

扫描探测系统的 *NETD* 和作用距离方程

陈汝钧

(华中理工大学光电子工程系, 湖北, 武汉, 430074)

TN215

A

**摘要** 将扫描探测系统视为对比度探测系统, 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的 *NETD* 之间的关系.

**关键词** 红外探测系统, 扫描探测系统, 热成像系统, 小目标探测.

## 引言

与非热成像系统相比, 红外扫描探测系统或热成像系统可利用探测器阵列而获得较高的灵敏度<sup>[1,2]</sup>, 而且具有视场大、精度高、抗干扰能力强的特点. 因此, 它已成为红外探测系统的发展趋势. 研究和应用热成像系统的小目标探测技术具有重要的现实意义.

红外扫描探测系统或热成像系统属于对比度探测系统<sup>[2]</sup>, 而非热成像系统属于能量检测系统, 它们的本质区别见文献[2]. 文献[1]和[3]分别采用对非热成像系统的作用距离方程进行修正和直接利用成像系统的 *MDTD* 表达式的方法, 探讨了热成像系统对点目标的作用距离方程.

本文将扫描探测系统视为热成像系统, 根据热成像系统噪声等效温差的概念, 考虑了信号预处理器的影响和小目标探测的特点, 导出了红外扫描探测系统的噪声等效温差 *NETD* 和系统的作用距离方程.

1 扫描探测系统的 *NETD*

与热成像系统一样, 扫描探测系统的 *NETD* 定义为当系统输出的信噪比等于 1 时, 目标与背景(均为黑体)的温差.

当目标为扩展源时, 在探测器噪声限(白噪声)情况下, 探测器输出的信号为

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{2}} N_0^{-1/2} A_d^{-1/2} A_o \tau_o \bar{\tau}_a \frac{\omega}{\pi} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda \cdot D_\lambda^* d\lambda, \quad (1)$$

式(1)中,  $N_0/2$  为探测器输出的白噪声功率谱密度;  $A_d$  为探测器的响应元面积;  $A_o$  为光学系统的有效入射孔径;  $\tau_o$  为光学系统的有效透过率;  $\bar{\tau}_a$  为大气平均透过率;  $\omega$  为系统的瞬时视场立体角;  $M_\lambda$  为目标的光谱辐射出射度;  $D_\lambda^*$  为探测器的光谱比探测度.

从信号处理看, 扫描探测系统是一个脉冲接收系统. 系统接收目标辐射, 在探测器的驻留时间内输出一个脉冲信号. 因此, 它的信号预处理器可以是一个低通滤波器. 设这个低通滤波器的截止频率为  $f_c$  (对应的角频率为  $\omega_c$ ), 则通过信号预处理器输出信号脉冲的幅度

为<sup>[4]</sup>

$$v_{s0} = \frac{A_v}{\pi} \cdot S_i(n\pi) \cdot v_s, \quad (2)$$

式(2)中,  $A_v$  为信号预处理器的电压增益;  $S_i(\cdot)$  为正弦积分函数;  $n\pi = \omega_c \cdot \tau_d/2$ ,  $\tau_d$  为探测器的驻留时间.

经信号预处理器输出的噪声电压  $v_n$  为

$$v_n = \frac{A_v}{2\sqrt{\pi}} \cdot N_0^{1/2} \cdot \omega_c^{1/2}, \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可以得到信号预处理器输出的微分电压信噪比为

$$\frac{\partial v_{s0}}{\partial T} = \frac{2S_i(n\pi)}{\sqrt{\pi} \cdot N_0^{1/2} \omega_c^{1/2}} \cdot \frac{\partial v_s}{\partial T} \quad (4)$$

采用小信号近似法, 以  $\frac{\Delta v_{s0}}{\Delta T}$  代替  $\frac{\partial v_{s0}}{\partial T}$ ; 令  $\frac{\Delta v_{s0}}{v_n} = 1$ , 解出  $\Delta T$ , 即可得到:

$$NETD = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{N_0^{1/2} \cdot \omega_c^{1/2}}{S_i(n\pi)} \cdot \left(\frac{\partial v_s}{\partial T}\right)^{-1}. \quad (5)$$

