

文章编号: 1672-8785(2010)01-0022-04

通过噪声等效温差来评价红外系统的性能

宋敏敏 吴 平 董大兴

(南京航空航天大学理学院, 江苏南京 211100)

摘 要: 噪声等效温差对于红外系统的性能评价, 对于检验红外系统性能来提高红外系统设计水平、降低成本、缩短研制和生产周期都有非常重要的作用。噪声等效温差是衡量红外探测器系统性能的重要指标之一。它与总体大气透过率、探测器性能参数等因素有关。本文推导了噪声等效温差的表达式, 以特定的红外探测器为例, 通过噪声等效温差表征了探测器的性能, 并且通过编写程序检验了各个因素对探测器性能的影响。

关键词: 红外系统; 噪声等效温差; 大气透过率; 红外热成像

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.01.005

Evaluation of Performance of Infrared Systems Using Noise Equivalent Temperature Difference

SONG Min-min, WU Ping, DONG Da-xing

(College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: Noise equivalent temperature difference is of great importance to the evaluation of the performance of infrared systems. It is helpful to the performance improvement, cost reduction and production period shortening of infrared systems. Noise equivalent temperature difference is one of the important specifications for measuring the performance of infrared detector systems. It is related to the total atmospheric transmittance and detector performance parameters etc.. The expression of the noise equivalent temperature difference is deduced. The performance of a particular infrared detector is characterized by using the noise equivalent temperature difference and various performance influence factors are examined through a special program we wrote.

Key words: infrared systems; noise equivalent temperature difference; infrared imaging; atmospheric transmittance

1 引言

现代红外探测技术可以通过温差来探测并分辨物体, 即使没有其它热源, 物体本身各部分的温差以及发射率的差别也可能被探测到, 从而形成物体的红外图像。随着红外成像技术在军事和民用领域的广泛应用, 人们需要更灵

敏、更精密的红外成像系统, 如何较为准确地评价和测试红外成像系统的性能也就变得越来越重要。本文通过噪声等效温差来评价红外成像系统的静态性能, 即描述系统对静态目标的成像性能。

噪声等效温差是表征红外系统静态性能的主要参数之一。它受大气传输、目标特性等因素

收稿日期: 2009-09-04

作者简介: 宋敏敏 (1985-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为红外探测。E-mail: smm0102@hotmail.com

的影响, 其中大气透过率、光学系统透过率以及背景因素和反应系统探测性能的归一化探测率(D^*)对系统的探测能力具有重要影响。作为一个完善的噪声等效温差表达式, 应能正确地反映出以上诸因素的作用。本文以特定的红外探测器为例, 以噪声等效温差来评价红外探测器的探测性能。

2 大气透过率

在对流层以下, 大气对目标红外辐射能量的传输有极大的影响。由于红外辐射的能量与分子振动和转动的能量相当, 因此大气中气体分子对红外辐射的共振吸收, 不仅使红外辐射只能在 $2\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$ 三个大气窗口(见图1)内有效地传输, 而且对在这三个窗口中传输的红外辐射也有相当大的衰减^[1]。目前红外热成像主要研究 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$ 两个大气窗口的红外成像问题, 但在 $4.26\mu\text{m}$ 处存在一个二氧化碳强吸收带, 这大大影响了红外成像在该大气窗口上的工作性能, 因此一些学者正在研究将两个窗口相结合的红外成像系统^[5]。在红外热成像系统的性能评价体系中, 大气衰减后的透过率计算是非常重要的部分。

对于大气透过率的计算, 一般采用的是工程近似方法, 但是在对探测要求越来越高的情况

下, 尤其在不同的地区和不同的气象状况下, 使用理论近似已经不能满足要求。本文采用对大气透过率测量数据^[2]进行模拟的方法得到大气透过率, 其中主要考虑海平面水平路程上水蒸气的光谱透射率和海平面水平路程上二氧化碳的光谱透射率。这种方法的优点是可以因时因地地考虑大气透过率。

以 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$ 这两个大气窗口为例, 通过实际测量数据^[2]模拟得到大气透过率。

