

红外探测系统性能评估方法综述

寇人可^{1,2}, 王春平¹, 张勇², 唐攀攀², 黄富瑜¹, 付强¹

(1. 陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 95084 部队, 广东 佛山 528000)

摘要: 红外探测属于无源被动探测技术, 可辅助或代替雷达对目标进行探测, 其中关键的战技指标是作用距离, 而作用距离评估一直是研究的难点和热点。针对目前红外探测系统性能评估方法多样且效果差异较大的问题, 全面总结了现有的评估方法, 将其分为 5 大类, 分别是直观检查法、实验室标定法、外场实测法、仿真评估法以及交叉验证法。重点分析了每一类评估方法的优缺点, 并对本领域存在的问题和发展趋势进行了讨论分析。本综述不仅有助于初学者快速入门, 同时为促进该领域进一步研究提供参考。

关键词: 红外探测; 性能评估; 作用距离; 标定; 仿真评估; 交叉验证

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)12-1411-07

Performance Evaluation Methods for Infrared Detection Systems: a Review

KOU Renke^{1,2}, WANG Chunping¹, ZHANG Yong², TANG Panpan², HUANG Fuyu¹, FU Qiang¹

(1. Army University of Engineering Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China;

2. 95084 Unit of People's Liberation Army, Foshan 528000, China)

Abstract: Infrared detection is a passive detection technology with the potential to supplement radar in identifying targets. A crucial metric for this technology is its operating range, which has been a challenging yet popular area of research to evaluate. Considering the varied and starkly contrasting methods for assessing the performance of infrared detection systems, this review offers a thorough summary of existing evaluation techniques and categorizes them into five groups: visual inspection, laboratory calibration, field measurement, simulation evaluation, and cross-validation. In addition, a detailed analysis of the strengths and weaknesses of each evaluation method is provided. Finally, the challenges and future trends in this field are discussed and analyzed. This review is beneficial for beginners to start quickly and also provides a reference for further research in this field.

Keywords: infrared detection, performance evaluation, operating range, calibration, simulation evaluation, cross validation

0 引言

在复杂强电磁干扰环境下, 雷达探测近乎失效, 而红外探测系统作为一种被动探测设备, 具有作用距离远、抗干扰能力强、隐蔽性好、可全天时工作等诸多优势, 被广泛应用在机载、舰载、车载和星载的红外预警、侦察、精确制导等武器装备系统中^[1-3]。为了赢得复杂格局下的信息化战争, “先敌发现、先敌攻击、先敌摧毁”的作战模式^[4]将成为胜利的关键因素, 因

此往往要求红外探测系统具有较好的探测性能, 而评价探测性能最重要战技指标就是最大作用距离^[5]。

但由于红外探测属于无源被动探测技术, 它主要利用物体自身发出的红外辐射进行探测, 不需要外部能量源的支持。因此, 红外探测系统只能探测目标的方位和俯仰角, 而无法探测相对目标的距离。此外, 随着红外探测系统使用频次和时间的增加, 光学系统透过率会下降, 红外探测器的非均匀性、盲元以及系统内部电路老化等不确定因素, 均会导致最大作用距

收稿日期: 2023-09-13; 修订日期: 2023-10-18。

作者简介: 寇人可(1992-), 男, 陕西西安人, 工程师, 博士, 主要从事红外探测与目标识别等方面的研究。E-mail: krkoptics@163.com。

通信作者: 付强(1981-), 男, 河北石家庄人, 讲师, 博士, 主要从事图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: Fu_Qiang@aeu.edu.cn。

基金项目: 河北省自然科学基金(F2021506004)。

离与出厂时给出的指标产生严重偏差。

俗话说：“知己知彼，百战不殆”，如果我们将使用的红外探测系统的最大作用距离评估不准确，这将严重影响指挥员的决策。因此，本综述将聚焦于红外探测系统性能评估方法研究，特别是针对作用距离评估方法多样且效果不佳的问题，系统梳理了现有的5类评估方法，并讨论了每一类方法的适用范围及优缺点。

1 红外探测系统性能评估方法

在探讨红外探测系统性能评估方法时，本综述将其总结为5大类，即直观检查法、实验室标定法、外场实测法、仿真评估法以及交叉验证法。而每一类方法各有利弊，因此本章将详细讨论每一类方法的基本原理和研究进展。

