

文章编号: 1672-8785(2024)10-0014-07

分布式红外系统协同探测距离模型

祝家莹* 王淼妍 阎家亮 贾 鹏 李江勇

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 利用分布式多红外传感器协同探测同一目标后, 通过对多传感器目标图像进行像素级融合来提升信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR), 进而提高系统的探测能力。从单红外传感器探测距离出发, 阐述了分布式多红外系统协同探测的作用距离评估模型。推导了包含积分时间的噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)公式, 并用 NETD 表达了小哈德逊探测距离方程。采用多传感器图像融合的方式提升图像信噪比, 等效于延长积分时间, 抑制噪声、提高 NETD; 结合协同探测的虚警概率及探测概率关系公式, 为多红外传感器探测距离方程中的信噪比设置提供参考依据。分布式多红外系统探测距离评估模型综合考虑 NETD 和 SNR 两个维度因素。理论计算表明, 多传感器协同探测可以有效提升系统的探测距离, 为分布式红外系统的综合论证提供了重要的理论支撑。

关键词: 分布式红外; 协同探测; 探测距离; 噪声等效温差; 信噪比

中图分类号: TN211 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.10.003

Collaborative Detection Distance Model for Distributed Infrared Systems

ZHU Jia-ying*, WANG Miao-yan, CHUANG Jia-liang, JIA Peng, LI Jiang-yong

(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: After using distributed infrared sensors to detect the same target, the image of the multi-sensor target can be fused at pixel level to improve the signal-to-noise ratio (SNR), so as to improve the detection ability of the system. Starting with the detection range of a single infrared sensor, the range evaluation model of distributed multi-infrared system collaborative detection is described, and the noise equivalent temperature difference (NETD) formula is deduced including integral time. The Little Hudson detection range equation is expressed by NETD. The multi-sensor image fusion method is used to improve the SNR of the image, which is equivalent to extending the integration time and suppressing noise to improve NETD. Combined with the relation formula of the false alarm probability and detection probability, a reference for setting SNR in the detection range equation of multi-infrared sensors is provided. NETD and SNR are considered in the detection range evaluation model of distributed multi-infrared systems. Theoretical calculation shows that multi-sensor cooperative detection can effectively improve the detection range of the system, which provides important theoretical

收稿日期: 2023-11-05

作者简介: 祝家莹(1992-), 男, 北京人, 硕士, 主要从事机载光电总体设计研究。

*通讯作者: E-mail: zhujiaying17@163.com

support for the comprehensive demonstration of distributed infrared systems.

Key words: distributed infrared; cooperative detection; detection distance; noise equivalent temperature difference; signal-to-noise ratio

0 引言

近年来,在云技术、人工智能、大数据技术的不断推动下,美军相继提出了“空海一体化”、“战斗云”、“分布式空中作战”等一系列分布式作战新概念,使得各国非常重视协同作战体系发展和实战化运用。

分布式红外光电系统结合了被动探测和分布式结构特点,通过将多个红外传感器按照特定排列分布在单一/多个平台上,开展多部位、多传感器融合成像探测技术研究,实现了不同应用模式下的效能提升。

分布式红外系统中的每个红外传感器均为独立探测单元,由红外光学镜头、红外探测器以及红外机芯构成。此外,在每个红外传感器外壳上配置伺服偏转机电结构。每个传感器的成像视场方向均可独立控制。通过偏转机构将每个红外传感器协同指向同一位置的空间目标,并采用像素级图像融合算法对每个红外传感器所成图像进行叠加。融合后图像噪声降低,红外探测灵敏度增强,使分布式红外系统探测距离得到提升。

分布式红外系统协同探测是一种新型的热成像理论技术。其中,机载分布式红外系统已经得到初步验证。比如,美军 F-35 第五代战机上的超视距分布式红外系统,结合飞机外形设计,将 6 个红外传感器放在飞机不同位置上,通过协同探测降低杂波干扰来获得较高灵敏度,可实现对威胁目标的远距离探测。

红外协同探测系统采用完全被动的工作方式:目标与背景的红外辐射能量不同,经大气衰减后,由光学系统接收到红外探测器上,并经过光电转换成为可观察的图像。该系统具有精确的目标分辨能力、抗干扰能力和强隐蔽性,可装备在预警侦察机上,用于目标搜索、