3 噪声等效温差

3.1 噪声等效温差的定义

噪声等效温差的定义为: 温度为 $T_B\text{K}$ 的均匀背景中有一个目标, 该目标的温度为 $T_T\text{K}$, 尺寸为 $W \times W$ (W 的大小为热成像系统瞬时视场的数倍), 并设背景和目标都为黑体。用热成像系统对这张测试图进行观察, 当测量系统的输出信号电压峰值与噪声电压的均方根之比为1时, 测试图上的目标温度与背景温度之差就称为噪声等效温差。

3.2 噪声等效温差表达式的推导

设目标为朗伯体, 在目标扫过探测器的任一瞬间里, 接收从面积为 $A_t = \omega S^2$ 的目标发射来的辐射, 同时考虑光学系统的透射比 $\tau_o(\lambda)$ 和大气的透射比 $\tau_a(\lambda)$, 在探测元 A_d 上获得的光

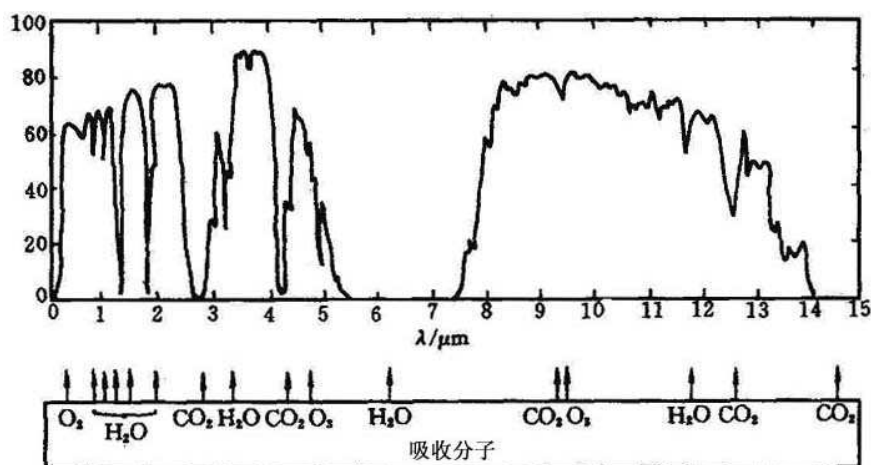


图1 红外大气窗口

谱辐射功率为

$$P_{\lambda} = I_{\lambda} \omega^* \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) = \frac{A_o A_t \cos \theta}{\pi S^2} M_{\lambda} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \\ = \frac{A_o}{\pi} M_{\lambda} \omega \cos \theta \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \quad (1)$$

设 $\theta = 0$ (即辐射面与探测元面的法线重合), 有

$$P_{\lambda} = \frac{A_o}{\pi} M_{\lambda} \omega \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \quad (2)$$

式中, ω 为面源目标的瞬时视场角。考虑到由于目标温度的微小变化而在探测元器件上所引起的光谱功率变化, 便有

$$\Delta P_{\lambda} = \frac{A_o}{\pi} \omega \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \Delta T \left(\frac{\partial M_{\lambda}}{\partial T} \right) \quad (3)$$

该微小温差产生的光谱信号电压 $U_{s\lambda}$ 为

$$U_{s\lambda} = \Re(\lambda) \Delta P_{\lambda} \\ = \frac{A_o}{\pi} \omega \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \Re(\lambda) \Delta T \left(\frac{\partial M_{\lambda}}{\partial T} \right) \quad (4)$$

式中, $\Re(\lambda)$ 为探测器的响应度, 得到的信噪比为

$$\frac{U_s}{U_n} = \frac{\omega A_o \Delta T}{\pi \sqrt{A_d \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) D^*(\lambda) \left(\frac{\partial M_{\lambda}}{\partial T} \right) d\lambda \quad (5)$$

与点源讨论相似, 本文用 τ_o 代替 $\tau_o(\lambda)$, 有

$$\frac{U_s}{U_n} = \frac{\omega A_o \Delta T \tau_o \tau_a(\lambda)}{\pi \sqrt{A_d \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \left(\frac{\partial M_{\lambda}}{\partial T} \right) d\lambda \quad (6)$$