1.1 直观检查

直观检查法是一种基础且直接的评估手段，主要通过观察红外探测系统在特定条件下的工作表现来初步判断其性能。这种方法依赖于评估者的专业知识和经验，通常用于快速筛查系统是否存在明显的故障或缺陷。例如，直接观察红外探测系统外观有无损坏、光学镜头有无磨损、通电检查系统是否正常工作、有无故障代码等。虽然直观检查法简单快捷，但其准确性和可靠性受限于评估者的主观判断和经验水平。且此类方法只能简单判断系统好坏，无法做出定性或定量评价。

1.2 实验室静态性能测评

为了深入研究红外探测系统内部器件特性，国内外很多学者利用各类测试装置分别对红外探测系统的系统噪声、信号传递函数（signal transfer function, SiTF）、调制传递函数（modulation transfer function, MTF）、最小可分辨温差（minimum discernible temperature difference, MRTD）、最小可探测温差（minimum detectable temperature difference, MDTD）以及探测器非均匀性等进行测评^[6]。

1.2.1 典型的红外探测系统性能测试平台

红外探测系统性能测试平台的硬件系统主要由黑体、可变光阑、透过率组片、平行光管、实验台架等组成^[2]，如图1所示。其中，各子部件的工作原理为：①根据目标的红外辐射传输特性，通过调节黑体温度来模拟目标的红外辐射强度；②通过可变光栏控制目标大小及形状，常见的测试靶标如图2所示；③通过改变透过率组片的衰减系数，模拟大气透过率；④准直仪确保了出射光栏的红外辐射光为平行光，用来模拟无穷远的传输距离；⑤设备台架承载以上实验设备，方便携行。

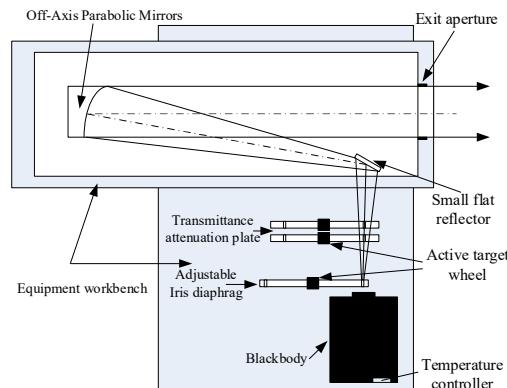


图1 性能测试平台设计图

Fig.1 Design diagram of performance testing platform

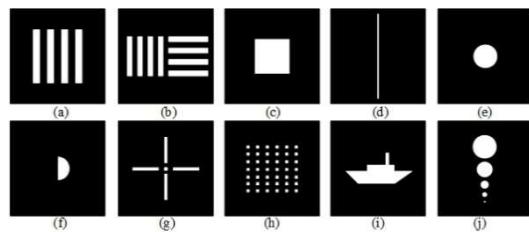


图2 常用的测试靶标：(a) 四杆靶；(b) 双四杆靶；(c) 方形靶；(d) 狹缝靶；(e) 圆孔靶；(f) 刀口靶；(g) 十字交叉靶；(h) 栅格靶；(i) 特殊目标轮廓靶；(j) 多圆孔靶

Fig.2 Common test targets (a) Four pole target; (b) Double four pole target; (c) Square target; (d) Narrow slit target; (e) Round hole target; (f) Knife target; (g) Cross target; (h) Grid target; (i) Special target contour target; (j) Multi circular hole target

1.2.2 系统噪声特性测量

系统的噪声会明显降低红外探测系统的作用距离及成像质量（主要针对凝视型探测器），从而限制探测目标的能力。噪声在系统中表现出多种形式，主要包括：1/f、散粒噪声、带宽漂移、闪烁、非均匀性噪声等。由于噪声的瞬态特性，它们产生的影响可能很难被量化。因此，D'Agostino 和 Webb 提出了基于三维噪声模型的噪声分析方法^[7]，可以客观、全面地测量系统噪声。