红外远程预警探测与识别等领域。

在评价分布式红外探测系统的性能指标时,探测距离是一项最为关键的技术参数,决定了系统的整体性能,一直都是众多科研工作者研究的重点。红外探测距离的计算方法已有多种。通常 NETD 是红外热像仪的一个已知的重要参数,需要讨论其变化对红外系统探测距离的影响。文献[1-3]给出了用 NETD 评估红外系统探测距离的方法。此外,红外探测器的信噪比也是影响作用距离的重要参数,与红外系统的虚警概率和探测概率息息相关。也就是说,在保证低虚警率的前提下实现较高探测概率,提高红外系统的信噪比。文献[4-6]探讨了系统探测概率、虚警概率与信噪比对探测距离的影响。研究人员普遍针对单个红外系统的某一影响因素开展探测距离理论建模与计算,目前还没有相关文献建立完善的分布式多红外系统探测距离的理论模型。

为了分析分布式红外协同探测系统的探测距离,本文从影响探测距离的两个维度出发进行论证。用多个红外传感器协同探测同一目标后,对多传感器图像进行像素级融合,提升图像信噪比,等效于延长积分时间,抑制噪声、提高 NETD,从而有效增加系统的作用距离。此外,我们研究了多红外传感器系统的探测概率、虚警概率和信噪比之间的约束关系。在探测概率不变的前提下,协同探测可以降低信噪比,增大系统的作用距离。本文建立了基于定量分析的协同探测距离性能评估方法,为分布式协同探测距离的计算提供了理论依据。

1 单传感器红外探测距离推导

针对红外热成像探测距离的评估,NETD 是出厂时通常给出的指标,需要建立一种利用 NETD 计算的探测距离评估模型。首先推导包

含积分时间的 NETD 表达式, 然后利用 NETD 表达小哈德逊方程, 实现对红外成像系统探测距离的有效评估, 为分布式协同探测的探测距离提供论证基础。

1.1 包含积分时间的 NETD 推导过程

当系统中黑体目标的峰值信号输出和系统本身的均方根噪声相等(即信噪比等于 1)时, 两个黑体的辐射温度差(ΔT)即为 NETD。 $\Delta T = T_T - T_B$, 其中 T_T 为目标温度, T_B 为背景温度。NETD 常用来表征系统的温度分辨率。

NETD 的推导通常从黑体目标温度与探测器输出信号的关系着手。黑体的光谱辐射亮度为

$$L_\lambda = \frac{M_\lambda}{\pi} \quad (1)$$

式中, M_λ 为目标的红外光谱辐射出射度。红外传感器接收口径对目标的立体角为 $\pi D_0^2 / 4R^2$, D_0 为红外成像系统的通光口径, R 为红外系统与目标的距离。

若目标距离红外传感器较远, 需要考虑大气衰减的影响, 则红外通光孔径处的光谱辐照度为

$$E_\lambda = M_\lambda \frac{D_0^2}{4R^2} \tau_a(R) \quad (2)$$

式中, $\tau_a(R)$ 为路径 R 的大气透过率。

红外探测器接收到从面积为 $\alpha\beta R^2$ 的目标射来的辐射通量:

$$\Phi_\lambda = \frac{M_\lambda}{4} D_0^2 \alpha \beta \tau_a \tau_0(\lambda) \quad (3)$$

式中, $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统的透过率。目标辐射温度为 T_T , 背景辐射温度为 T_B , 则目标与背景的辐射温度差值为

$$\Delta\Phi_\lambda = \frac{M_\lambda(T_T) - M_\lambda(T_B)}{4} D_0^2 \alpha \beta \tau_a \tau_0(\lambda) \quad (4)$$

若 T_T 与 T_B 相差不大, 则

$$\Delta\Phi_\lambda = \frac{1}{4} \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} \cdot \Delta T \cdot D_0^2 \alpha \beta \tau_a \tau_0(\lambda) \quad (5)$$

式中, 微分表示背景温度为 T_B 时辐射出射度的变化率。

电压响应率为

$$R_v = \frac{D^* V_n}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \quad (6)$$

