

文章编号:1001-5078(2007)12-1270-04

对 NETD 表达的红外热像仪探测距离的讨论

白渭雄,付全喜,焦光龙
(空军工程大学导弹学院,陕西 三原 713800)

摘要:红外热像仪对目标的探测距离的计算方法已有多种,本文对基于目标与背景温差 ΔT_0 和等效噪声温差 NETD 而推导出的公式进行了分析,对大气透过率 τ_a 对 ΔT_0 的衰减作用提出了不同的看法,并据此对基于 ΔT_0 和 NETD 的热像仪探测距离公式进行了修正,对影响 NETD 参数的诸多因素进行了分析。在此基础上,推导出了热像仪对含有不同温度的多个红外辐射源的同一目标的距离计算公式。

关键词:热像仪;热成像;红外探测;探测距离;NETD

中图分类号:P225.2 **文献标识码:**A

Discussion on the Detection Range of the Thermal Infrared Imager Expressed by NETD

BAI Wei-xiong, FU Quan-xi, JIAO Guang-long
(The Missile Institute of Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: A lot of computational methods have been proposed to decide the detection range of the thermal infrared imager. Analysis on the detection range equation is given, with consideration of the temperature difference between the target and the background— ΔT_0 and the noise equivalent temperature difference—NETD. Novel analysis on the attenuation effect of ΔT_0 by atmospheric transmittance— τ_a is presented, after which a correction is given to the ΔT_0 -and-NETD based range equation. Study on the factors that affect the NETD parameters is also provided. Range equation of the thermal infrared imager for targets with multiple infrared radiation sources and different temperature is deduced in conclusion.

Key words: thermal imager; thermal imaging; infrared detection; detection range; NETD

1 引言

红外热像仪用于防空作战时,探测距离是一个至关重要的指标。随着技术的不断发展,红外探测器的探测能力也在不断提高,其参数 NETD 已由第二代的 50mK 发展到第三代的 15mK,由此使得热像仪在探测距离上也得到了较大的提高,NETD 已成为计算探测距离的一个关键参数,因此,基于 ΔT 和 NETD 来计算热像仪的探测距离也就成为了一种重要的计算方法,但在目前的一些计算公式中,一些相

关因素在公式中并未得到反映(如光学仪器的焦距、口径、探测器波段等),这些因素将会对探测距离造成怎样的影响呢?另外,目标的发动机喷口辐射和目标表面气动加热辐射共同作用下,热像仪对目标的探测距离又应该如何计算呢?因为这是在计算中必须面对的问题,本文将在这些问题上展开

作者简介:白渭雄(1960-),男,教授,主要从事军事抗干扰新技术研究。E-mail:wxh369@126.com
收稿日期:2007-06-11

讨论。

2 基于 ΔT_0 和 NETD 的热像仪探测距离的计算

文献[1]中讨论了热像仪对点源目标的探测距离,其结果如下:

$$R^2 = \frac{S \cdot \Delta T_0 e^{-\sigma R}}{\alpha \beta \cdot \text{NETD} \cdot (V_S/V_N)} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \sigma R + 2 \ln R = \ln \left[\frac{S \cdot \Delta T_0}{\alpha \beta \cdot \text{NETD} \cdot (V_S/V_N)} \right]$$

式中,NETD 为探测器等效噪声温差; σ 为大气消光系数; S 为目标在视线方向的截面积; ΔT_0 为目标与背景的温差; α, β 分别为热像仪水平、垂直方向瞬时视场(弧度); V_S/V_N 为选取的极限信噪比比值。

推导中的思路:

1) 温度差 ΔT_0 经大气衰减后成为 ΔT ,且有关系: $\Delta T = \Delta T_0 \tau_a(R) = \Delta T_0 e^{-\sigma R}$;

2) 由于目标对热像仪的实际张角 $\alpha' \times \beta'$ 小于热像仪的瞬时视场 $\alpha \times \beta$,这意味着目标的辐射没有充满整个探测元件表面,而只照射到其中的一部分,在视场上相当于目标只在 $\alpha' \times \beta'$ 内对探测器有辐射贡献, ΔT 对探测器所起的作用,相当于 $\Delta T \cdot (\alpha' \times \beta' / \alpha \times \beta)$, $\alpha' \times \beta' = S/R^2$;