为了表征系统的总噪声信息，通常引入噪声等效温差（noise equivalent temperature difference, NETD）的概念。NETD 值被定义为模拟视频信号输出端的峰值信噪比为 1 时，所要求的黑体目标与背景之间的温差。NETD 的测量如式(1)所示：

$$\text{NETD} = \frac{V_n}{\text{SiTF}} \quad (1)$$

式中： V_n 为信号线的均方根噪声值；SiTF 为待测红外成像系统的信号传递函数。

1.2.3 信号传递函数测量

SiTf 是评价红外探测系统的关键技术指标之一,它是响应度函数的线性部分,表示在目标尺寸固定、目标强度固定可变情况下输入与输出的变换关系^[8]。

具体的测试步骤如下:①检查图 1 测试平台,记录环境温度并将增益固定;②逐步改变源强度 ΔT_i ,测量出目标及背景间的输出电压差 ΔV_i ;③用平均准直仪透过率和平均大气透过率乘以各 ΔT_i ,即在红外探测系统入瞳窗口处获得 ΔT ;④标出所有数据点,用最小二乘法对测试数据的线性部分进行拟合;⑤计算 SiTf。

1.2.4 调制传递函数的测量

MTF 是红外探测系统成像质量较为完善的评价指标。通常 MTF 的测试有 3 种方法^[6]:①建立在正弦信号和条带目标响应基础上的直接法;②建立在对所测量的线扩展函数傅里叶变换计算基础上的间接法;③由相干激光束或激光散斑法产生的杨氏干涉条纹法。

以上 3 种方法各有利弊,方法一虽然在视觉上非常有效,但对红外系统来说,正弦目标不易生成;方法二通过微分运算增强了噪声,使得合成的 MTF 含有掺杂;方法三由于激光是单一波长,生成的 MTF 不能代表多色 MTF。

1.2.5 最小可分辨温差测量

在热成像系统中, MRTD 是综合评价系统温度分辨率和空间温度分辨率的主要参数。目前, MRTD 的度量主要有 2 种方法^[9]:①主观测量法,即用人眼直接观察被测热像仪显示器上的靶标像;②客观度量法,主要包括视频采集 MTF 法、光度法和智能神经网络测试法。

为了更加简单、方便地测试 MRTD, 基于 NETD 和 MTF 测量值, 进行公式推演:

$$MRTD(f) = K(f) \cdot \frac{NETD}{MTF(f)} \quad (2)$$

式中: $K(f)$ 是目标空间频率函数。

表 1 常见探测器的非均匀性校正方法

Table 1 Common non-uniformity correction methods

	Category	Computational complexity	Corrective performance
Radiation source calibration	One point method	Very low	Bad
	Two point method ^[12]	Low	Better
	Multi-point ^[13]	Low	Better
	Polynomial fitting method ^[14]	Low	Better
Scene adaptation	Scenario statistics method ^[15]	Low	Good
	Constant system method ^[16]	High	Good
	Kalman filtering method ^[17]	High	Good
	Artificial neural network method ^[18]	High	Good

1.2.6 最小可探测温差测量

MRTD 也是综合评价热成像系统的重要参数之一,它的定义是:当观察者的观察时间不受限制时,在热成像系统显示屏上恰好能分辨出一定尺寸的方形或圆形目标及其所处位置时,目标与背景间的温差称为对应目标尺寸的最小可探测温差^[6]。因此,MRTD 是目标尺寸的函数,既可以反应系统的热灵敏特性,也可以反应系统的空间分辨力。

1.2.7 非均匀性测量

对于凝视型红外焦平面探测器,每一个探测单元对同样的外部输入的响应会出现偏差。因此,在红外探测过程中,非均匀性校正是必要环节。目前,关于红外探测器非均匀性校正主要分为 2 大类^[10-11]:基于辐射源定标的方法和基于场景自适应的方法,如表 1 所示^[12-18]。

1.2.8 半实物仿真评估

以上 1.2.2~1.2.7 小节的方法只是对系统内部某单一参数性能进行评价,很难综合评估系统探测性能及最大作用距离。因此,很多学者提出了基于半实物仿真的测量方法,这种方法是将数学模型与物理模型甚至是实物联合起来进行实验,因此可靠性较高。