而 $NETD = \frac{\Delta T}{(U_s/U_n)}$, 且考虑到探测元面积 $A_d = a \times b$, $\omega = \alpha\beta$, 有

$$NETD = \frac{\pi \sqrt{A_d \Delta f}}{\alpha \beta A_o \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \tau_a(\lambda) \left(\frac{\partial M_{\lambda}}{\partial T} \right) d\lambda} \quad (7)$$

其中 $\frac{\partial M_{\lambda}}{\partial T} = \varepsilon \frac{\partial M_{\lambda bb}}{\partial T} = \frac{\varepsilon c_1 c_2}{T^2 \lambda^6} \frac{e^{c_2/\lambda T}}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)^2}$ 。

3.3 计算与分析

通过前文的推导, 我们得到了噪声等效温差的表达式。可以看出, 噪声等效温差随作用距离和温度而变化。以数学的角度来看, 这是个三维的方程表达式。为了更加直观地判断红外探

测器的探测性能, 下面将以 InSb 红外探测器为例, 在 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 大气窗口中, 选定探测作用距离或目标温度来对红外探测器进行评价。

以 InSb 红外探测器为例, 所得到的 $D^*(\lambda)$ 的表达式^[3]如下:

$$D_{\text{InSb}}^*(\lambda) = \begin{cases} (2.35\lambda - 1.34) \times 10^8 & \lambda \leq \lambda_{c_1} \\ 0 & \lambda \geq \lambda_{c_1} \end{cases} \quad (\lambda_{c_1} = 4.5\mu\text{m}) \quad (8)$$

大气透过率的表达式^[2]为

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{H_2O} \tau_{CO_2} \tau_s \quad (9)$$

式中, τ_{H_2O} 和 τ_{CO_2} 是水蒸气和二氧化碳吸收衰减, τ_s 是大气对红外辐射的散射衰减^[4]。水蒸气的可凝结水量和距离是正比关系。

将式 (8) 和式 (9) 代入式 (7), 并且通过编程表达此表达式的关系。为了方便表达, 将式 (7) 中的常量取值为 1。

(1) 取 $L=1460\text{m}$, 以距离 NETD 为纵坐标、温度 $T(\text{K})$ 为横坐标, 通过编程得到图 2。

(2) 取 $T=1000$ 时, 以距离 NETD 为纵坐标、温度 $L(\text{m})$ 为横坐标, 通过编程得到图 3。

如图 2 和图 3 所示, 我们只是大体看出噪声等效温差的变化趋势。当然, 之所以取特定的作用距离和目标温度, 除了讨论方便外, 主要是因为对应于不同作用距离或温度得到的图的变化趋势大体一致, 而在下面的讨论中只要取其中之一就可以了, 再者这样更加符合实际情况。

在图 2 和图 3 中, 我们不能做到细致的评价。下面, 我们将结果转换成概率的形式, 这样更加直观。假定在作用距离一定而且被探测概率为 100% 的情况下, 以对应的噪声等效温差的表达值为标准, 得到了不同温度的探测概率 (见图 4); 同理, 假定在目标温度一定而且被探测概率为 100% 的情况下, 以对应的噪声等效温差的表达值为标准, 得到了不同作用距离的探测概率 (见图 5)。