式中, A_d 为探测器单元的面积, D^* 为探测率, Δf 为噪声等效带宽。

信号电压 V_s 可以表示为

$$V_s = \Delta\Phi_\lambda \cdot R_v \quad (7)$$

热成像系统通常考虑波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$, 需将辐射出射度变化率进行积分, 则可得到信噪比公式:

$$\frac{V_s}{V_n} = \frac{D_0^2 \alpha \beta \tau_a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} \tau_0(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda}{4\sqrt{A_d \Delta f}} \Delta T \quad (8)$$

根据 NETD 的定义, 当信噪比等于 1 时, ΔT 即为 NETD 值。在测试系统 NETD 时, 黑体源距离红外系统非常近, 其中的大气衰减可以忽略不计, 因此

$$NETD = \frac{4\sqrt{A_d \Delta f}}{D_0^2 \alpha \beta \tau_a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} \tau_0(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

定义探测器单元的长宽分别为 a 、 b , 即 $A_d = ab$, $\alpha = a/f$, $\beta = b/f$, 则式(9)变为

$$NETD = \frac{4F^2 \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{ab} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} \tau_0(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda} \quad (10)$$

在式(10)中, 噪声等效带宽与积分时间 τ_d 的关系式如下^[7]:

$$\Delta f = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{2\tau_d} \quad (11)$$

因此, NETD 与积分时间的关系式为

$$NETD = \frac{2\sqrt{\pi} F^2}{\sqrt{ab} \cdot \sqrt{\tau_d} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} \tau_0(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda} \quad (12)$$

1.2 基于 NETD 的探测距离方程

根据小哈德逊探测距离公式, 结合 NETD 的表达式, 即可求出基于 NETD 的探测距离方程。经典的小哈德逊探测距离方程为

$$R = \left[\frac{D^* I \tau_a \tau_0 \pi D_0^2}{4 \sqrt{A_d \Delta f \text{SNR}}} \right]^{1/2} \quad (13)$$

式中, R 为探测距离; D^* 为探测器的探测率; I 为目标辐射强度; τ_a 为大气透过率; τ_0 为光学系统的透过率; D_0 为光学系统的通光口径; A_d 为单元探测器的面积; SNR 为系统输入信噪比。

结合 NETD 表达式和小哈德逊公式, 即可推导出基于 NETD 的探测距离方程:

$$R = \sqrt{\frac{I \cdot \tau_a \cdot \pi}{A_d \cdot \text{NETD} \cdot \text{SNR} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda} \cdot f} \quad (14)$$

式(14)中的辐射出射度变化率可以表示为

$$\frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} = \frac{c_1 c_2}{\lambda^6 T_B^2} \cdot \frac{\exp(c_2/\lambda T_B)}{[\exp(c_2/\lambda T_B) - 1]^2} \quad (15)$$

式中, c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

2 分布式红外协同探测距离分析模型

为了分析分布式红外协同探测系统的探测距离, 根据式(14), 本文从探测距离中的 NETD 和信噪比两个维度出发进行论证。用多个红外传感器协同探测同一目标后, 对多传感器图像进行像素级融合, 提升图像信噪比, 等效于延长积分时间, 抑制噪声、提高 NETD, 进而增加系统的探测距离。另一方面, 研究了红外系统的探测概率、虚警概率和信噪比之间的约束关系。在探测概率不变的前提下, 多红外传感器协同探测可以降低输入信噪比, 进而提升系统的探测距离。

2.1 NETD 对分布式协同探测距离的机理评估

根据式(10), 在相同的帧频和其它参数条件下, 探测器带宽的降幅与探测器的数量成正比^[8]。结合式(11)可知, 分布式多红外传感器协同融合探测的机理等效于延长积分时间, 抑制噪声、提高 NETD, 进而增加系统的探测距离。

在实际求解作用距离时, 大气透过率随距

离变化的公式如下^[9]:

$$t_a(\lambda) = \exp(-\gamma(\lambda)R) \quad (16)$$

式中, $\gamma(\lambda)$ 为大气衰减系数。因此式(14)可变为

$$R^2 \cdot \exp(\gamma(\lambda)R) = \frac{I \cdot \pi \cdot f^2}{A_d \cdot \text{NETD} \cdot \text{SNR} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T} d\lambda} \quad (17)$$