3)

$$[\Delta T \cdot (\alpha' \times \beta' / \alpha \times \beta)] / \text{NETD} = V_S/V_N \quad (2)$$

把 1) 和 2) 中的关系带入公式(2),即可得到公式(1)。

现在的问题是: ΔT 经过距离 R 后,是否衰减了 $\tau_a(R)$ 倍,即: $\Delta T = \Delta T_0 \tau_a(R) = \Delta T_0 e^{-\sigma R}$ 是否成立?

根据文献[2]29 页的描述,辐射通量 P 通过大气的透射率为 $\tau_a = e^{-\sigma R}$,这样,辐射通量密度 W 通过大气的透射率也为 $\tau_a = e^{-\sigma R}$,并有: $W = W_0 \tau = W_0 e^{-\sigma R}$,这里 W_0 为目标的辐射通量密度, W 为 W_0 经过 R 长的距离传播后的辐射通量密度,由斯蒂芬-玻尔兹曼定律($W_0 = \sigma T^4$)可知:

$W_0 \propto T^4$, T 与距离 R 的关系应满足:

$$T^4 = T_0^4 e^{-\sigma R} \quad (3)$$

$$\Rightarrow T = T_0 e^{-\sigma R/4} \quad (4)$$

式中, T_0 为目标的温度; T 为 T_0 经过 R 长的距离传播后的温度,这里大气对温度的透射率为 $e^{-\sigma R/4} = \tau(R)^{1/4}$ 。

同样考虑温差的传播,设目标温度为 T_0 ,背景

温度为 T_{b0} ,则目标与背景的温差 $\Delta T_0 = T_0 - T_{b0}$,且 $T_0 = T_{b0} + \Delta T_0$ 。

由公式(4)得:

$$T = (T_{b0} + \Delta T_0) e^{-\sigma R/4} = T_{b0} e^{-\sigma R/4} + \Delta T_0 e^{-\sigma R/4} = T_b + \Delta T \quad (5)$$

显然,这里: $T_b = T_{b0} e^{-\sigma R/4}$ 为背景温度经过 R 长的距离传播后的温度值, $\Delta T = \Delta T_0 e^{-\sigma R/4}$ 为目标与背景的温差经过 R 长的距离传播后的温差值。

由此可得出结论:大气对温差的透射率也为 $e^{-\sigma R/4} = \tau_a(R)^{1/4}$,由 $\Delta T = \Delta T_0 \tau_a(R) = \Delta T_0 e^{-\sigma R}$ 推导的公式(1)存在一定的问题。

在此基础上可得出热像仪的距离探测公式为:

$$R^2 = \frac{S \cdot \Delta T_0 e^{-\sigma R/4}}{\alpha \beta \cdot \text{NETD} \cdot (V_S/V_N)}$$

$$\Rightarrow \sigma R/4 + 2 \ln R = \ln \left[\frac{S \cdot \Delta T_0}{\alpha \beta \cdot \text{NETD} \cdot (V_S/V_N)} \right] \quad (6)$$

利用 MATLAB 软件中的符号计算功能,用 solve 语句可解非线性方程式(6),与公式(1)比较,同样条件下,公式(6)计算的探测距离更远一些。

3 与 NETD 相关的因素及对探测距离的影响

在确知目标的 $S, \Delta T_0$,热像仪的瞬时视场 $\alpha \cdot \beta$ 和 NETD,并给出极限信噪比比值 V_S/V_N ,就可由公式(6)计算热像仪的探测距离,但可能会存在一些疑问,如不同波段的探测器,对同一 ΔT_0 目标的探测距离应如何计算,如果由式(6)计算,探测距离肯定是相同的(NETD 相等的条件下),但这样的计算结果肯定是有问题的,因为同一 ΔT_0 的目标,其红外辐射能量在中波波段和长波波段是有差异的,不可能有相同的探测距离;再如,在热像仪的焦距一定的条件下(瞬时视场 $\alpha \cdot \beta$ 一定),入瞳孔径 D_0 越大,热像仪接收到的红外辐射强度将越大,探测距离应更远,但在公式(6)中也未看到这一参数的影响。

