

文章编号: 1672-8785(2017)05-0027-04

## 基于 NETD 的红外探测系统作用距离分析

罗振莹<sup>1,2</sup> 白璐<sup>1,3\*</sup> 宁辉<sup>2</sup> 关小伟<sup>2</sup> 吴振森<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西西安 710071;

2. 西北核技术研究所, 陕西西安 710024;

3. 西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心, 陕西西安 710071)

**摘要:** 由于红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Array, IRFPA) 已成为红外探测器发展的主流, 用 IRFPA 的参数来评价红外探测系统的综合性能变得至关重要。推导了以噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 参数表示的红外探测系统的作用距离方程, 考虑了背景辐射和目标成像弥散效应对探测的影响, 计算了不同能见度条件下系统对点源目标的作用距离。结果表明, 大气能见度越好, 红外探测系统的作用距离就越远。分析了红外探测系统的探测能力随 NETD 值的变化。随着 NETD 值的增大, 红外探测系统对目标的作用距离显著减小。研究结果能为红外探测系统的设计和性能指标评价提供参考。

**关键词:** NETD; 红外探测系统; 作用距离

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.05.005

## Analysis of Operating Range of Infrared Detection System Based on NETD

LUO Zhen-ying<sup>1,2</sup>, BAI Lu<sup>1,3\*</sup>, NING Hui<sup>2</sup>, GUAN Xiao-wei<sup>2</sup>, WU Zhen-sen<sup>1</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University,

Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an Shaanxi 710024, China;

3. Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding,

Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Since Infrared Focal Plane Arrays (IRFPA) have become the main stream in the development of infrared detectors, the use of IRFPA parameters to evaluate the comprehensive performance of an infrared detection system is very important. The operating range equation of an infrared detection system represented by Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) is deduced. Considering the influence of background radiation and target imaging dispersion effect on detection, the operating range of a system for a point target under different visibility conditions is calculated. The result shows that the better the visibility is, the farther the operating range of the infrared detection system is. The variation of the detecting capability of the infrared detection system with NETD is analyzed. With the increase of NETD, the operating range of the infrared detection system for the target decreases remarkably. The research result is of referential value to the design and performance index evaluation of infrared detection systems.

**收稿日期:** 2017-02-15

**作者简介:** 罗振莹 (1976-), 女, 陕西蓝田人, 博士生, 主要从事红外辐射传输方面的研究。 E-mail: lzy\_ml@163.com

**\* 通讯作者:** 白璐 (1973-), 教授, 博导, 主要从事目标光散射特性研究。 E-mail: blu@xidian.edu.cn

**Key words:** noise equivalent temperature difference; infrared detection system; operating range

## 0 引言

随着 IRFPA 技术的发展,以 IRFPA 为核心探测器件的各种红外热像仪在军事和民用等领域的应用日益广泛和深入。利用这些系统能够实现对于导弹、飞机等远程红外目标的预警、识别、快速探测与跟踪等。

当目标张角小于红外系统的瞬时视场时,可以认为目标是点辐射源。对于点辐射源的探测主要是对辐射源发出的红外辐射能量的探测。红外系统所接收到的目标辐射能量与其间隔的距离密切相关。距离越远,则接收到的能量越小。与系统能接收到的最小可用能量相应的距离称为红外系统的作用距离<sup>[1]</sup>。在目前的实际应用中,研制和使用的绝大多数红外探测系统都是由高性能热像仪和相应的光学系统构成,景物的热辐射经光学系统成像在 IRFPA 上,形成热辐射图像;信号处理系统通过采集和处理图像并利用算法提取目标信号,实现对目标的跟踪和测量。为了实现对目标的有效探测以及在研制和使用阶段实际评估红外探测系统的性能,需要研究红外系统对特定目标的作用距离。作用距离作为红外探测系统的综合性能评价指标,一直以来都是众多科研工作者研究的重点<sup>[5]</sup>,人们已经开展了许多研究工作<sup>[2-4]</sup>。但由于红外系统应用相当广泛,对系统的设计目的、应用背景、使用环境、潜在探测目标的红外辐射特性、探测精度的要求等差别很大。所以,在针对不同的应用目的和关注点研究并讨论具体红外探测系统的作用距离时,仍需要进行具体分析。