刘博等人^[19]基于概率统计的标定方法,在一定先验知识基础上估算红外搜索跟踪 (infrared search and tracking, IRST) 系统作用距离;王领等人^[20]设计了双余度反馈 IRST 系统探测概率测试平台,可综合评估不同条件下被测对象的探测概率;王芳等人^[21]设计了机载光电雷达性能测试系统,可快速定性评估不同 IRST 系统性能的优劣;杨森等人^[22]设计了红外成像辐射校准系统,可实现对红外探测系统多参数的标定。虽然这些方法评估的准确性有一定提升,但只能做到定性评估和固定场景的定量评估。

1.3 外场动态性能测评

为了解决1.1~1.2小节“直观检查”和“实验室静态性能测评”无法定量评估不同场景、不同型号或者同一型号不同批次生产的红外探测系统最大作用距离的问题，最行之有效的方法是将红外探测系统放置在某固定观察位置，让指定目标（或靶板）按照预定的高度、速度和路线逐渐远离系统，当目标恰好丢失时，计算此时的探测距离即为该系统在设定条件下的最大作用距离^[23]。虽然此类方法数据准确、可信度高，但实验代价昂贵、耗时过长、灵活性差，会受到各类条件限制。

1.4 仿真评估

为了解决1.1~1.2小节“直观检查”和“实验室静态性能测评”无法定量评估，1.3小节“外场动态性能测评”代价过高、场地受限等问题，国内外很多学者^[24~30]利用数学建模的方法来仿真评估红外探测系统作用距离。从探测目标而言可分为点源目标和扩展源目标探测模型；从探测过程可分为水平探测和斜程探测模型；从探测原理可分为信噪比模型、噪声等效温差模型、噪声等效辐照度模型、最小可探测温差模型、对比度模型、光谱响应模型、传递函数模型、背景限制探测模型等。这些模型各有优缺点，适用于不同条件。下面主要从探测原理分析几种常见的模型：

1.4.1 基于信噪比模型

信噪比模型^[24]主要是以红外探测器接收的外界辐射能量所引起的电压响应是否满足与系统噪声阈值之间的比较关系为依据，当辐射能量引起的电压响应大于噪声阈值，则满足检测目标信号的条件，若小于噪声阈值，则无法检测目标。它的一般模型如式(3)所示：

$$\text{SNR} = \frac{I_t \tau_a \tau_0 \pi D_0^2 (NA) D^*}{4(A_d \Delta f)^{1/2} \cdot R^2} \quad (3)$$

式中： I_t 为点目标辐射强度； τ_a 为大气透过率； τ_0 为光学系统透过率； D^* 为比探测率； $D_0(NA)$ 为光学系统入瞳直径； A_d 为探测器光敏面积； Δf 为系统电路等效噪声带宽。

1.4.2 基于噪声等效温差模型

从引起噪声源角度考虑，当红外系统的噪声主要来自于探测器内部的噪声时，需要用到噪声等效温差作用距离模型^[25]：

$$\sigma R + 2 \ln R = \ln \left[\frac{S \cdot \Delta T_0}{\alpha \times \beta \cdot \text{NETD} \cdot (V_s / V_n)} \right] \quad (4)$$

式中： σ 是大气消光系数； α 和 β 分别是系统方位、俯仰的瞬时视场角； S 为目标在探测器视场方向的投影面积； V_s / V_n 为要求的极限信噪比； ΔT_0 为目标和背景之间的温差。

1.4.3 基于最小可分辨温差模型

当目标相对于红外系统的立体张角大于系统瞬时视场时，红外系统作用距离应该考虑面源目标的影响。最小可分辨温差距离模型^[26]可用于扩展源目标：

$$\text{MRTD}(R) = \sqrt{\frac{7}{m}} \cdot \frac{3 \text{NETD} \cdot f}{\text{MTF}(R)(t_e \cdot f_p \cdot \Delta f)^{1/2}} \cdot \frac{\alpha \times \beta}{t_d} \cdot \frac{RN_e}{a} \quad (5)$$

式中： m 是与目标尺寸相关的常数； f 为空间频率； t_e 为人眼积分时间； f_p 为红外探测器帧频； $\text{MTF}(R)$ 为系统传递函数； $\alpha \times \beta$ 表示探测目标瞬时视场方位俯仰乘积； t_d 为探测器驻留时间； N_e 为目标等效条带数； a 为目标长度。