根据文献[4, 5, 6], 对式(5)整理如下:

(1) 对于扫描探测系统, 通常有

$$\frac{\partial M_\lambda}{\partial T} \approx \frac{C_2}{\lambda T^2} \cdot M_\lambda. \quad (6)$$

式(6)中,  $C_2$  为第二辐射常数;  $\frac{\partial M_\lambda}{\partial T}$  是相对于背景温度  $T_B$  下的光谱辐射出射度  $M_\lambda(T_B)$  对温度的求导<sup>[5]</sup>. 因此, 式(6)右边实际为  $C_2 \cdot M_\lambda(T_B) / \lambda T_B^2$ .

(2) 对于理想的光子探测器, 光谱比探测度可写为

$$D_\lambda^* = \begin{cases} \frac{\lambda \cdot D_\lambda^*(\lambda_p)}{\lambda_p}, & \lambda \leq \lambda_p \\ 0, & \lambda > \lambda_p \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,  $\lambda_p$  为探测器截止波长;  $D_\lambda^*(\lambda_p)$  为  $\lambda_p$  处探测器的比探测度.

由式(6)和式(7)得到:

$$\frac{\partial M_\lambda}{\partial T} \cdot D_\lambda^* = \frac{C_2}{\lambda_p T_B^2} \cdot D_\lambda^*(\lambda_p) \cdot M_\lambda(T_B). \quad (8)$$

(3) 根据脉冲接收系统的最大信噪比条件, 有

$$f_c \cdot \tau_d = 0.68. \quad (9)$$

此时,

$$S_i(n\pi) \approx 1.65. \quad (10)$$

将式(1)、(8)、(9)和(10)代入式(5), 得到:

$$NETD = 1.09 \frac{\lambda_p A_d^{1/2} T_B^2}{\tau_d A_0 \tau_0 D_\lambda^*(\lambda_p) \tau_d^{1/2}} \cdot \frac{\pi}{\omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(T_B) d\lambda}. \quad (11)$$

式(11)中,  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  为系统的光谱响应范围.

## 2 扫描探测系统的作用距离方程

对于点源目标,扫描探测系统的信噪比方程为<sup>[5,6]</sup>

$$SNR = \frac{\overline{I(x,y)} \cdot \Delta T}{NETD}, \quad (12)$$

式(12)中,  $I(x,y)$  是以归一化为单位振幅的方形目标的像;  $\Delta T$  是目标与背景的温度差. 对于式(12)要计算卷积积分的平均值  $\overline{I(x,y)}$  是非常困难的. 实际上, 对于比探测器的立体张角小得多的目标,  $I(x,y)$  可以简化为目标立体张角与探测器张角之比<sup>[6]</sup>, 则式(12)变为

$$SNR = \frac{\Delta T}{NETD} \cdot \frac{A_s}{\omega S^2}, \quad (13)$$

式(13)中,  $A_s$  为目标的辐射面积;  $S$  为目标到系统的距离. 设采用  $N$  元探测器阵列来提高系统的灵敏度, 则由式(13)即可得到

$$S^2 = \frac{\Delta T \cdot A_s \cdot N^{1/2}}{\omega \cdot NETD \cdot SNR}. \quad (14)$$

将扫描探测系统的 *NETD* 表达式(11)代入式(14), 得到红外扫描探测系统作用距离方程的具体表达式为

$$R = 0.54 \cdot \frac{\left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_1(T_B) d\lambda \right)^{1/2}}{T_B} \cdot A_s^{1/2} \cdot \bar{\tau}_e^{1/2} \cdot (A_0 \tau_0)^{1/2} \cdot \left( \frac{D_i^2(\lambda_p)}{\lambda_p} \right)^{1/2} \cdot A_d^{-1/4} \cdot \tau_d^{1/4} \cdot \Delta T^{1/2} \cdot (SNR)^{-1/2} \cdot N^{1/4}. \quad (15)$$