由于评价红外系统作用距离的传统方法仅适用于单元探测器加光机扫描方式探测的情况,随着 IRFPA 越来越广泛地作为核心探测器,需要对评价方法进行修订和改进。*NETD* 是红外热像仪通常给出的一个指标,因此需要研究以 *NETD* 表示的作用距离方程。本文推导了适用于以 IRFPA 作为探测器的红外系统的作用距离

方程,讨论了 *NETD* 参数变化对系统探测能力的影响,结论对实际红外探测系统的综合评价具有实用意义。

## 1 传统的作用距离方程

在不考虑背景辐射的影响时,由 R.D. 小哈得逊给出的普遍的红外系统的作用距离方程<sup>[6]</sup>为

$$R = \left[ \frac{I_t \cdot A_0 \cdot D^* \cdot \tau_0 \cdot \tau_a}{(A_d \cdot \Delta f)^{1/2} \cdot SNR} \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $R$  为红外系统的作用距离;  $A_0$  为光学系统的入瞳面积;  $D^*$  为探测器的比探测率;  $\tau_a$  和  $\tau_0$  分别为大气和光学系统透过率;  $I_t$  为目标辐射强度;  $A_d$  为探测器面积;  $\Delta f$  为噪声等效带宽;  $SNR$  为系统工作时所需的最小信噪比。

传统作用距离方程建立的基础是辐射能量在大气中的传播与接收。由点源目标发出的辐射强度经大气传输后,按照辐射传输的平方反比定律传输到接收系统的光瞳处,致使位于光学系统焦面处的探测器产生信号电压;信号电压与探测器噪声电压之比即整个系统的信噪比;系统探测的最低信噪比决定了能够探测的最远距离。从方程的建立过程可以看出,该方程考虑了目标辐射强度、光学系统、探测器性能和信号处理等因素,这些都是红外系统作用距离进一步研究的基础。但它还存在不足,一是没有考虑背景辐射和成像弥散效应对目标探测的影响;二是对于热成像探测而言,目标—背景的温差即辐射对比度是影响探测效果的关键。

## 2 *NETD* 表示的作用距离方程

利用热成像系统观察图 1 的标准试验图案。当基准化电路输出端产生的峰值信号与均方根噪声之比为 1 时,图 1 中目标与背景之间的温差称为 *NETD*。 $T_T$ 、 $T_B$  分别为目标温度、背景温度。*NETD* 是表征系统受信噪比限制时对温度分辨率的一种度量,是评价系统综合性能的重要指标之一。

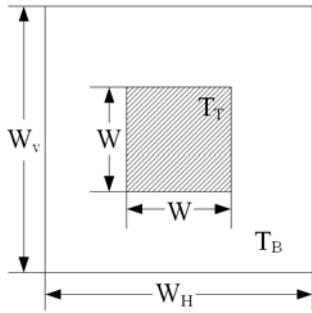


图 1 NETD 测试图案

根据上述定义, NETD 由下式计算:

$$NETD = \frac{\Delta T}{\Delta \nu_s / \nu_n} \quad (2)$$

式中,  $\nu_n$  是基准电路输出的噪声的均方根值,  $\Delta \nu_s$  是目标与背景之间的温差为  $\Delta T$  时输出端目标信号与背景信号之差。

热像仪的 NETD 表达式为<sup>[1]</sup>

$$NETD = \frac{\pi(A_d \cdot \Delta f)^{1/2}}{\Omega \cdot A_0 \cdot \tau_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda} \quad (3)$$

式中,  $\Omega$  为系统的瞬时视场立体角,  $M_\lambda$  为目标的光谱辐射出射度。  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  为红外探测系统的有效工作波段。