从上述模型可以看出，红外系统作用距离与目标辐射特性、背景辐射、大气条件、系统性能、探测器工作特性、电路带宽、信噪比等因素密切相关。在上述作用距离公式基础上，寇人可等人^[1]优化了红外探测系统作用距离模型并讨论了作用距离与探测概率、虚警率之间的关系；王卫杰等人^[27]对空基红外系统作用距离进行了建模及分析；Gaitanakis 等人^[28]总结了IRST 系统在军事领域的发展趋势并仿真了某型IRST 系统在不同气象条件下的最大作用距离；Knežević 等人^[29]对红外热像仪的最小可分辨温差（MRTD）性能进行了仿真评估；Driggers 等人^[30]详细分析了IRST 系统各参数对作用距离的影响。

上述文献在仿真过程中各参数均按照理论值进行估计，从而导致仿真结果过于理想，与实际差别很大。

1.5 交叉验证评估方法

针对1.2~1.4小节红外探测系统作用距离评估方法的缺点，寇人可等人^[31]从相对折中的角度出发，提出了交叉验证评估方法。

该方法首先基于点目标辐照度等效模型，得出大气透过率和红外探测系统作用距离之间的关系曲线，如图3所示^[31]。可以看出，同一型号不同批次生产的4个IRST 系统，随着使用频次、维护、保养、保存方式的不同，尽管是同一型号的IRST 系统，但性能的衰减程度也存在差异。

然后，利用LOWTRAN 大气透过率软件可以推导出大气透过率与红外辐射传输距离之间的关系曲线，如图4所示^[31]。

最后，将图3和图4进行交叉验证，即可定量得到不同气象条件下，同一型号不同批次生产的红外探测系统的作用距离，如图5所示^[31]。可以看出，通过交叉验证方法可以便捷、高效、定量且精确地评估不同红外探测系统在不同气象条件下，对不同目标的最大作用距离。

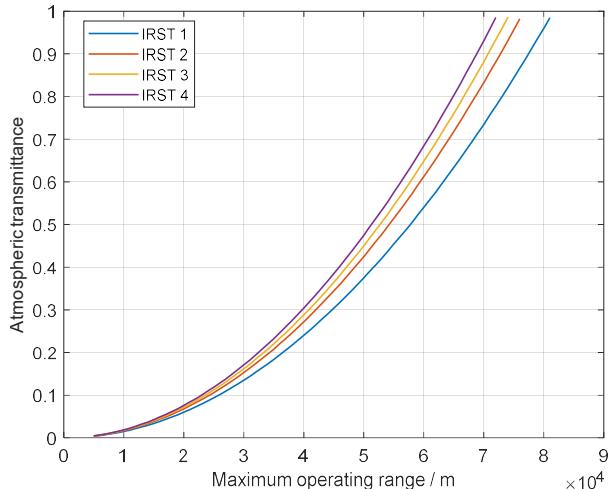


图3 大气透过率与红外探测系统最大作用距离之间的曲线关系
Fig.3 Curve relationship between atmospheric transmittance and maximum operating distance of infrared detection system

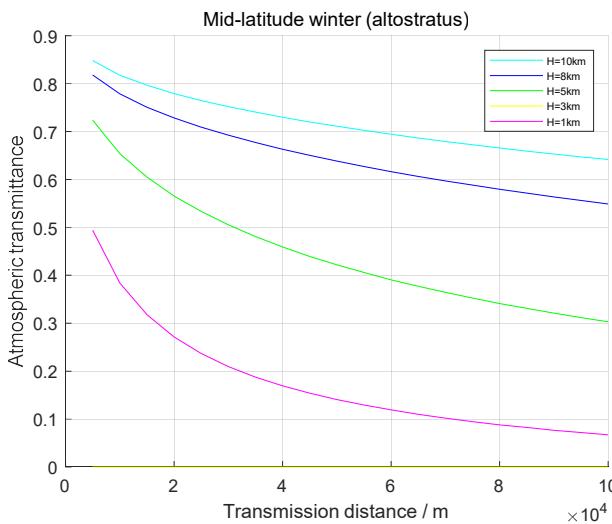


图4 大气透过率与红外辐射传输距离之间的曲线关系
Fig.4 Curve relationship between atmospheric transmittance and infrared radiation transmission distance

