

文章编号: 1672-8785(2014)06-0001-09

论红外探测系统的噪声等效温差

王忆锋 谈 骥

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 介绍了基于噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 定义的 NETD 公式推导过程, 讨论了相关系统参数对 NETD 的影响。然后分析了环境温度变化对 NETD 的影响, 并给出了相同辐射功率差所对应的等效温差的 MATLAB 计算方法。

关键词: 噪声等效温差; 温度分辨率; 热灵敏度; 红外成像系统

中图分类号: O472 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.06.001

On the Noise Equivalent Temperature Difference of Infrared Detection System

WANG Yi-feng, TAN Ji

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The derivation process of Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) based on the definition of NETD is presented. The influence of related system parameters on NETD is discussed. Then, the influence of the variation of ambient temperature on NETD is analyzed. Finally, the MATLAB method for calculating the equivalent temperature difference corresponding to the same radiant power difference is given.

Key words: noise equivalent temperature difference; temperature resolution; thermal sensitivity; infrared imaging system

0 引言

红外成像系统的性能主要是用分辨率来衡量的。分辨率有温度分辨率和空间分辨率之分。其中, 温度分辨率是指能够对目标中的两个不同点加以区分的最小温差, 又称为热分辨率或者热灵敏度^[1-3]。温度分辨率越高, 可区分的温差越小, 成像细节越丰富, 人们也越容易发现和识别目标。

NETD 用于描述红外成像系统受客观信噪比限制的分辨率, 其测试或计算是利用目标与背景之间的温差进行的。本文将介绍基于

NETD 定义的公式推导过程, 然后分析环境温度 (例如寒区或热区) 变化对 NETD 的影响, 并介绍一种基于黑体辐射理论的等效温差 MATLAB 计算方法。

1 红外探测系统的信噪比

英文文献中, 关于红外成像系统的术语有 thermal imager、thermograph、thermovision、FLIR (Forward Looking Infrared)、thermal imaging device、infrared imaging radiometer、thermal viewer、thermal video system、infrared camera 以及 thermal imaging device 等^[3]。本文将统称为“红外成

收稿日期: 2014-03-14

作者简介: 王忆锋 (1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

像系统”，有时为了便于行文，又将其称为“热像仪”或“整机”。

NETD 是基于红外探测系统的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 推导出来的一个概念。根据电压响应率 R_v (量纲为 $V \cdot W^{-1}$)，SNR 可以表示为

$$SNR = \frac{V_s}{V_n} = \frac{R_v P}{V_n} \quad (1)$$

式中， V_s 为信号电压； V_n 为噪声电压； P 为辐射功率 (量纲为 W)。SNR 是一个无量纲的数值，只是随不同的任务要求而异。例如，探测任务通常需要 $SNR=5 \sim 10$ ；一旦目标被探测到，智能跟踪系统即可跟踪 $SNR \approx 2$ 的目标，而非智能跟踪系统则只能跟踪 $SNR \geq 10$ 的目标^[4]。

红外探测系统的光学部分可以用一个理想化的 (薄) 透镜概念来简单描述。设透镜为圆形，其直径 D_o 与焦距 F_o 之比称为光学系统的 F 数，记为 $F/\#$ ，即

$$F/\# = \frac{F_o}{D_o} \quad (2)$$

辐射功率 P 的计算是 SNR 分析的重点，其处理方式依据红外探测系统所观察的对象是点源目标 (如图 1 所示) 还是扩展源目标 (如图 2 所示) 而有所差异。点源目标呈现的面积始终小于

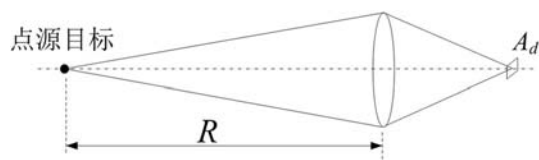


图 1 针对点源目标的红外探测系统

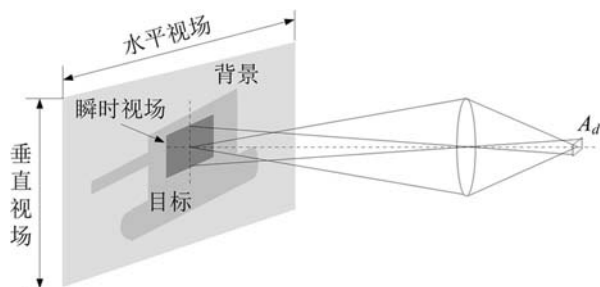


图 2 红外成像系统的观察对象是视觉上可分辨的扩展源目标

一个瞬时视场 (Instantaneous Field of View, IFOV)，所成之像即为一个 (像素) 点，并不具有视觉意义上的可分辨性。而扩展源目标呈现的面积则大于一个 IFOV。