由于热像仪的 NETD 参数的温度分辨率主要是通过分母中的积分项来体现, 在此, 有必要对其进行讨论。

设  $\lambda_p$  为探测器的峰值波长,  $D^*(\lambda_p)$  是峰值波长的光谱归一化比探测率。式 (3) 中, 积分项中的微分  $\frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T}$  是在相对背景温度  $T_B$  下光谱辐射出射度  $M_\lambda(T_B)$  对温度求导。将积分项中的  $D^*(\lambda)$  按峰值波长  $\lambda_p$  取相对值  $D^*(\lambda)/D^*(\lambda_p)$ , 于是积分项变为

$$\begin{aligned} & \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda \\ &= D^*(\lambda_p) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{D^*(\lambda)}{D^*(\lambda_p)} \cdot \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda = D^*(\lambda_p) \frac{\Delta M}{\Delta T} \end{aligned} \quad (4)$$

对于光子探测器, 在单位波长间隔内辐射功率不变的情况下, 光子探测器的响应随波长线性上升, 到某一截止波长后突然下降为零。因

此, 光子探测器的光谱归一化比探测率  $D^*(\lambda)$  满足不等式

$$D^*(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_p} D^*(\lambda_p) & \lambda \leq \lambda_p \\ 0 & \lambda > \lambda_p \end{cases} \quad (5)$$

并且在中红外波段, 通常满足  $e^{c_2/(\lambda T)} \gg 1$  ( $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ , 为第二辐射常数)。则

$$\frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} \cong \frac{c_2}{\lambda T_B^2} M_\lambda(T_B) \quad (6)$$

在上述两项条件下, 有

$$\frac{\Delta M}{\Delta T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{\lambda_p} \frac{c_2}{\lambda T_B^2} M_\lambda(T_B) d\lambda = \frac{c_2}{\lambda_p T_B^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(T_B) d\lambda \quad (7)$$

至此, NETD 的表达式为

$$NETD = \frac{\pi(A_d \cdot \Delta f)^{1/2}}{\Omega \cdot A_0 \cdot \tau_0 \cdot D^*(\lambda_p) \frac{c_2}{\lambda_p T_B^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(T_B) d\lambda} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (1), 并将探测器峰值波长用红外探测系统的工作波长上限代入, 得到用 NETD 参数表达的红外探测系统的作用距离方程

$$R = \left[ \frac{I_t \cdot \tau_a \cdot \pi}{\Omega \cdot (NETD) \cdot SNR \cdot \frac{c_2}{\lambda_2 T_B^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(T_B) d\lambda} \right]^{1/2} \quad (9)$$

在测量 NETD 时, 背景的辐射出射度积分可由下式计算得到:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(T_B) d\lambda = \varepsilon \cdot [F(\lambda_2 T_B) - F(\lambda_1 T_B)] \cdot \sigma T_B^4 \quad (10)$$

式中,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  为斯蒂芬常数,  $\varepsilon$  为目标表面发射率。黑体相对幅出度函数为  $F(\lambda T) = M_{0\sim\lambda}/M_{0\sim\infty}$ , 通过查算黑体相对幅出度函数表可以较方便地计算出  $F(\lambda T)$ 。

### 3 背景辐射对探测的影响

在红外系统对目标进行探测时, 由于进入光学系统入瞳处的辐射通量不可避免地包含背景辐射, 因此需要对传统的红外系统作用距离方程进行修正, 方程表达式要将目标所处的背景辐射对探测的影响考虑在内。

均匀背景辐射产生的影响之一是, 由于与背景的辐射差, 探测到的目标辐射小于无背景辐射时的值。在有背景辐射的情况下, 红外系统响应的不只是目标辐射, 而是目标与背景辐射之差<sup>[7]</sup>。