上述问题的答案可在等效噪声温差 NETD 中去寻找。

在文献[2]中,等效噪声温差 NETD 的定义为:景物上两个相邻单元之间给出等于系统噪声的信号时的温差。其数学定义关系式为:

$$\text{NETD} = \frac{H_0}{\Omega \Delta N} \quad (7)$$

这里, $H_0 = \text{NEI}$,为红外系统的等效噪声照度,表示红外系统输出端信噪比(V_S/V_N)为 1 时,入射孔径

上所需的照度,其量纲为 W/cm^2 ; Ω 系统的瞬时视场, $\Omega = \alpha \cdot \beta$, ΔN 为单位温度变化引起的辐射亮度差,且有:

$$\Delta N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial T} \right) d\lambda \quad (8)$$

式(7)的分母项实际是由单位温度变化引起的进入红外系统的辐射照度的变化量,而 NETD 与分母项的乘积在数值上应与系统输出的噪声相等,也即:目标上的温度只要有 NETD 的变化量,将会在红外系统中产生信噪比为 1 的信号(当然这里没有考虑大气对辐射亮度的衰减,因这一因素会在距离求解时考虑)。

而辐射亮度增量 ΔN 的含义为:光谱辐射亮度 N_λ 对温度 T 的变化梯度在某一特定谱段($\lambda_1 \sim \lambda_2$)对 λ 的积分,它反映的是在某一特定谱段($\lambda_1 \sim \lambda_2$)内辐射亮度 N 对温度 T 的变化率,体现了辐射亮度增量 ΔN 对温度增量 ΔT 的敏感程度,如果敏感程度强, ΔN 的数值就大, NETD 的数值就小,对目标的探测灵敏度就高,反之, NETD 的数值就大,对目标的探测灵敏度就低。

由于:

$$N = \frac{W}{\pi}, N_\lambda = \frac{W_\lambda}{\pi}, W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

有:

$$\frac{\partial N_\lambda}{\partial T} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} = \frac{c_1 c_2 e^{c_2/\lambda T}}{\pi T^2 \lambda^6 (e^{c_2/\lambda T} - 1)^2} \quad (9)$$

由于 $e^{c_2/\lambda T} \gg 1$, 式(9)可近似为:

$$\frac{\partial N_\lambda}{\partial T} = \frac{c_1 c_2}{\pi T^2 \lambda^6 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (10)$$

将式(9)或式(10)代入式(8),利用 MATLAB 软件很容易计算求取 ΔN 。

由于

$$H_0 = \frac{f \cdot (\Omega \cdot \Delta f)^{1/2}}{\pi (D_0/2)^2 \tau_0 D^*} \quad (11)$$

其中, τ_0 为光学系统的透射率; D_0 为红外光学系统入射孔径直径,单位: cm; Δf 为信号处理系统带宽,单位: Hz; D^* 为红外探测器的探测度; $\Omega = \alpha \cdot \beta$ 为系统的瞬时视场; f 为光学系统焦距。

将式(11)代入式(7),可得:

$$\text{NETD} = \frac{f \cdot (\Delta f)^{1/2}}{\pi (D_0/2)^2 \tau_0 D^* \Omega^{1/2} \Delta N} \quad (12)$$

由式(12)可知,探测器的 NETD 受三方面因素

的影响:一是红外系统参数的影响,包括 τ_0 , D_0 , Δf , Ω , f 等,显然, D_0 的增大和 Δf 的减小都有利于 NETD 性能参数的提高;二是受探测器自身参数 D^* 的影响, D^* 值越大、NETD 越小、探测能力越强;三是受辐射源的影响, ΔN 值大、NETD 就小、探测能力就强。