为了直观表达出 NETD 对分布式协同探测的影响, 计算积分时间与探测距离的关系曲线。将式(12)与式(14)中的参数赋值, 其中 $F=1$, $A_d=17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$, $D^*(\lambda)$ 被视为常数, ($D^*(\lambda)=1.2995 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$), $\text{SNR}=5$, $\lambda_1=8 \mu\text{m}$, $\lambda_2=14 \mu\text{m}$, $T_B=298.15 \text{ K}$, $\gamma(\lambda)=0.03 \text{ km}^{-1}$, $I=65 \text{ W/sr}$, $f=100 \text{ mm}$, $\tau_0=0.6$ 。

结合式(12)和式(14), 得到探测距离与积分时间的计算关系曲线如图 1 所示。可以看出, 探测距离随着积分时间的增加而增大。

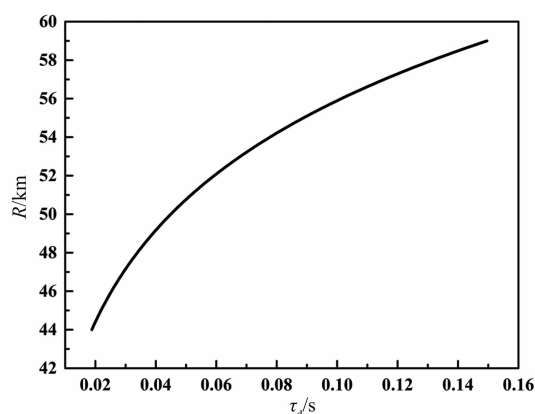


图 1 探测距离与积分时间的关系曲线

在红外热像仪应用中, 帧频通常作为已知参数, 而帧频与积分时间 τ_d 是密切相关的^[7], 即

$$\tau_d = \frac{1}{F_R \cdot ff} \quad (18)$$

式中, F_R 为帧频, ff 为填充因子。 ff 的定义如下:

$$ff = \frac{A_d}{pitch^2} \quad (19)$$

式中, A_d 为探测单元的大小, $pitch$ 为相邻探

测单元中心的距离。

假设红外探测器的帧频 F_R 为 50 Hz, 填充因子 ff 为 1, 则单个传感器的积分时间是 0.02 s。由图 1 可以得到表 1 所示的分布式红外协同探测结果。

表 1 分布式多传感器积分时间与探测距离的计算分析结果

传感器数量	τ_d/s	NETD/K	R/km
1	0.02	0.073	44.4
2	0.04	0.052	49.2
3	0.06	0.042	52.1
4	0.08	0.036	54.2
5	0.10	0.033	55.9
6	0.12	0.030	57.3

从表 1 可以看出, 在分布式红外协同探测系统中, 每个传感器存储一张红外图像, 6 个传感器共存储的 6 张图像进行叠加融合, 等效于积分时间延长 6 倍, 探测距离比采用单传感器时提升 29%, 即从 44.4 km 提升到 57.3 km。

2.2 信噪比对分布式协同探测距离的机理评估

红外系统主要用于目标的探测、分类和识别。为了保持较高的探测概率和较低的虚警概率, 目标辐射必须具有一定的信噪比。随着设计水平和制造工艺的提升, 当前红外探测系统的噪声主要来源于探测器。探测器的噪声信号符合高斯分布。实际上, 探测器的输入信噪比超过阈值信噪比的概率就是探测概率。红外探测器的探测概率为^[5,10]

$$P_d(SNR) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{SNR-TNR} \exp(-\frac{\rho^2}{2}) d\rho \quad (20)$$

式中, SNR 为探测器的输入信噪比, $SNR = V_s/V_n$; TNR 为探测器的阈值信噪比, $TNR = (V - V_a)/V_n$; ρ 为积分变量, $\rho = (V - V_a - V_s)/V_n$ 。

探测概率是指目标出现在红外成像系统的瞬时视场时, 系统成功探测到目标的概率; 而虚警概率是指系统对目标进行多次独立探测时误判的概率, 即目标实际不存在, 但系统却错