如果探测器为一个长度为 a 、宽度为 b 的矩形，而且置于透镜焦 (点) 平面所在的位置上，那么 a 和 b 所对应的平面角 α 和 β 分别为

$$\alpha = \frac{a}{F_o}, \quad \beta = \frac{b}{F_o} \quad (3)$$

将 α 与 β 的乘积定义为 IFOV，即

$$\alpha\beta = \frac{ab}{F_o^2} = \text{IFOV} \quad (4)$$

目标的红外辐射一方面具有方向性，另一方面具有一个分布范围，其大小可以用立体角 (量纲为球面度，记为 sr) 来描述。设透镜的面积为 A_l ，目标与红外系统之间的距离为 R ，透镜所对应的立体角 Ω_l 就等于透镜面积除以距离的平方，即

$$\Omega_l = \frac{A_l}{R^2} \quad (5)$$

从概念上来讲，一个点是没有面积而言的。因此需要用一个有立体角、没有面积的量纲来描述点源目标的辐射量，这就是辐射强度。它是点源在某个方向上的单位立体角内所发射的辐射功率，其量纲为 $W \cdot \text{sr}^{-1}$ 。该量纲对应于辐射功率除以立体角的值，对于图 1 来说就是

$$I = \frac{P}{\Omega_l} \quad (6)$$

于是有

$$P = I\Omega_l = I \times \frac{A_l}{R^2} \quad (7)$$

扩展源具有一定的面积，因此需要用一个既有立体角又有面积的量纲来描述扩展源目标的辐射量，这就是辐射亮度 L 。其量纲为 $W \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ，对于图 2 来说就是

$$L = \frac{P}{A_t \Omega_l} \quad (8)$$

式中， A_t 为探测器的瞬时视场在目标表面上的投影面积，并有

$$A_t = \alpha\beta R^2 \quad (9)$$

它表示探测器从面积为 A_l 的场景区域中接收辐射能量。

大多数自然表面的自身辐射发射和反射基本上与观察角度无关。在许多应用场合中, 这些表面均可视为朗伯辐射源, 其辐亮度 $L(\lambda, T)$ 与辐出度 $M(\lambda, T)$ 之间存在以下关系:

$$M(\lambda, T) = \pi L(\lambda, T) \quad (10)$$

黑体的光谱辐出度 $M(\lambda, T)$ 可以按照普朗克函数来计算:

$$M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]} \quad (11)$$

式中, $c_1 (=3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2)$ 为第一辐射常数; $c_2 (=1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K})$ 为第二辐射常数。式 (11) 的 MATLAB 推导过程可见文献 [5]。

综合式 (5) 和式 (8), 可得:

$$P = LA_l \Omega_l = \frac{M}{\pi} \times \alpha \beta R^2 \times \frac{A_l}{R^2} = \frac{M}{\pi} \alpha \beta A_l \quad (12)$$

从式 (12) 中可以看出, 其中已经没有距离项 R , 即当目标张角大于瞬时视场时, 探测器所接收到的目标辐射能量与两者间的距离无关, 并且始终为某一常数值。因此对于扩展源来说, 从能量的观点出发则无法推导出作用距离 [6]。

分别将式 (7) 和式 (12) 代入式 (1) 后可知, 对于点源来说, 系统的 SNR 与作用距离 R 有关; 对于扩展源来说, 系统的 SNR 与 R 无关。因为 NETD 是由 SNR=1 推导出的一个量值, 所以从逻辑上来讲, 用于观察扩展源目标的热像仪的 NETD 也与 R 无关。之所以指出这一点, 是因为文献 [7-8] 介绍了一个用 NETD 表示的热像仪作用距离方程, 显然这是一种不同的说法。

在红外成像系统中, SNR 还可以写为 [9]

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \dots = \frac{D^* P}{A_d^{1/2} \left[\int_0^\infty s(f) \text{MTF}_e^2(f) df \right]^{1/2}} \\ &= \frac{D^* P}{(A_d \Delta f_n)^{1/2}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, D^* 为归一化探测率; $s(f)$ 为归一化噪声功率谱; f 为时间频率; $\text{MTF}_e(f)$ 为电子信号处理系统的传递函数; Δf_n 为噪声等效带宽:

$$\Delta f_n = \int_0^\infty s(f) \text{MTF}_e^2(f) df \quad (14)$$

文献 [10] 介绍了一种利用 MATLAB 和多项式拟合求解 $s(f)$ 的简易计算方法。文献 [11] 指出, Δf_n 是计算扫描型和凝视型红外成像系统的 NETD 的关键。文献 [12] 介绍了一种利用 NETD 和探测器测试数据计算 Δf_n 的方法。文献 [13] 介绍了一种经过改进的基于 NETD 的红外图像 SNR 计算方法。