取温度为 300 ~ 800K、红外谱线范围为 2 ~ 12 μm , 由 MATLAB 软件计算求取的 $\partial N_\lambda / \partial T$, 图 1 可反映出 $\partial N_\lambda / \partial T$ 随 T 及 λ 的变化趋势,并且可以看出:在 λ 为 3 ~ 5 μm 谱段的 $\partial N_\lambda / \partial T$ 值高于 8 ~ 12 μm 谱段的 $\partial N_\lambda / \partial T$ 值,因而在 3 ~ 5 μm 谱段对 $\partial N_\lambda / \partial T$ 积分所得的 ΔN 将高于在 8 ~ 12 μm 谱段对 $\partial N_\lambda / \partial T$ 积分所得的 ΔN 。对具有相同探测度 D^* 、工作于不同谱段的探测器,显然工作于红外中波谱段的探测器其等效噪声温差 NETD 更小。由图 1 还可看出,温度越高: $\partial N_\lambda / \partial T$ 值越高,这说明目标在高温时光谱辐射亮度 N_λ 对温度的变化更敏感,既探测器对高温目标的 NETD 更小。

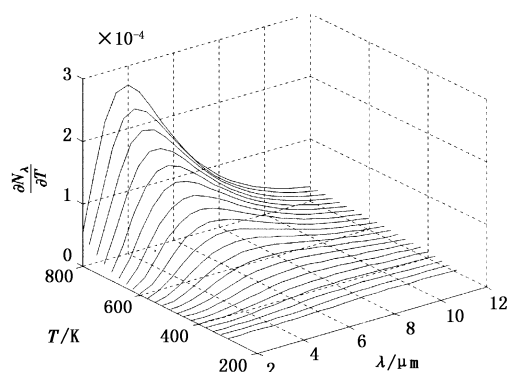


图1 $\frac{\partial N_\lambda}{\partial T}$ 随 T 及 λ 的变化趋势

现在来回答前面提出的第一个问题,即不同波段的探测器,对同一 ΔT_0 目标的探测距离应如何计算的问题。在用 D^* 求取探测距离时,关心的是辐射强度 J 、辐射通量密度 W 或光谱辐射通量密度 W_λ ,在计算有效辐射通量密度时,应只计算与探测器敏感谱段对应的那部分辐射能量,即: $W = W_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda d\lambda$,而在用 NETD 求取探测距离时,关心的则是光谱辐射亮度 N_λ 或辐射亮度 N 对温度 T 的变化梯度,即 $\partial N_\lambda / \partial T$ 和 ΔN ,由于 $\Delta N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{\partial N_\lambda}{\partial T} \right) d\lambda$,积分式中的积分上下限即反映了光敏元件的敏感谱段与辐

射源的光谱对应关系,而 ΔN 又会影响 NETD 的大小,因此不同谱段的探测器在用式(6)求取对目标的探测距离时,对给定 ΔT 和辐射面积 S 的同一目标,探测远界必然是不同的。

但这里随之带来的一个问题是:如何计算 NETD,也即以谁为参照。通常,给出的探测器的 NETD 参数也是在一定条件下获取的,并且给出了适应的谱段,如给出了 300K 温度条件下 NETD₁ 值,谱段为 $\lambda_1 = 7.7\mu\text{m}$, $\lambda_2 = 10.3\mu\text{m}$,现要计算 $T = 700\text{K}$ 时的 NETD₂,则可分别由式(8)求取 $T = 300\text{K}$ 时的 ΔN_1 和 $T = 700\text{K}$ 时的 ΔN_2 ,由式(7)可得: $\Delta N_1 \text{NETD}_1 = \Delta N_2 \text{NETD}_2 \Rightarrow \text{NETD}_2 = (\Delta N_1 \text{NETD}_1) / \Delta N_2$ 。从而可根据已给参数 NETD₁ 及不同温度下的 ΔN_1 和 ΔN_2 来求取 NETD₂。

