

弱小目标红外探测系统的杂散辐射分析

牛金星, 张 涛

(华北水利水电学院 机械学院, 河南 郑州 450011)

摘 要: 杂散辐射是指到达红外探测系统靶面的非目标成像的辐射能量。杂散辐射经过光电器件后增加了系统的噪声, 降低了系统的输出信噪比, 影响到红外探测系统对目标的探测能力。为了提高红外探测系统对空间弱小目标的探测能力, 分析了红外探测系统的杂散辐射来源; 推导了不同地理纬度、不同时刻下的红外探测系统太阳辐射入射角计算公式; 分别计算了红外探测系统的太阳辐射、天空背景、热辐射噪声等效电子数; 比较了杂散辐射噪声和探测器的固有噪声, 分析了红外探测系统的最小噪声极限, 得出地基红外探测系统的背景噪声决定了系统的探测极限。

关键词: 红外目标探测; 杂散辐射; 太阳辐射; 背景辐射

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1665-04

Analysis of stray radiation of infrared system to detect dim and small target

Niu Jinxing, Zhang Tao

(Department of Mechanic, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Stray radiation refers to the unwanted radiation reached on the detector surface in infrared detection system. Stray radiation will add the system's noise after photoelectric conversion, decrease the system's output signal-noise-ratio, and reduce the system's detection ability for space target. In order to improve the detection ability of infrared system for space dim and small target, the sources of stray radiation in infrared detection system were analyzed. The formula of the sun's incident angle on infrared detection system at certain geographic latitude and time was deduced. The equivalent number of noise electrons from the sun, sky and the infrared detection system's thermal radiation was calculated based on a typical system parameter. The noises arisen from stray radiation and detector's inherent noise were compared, the noises limit of infrared detection system was analyzed. Results prove that noise limit of infrared detection system is background noise after analysis of the system designed.

Key words: infrared target detection; stray radiation; sun radiation; background radiation

收稿日期: 2012-11-07; 修订日期: 2012-12-20

基金项目: 河南省教育厅科学技术研究重点项目(12A460008); 华北水利水电学院高层次人才科研启动项目

作者简介: 牛金星(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事红外探测技术方面的研究。Email: niujinxing@ncwu.edu.cn

0 引言

“弱”和“小”是目标属性的两个方面,所谓“弱”是指目标红外辐射的强度,反映到图像上是指目标的灰度值小;所谓“小”是指目标的尺寸,反映到图像上是指目标所占的像素数少,不考虑形状等结构信息^[1]。

杂散辐射是指到达红外探测系统靶面的非目标成像的辐射能量。红外探测系统在对弱小目标进行探测时,因目标信号较弱,往往被噪声所淹没,目标信号很难从杂散辐射背景中提取出来,严重影响了系统的探测距离和识别能力,所以分析并抑制杂散辐射成为提高红外探测系统对弱小目标探测能力的关键因素^[2]。

1 杂散辐射的来源

地基红外探测系统的示意图见图 1, 红外探测系统的杂散辐射来源主要有三种^[3-5]:(1) 视场外部点辐射源通过散射或衍射到达探测器表面, 主要指太阳辐射;(2) 视场内大气背景经过光学系统到达探测器表面形成背景辐射;(3) 系统自身的热辐射直接或通过散射到达探测器表面形成背景辐射, 包括来自带有挡光环的主镜筒, 主镜、主镜内罩、次镜、次镜罩等主要系统部件的热辐射。下面分别对三种杂散辐射进行分析。