2 黑体辐射函数的极值计算

为了便于下面的行文叙述, 这里单列一节介绍有关黑体辐射的极值计算问题, 为此先要求出黑体辐射函数的导函数, 然后再求出令导函数等于零的特定值。式 (11) 中, 不仅可以只对波长求导或者只对温度求导, 而且还可以同时对波长和温度求导。利用 MATLAB 的求导函数 diff() 容易得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial \lambda} &= -\frac{5c_1}{\lambda^6} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \\ &\quad + \frac{c_1 c_2}{\lambda^7 T} \frac{\exp(c_2/\lambda T)}{[\exp(c_2/\lambda T) - 1]^2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} = \frac{c_1 c_2}{\lambda^6 T^2} \cdot \frac{\exp(c_2/\lambda T)}{[\exp(c_2/\lambda T) - 1]^2} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \right] &= -c_1 c_2 \exp(c_2/\lambda T) \\ &\quad \times \left\{ \frac{6\lambda T \exp(c_2/\lambda T) - 6\lambda T - c_2 \exp(c_2/\lambda T) - c_2}{\lambda^8 T^3 [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^3} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

对于式 (15), 令 $\frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0$, 整理后可得:

$$\exp(c_2/\lambda T) - 1 = \frac{c_2}{5\lambda T} \exp(c_2/\lambda T) \quad (18)$$

令

$$x = \frac{c_2}{\lambda T} \quad (19)$$

则式 (18) 变为

$$\left(1 - \frac{x}{5}\right) \exp(x) = 1 \quad (20)$$

式 (20) 是一个超越方程, 以往常用图解法或迭代法求解。在 MATLAB 中, 上述超越方程可以通过执行以下程序求解:

```
% MATLAB Program Name: weinshift
R1=solve('(1-x/5)*exp(x)-1=0') % 求方程精确解的命令
```

```
RV8=vpa(R1,8) % 求 8 位有效数字的近似解
该方程的两个数值解为
```

```
RV8=
[4.9651142]
[          0]
```

这里有意义的是第一个解, 通常取 4 位小数, 即

$$x = \frac{c_2}{\lambda T} = 4.9651 \quad (21)$$

代入 c_2 的数值, 可得:

$$\lambda = \lambda_m = \frac{2898}{T} \quad (\mu\text{m}) \quad (22)$$

式 (22) 所示为描述黑体辐射峰值的维恩位移定律。

式 (16) 给出的 $\frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T}$ 称为黑体在温度 T 下的热导数, 又称为辐出 (度) 对比度^[1]。如果考虑这样一个问题: 使辐出对比度具有最大值的波长是多少? 这时就要用到式 (17)。令

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \right] = 0, \text{ 整理后可得:}$$

$$6[\exp(x) - 1] = x[\exp(x) + 1] \quad (23)$$

式中, x 的定义同式 (19)。可以注意到, 式 (23) 并不能像式 (20) 那样用 solve() 命令进行求解, 而需要换一种方法。在 MATLAB 中输入下列两条语句^[14]:

```
>> options=optimset('display','off');
>> q=fzero(inline('6*(exp(x)-1)-x*(exp(x)+1)', 'x'), 5, options)
```

结果为 $q=5.9694$, 即有

$$x = \frac{c_2}{\lambda T} = 5.9694 \quad (24)$$

代入 c_2 的数值, 可得:

$$\lambda_{\max, \text{contrast}} = \frac{2400}{T} \quad (\mu\text{m}) \quad (25)$$

例如, 对于温度为 300 K 的源目标, 最大辐出对比度所在的波长为 $8 \mu\text{m}$ 左右; 而根据式 (22), 最大辐出度所在的波长为 $9.7 \mu\text{m}$ 。这些关系在下面的讨论中将要用到。

3 根据定义推导出 NETD 公式

图 3 所示为一个典型的 NETD 测试目标及其相应的系统响应。其中, 温度为 T_T 的均匀黑体目标叠加在温度为 T_B ($T_T > T_B$) 的均匀黑体背景中构成测试图案。根据图 3 所示的峰值信号和均方根噪声数据, 使 $\text{SNR}=1$ 时的温差 ΔT ($= T_T - T_B$) 即为 NETD:

$$\text{NETD} = \frac{\Delta T}{v_s/v_n} = \frac{v_n}{v_s/\Delta T} = \left(\frac{v_n}{\Delta T} \right)^{-1} v_n \quad (26)$$

例如, 如果 $\Delta T=2 \text{ K}$ 时得到 $\text{SNR}=50$, 则有 $\text{NETD}=40 \text{ mK}$ ^[1]。测试中, 一般选取均匀目标的一个图像序列作为原始数据, 其差异在于如何计算其中的均方根噪声^[3]。

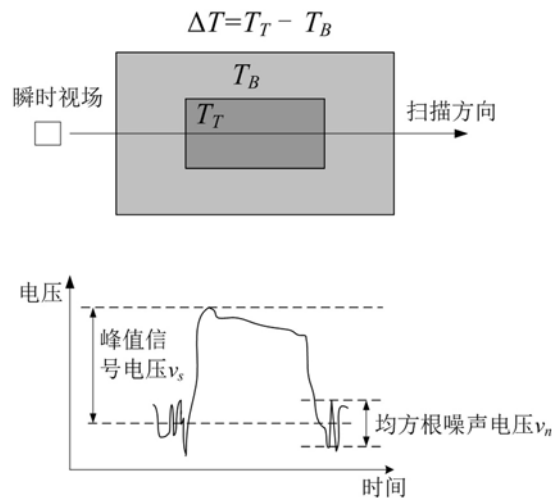


图 3 一个 NETD 测试图案及产生的系统输出波形

式 (26) 是 NETD 的一个经典定义。在其形成之际, 所有红外成像系统均为扫描型^[3]。文献中一般都是从 $\text{SNR}=1$ 着手来推导 NETD 表达式的^[1]。下面介绍一种直接基于式 (26) 推导出 NETD 表达式的方法。根据下列关系:

