

红外成像导引头抗干扰效能评估体系 构建及仿真研究

查月¹, 曹玉音²

(1. 中国人民解放军 92941 部队 44 分队, 辽宁 葫芦岛 125001;

2. 宜昌测试技术研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 针对日益复杂的战场对抗环境, 导引头抗干扰能力已成为非常重要的指标, 红外成像制导武器因具有高命中率、高效费比及强抗干扰能力而广泛应用; 随着红外成像导引头识别跟踪算法的蓬勃发展, 红外成像导引头的抗干扰能力已经不能简单将武器打击精度作为唯一的评估手段, 文中提出了一种基于目标识别、图像特征、跟踪精度的红外成像导引头抗干扰能力评估体系, 通过构建仿真对抗场景, 对红外成像导引头抗干扰效能进行仿真, 验证了该方法的合理性和有效性。

关键词: 红外成像导引头; 效能评估; 红外诱饵; 抗干扰; 仿真

Research on Anti-interference Effectiveness Evaluation System Construction and Simulation of Infrared Imaging Seeker

ZHA Yue¹, CAO Yuyin²

(1. Element 44, Unit 92941 of PLA, Huludao 125001, China;

2. Yichang Testing Technique Research Institute, Yichang 443003, China)

Abstract: In response to the increasingly complex battlefield combat environment, the anti-interference capability of seekers becomes a very important index. Infrared imaging guidance weapon has the characteristics of high hit ratio, high efficiency cost ratio and strong anti-jamming ability, and it is widely used. With the vigorous development of tracking algorithms of infrared imaging seekers, and the single evaluation method based on weapon strike accuracy can no longer fully reflect the anti-interference ability of infrared imaging seekers. A life-cycle effectiveness evaluation system based on the three dimensions of target recognition, image characteristics and tracking accuracy is proposed. The anti-interference performance of the infrared imaging seeker is simulated in countermeasure scenarios. The simulation result showed that the effectiveness and feasibility of the method is verified.

Keywords: infrared imaging seeker; effectiveness evaluation; infrared decoy; anti-interference; simulation

0 引言

20 世纪以来, 红外成像技术有了很大的发展, 并迅速在精确制导武器上得到了广泛应用^[1-2]。红外成像制导武器是利用探测目标和背景间微小的温差或辐射频率差引起的热辐射分布情况来实现对目标的跟踪, 能够实现在复杂战场中对目标的全向攻击^[3]。然而, 如何准确评估红外成像导引头在干扰条件下的工作效能, 为红外成像导引头抗干扰效能的提高及其验收鉴定提供重要的依据, 是一项亟待完成的工作^[4-6]。

国内外目前评估系统作战效能的主观评估方法主要有专家调查法、层次分析法、菲尔德法; 客观评估法主要有因子分析法、回归分析法、主成分分析法; 综合评估法主要有神经网络评估法、灰色评估法、模糊综合评估法^[7-14]。目前, 对红外成像导引头进行抗干扰效能评估多是利用层次分析法和模糊综合评估法, 得到综合抗干扰概率指标。

李凡等利用多层模糊分析法对红外制导的抗干扰效能进行了评估, 构建了抗干扰效能评估指标体系, 提高了评估结果的可信度和准确性^[8]; 钱欢等使用多层次灰色评估模型评估了电子对抗装备不同工作状态下的作战效能^[15]; 葛辰杰等利用线性支持向量机对红外导引头的抗干扰效能进行评估, 适用于小数据样本情况^[16]。

由于作战场景下的红外干扰因素复杂多样性, 对于红外成像制导系统抗干扰效能的评估方法也尚未规范统一^[17-18]。本文提出了基于目标识别、图像特征、跟踪精度的多维度反舰导弹抗红外干扰效能评估体系, 并通过仿真实验, 验证了两种红外成像识别跟踪算法抗干扰表现与体系评估指标的一致性。

1 红外成像导引头工作原理

1.1 红外成像原理

红外导引头的工作窗口波段通常是指 3~5 μm 的中波

收稿日期: 2023-04-09; 修回日期: 2023-05-23。

作者简介: 查月(1977-), 女, 四川仁寿人, 硕士, 高级工程师, 主要从事装备试验鉴定与靶标技术方向的研究。

引用格式: 查月, 曹玉音. 红外成像导引头抗干扰效能评估体系构建及仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(8): 300-305.