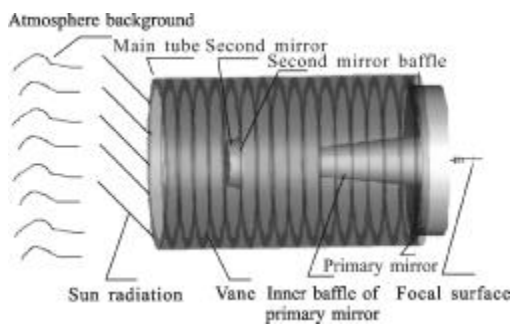


图 1 地基红外探测系统的示意图

Fig.1 Stray radiation sources of ground-based IR detection system

2 太阳杂散辐射

太阳是一个由多层组成, 且温度和辐射波长不同的复杂辐射体, 但在实际的计算中, 常常把太阳简化成一个温度为 6 000 K 的辐射黑体, 即太阳辐射相当于温度 6 000 K 黑体的辐射。

假设某一时刻, 太阳与红外探测系统的位置关系如图 2 所示。此时红外探测系统入口斜面倾角为

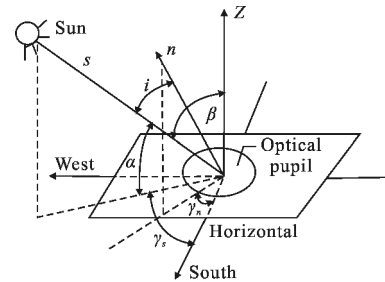


图 2 太阳与红外探测系统的位置关系

Fig.2 Position relation between sun and IR detection system

β , 方位角为 γ_n ; 太阳高度角为 α , 太阳方位角为 γ_s 。太阳高度角是太阳向量 S 与地平面之间的夹角, 太阳向量 S 与天顶 Z 轴的夹角定义为天顶角, 用 θ_z 表示, 则 $\theta_z=90^\circ-\alpha$; 太阳方位角表示太阳向量 S 在地平面上的投影线与南北方向线之间的夹角, 并规定正南方向为 0° , 由南向西向北为正, 正西方向为 $+90^\circ$, 正东方向为 -90° , 正北方向为 $\pm 180^\circ$ 。太阳高度角的表达式为^[6]:

$$\cos\alpha = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\omega = \cos\theta_z \quad (1)$$

式中: ϕ 为地理纬度, 赤道以北为正, 以南为负; δ 为太阳赤纬角; ω 为太阳时角。

太阳方位角的表达式为^[6]:

$$\cos\gamma_s = \sin(\phi) \frac{\sin\alpha\sin\phi - \sin\delta}{\cos\alpha\cos\phi} \quad (2)$$

式中: $\text{sign}(\phi)$ 是符号函数, 在北半球取正值, 在南半球取负值。

太阳向量 S 与光学系统入口面法线 n 的夹角定义为太阳入射角, 用 i 表示。在已知太阳天顶角 θ_z 、太阳方位角 γ_s , 光学系统入口面的斜面的倾角 β 和方位角 γ_n , 则太阳入射角 i 可由下面的公式计算^[7]:

$$\cos i = \sin\theta_z\sin\beta\cos(\gamma_s - \gamma_n) + \cos\theta_z\cos\beta \quad (3)$$

由公式(3)可知:

$$\cos i \leq \sin\theta_z\sin\beta + \cos\theta_z\cos\beta = \cos(\theta_z - \beta)$$

取等号时有:

$$i = |\theta_z - \beta| \quad (4)$$

太阳在红外探测系统入口斜面的照度计算公式为:

$$E = E_0\cos i \quad (5)$$

式中: E_0 为太阳在垂直入射方向的辐照度。由上式可以看出当红外探测系统轴线和太阳入射光线在同一个竖直平面内时, 此时红外探测系统接收到的太阳

辐照度系数最大。

太阳在垂直入射方向的辐照度 E_0 可由黑体辐射公式计算:

$$E_0 = \frac{M_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \tau_a}{2} \left(\frac{r}{r_s} \right)^2 \quad (6)$$

式中: M_λ 为太阳光谱辐出度, 可由普朗克黑体辐射定律得到。 r 为太阳与地球之间的平均距离, 约为 1.496×10^{11} m; r_s 为太阳的平均半径, 约为 6.9627×10^8 m; τ_a 为大气透过率, 取 0.6。