$$\begin{aligned} v_s(\lambda) &= V_T(\lambda, T_T) - V_B(\lambda, T_B) = P_{d,T} R_v(\lambda) - P_{d,B} R_v(\lambda) \\ &= \frac{\pi A_d}{4(F/\#)^2} \times R_v(\lambda) \times [L(\lambda, T_T) - L(\lambda, T_B)] \quad (27) \end{aligned}$$

根据式 (1) 和式 (13), 有

$$R_v(\lambda) = \frac{v_n D^*(\lambda)}{\sqrt{A_d \Delta f_n}} \quad (28)$$

当温差 ΔT 较小时, 可以引入偏微分表达式, 即

$$\frac{L(\lambda, T_T) - L(\lambda, T_B)}{\Delta T} = \left. \frac{\partial L(\lambda, T)}{\partial T} \right|_{T=T_B} \quad (29)$$

在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内作光谱积分, 有

$$\frac{v_s}{\Delta T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{v_s(\lambda)}{\Delta T} d\lambda \quad (30)$$

基于上述相关各式, 可以写出:

$$\text{NETD} = \frac{4(F/\#)^2 \sqrt{\Delta f_n}}{\sqrt{A_d} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \left. \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \right|_{T=T_B} d\lambda} \quad (31)$$

从计算的角度来看, 根据式 (31) 求解 NETD 的重点主要在于分母中定积分项的计算。对于给出 $D^*(\lambda)$ 测试值的情况, 可以基于样条插值作数值积分^[15]。若将 $D^*(\lambda)$ 视为常数, 该计算则变成一个辐出对比度的定积分问题。利用 MATLAB 可以画出图 4 所示的辐出对比度的定积分值随不同背景温度的变化曲线。可以看出, 在 $T_B=300$ K 附近, 短波红外与长波红外的辐出对比度值之间存在几个数量级的差异。

从式 (31) 中可以看出, NETD 与不少系统

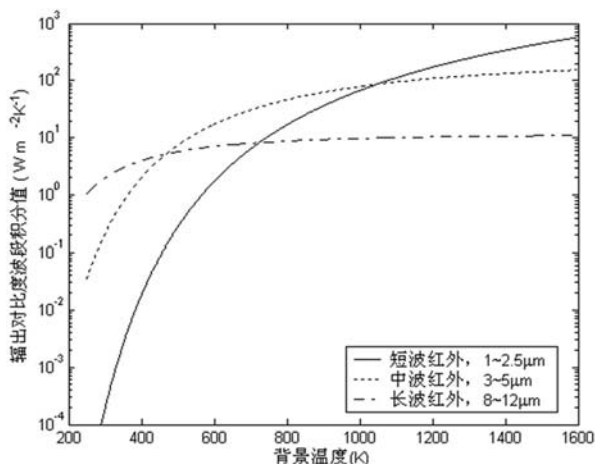


图 4 辐出对比度的波段积分值随背景黑体温度的变化曲线

参数有关。例如, $\text{NETD} \propto 1/\sqrt{A_d}$, 故增加探测器的光敏面积可以提高温度分辨率。但是另一方面, 探测器的光敏面积越大, 空间分辨率越低, 成像质量也越差^[1]。因此需要在温度分辨率与空间分辨率两者之间作出某种折衷和平衡。既可提高温度分辨率又不会使空间分辨率变差的途径包括^[16]:

(1) 在增加探测器的光敏面积的同时, 也相应扩大焦距和光学孔径。但是增加光学孔径一般是不可取的, 因为这样做会使整机的体积、重量和价格增加。

(2) 提高探测器的性能或使用具有较高探测率的器件。

(3) 增加探测器的数量, 因为在同样的帧频和其他参数条件下, 单元探测器带宽的降低量与探测器的数量成正比。

文献 [17–19] 介绍了不同波段、不同口径光学镜头组合下的致冷型 HgCdTe 红外系统的 NETD 测试结果。结果表明, 在同一波段下, 口径不同的系统的 NETD 相差不大, 而波段不同、口径相同时的 NETD 相差很大; 另外, 光学系统中只有 F 数与 NETD 有关。积分时间、增益和背景温度等各种参数的设置会对 NETD 测试结果产生较大影响。文献 [20–21] 分析了影响 NETD 测量结果的各种因素。文献 [22] 介绍了在多种温度、不同增益下的 NETD 测试结果。

