

367-371

# 红外扫描探测系统综合性能 描述和测试方法的研究

陈汝钧

(华中理工大学光电子系, 湖北, 武汉, 430074)

TN 216

**摘要** 以系统输出信噪比为判据, 建立了系统的作用距离  $R$ 、最小可分辨温差  $MRTD$ 、最小可探测温差  $MDTD$  与系统的噪声等效温差  $NETD$  和调制传递函数  $H$  之间的关系; 并研究了这些性能参数的测量方法, 为系统综合性能评估和性能测试提供了依据。

**关键词** 红外系统, 扫描探测系统, 红外系统性能评价, 红外系统性能测试。

## 引言

红外扫描探测系统是根据对比度原理建立的探测系统<sup>[1]</sup>, 其综合性能可沿用热成像系统的性能参数来描述, 即可用噪声等效温差  $NETD$ 、最小可分辨温差  $MRTD$  和最小可探测温差  $MDTD$  来综合衡量系统的性能。红外扫描探测系统通常既要工作于成像(包括亚成像)跟踪状态, 又要工作于搜索或点跟踪状态<sup>[2]</sup>。因此, 除了系统的成像性能之外, 还必须描述系统对小目标的探测能力。文献[1, 3, 4]研究了红外扫描探测系统对于小目标的探测性能, 推导了系统的作用距离方程, 得到了在最大信噪比条件下系统的  $NETD$ 。在此基础上, 本文进一步研究推导了红外扫描探测系统的  $MDTD$  和  $MRTD$ , 并提出了对扫描探测系统综合性能进行测试的方法。

## 1 扫描探测系统的 $MDTD$ 和 $MRTD$

在红外热成像系统的  $MDTD$  和  $MRTD$  的推导和表达式中都考虑了观察者的眼睛的作用, 并用眼睛的有效积分时间  $T_{eye}$  来表示<sup>[5, 6]</sup>。这对于观察的热成像系统无疑是正确的。而自动红外扫描探测系统, 无论在点跟踪状态还是在成像跟踪状态, 都是由系统自动完成的。因此, 为了能客观地评价系统的性能, 红外扫描探测系统的  $MDTD$  和  $MRTD$  的定义与通常热成像系统不同, 应以系统信号处理器输出的信噪比为判据, 而不以人眼的观察结果为依据。

$NETD$  是系统探测面源目标时的温度灵敏度, 不能反映系统的空间频率特性。而  $MDTD$  和  $MRTD$  都是空间频率  $N_f$  的函数, 因此也都是目标线度的函数。 $MDTD$  表明系统探测不可分解的点源目标的能力,  $MRTD$  表明系统对不同空间频率目标进行探测时的温度灵敏度。

对于点源目标, 扫描探测系统的信噪比方程为<sup>[5]</sup>

本文 1995 年 10 月 14 日收到, 修改稿 1996 年 3 月 5 日收到

$$SNR = \frac{\overline{I(x,y)} \cdot \Delta T}{NETD}, \quad (1)$$

式(1)中,  $I(x,y)$  是单位振幅的方形目标的像,  $\Delta T$  是目标与背景的温差. 对于比探测器的立体张角小得多的目标,  $I(x,y)$  可以简化为目标的立体张角与探测器张角之比<sup>[5]</sup>. 这样, 式(1)变为

$$SNR = \frac{\Delta T}{NETD} \cdot \frac{A_t}{\omega \cdot R^2}, \quad (2)$$

式(2)中,  $A_t$  为目标的辐射面积. 若方形目标的线度为  $B$ , 则  $A_t = B^2$ ;  $R$  为目标到系统之间的距离;  $\omega$  为探测器的瞬时视场立体角.

在式(2)中,  $SNR=1$  时的  $\Delta T$  就是系统在空间频率  $N_T = \frac{1}{2B}$  时的  $MDTD$ , 即

$$MDTD\left(\frac{1}{2B}\right) = \frac{NETD \cdot \omega \cdot R^2}{B^2}. \quad (3)$$

文献[5,6]指出, 当方形目标的线度  $B$  与测试  $MRTD$  时用的四条带标准测试图案(见图1)的条带的宽度相等时, 系统的  $MRTD$  与  $MDTD$  之间的关系为:

$$MDTD\left(\frac{1}{2B}\right) = \frac{1.5 \cdot \sqrt{2} \cdot H_t}{\overline{I(x,y)}} \cdot MRTD\left(\frac{1}{2B}\right), \quad (4)$$

