

文章编号: 1672-8785(2010)01-0008-04

空间低温点目标红外探测系统的作用 距离的计算与等效测试

柴金广 刘云猛

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 应用于空间环境的低温目标红外探测系统, 其作用距离是系统的重要性能指标。本文推导了以红外焦平面探测器噪声为主要因素的点目标红外探测系统的作用距离估算方程, 结合实例求解了典型红外探测系统的探测系统的作用距离。针对空间低温点目标, 基于信噪比判断准则, 采用能量等效和尺度缩比等效的方法在实验室内验证了红外探测系统的作用距离, 测试结果符合理论估算。试验表明, 该方法可在实验室内用于评估低温点目标红外探测系统的作用距离。

关键词: 低温点目标; 红外探测系统; 作用距离; 等效测试

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.01.002

Calculation and Equivalent Test of Infrared Operating Distance for Low Temperature Point Target in Space

CHAI Jin-guang, LIU Yun-meng

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Operating distance is an important specification of infrared systems for detecting low temperature targets in space. By taking the noise of an infrared focal plane detector as the main factor, an operating distance estimation equation for point targets is derived. A calculation example of the operating distance of a typical infrared detection system is given. For the low temperature point target in space, the operating distance of the infrared detection system is verified by using both an energy equivalent method and a dimension equivalent method according to the signal-to-noise criterion in laboratory. The measured result is in agreement with the theoretical estimation. The test shows that the method can be used to evaluate the operating distance of an infrared detection system for detecting low temperature point targets in laboratory.

Key words: low temperature point target; infrared detection system; operating distance; equivalent test

1 引言

在红外探测系统中, 作用距离是评价系统性能的重要指标。红外探测系统作用距离的远

近可直接影响红外图像的信噪比和像质, 因而也会影响到目标的捕获与识别。当目标张角小于红外系统的瞬时视场时, 实际应用中可将目标看成是点辐射源目标, 红外系统所接收到的

收稿日期: 2009-07-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划 863-704 专题 (2006AA704205-4)

作者简介: 柴金广 (1967-), 男, 江西万年人, 副研究员, 主要从事空间遥感与光电技术的研究。E-mail: chaijinguang@hotmail.com

目标辐射能量与其间的距离有关。影响红外探测距离的主要因素有背景噪声和探测器噪声，而对于在空间冷背景(4K)下工作的探测系统来说，系统的噪声主要是探测器的噪声^[1-3]。

红外探测系统作用距离的测试试验实现起来一般比较困难，尤其是对于空间超低温目标的探测，需要在地面上的真空罐中模拟低温冷背景，而低温远距离点目标的操作也比较困难。为了考核在规定条件下的作用距离，迫切需要研究一些等效的实验室测试方法。文中针对低温目标，采用尺寸缩比和能量等效方法来测试红外探测系统的作用距离。

2 基于探测器噪声的红外探测系统的作用距离^[3,4]

对于点目标，当目标距离为 R 时，红外探测系统入瞳处所接收到的目标光谱辐射照度为

$$E_\lambda = \frac{J_{\Delta\lambda}\tau_\alpha(\lambda)}{R^2} \quad (\text{W/cm}^2) \quad (1)$$

式中， $J_{\Delta\lambda}$ 为目标红外辐射强度， $\tau_\alpha(\lambda)$ 为大气光谱透过率。

若光学系统的通光口径为 D ，则经光学系统入射到红外探测系统上的光谱辐射功率为

$$P_\lambda = E_\lambda \tau_0(\lambda) \pi D^2 / 4 \quad (2)$$

探测器的光谱响应度为

$$R(\lambda) = \frac{V_N D^*(\lambda)}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \quad (3)$$

式中， $D^*(\lambda)$ 为探测器的光谱比探测率， V_N 为探测噪声的均方根值， A_d 为光敏元的单元面积； Δf 为系统的等效噪声带宽， $\Delta f = 1/2T_{int}$ ， T_{int} 为积分时间。