4 关于 NETD 的讨论

当 NETD 最小时, 温度分辨率最高, 为此就要使式 (31) 的分母值达到最大, 即

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \left. \frac{\partial M(\lambda, T)}{\partial T} \right|_{T=T_B} d\lambda \rightarrow \text{最大} \quad (32)$$

这种情况大体出现在同 $D^*(\lambda)$ 成正比的光谱响应率峰值与辐出对比度峰值耦合之际^[1]。换言之, 理想的情况是这两个峰值出现在同一波长附近; 若做不到这一点, 则可退而求其次, 能有一个峰值处在工作波段内也不错。由于很难给出具有某种普适性的 $D^*(\lambda)$ 表达式, 分析时一般将

关注点放在式 (32) 中的辐出对比度项。该项取最大值时应满足的条件如前面的式 (25) 所示。

在实际应用中, 光谱响应率峰值所在位置一般比辐出对比度峰值所在位置更重要。例如, 基于 PtSi 探测器的红外成像系统的工作波段一般为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ [1]; 在对室温目标进行成像时, 该波段并未包括辐出对比度所在的峰值波长 (如上所述, 对于温度为 300 K 的源目标, 该峰值在 $8 \mu\text{m}$ 左右); 根据式 (31), 此时虽然 NETD 并没有达到本可更低的水平, 但是已经够用了, 或者说也只能如此了。这是一种工程层面上的折衷选择。另外, 波段的选择始终取决于探测器本身的可获得性以及探测器成本的可接受性 [1]。例如, 对于夜视应用中的 InGaAs 短波红外探测器, 尽管各峰值波长所在的位置均不在其工作波段 ($0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$) 内, 但是这已经够用了。因此, 该探测器近年来发展迅速, 已经成为基于微通道板等的传统微光器件的有力竞争者。总之, 虽然 NETD 是一种足够有效的实用测试手段, 但是它却不能用作一个系统级的设计准则 [1]。

从概念上来讲, 在示波器上测量 NETD 较为容易, 但是在对数字化数据进行自动计算时就要比较小心, 均方根噪声的计算必须排除目标区域 [1]。为了确保系统的空间响应不影响测量结果, 目标尺寸应超过系统瞬时视场的若干倍, 以使目标过量填满瞬时视场 [1]。NETD 在 $50 \sim 200 \text{ mK}$ 之间的红外成像系统一般均可产生高质量的热像数据 [4]。采用模拟输出的常规致冷型碲镉汞器件的 NETD 通常在 $10 \sim 20 \text{ mK}$ 之间 [23]。长波红外器件的 NETD 理论限在 $1 \sim 2 \text{ mK}$ 之间 [24]。非致冷型系统的 NETD 较差, 其典型值约为 100 mK , 但也在不断改善 [3]。文献 [25] 分析了非致冷型探测器的结构和噪声对 NETD 的影响。文献 [26-27] 分析了影响非致冷型系统的 NETD 的若干因素。

精确测量要求黑体的温度分辨率比 NETD 高几倍甚至更多。国内高精度黑体的量值可以溯源到中国测试技术研究院所建立的全辐照国家基准黑体辐射源 [28]。对于非致冷型系统来说,

10 mK 的黑体温度分辨率是可以接受的; 但是如果待测的是致冷型系统, 则要求黑体具有 1 mK 的温度分辨率 [3]。文献 [29] 介绍了一种内部参考黑体温度与环境温度相等的红外辐射计, 并估算了该辐射计在不同电子带宽和光谱波段下的 NETD。结果表明, 当噪声带宽小于 1 Hz 时, 在中波红外和长波红外波段, 红外辐射计自身的 NETD 均小于 10 mK , 能够满足测试设备的校准需求。文献 [19] 介绍了一种在实验室条件下基于数字图像的 NETD 精确测量方法。

多年来, 人们一直使用方形黑体目标来测量 NETD。由于下述原因, 现已并不严格要求使用方形黑体目标 [3]:

(1) 方形黑体目标是和示波器一起用于扫描型系统的 NETD 测试的。目前, 人们通常用帧抓取器来替代示波器。帧抓取器实际上是一种视频卡, 用于捕获待测红外成像系统所产生的一段图像序列; 当抓取的帧数少于 100 帧时, $1/f$ 噪声的影响可以忽略不计。

(2) 凝视型系统将会取代扫描型系统。

(3) 利用现有的软件技术可以对红外成像系统产生的图像的任何一块区域进行分析。

一般而言, 焦平面阵列 (特别是非致冷型焦平面阵列) 器件产生的图像噪声非常多 [3], 其中空间噪声是主要的噪声类型。为了获得较清晰的图像, 一般需要对红外成像系统的空间噪声进行校正。文献 [30] 指出, NETD 等于由系统噪声引起的输出温度色散的标准偏差, 因此用 NETD 可以较好地估计由系统噪声产生的不确定性。另外, 只有准确知道噪声是如何测量出来的, NETD 才能用作噪声现象的一种有用量度, 否则对于 NETD 数据的理解可能会产生很大歧义 [3]。文献 [31-32] 介绍了一种基于三维噪声模型的 NETD 计算方法。