设探测系统入口面的面积用 A_0 表示, 则 $A_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$ 其中 D 为直径。则相机入口面的接收到的辐射通量为:

$$\Phi_s = E \cdot A_0 = E_0 \cdot A_0 \cdot \cos i \quad (7)$$

若探测器单个像素的面积为 A_d , 取 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 对应的视场立体角为 Ω_d , 光学系统的透过率为 τ_0 , 取 0.7, 则单个像元接收到的辐射通量为:

$$\Phi_{sd} = \Phi_s \cdot \frac{\Omega_d}{\pi} \cdot \tau_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \Phi_s \cdot \frac{A_d}{f^2} \cdot \tau_0 \quad (8)$$

单个像元每秒内接收到的太阳杂散辐射等效光子数为:

$$N_s = \frac{\Phi_{sd} \cdot \eta}{h \cdot \nu} \quad (9)$$

式中: η 为光电转换平均量子效率, 取 0.7。

方程(6)~(9)联立得:

$$N_s = \frac{1}{4h \cdot \nu} \cdot \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot \frac{M_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot \tau_a \cdot \tau_0 \cdot A_d \cdot \eta}{2} \cdot \cos i \left(\frac{r}{r_s} \right)^2 \quad (10)$$

文中的数据计算中使用的红外探测系统参数为: 口径为 800 mm, F 数为 4, 视场角为 0.5° 。在红外探测波段为 L 波段(中心波长为 $3.40 \mu\text{m}$, 波段宽度为 $0.57 \mu\text{m}$)时, 代入数值得:

$$N_s = 7.19 \times 10^8 \cos i \quad (11)$$

由太阳杂散辐射光子起伏产生的光子噪声为:

$$\Phi_s = \sqrt{N_s} = 2.68 \times 10^4 \cdot \cos \frac{1}{2} i \leq 2.68 \times 10^4 \quad (12)$$

由上面的计算结果可以看出, 太阳杂散辐射光子噪声随着入射角的变化而变化。单个像元每秒内接收到的太阳杂散辐射噪声等效电子数最大值为 2.68×10^4 个。

3 大气背景杂散辐射

地基探测系统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 星的亮度^[8], 0 m 星的光子通量密度 1.17×10^9 photons/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{s}$)。

星等之间的换算公式为:

$$m_1 - m_2 = 2.5 \log \frac{N_{\phi_2}}{N_{\phi_1}}$$

即

$$N_{\phi_2} = N_{\phi_1} \times 10^{0.4(m_1 - m_2)} \quad (13)$$

式中: N_{ϕ_1} 、 N_{ϕ_2} 分别是星等为 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 5.11×10^7 photons/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{s}$)。每秒内天空背景到达单个像元的等效光子数为:

$$N_{\text{sky}} = N_\phi \cdot \Delta\lambda \cdot A_0 \cdot \tau_0 \cdot \eta \cdot \Omega_d \quad (14)$$

式中: $N_\phi = 5.11 \times 10^7$ photons/($\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{s}$); $\Delta\lambda = 0.57 \mu\text{m}$; $\tau_0 = 0.7$ 为整个光学系统的透过率;

$$A_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 0.5027 \text{ m}^2$$

η 为探测器的平均量子效率;

$$\Omega_d = \left(\frac{30 \times 10^{-6}}{3.2} \times 206265 \right)^2 = 3.739$$

代入公式(14)求得:

$$N_{\text{sky}} = 2.68 \times 10^7$$

夜间天空背景的光子噪声为:

$$\sigma_{\text{sky}} = \sqrt{N_{\text{sky}}} = 5.18 \times 10^3$$

即每秒内天空背景在单个像元上产生的噪声等效电子数为 5.18×10^3 个。

白天西安地区的大气平均散射辐照度为 18.7 W/m^2 ^[9], 经过计算得到单个像素产生的等效噪声电子数约为 2.95×10^5 个, 这是由于在白天大气背景不仅包括大气自身的热辐射, 而且包括大气对太阳的散射。