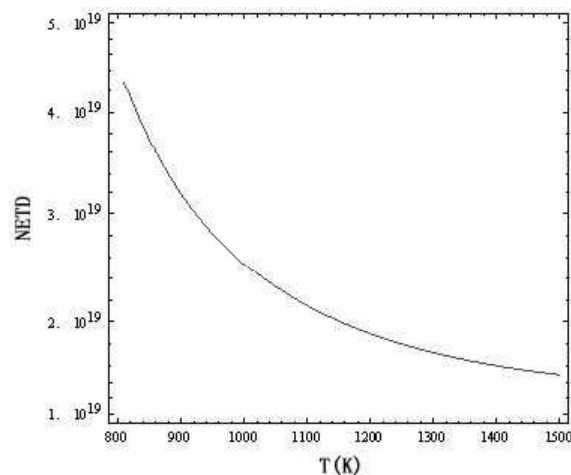


图 2 噪声等效温差曲线

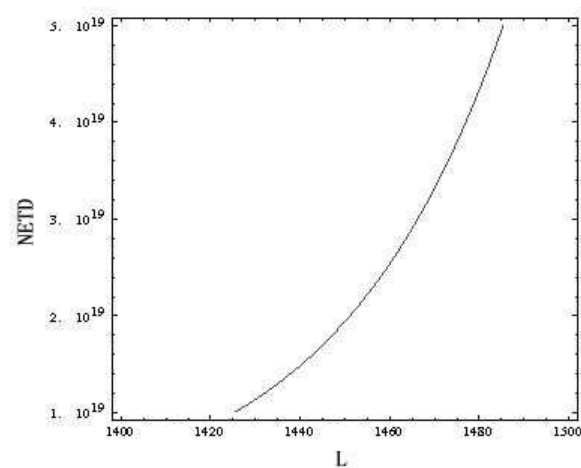


图 3 噪声等效温差曲线

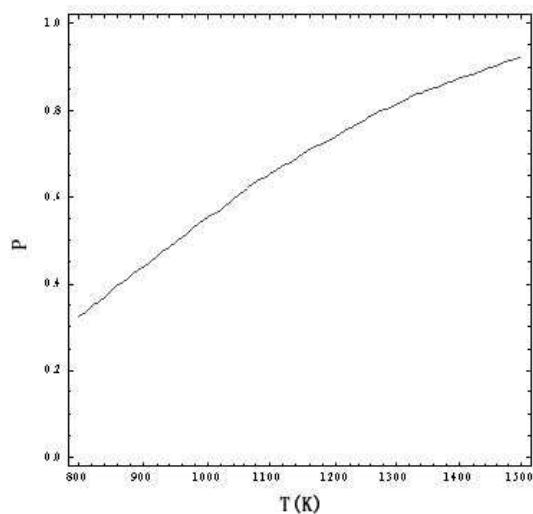


图 4 概率曲线

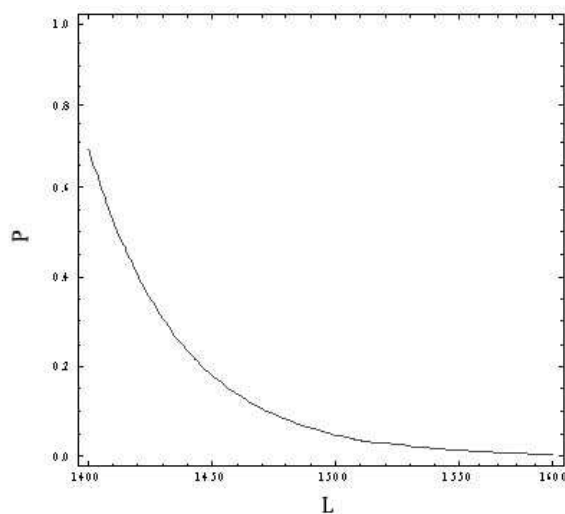


图 5 概率曲线

4 结论

我们从图 4 中可以看出, 随着温度的增加, 探测概率不断地增加。从图 5 中可以看出, 随着作用距离的增加, 探测概率不断地减少。所以, 我们可以确定我们的研究结果是符合实际情况的, 噪声等效温差可表征红外系统静态性能的作用在所举的例子中充分得到了体现。当然, 在实际测量中, 在探测目标的温度或探测距离一定的情况下, 我们可以根据图 4 和图 5, 取探测概率为 0.2、0.4、0.8 时为发现、识别和认清。

参考文献

- [1] 蔡毅, 潘顺臣. 红外技术在未来军事技术中的地位和作用 [J]. *红外技术*, 1999, 21(3): 1-7.
- [2] 高思峰, 吴平. 复杂大气条件下红外系统作用距离的估算 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 941-944.
- [3] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. *微光与红外成像技术* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [4] 杨臣华, 梅遂生, 林钧挺. *激光与红外技术手册* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [5] Alain Malaplate, Francoise Nerry, Marc-Philippe Stoll. Combined field [3-5 μ m] and [8-14 μ m] infrared imaging: approaches to extracting target, s bi-directional reflectivity and emissivity [C]. *SPIE*, 2002, 4538.