凝视型系统的 NETD 可按下列步骤计算 [3]:

(1) 选取单个像元, 根据信号时间变化量的标准偏差来计算均方根噪声。在 MATLAB 中, 标准偏差可以用 `std()` 命令来计算。此时, NETD 仅仅是单个像元的时间噪声的量度。

(2) 选取若干个像元构成一组, 根据它们的时间变化量和空间变化量的标准偏差来计算均方根噪声。此时, NETD 是总噪声 (包括时间噪声和空间噪声) 的一种量度。

(3) 选取若干个像元构成一组, 先对空间噪声进行校正, 然后根据它们的时间变化量和空间变化量的标准偏差来计算均方根噪声。此时, NETD 是该组像元的平均时间噪声的一种量度。

不管是否对低频噪声进行校正, 上述三种方法均可使用。这就意味着, 如果使用了校正, 则 NETD 仅是高频噪声的量度; 如果没有使用校正, 则 NETD 是全带宽噪声的量度^[3]。

人们经常使用不同的 NETD 定义^[3]。采用不同方法计算得到的 NETD 数据之间可能会具有明显差异^[3]。例如, 按第 (2) 种方法测出的 NETD 值可以比按第 (1) 种方法测出的 NETD 值大几倍。对于非致冷型红外成像系统, 当总噪声比时间噪声大几倍时, 这种情况尤为明显^[3]。

点源目标的 NETD 是一个关于距离和背景的函数^[4]。文献 [33] 介绍了一种适用的基于 NETD 和目标背景温度参数的点源目标作用距离计算方法。文献 [34] 将扫描探测系统视为对比度探测系统, 并考虑到信号处理系统的影响, 推导了探测器噪声限下扫描探测系统对扩展源的噪声等效温差和对点源目标的作用距离方程, 得到了扫描探测系统的作用距离与系统 NETD 之间的关系。但是在大多数情况下, 人们并不将 NETD 与用于探测点源目标的红外系统联系在一起。

文献 [35] 从应用角度推导了全视场 NETD 的关系式。红外偏振成像技术是将可见光偏振成像技术引入红外领域而衍生出来的一个新方向。文献 [36] 建立了偏振成像系统的 NETD 模型。文献 [37] 介绍了显微红外成像系统的 NETD 模型。文献 [38] 计算了第一代与第二代扫描型热像仪的空间 NETD 和时间 NETD。文献 [39] 介绍了一种利用 NETD 和探测器测试数据计算红外成像系统的扫描效率的方法。

5 关于等效温差

红外探测器敏感的是目标与背景之间的温差所对应的辐射量差。NETD 依赖于目标温度, 人们通常是针对该温度的一个固定值 (通常接近 30 °C) 来对其进行测量的; 当目标温度处在可获得温度范围的低端 (接近 -20 °C) 时, NETD 可以提高好几倍^[3]。事实上, 在较冷的气候条件下, 需要较大的温差才能获得较热条件下红外成像系统所具有的等效探测器信号^[40]。

一般而言, 背景温度也就是环境温度。人们通常在实验室条件下对整机进行测试, 同时又期望它们能够在极端的环境温度 (例如寒区或热区) 下正常工作。整机参数会随环境温度产生显著变化。这种依赖性或者说是整机的温度稳定性, 可以通过将整机放入温度可调的温箱内进行测量来获得。温度稳定性测量方法有两种: 第一种是将整机和黑体一起放入温箱; 第二种是使用具有红外透明窗口的温箱, 这时只需将整机放入温箱。温箱的温度范围应符合被测整机日后使用时的环境温度范围^[3]。

由于辐射量是一个关于温度的函数, 如果假设辐射量差值不变, 那么当环境温度变化时, 相应的温差值也会随之变化。温差 $\Delta T = T_T - T_B$ 所对应的辐射功率差 ΔE_d 可按式 (33) 计算:

$$\Delta E_d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [M(\lambda, T_T) - M(\lambda, T_B)] d\lambda \quad (33)$$

假定辐射功率差固定不变, 背景温度变为 $T_{B, new}$, 这时就存在一个新的目标温度 $T_{T, new}$, 并且满足以下关系:

$$\Delta E_d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [M(\lambda, T_{T, new}) - M(\lambda, T_{B, new})] d\lambda \quad (34)$$

两者之差 $\Delta T_e = T_{T, new} - T_{B, new}$ 称为等效温差。式 (34) 是一个没有解析解的积分方程。最简单的求解方法是编写一个小的 MATLAB 程序, 即先设定一个 $T_{T, new}$ 的初始值, 计算出其对应的辐射功率差, 然后视误差值的情况适当调整其大小, 并求出新的辐射功率差。一般尝试几次以后, 即可

找到一个满足计算精度要求的 $T_{T,new}$ 值,从而得到等效温差 ΔT_e 。这时,如果已知系统在新的环境温度下的信噪比值 SNR_{new} ,那么将 SNR_{new} 代入式 (26),即可得到 $NETD_{new}$ 。

