面的噪声等效辐照度 E_{NEI} 为

$$E_{NEI} = \frac{P_{NEP}}{A_d},$$

代入数值得 $E_{NEI} = 6.153 \times 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2)$.

由(3)式计算可以得到光学系统自身热辐射不同温度下在探测器靶面的辐照度如表 1 所示。

学系统的热辐射必须采取相应的衰减措施。如果要求杂散光在探测器靶面的辐照度对探测相机的像质不产生影响, 则对其衰减到比热像仪噪声等效辐照度低一个数量级为宜。对于光学系统自身的辐射, 一般采取致冷的措施。从表 1 中的数据可以看出,

由探测器看到的第一个透镜的温度需致冷到 80 K 以下才能满足要求。地气表面产生杂光的抑制比为

$$R = \frac{0.1 \times E_{NEI}}{E_{ed}} = 1.230 \times 10^{-7}.$$

即对地气杂光在探测器靶面的辐照度要衰减到 10^{-7} 倍。对地气杂光的衰减, 可以采用设计遮光罩和罩内的挡光环、改变内表面材料特性以及采用冷光阑匹配等措施来达到衰减的要求^[14~16]。

4 结 论

天基红外探测系统是一个庞大的系统工程。一个好的探测系统应有高的探测概率, 这就要求系统输出结果需要有较高的信噪比。对系统工作的杂光环境进行分析是系统设计的第一步, 只有充分掌握了系统工作的特殊环境, 才能保证系统在该环境下的正常工作。对天基红外探测系统的杂光环境进行了分析计算, 给出了地气杂光的抑制要求和对光学系统致冷温度的要求。

参 考 文 献

- 1 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 2 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
- 3 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
- 4 Wang Pingyang, Xia Xinlin, Tan Heping *et al.*. Simulation and analysis of stray light in CCD camera[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 1999, **31**(5): 55~59
王平阳, 夏新林, 谈和平 等. CCD 相机的杂散光模拟计算与分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1999, **31**(5): 55~59
- 5 Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 316~318
钟 兴, 张 雷, 金 光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(2): 316~318
- 6 A. D. Warren. Simplified techniques for estimating out-of-field radiation[C]. *SPIE*, **257**: 10~18
- 7 Li Dexiong, Yan Dayuan. Calculation of stray radiation from the earth as an extended source [J]. *J. Beijing Institute of Technology*, 1995, **15**(3): 335~338
李德熊, 阎达远. 地球作为扩展源的杂光计算[J]. *北京理工大学学报*, 1995, **15**(3): 335~338
- 8 Zhang Jun, Lü Xiangyin, Wang Yicheng *et al.*. Influence of earth radiation on surface temperature field of exoatmospheric ballistic target[J]. *Infrared Technology*, 2008, **33**(4): 187~191
张 骏, 吕相银, 王一程 等. 地球辐射对大气层外弹道式目标表面温度场的影响[J]. *红外技术*, 2008, **33**(4): 187~191
- 9 Xing Qianglin, Huang Huiming, Xiong Rensheng *et al.*. Detectability analyzing of IR FPA tracking system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 893~896
邢强林, 黄惠明, 熊仁生 等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 893~896
- 10 R. D. Hudson, Jr. Infrared System Engineering[M]. Principle of IR System Group Transl, Beijing: National Defense Industry Press, 1975. 64
R. D. 小哈得逊. 红外系统原理[M]. 《红外系统原理》编译组译, 北京: 国防工业出版社, 1975. 64
- 11 Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared Radiation and The Control of Missile[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. 391~397
徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. 391~397
- 12 Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping *et al.*. Baffle design and simulation of R-C system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 332~336
李 婷, 杨建峰, 阮 萍 等. R-C 系统的遮光罩设计与仿真[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 332~336
- 13 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
- 14 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
- 15 Zhang Wei, Wang Hongyuan, Wang Zhile. Measurement of bidirectional reflection distribution function on material surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 88~91
- 16 He Hongxing, Zhao Jingsong, Pan Shunchen. Common-aperture optical system for MWIR/SWIR polarization imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 932~936
何红星, 赵劲松, 潘顺臣. 共口径中波/短波偏振红外成像光学系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 932~936