2 讨论分析

2.1 仿真与交叉验证评估优缺点分析

对于远距离点目标而言,进一步优化式(3),得到如式(6)所示的作用距离模型^[31]。

$$R_{\max} = \left[\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} (I_t(\lambda_1 - \lambda_2) + I'_t(\lambda_1 - \lambda_2) - L_b(\lambda_1 - \lambda_2)A_t) \cdot \tau(\lambda, R) d\lambda \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{\pi}{4} D_0^2 \tau_0 \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{D^*}{\sqrt{A_d}} \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{\delta}{(V_s/V_n) \sqrt{\Omega(1-q)}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中: I_t 和 I'_t 分别为目标辐射强度和目标反射背景辐射强度; τ 为大气透过率; τ_0 为光学系统透过率; $D_0(NA)$ 为孔径; D^* 为比探测率; A_d 为探测器光敏面积; SNR

为信噪比; δ 为信号过程因子; q 为扫描再重叠率; n 为光敏元数; Ω 为扫描总视场; T_f 为扫描周期; ω 为瞬时立体角; η_{sc} 为扫描效率。

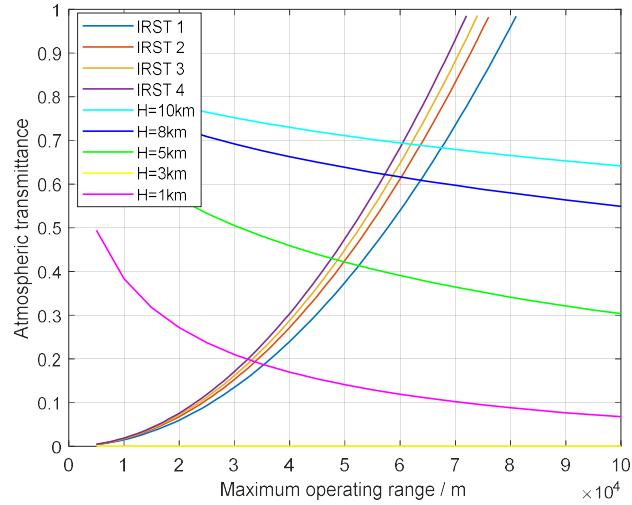


图5 交叉验证结果

Fig. 5 Cross validation results

从式(6)可以看出,影响红外探测系统作用距离的因素可以被分解为3个部分,分别是:目标红外辐射强度、大气透过率和探测系统内部参数。在仿真过程中,虽然计算高效且无成本代价,但很难准确估计探测系统内部的各个参数值,从而导致预测结果误差较大。同时,对于同一型号红外探测设备在限定条件下的最大作用距离仿真结果是一个定值。而交叉验证法可以不考虑红外探测系统的内部的工作原理及各参数的具体值,将其视为“黑盒”,只需通过标定法准确测得红外探测系统检测到目标时的极限辐照度。然后结合目标和大气透过率的仿真结果进行交叉验证,从而可以定量比较同一类型不同批次红外探测系统的最大作用距离。

2.2 综合对比分析

从本综述可以看出,红外探测系统性能评估方法主要分为5大类,分别是:直观检查法、实验室标定法、外场实测法、仿真评估法以及交叉验证法。这些方法各有利弊,如表2所示。

综合来看:“直观检查法”简单灵活代价低,但只能通过表征粗略判别系统状态;“实验室标定法”可以剖析系统内部某参数性能,但无法做到定量评估红外探测系统最大作用距离;“外场定量评估法”、“仿真评估法”和“交叉验证法”虽然可以对红外探测系统的作用距离进行评估,但各有利弊,它们的应用场景不同:
①“外场定量评估法”的精度相对最高,往往在红外探测系统定型交付之前,会进行外场实测评估,但该方法人工、时间等成本代价过高,在后期使用过程中用户无法自行完成评估任务;
②“仿真评估法”作为学术理论

表2 评估方法对比分析

Table 2 Comparative analysis of evaluation methods

Methods	Working status	Qualitative evaluation		Quantitative evaluation				Flexibility	Timeliness	Cost			
		Same		Same									
		Different models	model with different batches	Different models	model with different batches								
Visual inspection	√	×	×	×	×			excellent	excellent	low			
Laboratory qualitative evaluation	√	√	√	×	×			good	good	medium			
Quantitative evaluation of outfield	√	√	√	√	√	√	excellent	poor	poor	high			
Simulation evaluation	√	√	×	√	×	poor	excellent	excellent	low				
Cross validation	√	√	√	√	√	good	good	good	medium				