6 结束语

NETD 本身是一个可调整的参数值,不宜将其解读为目标与背景之间的真实温差,因为真实温差往往要比 NETD 大若干倍。20 世纪 70 年代,为了决定针对各种目标、背景和探测器的伪装措施需要达到何种水平才能取得令人满意的效果,美国从事伪装工作的研究人员对有关问题进行了深入分析和探讨。20 世纪 80 年代初期,研究人员又对红外波段进行了野外测量和试验,并从中得到了一个已被认同的主要结论:如果目标与背景之间的温差能够保持在 $\pm 4^\circ\text{C}$ 以内,那么就可以达到所期望的伪装效果^[41],这也成为了红外伪装工作的设计目标。至于能否将真实温差控制在几毫开以及红外探测系统能否感应到几毫开的真实温差,文献中至今尚未见到明确的说法。

采用不同方法计算得到的 NETD 数据之间可能会存在明显差异^[3]。从计算的角度来看,由于辐出对比度积分项的存在,不同波段(至少是短波、中波和长波)红外成像系统的 NETD 的可比性不高。严格地说,引用 NETD 值时应给出其测试条件或计算条件。

作为芯片级的一个参数,NETD 基本上可以反映出器件的性能水平。第一代器件的 NETD 约为 200 mK;第二代器件的 NETD 在 100 mK 左右;法国 Sofradir 公司生产的第 2.5 代 288×4 元探测器的 NETD 约为 50 mK;但是第三代器件的 NETD 只比第二代器件略好一点^[3]。提高 NETD 性能的途径之一就是使用像元级模数转换^[23]。

参考文献

[1] Dereniak E L, Boreman G D. Infrared Detectors and Systems [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.

- [2] Chrzanowski K. Evaluation of Thermal Cameras in Quality Systems According to ISO 9000 or EN45000 Standards [C]. SPIE, 2001, **4360**: 387-401.
- [3] Chrzanowski K. Testing Thermal Imagers: Practical Guidebook [M]. Warsaw: Military University of Technology, 2010.
- [4] Miller J L. Principles of Infrared Technology, A Practical Guide to the State of the Art [M]. New York: Chapman and Hall, 1994.
- [5] 王忆锋, 黄江平. 试论光子的分裂 [J]. 红外, 2013, **35**(3): 1-8.
- [6] 杨宜禾, 岳敏, 周维真. 红外系统 (第二版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [7] 刘其涛, 李金萍. 用 NETD 表达的热像仪作用距离方程 [J]. 生命科学仪器, 2005, **3**(2): 41-42.
- [8] 李金萍, 刘自强, 何月顺. 一种新的热像仪作用距离表示方法 [J]. 光学与光电技术, 2006, **4**(1): 24-26.
- [9] Dudzik M C. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (Vol.4): Electro-Optical Systems Design, Analysis, and Testing [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [10] 王忆锋. 利用多项式拟合和 MATLAB 估算红外成像系统的归一化噪声功率谱 [J]. 红外, 2009, **30**(7): 42-44.
- [11] 尹达人, 许生龙. 噪声等效温差 (NETD) 测试方法分析 [J]. 红外技术, 1997, **19**(4): 31-33.
- [12] 毛京湘, 王忆锋. 利用 NETD 和探测器测试数据计算红外成像系统噪声等效带宽 [J]. 红外, 2009, **30**(8): 41-43.
- [13] 齐昇, 刘焕英, 陈圣涛, 等. 一种改进的红外图像信噪比计算方法 [J]. 舰船科学技术, 2009, **31**(10): 141-143.
- [14] Magrab E B, Azarm S, Balachandran B 著. 高会生, 李新叶, 胡智奇, 等译. MATLAB 原理与工程应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [15] 王忆锋, 毛京湘. 用 MATLAB 和样条函数拟合红外探测器相对光谱响应曲线 [J]. 光电技术应用, 2008, **23**(2): 46-49.
- [16] Rogalski A. HgCdTe Infrared Detector Material: History, Status and Outlook [J]. Reports on Progress in Physics, 2005, **68**: 2267-2336.
- [17] 魏东, 徐世伟, 王大鹏. 不同波段口径的制冷型红外系统 NETD 对比分析 [J]. 舰船电子工程, 2012, **32**(12): 133-135.
- [18] 徐世伟, 张悦玲, 王大鹏, 等. 制冷型 HgCdTe 红外推扫系统噪声等效温差精测与结果分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(11): 132-138.
- [19] 魏东, 徐世伟, 王大鹏. 红外系统 NETD 测试对比与分析 [J]. 光电技术应用, 2012, **27**(6): 38-41.
- [20] 胡明鹏. 参数设置对噪声等效温差 (NETD) 测试影响分析 [J]. 红外技术, 2013, **31**(1): 27-31.