4 热杂散辐射

对于红外探测系统, 室温下探测系统自身的热辐射可能比目标辐射在探测器表面形成的辐照度大几个数量级, 所以在使用遮光罩、挡光环结构来抑制视场外的杂散辐射的同时, 其自身的热杂散辐射必须考虑。作者在 TracePro 软件中建立了系统模型, 分别对主镜、次镜和主镜筒、主镜内罩、次镜罩的热杂散辐射进行了仿真试验。在 L 波段内温度为 300 K 时的热杂散辐射仿真结果如表 1 所示。可以看出, 主镜内罩和主镜筒的杂散辐射光子数最大,

在一个数量级;次镜罩的杂散辐射光子数次之;主镜和次镜的杂散辐射光子数较小,它们在一个数量级上。由表中的数据相加得到主系统的热杂散辐射光子数为 1.2316×10^9 。红外探测系统杂散辐射噪声等效电子数为:

$$\sigma_{\text{stray}} = \sqrt{N_{\text{stray}} \cdot \eta} = \sqrt{1.2316 \times 10^9 \times 0.7} = 2.94 \times 10^4$$

表 1 温度为 300 K 时各组件热杂散辐射仿真结果
Tab.1 Stray radiation simulation result of each part of 300 K

	Main tube	Primary mirror	Inner baffle of primary mirror	Second mirror	Second mirror baffle
Photons received by a pixel/s	2.4125×10^8	4.7356×10^6	9.6811×10^8	5.7275×10^6	1.1776×10^7

5 分析与结论

由太阳杂散辐射产生的噪声等效电子数为 10^4 量级,考虑到红外探测系统常设计遮光罩来抑制太阳辐射,遮光罩的设计要求太阳辐射到达探测器表面至少反射两次,遮光罩内壁常采用高吸收率材料,假设对太阳辐射的吸收率为 0.85,反射率为 0.15,则太阳杂散辐射噪声电子数至多为 10^2 量级。探测器噪声等效电子数一般为 10^3 量级,红外探测系统的背景噪声不仅包括天空背景辐射噪声,而且包括仪器本身的热辐射噪声。从上面的分析数据可以看出,地基红外探测系统的背景噪声决定了系统的探测极限,也就是系统工作在背景限探测状态。

参考文献:

- [1] Xu Jun. Research on the detection of small and dim targets in infrared images [D]. Xi'an: Xidian University, 2003. (in Chinese)
徐军. 红外图像中弱小目标检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003.
- [2] Niu Jinxing, Shi Shuheng, Zhou Renkui. Analysis to stray radiation of infrared detecting system[C]//SPIE, 2011, 8193: 81931H-1-81931H-5.
- [3] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散辐射的消除[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316-318.
- [4] Deng Chao. Analysis on stray light elimination for space solar telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 715-720. (in Chinese)
邓超. 空间太阳望远镜消杂散光分析 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 715-720.
- [5] Shang Ling, Liu Zhaohui, She Wenji. Optimizing design of baffle in the ground-based IR optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1158-1162. (in Chinese)
尚玲, 刘朝晖, 折文集. 陆基红外探测系统遮光罩优化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1158-1162.
- [6] Luque A, Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering[M]. Wiley Hoboken NJ: John Wiley & Sons Ins, 2003: 906-915.
- [7] Matchko R M, Gerhart G R. Polarization azimuth angle in daylight scenes[J]. Opt Eng, 2005, 44(2): 028001.
- [8] Bely Pierre Y. The Design and Construction of Large Optical Telescope[M]. New York: Springer-Verlag Inc, 2003: 22.
- [9] Cao Miao. Illumination technology research of comprehensive test target lane for shoot [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009: 97. (in Chinese)
曹秒. 综合试验射击靶道照明技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009: 97.