研究的重要手段，同样是外场评估所无法代替的；③“交叉验证法”采用“折中”的设计思路，将仿真评估的快速性和实验室标定的精确性相结合，从而可以便捷、高效、定量且精确地评估不同红外探测系统在不同气象条件下，对不同目标的最大作用距离。综上所述，针对不同的应用场景，我们可以利用不同的评估方法进行测试。

3 结论

本综述针对目前红外探测系统性能评估不全面、作用距离评估不精准、效率较低等问题。对现有文献资料进行了分析与讨论，全面总结了现有的评估方法，即直观检查法、实验室标定法、外场实测法、仿真评估法及交叉验证法。同时，对每一类评估方法的优缺点进行了分析，重点对比了交叉验证法相比其他4类评估方法所具备的优势。但客观地讲，由于红外探测作用距离评估涉及到目标辐射、大气透过率、探测系统本身等多因素的影响，现有的评估方法在精度上仍有很大的提升空间。

参考文献：

- [1] KOU R K, WANG H Y ZHAO Z H, et al. Optimum selection of detection point and threshold noise ratio of airborne infrared search and track systems [J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(18): 5268-5273.
- [2] KOU R K, WANG C P, FU Q, et al. Detection model and performance evaluation for the IR search and tracking system [J]. *Applied Optics*, 2023, **62**(2): 398-410.
- [3] 叶振华, 李辉豪, 胡伟达, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势[J]. 红外与毫米波学报, 2022, **41**(10): 15-39.
- [4] YE Z H, LI H H, HU W D, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, **41**(10): 15-39.
- [5] 李战武, 常一哲, 孙源源, 等. 中远距协同空战多目标攻击决策[J]. 火力与指挥控制, 2016, **41**(2): 36-40.
- [6] LI Z W, CHANG Y Z, SUN Y Y, et al. A decision-making for multiple target attack based on characteristic of future long-range cooperative air combat[J]. *Fire Control & Command Control*, 2016, **41**(2): 36-40.
- [7] 吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 32-36.
- [8] WU H P. *Infrared Search System*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 32-36.
- [9] 张建奇, 王晓蕊. 光电成像系统建模及性能评估理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 351-379.
- [10] ZHANG J Q, WANG X X. *Theory of Modeling and Performance Evaluation for Optoelectronic Imaging Systems*[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2010: 351-379.
- [11] D'Agostino J, Webb C. Three-dimensional analysis framework and measurement methodology for imaging system noise[C]//*Proceedings of SPIE*, 1991, **1488**: 110-121.
- [12] Burks S D, Haefner D P, Burks T J. Signal intensity transfer function determination on thermal systems with stray light or scattering present[C]//*Proc. of SPIE on Defense+Security*, 2015, **9452**: 39-48.
- [13] Singh M, Khare S, Kaushik B K. Objective evaluation method for advanced thermal imagers based on minimum resolvable temperature difference[J].