- [21] 马冬梅, 胡明鹏, 孙军月. 凝视型红外光电成像系统主要参数的实验室测评分析 [J]. **红外技术**, 2007, **29**(8): 483-487.
- [22] 雷萍, 吴文华, 朱祺. 热成像设备测试方法的实验及分析 [J]. **激光与红外**, 2013, **43**(9): 1017-1020.
- [23] Bisotto S, Borniola E, Mollarda L, et al. A 25 μ m Pitch LWIR Staring Focal Plane Array with Pixel-level 15-bit ADC ROIC Achieving 2mK NETD [C]. **SPIE**, 2010, **7834**: 78340J.
- [24] Markin V A. Temperature-sensitivity Limits to Third-generation Thermal Viewers [J]. **Journal of Optical Technology**, 2010, **77**(2): 119-125.
- [25] 刘磊, 常本康. 优化非制冷红外探测器设计的理论模型 [J]. **红外技术**, 2002, **24**(11): 31-34.
- [26] 李颖文, 罗艳, 吴裕斌, 等. 基于脉冲偏置的红外热像仪的噪声等效温差精度分析 [J]. **仪器仪表学报**, 2004, **25**(5): 41-42.
- [27] 李颖文, 易新建, 吴裕斌, 等. 大面阵非制冷红外热像仪的噪声等效温差精度分析 [J]. **光学与光电技术**, 2003, **1**(2): 42-47.
- [28] 苏红雨, 张宪亮, 陈宇. 红外热像仪性能参数的评价 [J]. **中国测试**, 2010, **36**(1): 14-19.
- [29] 胡铁力, 申越, 郭羽, 等. 低噪声红外辐射计设计 [J]. **应用光学**, 2013, **34**(4): 663-666.
- [30] Chrzanowski K, Szulim M. A Measure of Influence of Detector Noise on Temperature Measurement Accuracy with IR Systems [J]. **Applied Optics**, 1998, **37**(22): 5051-5057.
- [31] 胡明鹏, 李宏壮, 马冬梅. 凝视型红外光电系统噪声等效温差测量 [J]. **光电工程**, 2007, **34**(18): 15-19.
- [32] 权清科, 仇振安, 崔志新. 红外成像系统噪声等效温差数字图像测试方法 [J]. **电光与控制**, 2013, **20**(1): 102-104.
- [33] 王晓剑, 刘扬, 陈蕾, 等. 基于 NETD 和 ΔT 红外点源目标作用距离方程的讨论 [J]. **红外与激光工程**, 2008, **42**(S2): 493-496.
- [34] 陈汝钧. 扫描探测系统的 NETD 和作用距离方程 [J]. **红外与毫米波学报**, 1996, **15**(3): 165-168.
- [35] 熊辉丰. 红外成像系统中全视场的噪声等效温差 [J]. **红外与激光工程**, 1996, **25**(4): 1-5.
- [36] 赵大鹏, 时家明, 汪家春, 等. 偏振热成像系统的作用距离分析 [J]. **红外与激光工程**, 2013, **42**(5): 1146-1152.
- [37] 高美静, 金伟其, 王霞, 等. 显微热成像系统的噪声等效温差和噪声等效辐射率差模型及其分析 [J]. **北京理工大学学报**, 2007, **27**(1): 50-54.
- [38] 王晓璇, 普建勋, 字正华, 等. 参数设置对噪声等效温差 (NETD) 测试影响分析 [J]. **红外技术**, 2013, **31**(8): 453-457.
- [39] 王忆锋, 毛京湘. 利用 NETD 和探测器测试数据计算红外成像系统扫描效率 [J]. **激光与红外**, 2008, **38**(4): 1097-1099.
- [40] Driggers R G, Boylston G L, Edwards G T. Equivalent Temperature Differences with Respect to Ambient Difference as a Function of Background Temperature [J]. **Optical Engineering**, 1992, **31**(27): 1357-1361.
- [41] Robinson S R. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (Vol.7): Countermeasure Systems [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.

新闻动态 News

美德双方正式确立商用空间 成像合作关系

据 www.teledyne.com 网站报道, 美国 Teledyne 技术公司最近宣布, 其子公司 —— Teledyne Brown 工程公司 (TBE) 与德国航空航天中心 (DLR) 正式确立商用空间成像合作关系, 他们将利用国际空间站 (ISS) 开展对地观测业务。

根据相关协议, DLR 负责研制地球遥感成像光谱仪 (DESI), Teledyne 技术公司则负责把这个高光谱仪器安装到 ISS 基成像平台 —— 多用户地球遥感系统 (MUSES) 中。另外, MUSES

平台还将搭载其他 3 个对地观测仪器, 用于诸如森林测绘与监测、海域感知、油气勘探以及自然灾害处理之类的商用场合。

DESI 仪器能够在可见光 - 近红外波段对地球进行成像。DLR 将为大气物理学和地球科学方面的研究人员提供精确的光谱数据。另外, DLR 还打算在 DESI 服役结束并返回地球后对遥感仪器受太空环境的影响情况进行研究。

美德双方期望 DESI 能够于 2016 年在 MUSES 平台上开始工作。根据同美国航空航天局 (NASA) 达成的一项合作协议, Teledyne 技术公司正在开展 MUSES 平台的研制工作。

□ 岳桢千