## 3 分析与讨论

式(11)和式(15)适用于探测器输出的噪声为白噪声, 探测器噪声限、信号预处理器满足输出最大信噪比条件下的扫描探测系统. 式(14)将扫描探测系统的作用距离  $S$  与系统的噪声等效温差 *NETD* 联系起来, 表明了两者之间的关系, 即系统的 *NETD* 越小, 则系统的作用距离  $S$  越大. 式中  $\Delta T$  为目标与背景的温差, 它体现出扫描探测系统是一个对比度探测系统. 在红外跟踪系统中, 利用扫描探测系统的小目标作用距离方程式(14), 可以将点跟踪, 亚成像跟踪和成像跟踪阶段系统的性能描述统一到系统的性能参数 *NETD* 上来, 为红外跟踪系统的系统仿真, 系统性能的综合评估和系统的设计提供了一个重要的依据.

式(14)或式(15)中的 *SNR* 是信号预处理器的输出信噪比, 根据目标发现概率与 *SNR* 的关系, 可得到各种探测概率所对应的系统的作用距离<sup>[3]</sup>. 扫描探测系统本质上也是热成像系统, 因此式(11)和式(15)也是考虑了信号预处理器的影响后的热成像系统的噪声等效温差和作用距离方程. 在这些表达式中都不包括人眼的积分时间  $T_{eye}$ , 因此可用于客观地描述系统的性能.

应当指出, 式(15)中的  $\bar{\tau}_e$  是与距离有关的参量, 在求得作用距离前不能事先确定  $\bar{\tau}_e$  的数值. 文献[7]给出了解决这个问题的一种方法, 即将式(15)中除  $\bar{\tau}_e$  以外其它参数全部代入, 经计算后得出作用距离  $S$  与  $\bar{\tau}_e$  的关系.

$$S = K \cdot \bar{\tau}_a^{1/2}, \quad (16)$$

式(16)中,  $K$  为式(15)中的各已知参数的计算值. 然后, 在相应的  $\lambda_1$ - $\lambda_2$  光谱区间就所涉及的情况(气象条件、工作高度及各种距离)下的大气平均透过率  $\bar{\tau}_a$  进行具体计算, 并根据计算结果作出给定工作高度上的

$$\bar{\tau}_a^{1/2} = f(S) \quad (17)$$

曲线, 则在  $S \sim \bar{\tau}_a$  坐标平面上式(16)和式(17)所表示的曲线的交点即为所求的作用距离  $S$ .

### 参考文献

- 1 杨应槐, 石 峰. 红外与激光技术, 1989, (1), 17~19
- 2 杨宜禾, 岳 敏. 激光与红外, 1989, 19(1), 37~38
- 3 骆清铭, 刘贤德. 激光与红外, 1991, 21(3), 36~39
- 4 陈汝钧, 等. 红外与毫米波学报, 1993, 12(3), 207~211
- 5 陈波若. 红外系统, 北京: 国防工业出版社, 1988, 266~267, 276~277
- 6 J. M 劳埃德. *Thermal Imaging Systems*. Plenum Press, 1975, 尹白云, 戴传衡译. 热成像系统, 北京: 国防工业出版社, 1981, 158~183
- 7 杨宜禾, 岳 敏. 红外系统, 北京: 国防工业出版社, 1985, 185

## NETD AND RANGE EQUATION OF SCANNING DETECTION SYSTEMS

Chen Rujun

(Department of Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Taking Scanning Detection Systems (SDS) as detection systems of contrast, under detector noise limited circumstances, and considering the effects of signal processors, the *NETD* for extended sources and the range equation for point source targets of SDS were derived. The relations between the range equation and the *NETD* of SDS were established.

**Key words** IR detection system, scanning detection system, thermal imaging system, small target detection.