式(4)中,  $H_t$  为系统总的调制传递函数. 根据式(4), 若测得系统的  $MDTD(N_T)$  和系统总的调制传递函数  $H_t$ , 则可求得系统的  $MRTD$  为

$$MRTD\left(\frac{1}{2B}\right) = \frac{MDTD\left(\frac{1}{2B}\right)}{1.5 \sqrt{2} \cdot H_t} \cdot \overline{I(x,y)} = \frac{NETD}{1.5 \sqrt{2} \cdot H_t \left(\frac{1}{2B}\right)}. \quad (5)$$

式(5)直接表示系统的  $MRTD$  和  $NETD$  与  $H_t$  的关系.  $NETD$  表明的是系统对扩展源的温度灵敏度,  $H_t$  描述了系统的空间频率特性. 因此, 式(5)清楚地表明了  $MRTD$  就是系统对具有一定空间频率的目标进行探测时的温度灵敏度. 为了表明  $MRTD$  是空间频率的函数, 式(5)中的  $H_t$  也可写成空间频率的函数  $H_t\left(\frac{1}{2B}\right)$ .

根据式(2), 还可以直接得到扫描探测系统的作用距离  $R$  与  $NETD$  的关系, 即

$$R = \left( \frac{\Delta T \cdot A_t}{\omega \cdot NETD \cdot SNR} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

## 2 扫描探测系统性能的综合测试

由上面的分析可知, 只要测量了系统的  $NETD$  和  $H_t$ , 就可得到系统的  $MRTD$ 、 $MDTD$  和作用距离  $R$ .

### 2.1 系统的噪声等效温差 $NETD$ 的测试

扫描探测系统的噪声等效温差  $NETD$  的测试方法与通常的热成像系统的  $NETD$  测试方法<sup>[6]</sup>相同. 用一个大的黑体目标, 使其对系统的立体张角为系统的瞬时视场的若干倍, 目

标与背景之间的温差  $\Delta T$  超过所需要的  $NETD$  的 10 倍或几十倍, 以保证系统输出的峰值信号电压  $V_s$  远大于均方根噪声电压  $V_n$ , 即保证系统输出足够大的信噪比. 测量  $\Delta T$ 、 $V_s$  和  $V_n$ , 并按下式计算系统的  $NETD$ <sup>[6]</sup>:

$$NETD = \frac{\Delta T}{V_s/V_n}. \quad (7)$$

## 2.2 系统的调制传递函数 $H_s$ 的测试

用  $H_s$  描述系统的空间频率特性. 为了测量系统的  $H_s$ , 需要一组不同空间频率的目标, 这里可直接利用测量热成像系统  $MRTD$  时所用的标准测试图(见图 1). 每组空间频率的图案均用薄金属板腐蚀而成, 其中包括 4 个条带, 条带的长宽比为 7:1.  $H_s$  的测试装置如图 2 所示. 环境温度片的发射率与黑体辐射源相同, 其中有可变孔径, 里面可装不同空间频率的标准测试图案. 图案金属板与环境片有着良好的热接触, 使图案金属板的温度为环境温度, 且发射率也相同, 4 条带标准测试图案的温度则为黑体辐射源温度<sup>[6]</sup>.

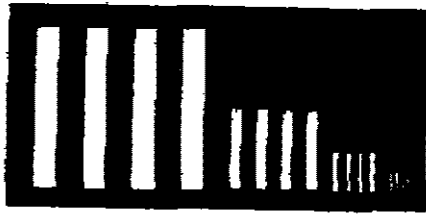


图 1  $H_s$  的测试图案

Fig. 1 The pattern for testing  $H_s$ .

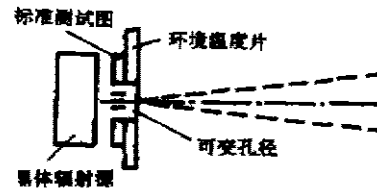


图 2  $H_s$  的测试装置

Fig. 2 The setup for testing  $H_s$ .

测试  $H_s$  时, 使黑体源升至一定的温度后保持不变, 即被测试图案(目标)与环境的温差  $\Delta T$  恒定; 并保持系统到标准测试图案的距离不变. 然后, 对于不同空间频率的测试图案, 分别测量扫描探测系统输出的相应信号的幅值  $V_s$ , 作出  $V_s$  随空间频率  $N_T$  变化的曲线  $V_s(N_T)$ , 进行归一化处理, 即得到系统的调制传递函数  $H_s(N_T)$ .

## 2.3 系统 $MRTD$ 和 $MDTD$ 的计算

根据式(5), 很容易通过计算得到系统的  $MRTD$ , 即对于测试  $H_s(N_T)$  的每个空间频率  $N_T$ , 将相应的  $H_s$  值和系统的  $NETD$  代入式(5), 就得到空间频率为  $N_T$  时的  $MRTD(N_T)$ .