误地探测到目标的概率。由于探测概率是在特定的虚警概率下计算得到的, 因此有必要对虚警概率进行计算, 其公式为

$$P_f(TNR) = \exp(-\frac{TNR^2}{2}) \quad (21)$$

从式(21)可以看出, 虚警概率只取决于阈值信噪比 TNR 。

根据式(20), 当 TNR 取值一定时, 即可得到探测概率与信噪比之间的关系, 其计算曲线如图 2 所示。

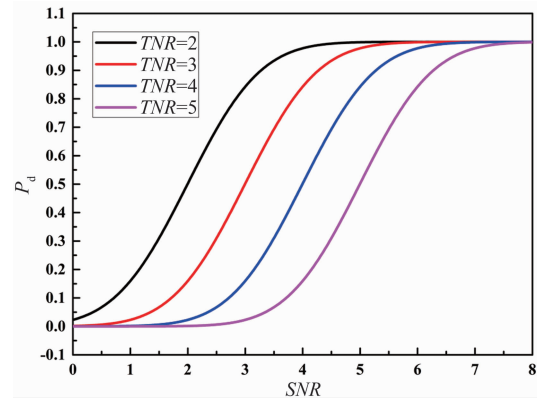


图 2 不同阈值信噪比下探测概率与信噪比的关系曲线

根据式(21), 当 TNR 分别取 2、3、4、5 时, 虚警概率分别为 0.1353、0.0111、 3.355×10^{-4} 、 3.727×10^{-6} 。结合图 2 中的曲线可知, 在同样的信噪比下, 阈值信噪比越高, 虚警概率越低, 但是探测概率也在下降。表 2 列出了探测概率与信噪比的数值。

表 2 探测概率与信噪比的数值关系

P_d	1	0.8	0.6	0.4	0.2
SNR($TNR=2$)	4.59	2.84	2.24	1.75	1.15
SNR($TNR=3$)	5.57	3.83	3.25	2.74	2.15
SNR($TNR=4$)	6.57	4.84	4.25	3.75	3.16
SNR($TNR=5$)	7.58	5.83	5.26	4.75	4.15

分布式红外系统对同一目标协同探测时, 单个红外传感器系统的阈值信噪比 TNR 可以较低, 进而提高探测概率。 n 个红外传感器系统探测时的虚警概率和探测概率计算公式如下^[11]:

$$\begin{aligned} P'_f &= P_{f1} \cdot P_{f2} \cdot P_{f3} \cdots P_{fn} \\ P'_d &= P_{d1} \cdot P_{d2} \cdot P_{d3} \cdots P_{dn} \end{aligned} \quad (22)$$

根据探测概率与信噪比的计算曲线图, 当单个传感器的探测概率 $P_d = 98\%$ 、 $SNR = 5.00$ 时, 其阈值信噪比 TNR 为 3.00; 根据式(21)可知, 其虚警概率 $P_f = 1.11\%$ 。

当子孔径个数为 2 时, 需要保证协同融合后的虚警概率不变。根据式(22), 单个红外传感器系统的虚警概率即可提高到 10.54%; 根据式(21), 相应的阈值信噪比 TNR 降为 2.1213; 根据式(20), 探测概率 98% 对应的信噪比 SNR 降为 4.18。

结合式(20)、式(21)和式(22), 在相同的探测概率 P_d 和输入信噪比 SNR 情况下, 分布式传感器个数与协同后的输入信噪比数值如表 3 所示。可以看出, 当协同的传感器个数增加时, 分布式协同后的输入信噪比会降低, 即单传感器的输入信噪比为 5、分布式协同传感器个数为 6 时, 协同后的信噪比变为 3.29。

表 3 分布式多传感器协同前后的信噪比数值

传感器数量	探测概率 P_d	协同前单传感器参数 SNR	协同后多传感器参数 P_f'	协同后多传感器参数 P_{fi}	协同后多传感器参数 SNR
1	98%	5.00	—	—	—
2	98%	5.00	1.11%	10.54%	4.18
3	98%	5.00	1.11%	22.31%	3.78
4	98%	5.00	1.11%	32.46%	3.56
5	98%	5.00	1.11%	40.65%	3.40
6	98%	5.00	1.11%	47.23%	3.29