需要说明的是,为了减小背景引起的探测器噪声,通常要采用冷屏限制光子探测器的视场角 θ ,这将引起其探测度 D^* 的变化,其关系为:

$$D^*(\theta) = D^*(\pi) / \sin(\theta/2) \quad (13)$$

$D^*(\pi)$ 为探测器的冷屏用 $\theta = \pi$ 时所测得的 D^* 值,显然, θ 越小, $D^*(\theta)$ 值越大。光学系统的光束会聚角(孔径角)通常与探测器的冷屏角 θ 是一致的,其关系为:

$$\tan(\theta/2) = (D_0/2)/f \quad (14)$$

由式(13)和式(14)存在着关系: $D_0 \uparrow \Rightarrow \theta \uparrow \Rightarrow D^*(\theta) \downarrow \Rightarrow \text{NETD} \uparrow$,但在式(12)中,有 $D_0 \uparrow \Rightarrow \text{NETD} \downarrow$ 。

为了看出 D_0 对 NETD 的影响,将式(13)、(14)代入式(12),得:

$$\text{NETD} = \frac{2(ab\Delta f)^{1/2}}{\tau_0 \Delta N \pi D^*(\pi) \alpha \beta} \cdot \frac{1}{D_0((D_0/2)^2 + f^2)^{1/2}} \quad (15)$$

式中, $a = \alpha \cdot f$, $b = \beta \cdot f$ 分别为探测器边长,由式(15)可以看出,在考虑了 D^* 的冷屏角 θ 的影响后,可得结论:增大 D_0 可使 NETD 减小,有利于提高探测器性能,由此回答了前面提出的第二个问题。

为了考察瞬时视场 $\alpha \cdot \beta$ 对探测距离的影响,可将式(15)代入式(6),得:

$$R^2 e^{\sigma R/4} = \frac{S \Delta T_0}{V_S/V_N} \cdot \frac{\tau_0 \Delta N \pi D^*(\pi)}{2(ab\Delta f)^{1/2}} \cdot D_0((D_0/2)^2 + f^2)^{1/2} \quad (16)$$

由式(16)可以看出:增大 f 可增大探测距离,而增大 f 意味着减小系统的瞬时视场 $\alpha \cdot \beta$ 。

4 对同一目标多辐射源探测距离的计算

对同一目标多辐射源探测距离的计算问题有其现实的意义,当目标存在发动机尾喷口辐射和表面气动加热辐射时,由于目标中存在由两个温差 ΔT_1 和 ΔT_2 而产生的辐射,应如何计算热像仪的探测距离呢?显然用式(6)是无法计算的。

对于瞬时视场内同一距离上的多个辐射源, $W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n$, 可看作叠加的结果,即距离 R 相同、目标面积 $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n$ 和温 $\Delta T_{10}, \Delta T_{20}, \dots, \Delta T_{i0}, \dots, \Delta T_{n0}$ 不同的辐射源,其作用是叠加后共同对探测器发挥辐射作用,公式(2)成为:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta T_i / \text{NETD}_i) (\alpha' \beta' / \alpha \beta) = V_S / V_N \quad (17)$$

$\Rightarrow$

$$\sum_{i=1}^n (\Delta T_{i0} e^{-\sigma R/4} / \text{NETD}_i) (S_i / R^2) / (\alpha \beta) = V_S / V_N$$

$\Rightarrow$

$$\left(\sum_{i=1}^n (\Delta T_{i0} S_i) / (\text{NETD}_i) \right) = e^{\sigma R/4} R^2 (\alpha \beta (V_S / V_N))$$

其结果为:

$$\sigma R/4 + 2 \ln R = \ln \left(\sum_{i=1}^n (S_i \Delta T_{i0}) / (\text{NETD}_i) \right) - \ln \alpha \beta (V_S / V_N) \quad (18)$$

在用式(18)求解时,利用给定的参数 S_i 、瞬时视场 $\alpha \cdot \beta$ 及目标辐射源温度 T_{i0} 、背景温度 T_b ,可计算出目标的 ΔT_{i0} , NETD_i ,并用 MATLAB 软件中的 solve 语句求解非线性方程式(18),即可得到结果。

参考文献:

- [1] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] R D 小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975.
- [3] 红外与激光技术编辑组. 红外手册第三分册[M]. 1980.
- [4] 姜宏滨. 用 NETD 表达的红外作用距离方程[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(2): 40-41.
- [5] 刘小波. 高分辨率热像仪主要参数优化研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(8): 580-583.