根据式(4)可得:

$$MDTD\left(\frac{1}{2B}\right) = \frac{1.5\sqrt{2}H_s \cdot B^2}{\omega \cdot R^2} \cdot MRTD\left(\frac{1}{2B}\right), \quad (8)$$

式(8)中,  $\frac{1}{2B} = N_T$  为空间频率;  $B$  为测试  $H_s$  时标准 4 条带图案的条带宽度;  $R$  为测试  $H_s$  时标准图案到系统的距离;  $\omega$  为系统的瞬时视场立体角. 将每一种空间频率  $N_T = \frac{1}{2B}$  的  $MRTD$  代入式(8)中, 经计算可得相应空间频率的  $MDTD$ .

需要指出的是,为了保证式(2)对于式(1)的等效性,必须使最小空间频率目标的线度  $B$  对系统所张的立体角  $B^2/R^2$  比系统的瞬时视场立体角  $\omega$  小得多. 因此,在测量系统的  $H_s$  时应根据这一要求选定系统到标准图案的距离  $R$ .

#### 2.4 系统理想作用距离 $R_0$ 的估算

式(6)是扫描探测系统的作用距离方程. 式(6)表明,系统的作用距离与  $\Delta T^{1/2}$  成正比,与系统输出信噪比的平方根成反比. 信噪比  $SNR$  等于 1 时的作用距离即为理想作用距离. 所以,对于与背景的温差为  $\Delta T$  的点源目标,系统的理想作用距离  $R_0$  为

$$R_0 = \left( \frac{\Delta T \cdot A_s}{\omega \cdot NETD} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

测得系统的  $NETD$  后,就可以依据上式估算系统的理想作用距离.

### 3 讨论

本文以系统输出的  $SNR$  为依据,用热成像系统的性能参数来描述扫描探测系统的综合性能;推导了扫描探测系统的作用距离与噪声等效温差  $NETD$  之间的关系. 研究表明,根据系统的  $NETD$ 、 $R$ 、 $MRTD$  和  $MDTD$  之间的关系,只要测得系统对于扩展源的  $NETD$  和系统的调制传递函数  $H_s$  (即系统的空间频率特性),就可方便地得到系统的  $MRTD$  和  $MDTD$ ,并可估算出系统的理想作用距离  $R_0$ . 这样,通过测量  $NETD$  和  $H_s$ ,就可以得到系统的  $NETD$ 、 $H_s \sim N_T$  特性曲线、 $MRTD \sim N_T$  特性曲线、 $MDTD \sim N_T$  特性曲线和理想作用距离  $R_0$ . 有了这些参数和特性曲线,就能够较全面地衡量扫描探测系统的综合性能.

文献[4]推导了信号处理系统满足最大信噪比的条件,即系统带宽  $\Delta f$  与探测器驻留时间  $\tau_d$  的乘积约为 0.68 时,扫描探测系统  $NETD$  的表达式为

$$NETD = 1.09 \frac{\lambda_p A_d^{1/2} T_B^2}{\tau_d A_0 \tau_0 D_s^* (\lambda_p) \tau_d^{1/2}} \cdot \frac{\pi}{\omega \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(T_B) d\lambda}. \quad (10)$$

这样,通过式(3)、(5)、(6)和(10),就将扫描探测系统的各项性能参数与系统的结构参数联系起来,成为系统设计和性能评估的重要依据.

#### 参考文献

- 1 杨宜禾,岳敏. 激光与红外,1989,19(1):37~38
- 2 杨宜禾,周维真. 成像跟踪技术导论,西安:西安电子科技大学出版社,1992:1~2,108~109
- 3 杨应槐,石峰. 红外与激光技术,1989,(1):17~19
- 4 陈汝钧. 红外与毫米波学报,1996,13(3):165~168
- 5 Loyd J M. *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
- 6 陈玻若. 红外系统,北京:国防工业出版社,1988:275~277

**RESEARCH ON DESCRIPTIONS AND TESTING METHODS  
OF SYNTHETIC FIGURES OF MERIT  
FOR IR SCANNING DETECTING SYSTEMS**

Chen Rujun

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

**Abstract** Taking the output signal-to-noise ratio (*SNR*) of systems as a criterion, the relationships among the detecting distance *R*, the noise equivalent temperature difference *NETD*, the minimal resolvable temperature difference *MRTD*, the minimal detectable temperature difference *MDTD* and the modulation transfer function of IR scanning detecting systems (*SDS*) were established. The testing methods for these figures of merit were also studied. As a result, the bases of the synthetic performance evaluation and the practical testing methods of IR *SDS* were provided.

**Key words** IR system, scanning detecting system, performance evaluation, IR system, testing of performances