- Journal of Optics*, 2020, **49**(1): 94-101.
- [10] 徐泽林, 路东明, 王利平, 等. 利用灰度差估计的条纹非均匀性校正方法[J]. 光学学报, 2021, **41**(5): 0511001.
XU Z L, LU D M, WANG L P, et al. Fringe non-uniformity correction method based on gray difference estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, **41**(5): 0511001.
- [11] 丁帅. 机载红外小目标探测系统非均匀性校正技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
DING S. Research on non-uniformity correction technology of airborne infrared small target detection system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [12] XU L, YANG H. Application of a nonuniformity correction algorithm for IRFPAs based on two points[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S2): 608-610.
- [13] 代少升, 李季碧, 张天骐, 等. 红外焦平面阵列成像及其非均匀性校正技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
DAI S S, LI J B, ZHANG T Q, et al. *Infrared Focal Plane Array Imaging and Its Non-Uniformity Correction Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [14] 李言旭, 孙德新, 刘银年. 基于多项式拟合的红外焦平面非均匀性校正[J]. 激光与红外, 2005, **35**(2): 104-107.
LI Y X, SUN D X, LIU Y N. Polynomial fitting based on nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(2): 104-107.
- [15] Narendra P M. Scene-based nonuniformity compensation for imaging sensors[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982(1): 57-61.
- [16] 周永康, 朱尤攀, 赵德利, 等. 基于场景的红外焦平面非均匀校正算法综述[J]. 红外技术, 2018, **40**(10): 952-960.
ZHOU Y K, ZHU Y P, ZHAO D L, et al. A review of scene-based nonuniformity correction algorithms for infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Technology*, 2018, **40**(10): 952-960.
- [17] Torres S N, Vera E M, Reeves R A, et al. Adaptive scene-based nonuniformity correction method for infrared-focal plane arrays[C]// Proc. of SPIE, 2003, **5076**: 130-139.
- [18] Scribner D A, Sarkady K A, Krueger M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks[J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, **1541**: 100-109.
- [19] 刘博, 张斌, 王海晏. IRST作用距离标定方法研究[J]. 红外技术, 2006, **28**(11): 633-635.
LIU B, ZHANG B, WANG H Y. A new method for demarcating acceptance range of IRST[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(11): 633-635.
- [20] 王领, 于雷, 寇添, 等. 机载红外搜索跟踪系统探测性能评测标定[J]. 国防科技大学学报, 2015, **37**(5): 192-198.
WANG L, YU L, KOU T, et al. Evaluation and calibration of operational capability to airborne IRST system[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, **37**(5): 192-198.
- [21] 王芳, 寇人可, 罗寰, 等. 机载光电雷达性能测试系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, **56**(1): 010101.
WANG F, KOU R K, LUO H, et al. Design of airborne photoelectric radar performance test system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, **56**(1): 010101.
- [22] 杨森, 张厚庆. 基于成像/光强变化响应的中/短波红外辐射校准系统设计[J]. 光学学报, 2022, **42**(6): 0611001.
YANG S, ZHANG H Q. Design of medium/short wave infrared radiation calibration system based on imaging/light intensity change response[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, **42**(6): 0611001.
- [23] 王琦, 张继旭, 曹艳霞. 红外探测系统作用距离试验与评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, **37**(7): 192-195.
WANG Q, ZHANG J X, CAO Y X. A study on action range test and evaluated method for infrared detector[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, **37**(7): 192-195.
- [24] 牟达, 韩红霞. 红外系统作用距离方程的比较与分析[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2012, **35**(4): 0005-0008.
MOU D, HAN H X. Comparison and analysis for operating range equations of infrared system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2012, **35**(4): 0005-0008.
- [25] 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**(6): 493-496.
WANG X J, LIU Y, CHEN L, et al. Discussion on the operation range of the infrared imaging system for point target expressed by NETD and ΔT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6): 493-496.
- [26] 高思峰, 吴平, 何曼丽, 等. 复杂大气条件下红外系统作用距离的估算[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(6): 941-945.
GAO S F, WU P, HE M L, et al. Estimation of the operating range of infrared systems under complex atmospheric conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6): 941-945.
- [27] 王卫杰, 黄俭, 袁光福, 等. 空基红外系统作用距离建模及应用分析[J]. 光学精密工程, 2020, **28**(6): 1295-1302.
WANG W J, HUANG J, YUAN G F, et al. Modeling and application analysis of operating range of air-based infrared system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, **28**(6): 1295-1302.
- [28] Gaitanakis G K, Vlastaras A, Vassos N, et al. Infrared search & track systems as an anti-stealth approach[J]. *Journal of Computations & Modelling*, 2019, **9**(1): 33-53.
- [29] Knežević D, Redjimi A, Mišković K, et al. Minimum resolvable temperature difference model, simulation, measurement and analysis[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, **48**(6): 332.
- [30] Driggers R, Pollak E, Grimming R, et al. Detection of small targets in the infrared: an infrared search and track tutorial[J]. *Applied Optics*, 2021, **60**(16): 4762-4777.
- [31] 寇人可, 王春平, 张勇, 等. 基于交叉验证的红外探测系统作用距离评估方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2024, **49**(11): 46-53.
KOU R K, WANG C P, ZHANG Y, et al. Research on the operation range evaluation method of infrared detection system based on cross validation[J]. *Fire Control & Command Control*, 2024, **49**(11): 46-53.