探测器产生的信号电压为

$$V_s(\lambda) = P_\lambda R(\lambda) \quad (4)$$

在红外探测器所选用的工作波段($\lambda_1 \sim \lambda_2$)内可获得的信号电压为

$$V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_s(\lambda) d\lambda$$

$$= \frac{\pi D^2}{4R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{\Delta\lambda} \tau_\alpha(\lambda) \tau_0(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

把信噪比 $SNR = V_s/V_N$ 代入上式进行变换，得出的作用方程为

$$\begin{aligned} R^2 &= \frac{\pi D^2}{4(A_d \Delta f)^{1/2} SNR} \\ &\times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} J_{\Delta\lambda} \tau_\alpha(\lambda) \tau_0(\lambda) R(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (6)$$

假设在波段宽度 $\Delta\lambda$ 内目标的平均辐射强度为 $J_{\Delta\lambda}$ ，距离为 R 处的平均大气光谱透过率为 τ_α ，光学系统在 $\Delta\lambda$ 内的平均光谱透过率为 τ_0 ，探测器在 $\Delta\lambda$ 内的平均光谱比探测率为 D^* 。由于上式中没有考虑信号损失等影响因素，根据经验引入了过程因子 ζ 。于是红外探测系统的作用距离估算公式为

$$R = \left[\frac{\pi D^2 \tau_0 \tau_\alpha \zeta D^* J_{\Delta\lambda}}{4(\Delta f A_d)^{1/2} SNR} \right]^{1/2} \quad (7)$$

基于上述估算公式，进行误差分析时要考虑以下影响：一是探测目标特性分析的准确性；二是与目标成像像元大小有关的最小探测信噪比的测定误差；三是大气辐射传输计算误差等。另外，推导上述公式时没有考虑成像点的弥散及背景噪声对探测距离的影响等。

3 参数确定及作用距离估算

3.1 目标辐射强度

目标红外辐射强度的公式为^[3]

$$J_{\Delta\lambda} = \frac{1}{\pi} \varepsilon \sigma T^4 A_C k_{\Delta\lambda} \quad (8)$$

式中， ε 为目标比辐射率， A_C 为目标等效面积， σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ， T 为目标温度， $k_{\Delta\lambda}$ 为目标温度为 T 时 $\Delta\lambda$ 光谱范围内的辐射能量占总能量之比， $k_{\Delta\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} d\lambda}{\sigma T^4}$ ，其中 C_1 和 C_2 分别为第一和第二辐射系数， $C_1 = 3.74 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$ ， $C_2 = 1.438 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

假设空间冷背景下目标的等效温度为 210K，目标的面积为 1m²，外表面材料的发射率 ε 近似为 0.7。在不考虑背景辐射时，对于光

谱响应带宽为 $7.5\mu\text{m} \sim 9.5\mu\text{m}$ 的波段, 由式(8)计算出目标的辐射强度 $J_{\Delta\lambda} = 1.32\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1}$ 。

3.2 探测信噪比及等效测试准则

综合目标捕获、识别和跟踪算法的特点, 红外图像的信噪比可作为红外作用距离评估的着眼点。只要图像的信噪比 SNR_g 不小于某一个量 SNR_{g_0} (SNR_{g_0} 与目标成像像元大小有关, 在一定范围内, 可近似为常数), 那么红外探测系统就可按照规定的捕获概率要求获取目标, 我们把 SNR_{g_0} 称为红外探测系统的最小探测信噪比, 信噪比为 SNR_{g_0} 时的作用距离为红外探测系统可探测的距离, 这也是我们下面进行等效测试时的判断准则。

红外最小探测信噪比在实际工程中是通过测试获得的, 与探测概率还有一定的关系。综合测试结果, 最小探测信噪比 SNR_{g_0} 为 5 时, 可以满足目标识别要求。