根据 NETD 对分布式协同探测距离的影响评估, 6 个传感器融合探测且 $SNR = 5$ 时, NETD 值为 0.03 K, 其他参数不变。根据式(17)得到的探测距离与信噪比的关系如图 3 所示。由表 3 可知, 当 6 个子孔径协同探测时, 信噪比从 5.00 变成 3.29。结合图 3 可知, 探测距离从 57.3 km 提升到 63.8 km, 即提升了 11.3%。

3 结束语

本文对红外探测系统的 NETD 进行详细推导并用其表达小哈德逊公式, 然后从探测距离公式中的 NETD 和信噪比两个维度出发,

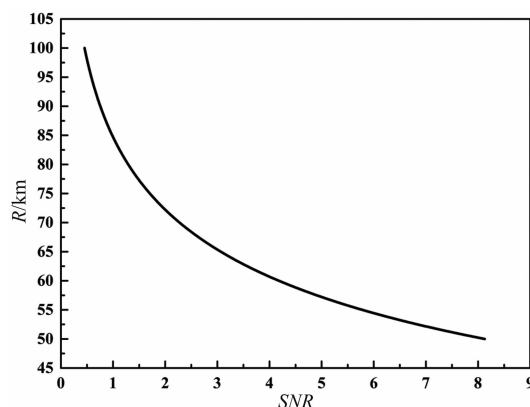


图 3 探测距离与信噪比的关系曲线

研究了分布式多红外传感器协同探测距离模型。首先, 红外探测器带宽的降幅与探测器的数量成正比, 多红外传感器图像叠加融合即等效于延长积分时间, 抑制噪声、提高 NETD, 进而增加系统的探测距离。其次, 探测概率和虚警概率中的信噪比也是衡量探测距离的重要因素。计算了分布式协同探测信噪比对探测距离的影响。

在 6 个传感器协同探测距离的计算实例中, 当每个传感器存储一张图像并进行融合叠加时, 在 NETD 和信噪比两个维度下, 探测距离共提升了 43.7%, 即从采用单传感器时的 44.4 km 提升到采用 6 个传感器时的 63.8 km。

本文通过计算多传感器协同后的探测距离, 为分布式多红外传感器协同探测性能的实践提供了理论依据。此外, 提高分布式多传感器协同融合的位置精度和时间基准精度(即相应的配准误差理论), 将是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] 罗振莹, 白璐, 宁辉, 等. 基于 NETD 的红外探测系统作用距离分析 [J]. 红外, 2017, 38(5): 27-43.
- [2] 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, 37(S2): 493-496.
- [3] 王小兵, 贾国伟, 洪普. 利用 NETD 评估红外系统探测距离的方法研究 [J]. 光学与光电技术,

- 2020, **18**(2): 32–37.
- [4] 钟伟, 刘辉, 许松, 等. 红外点目标探测系统中标准正态分布函数的工程计算 [J]. *空军预警学院学报*, 2016, **30**(2): 102–105.
- [5] 毛峡, 常乐, 刁伟鹤. 复杂背景下红外点目标探测概率估算 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, **37**(11): 1429–1434.
- [6] 郭晓东, 左志高, 岳松, 等. 红外点目标探测系统的作用距离理论模型分析 [J]. *红外*, 2019, **40**(7): 18–25.
- [7] Redjimi A, Kneevi D, Savi K, et al. Noise equivalent temperature difference model for thermal imagers, calculation and analysis [J]. *Scientific Technical Review*, 2014, **64**(2): 42–49.
- [8] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, **68**(10): 2267–2336.
- [9] 路远, 冯云松, 凌永顺, 等. 飞行器尾焰红外辐射及其被动测距 [J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(7): 1660–1664.
- [10] 斯仁, 吉洪湖, 冯晓星, 等. 采用低发射率红外材料对探测距离和概率的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(2): 442–448.
- [11] 熊蓉玲. 红外系统协同探测性能分析 [J]. *激光与红外*, 2016, **46**(5): 575–577.