设均匀背景辐射的亮度为  $L_b$ , 目标的面积为  $A_t$ ,  $\varepsilon_b$  为背景辐射的发射率, 系统接收到的目标与背景辐射强度之差  $\Delta I$  为

$$\Delta I = I_t \cdot k - \varepsilon_b L_b A_t \quad (11)$$

为了弥补未考虑背景辐射影响的不足, 需要用系统接收到的目标背景辐射强度差  $\Delta I$  替换式 (9) 中的辐射强度; 并且由于系统对点源目标成像的弥散效果, 目标辐射强度需要考虑弥散系数  $k$  以及由系统信号处理损失等因素引入的系数  $\xi$ 。

因此, 基于 *NETD* 的红外成像系统的作用距离方程为

$$R = \left[ \frac{\Delta I \cdot \tau_a \cdot \pi \cdot \lambda_2 \cdot T_B^2}{\Omega \cdot (NETD) \cdot SNR \cdot c_2 \cdot \xi \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda(T_B) d\lambda} \right]^{1/2} \quad (12)$$

## 4 大气透过率

从红外辐射传播时的能量考虑, 大气透过率的数值越大, 系统的作用距离越远。而传输距离越远又意味着辐射在大气中的损耗越大, 即系统的作用距离会越近。因此, 利用方程 (12) 求解红外探测系统作用距离时, 需要考虑大气透过率随作用距离的变化, 并采用逐步逼近的方法来迭代求解<sup>[8]</sup>。否则, 计算结果可能会出现较大偏差。

## 5 实例计算

某型战斗机的大小为  $11.43 \text{ m} \times 4.66 \text{ m}$ , 温差为  $6 \text{ K}$ , 材料表面的发射率为  $0.65$ 。探测系统的瞬时视场角为  $3.8 \times 10^{-8} \text{ Sr}$ , 探测器的响应波段为  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ,  $300 \text{ K}$  时 *NETD* 为  $0.0783 \text{ K}$ , 信噪比为  $6$ , 信号处理损失因子  $\xi$  为  $3$ , 弥散系数  $k$  为  $0.2143$ 。当大气的环境参数为天空的背景亮度 ( $1.45 \text{ W/m}^2$ ), 大气的温度为  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度为

$60\%$ , 目标天顶角为  $60^\circ$  时, 不同能见度条件下该红外探测系统对目标的作用距离见表 1。由计算结果可知, 随着大气能见度的增大, 红外辐射在大气中传输的距离、探测系统的作用距离相应增加。

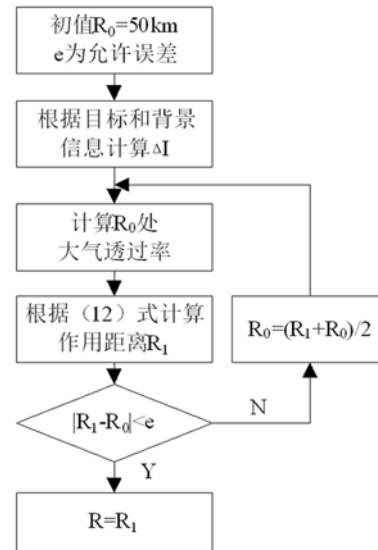


图 2 迭代求解流程图

表 1 不同能见度条件下系统的作用距离

Visibility /km	5	7	10	15	20
Range /km	25.9	31.5	38.2	41.6	43.8

## 6 NETD 对系统探测的影响

在使用较长周期之后, 红外系统的探测性能会随时间下降, 表现为对目标探测的作用距离变短。NETD 值作为衡量热像仪的关键指标, 一般是出厂时测试的。在利用出厂值对系统进行理论评估时, 计算的系统作用距离和实验值的差异应考虑是由 NETD 值变化导致的。能见度为  $5 \text{ km}$  时, 其它参数的计算同前。系统 NETD 值由  $0.05 \text{ K}$  变化到  $0.15 \text{ K}$  时, 系统对目标的作用距离由  $29.6 \text{ km}$  逐渐减小到  $21 \text{ km}$ 。由于热像仪 NETD 值的增大, 红外系统的探测距离不断减小, 探测性能明显下降。红外系统的作用距离随 NETD 值的变化如图 3 所示。

(下转第 43 页)