3.3 典型系统的作用距离估算

系统参数如下: 红外探测系统的光学口径 $D = 100\text{mm}$, 红外探测器的比探测率 $D^* = 8 \times 10^{10}\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 光敏元的单元面积 $A_d = 30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$, 光学效率 $\tau_o = 0.3$, 对于外大气层作用空间, 假设大气透过率为 1, 过程因子 $\zeta = 0.7$ 。若积分时间为 $200\mu\text{s}$, 则 Δf 为 2.5kHz 。经测试, 最小探测信噪比 SNR_{g_0} 为 5。

由式(7)得出 $R = 15.2\text{km}$, 即红外探测系统在上述条件下的作用距离为 15.2km 。

4 作用距离测试验证

4.1 等效测试方法

由于在实验室内无法真实模拟低温远目标, 为了验证红外探测系统的作用距离, 采用了尺度学等效缩比及辐照度等效验证方法。

4.1.1 尺度学等效

采用焦距为 6m 的平行光管和 $0.4\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 大小的光阑孔等效模拟距离为 15.2km 处的 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 点目标, 在光阑孔后方放置可调的面源黑体。

4.1.2 目标辐射度等效

根据普朗克定律计算目标辐射出射度。当目标的温度为 210K 、背景的温度为 4K 时, 在 $7.5\mu\text{m} \sim 9.5\mu\text{m}$ 范围内, 目标和背景的辐射出射度差 $\Delta W_{\Delta\lambda} = 4.0\text{E}-4\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

对于面源黑体来说, 在 $7.5\mu\text{m} \sim 9.5\mu\text{m}$ 波段范围内, 温度为 305K (32°C) 时的辐射出射度 $W(305\text{K}) = 6.50\text{E}-3\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 温度为 308K (35°C) 时的辐射出射度 $W(308\text{K}) = 6.86\text{E}-3\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 两者的辐射出射度差 $\Delta W = 3.6\text{E}-4\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。对于点目标光阑来说, 在温差为 3K (300K 附近) 时的目标辐射强度为 $3.6\text{E}-4 \times 0.0016/\pi = 1.83\text{E}-7 (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1})$ 。当平行光管的焦距为 6m 、光阑孔大小为 0.4mm 时, 点目标在探测系统入瞳处的辐照度为 $H = \frac{J}{f^2} = \frac{1.83 \times 10^{-7}}{(6 \times 10^2)^2} = 5.1 \times 10^{-13} \text{W/cm}^2$ 。

在上述理论计算的距离处, 目标在系统入瞳处的辐照度 $E = 1.32/(1.52 \times 10^6)^2 = 5.7 \times 10^{-13} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。等效辐照度与真实目标在入瞳处的辐照度基本一致。

4.2 测试结果

4.2.1 系统噪声

在红外探测系统前放置常温黑体挡板, 测试红外探测单元的噪声信号值, 测得的噪声方差值为 $V_n(\text{rms}) = 1.3$ 。

4.2.2 黑体温度为 305K 和 308K 时的信号

在平行光管焦面处放置孔大小为 0.4mm 的光阑, 面源黑体的温度分别为 32°C 和 35°C , 测得的目标在光敏元上的信号多帧分布如图 1、图 2 所示。

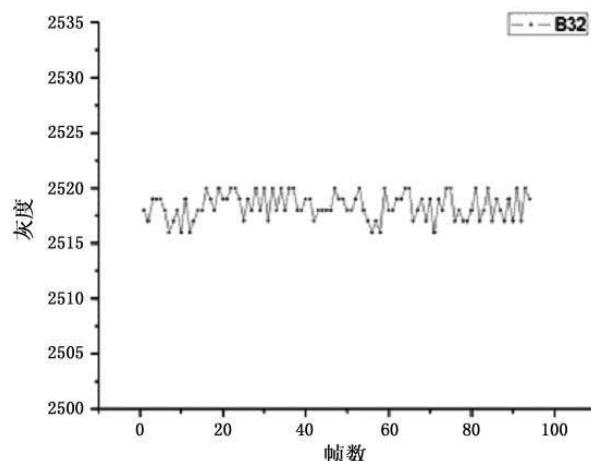


图 1 黑体为 305K 时光敏元的多帧信号曲线

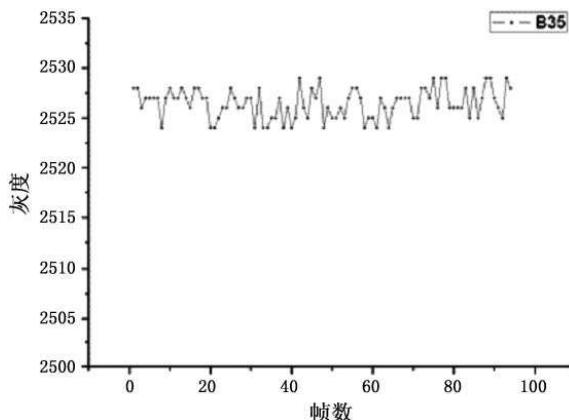


图 2 黑体为 308K 时光敏元的多帧信号曲线

4.2.3 探测信噪比

表 1 为根据多帧测量数据统计的结果。

表 1 探测信噪比测试数据

温度 (℃)	平均值	方差	最小	最大	峰峰
32	2518.36	1.20	2516	2520	4
35	2526.44	1.48	2524	2529	5

测得的探测信噪比 $SNR = \frac{V_{308K} - V_{305K}}{Vn(rms)} = \frac{8.08}{1.3} = 6.2$, 测试结果大于最小探测信噪比 5 ,

新闻动态 News

Raytheon 公司研制出世界上最大的红外光波探测器

据 <http://raytheon.mediaroom.com> 网站 2009 年 8 月 11 日报道, 美国 Raytheon 公司已研制出世界上最大的红外光波探测器, 使其现有能力扩大到了导弹告警、环境监测及天文研究等领域。该公司研制的这种新型 “4k×4k” 焦平面阵列是专门为空间应用优化的, 它由以 4096 行和列排列的大约 1600 万个像素构成, 比目前正在生产中的红外探测器大四倍。这使它具备了以改进的灵敏度从一个非常大的视场中采集数据的能力。

据该公司有关人员说, 焦平面技术的这一突破为在广阔的军民应用领域进行重要的设计改进扫清了道路。当被用作卫星敏感器系统的一

即系统作用距离大于 15.2km , 表明上述红外作用距离的估算结果和参数选取具有一定的可信度。

5 结论

文中推导了基于探测器噪声的点目标红外探测系统的作用距离方程。对于有背景噪声影响的红外探测系统, 在计算作用距离时须考虑背景辐射对探测器的影响。对于空间低温点目标, 在实验室内可以采用尺寸缩比和能量等效方法来测试红外探测系统的作用距离, 该方法操作简单, 可以作为红外作用距离的实验室评估方法。

参考文献

- [1] 陈玻若. 红外系统 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 287-291.
- [2] 杨宜禾. 红外系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 23-41.
- [3] 张幼文. 红外光学工程 [M]. 上海: 科学技术出版社, 1982: 31-45.
- [4] Richard D Hudson. Jr. Infrared System Engineering [M]. John Wiley & Sons, Inc., 1969.

部分时, 这种 “4k×4k” 焦平面阵列将能够以单个焦平面阵列凝视整个地球的半球。

焦平面阵列可以俘获多束光波 (光子) 并将它们转换成电脉冲。这种电脉冲可以用来产生与发射光子的物体有关的数据。阵列上的像素越多, 它所能观测的面积就越大。

星基导弹告警是能够从该公司的大规格焦平面阵列中大大获益的一个方面。采用这种技术的敏感器可以在整个半球面上空形成一只不眨眼的眼睛, 并以比现有野外贵重仪器更快的速度探测模糊不清的事件或物体。

气象卫星将能够提供连续、详细的全球风暴信息, 而天文学家则将能够以前所未有的距离探测红外现象。

采用这种阵列的敏感仪器也比较容易设计、制造和测试, 因为它们不需要以前在覆盖同样大小视场时所使用的复杂的扫描机构。

□ 高国龙