红外和 8~12 μm 的长波红外, 红外感知系统的工作原理是通过特殊的材料如熔融石英辅以冷光栅和冷屏来捕获红外波长内的热能量。根据已知的材料, 可以得到某红外成像探测器的黑体温度与相应灰度值之间的关系, 根据目标温度, 可以采用黑体的辐射公式计算出黑体的光谱辐射 M 如下:

$$M(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}} \quad (1)$$

式中, c_1 为第一辐射常数, c_2 为第二辐射常数。

红外成像探测器的工作波长为 $[\lambda_1, \lambda_2]$, 可以根据其工作波长得到黑体的光谱辐射 W 为:

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M \cdot d\lambda \quad (2)$$

辐射照度 L 的计算公式为:

$$L = \epsilon_0 \cdot \frac{W}{\pi} \quad (3)$$

即单位面积上的辐射能量。从此处可以得到黑体的辐射照度 L 和红外成像探测器红外灰度图灰度值的对应关系。最终可以通过普朗克定律和兰伯特定律计算得出远距离目标的探测辐射亮度如下:

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} d\lambda \quad (4)$$

式中, h 为普朗克常数, c 为光速, k 为波尔兹曼常数, T 为温度。

1.2 红外成像制导系统基本组成

红外成像制导系统主要由三部分构成, 即红外成像系统、图像处理系统及随动系统。目标的红外辐射信号首先进入到光学系统, 通过扫描机构在红外探测器的光敏面上聚焦, 经过光电转换将光信号转换为电信号, 再对电信号进行滤波和放大处理, 得到目标的位置误差信息; 或由成像系统解析图像, 经过非均匀校正和预处理后得到原始的目标红外图像, 再传输至随动系统联动光学系统, 引导导引头向目标方位运动, 形成角跟踪回路, 实现导引系统对目标的连续跟踪。同时生成自动驾驶仪所需的导引信号, 指挥控制导弹飞向目标^[11]。红外成像制导系统组成如图 1 所示。

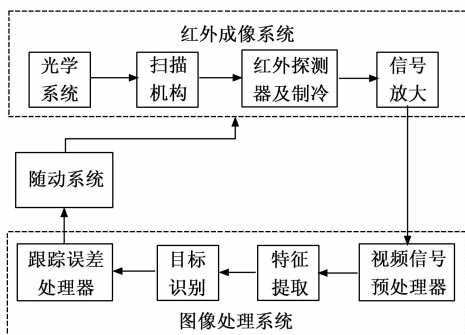


图 1 红外成像制导系统构成

1.3 红外成像导引头工作方式

红外成像导引头在在识别跟踪过程中具有三种工作状态, 分别为检测状态、跟踪状态以及判断状态。

1) 检测状态: 在检测状态下, 红外成像导引头对目标生成的红外图像进行识别检测, 寻找所要追踪的目标红外信号。如果导引头发现符合目标特性的红外信号, 会通过识别算法确定目标信息并锁定其位置, 在确定该信号有效后保存目标信息与位置并转入跟踪状态, 否则保持检测状态。

2) 跟踪状态: 在跟踪状态下, 红外成像导引头锁定目标并调整自身方向使得导弹朝向目标所在方位偏移, 从而实现改变飞行轨迹与飞行目的地, 同时导引头也将记录目标物体的红外成像特征, 用于出现抗干扰判断。根据自身采取的跟踪算法对目标置信度进行评估, 出现置信度过低或者丢失目标信息的情况, 则说明出现干扰, 导引头即转入判断状态。

3) 判断状态: 红外成像导引头判断状态主要出现于多个真假目标物体同时出现造成跟踪算法受到干扰无法正常工作, 或者目标信息丢失导致跟踪算法无法继续跟踪目标的情况。此时跟踪算法难以确定跟踪目标, 需要通过红外成像导引头抗干扰算法重新选择要追踪的目标物体或者返回检测状态。

2 红外成像导引头抗干扰效能指标

红外成像导引头抗干扰效能评估是在复杂战场环境下对红外成像制导系统的捕获、识别跟踪目标的水平进行评估的准则和方法。它对于在复杂海战场环境试验中如何构造红蓝双方光电对抗的博弈态势有着重要指导作用。

评估红外成像导引头效能首先构建合适的评估指标, 其次建立数学模型并设置典型场景, 通过仿真实验对系统进行抗干扰效果评估, 最后根据实验结果对抗干扰效能进行分析评价。通过对红外成像制导工作原理的分析, 可以从目标识别、图像特征、跟踪精度三个维度构建评估指标体系^[19-20]。

2.1 目标识别指标

红外成像导引头处于搜索检测工作状态时, 对其视场内的目标进行识别, 通过目标红外辐射特征判断其类型, 并给出置信度指标。目标抗干扰识别能力是指红外成像导引头运用相应的目标识别算法, 在打击目标的过程中, 从其所采集到的每一帧图像中识别出正确目标的能力^[4]。目标识别概率是反映导引头由探测转入截获过程的核心参数, 易受自然环境、人为干扰影响, 主要表现为规定时间内导引头识别概率下降将导致跟踪目标错误。

平均目标识别概率 P_t 是指在干扰环境下对检测目标的置信度, 定义为:

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (5)$$

式中, p_i 为单次目标识别的置信度; n 为导引头检测识别总次数。

2.2 图像特征指标

红外成像导引头的核心功能是目标探测、识别和跟踪, 而其探测、识别和跟踪的效能依赖于目标图像特征的强

弱^[22]。当导引头受到干扰时,会导致目标在海天背景下的红外成像质量下降,目标与背景的对比度降低。因此可以根据目标红外成像特征的对比度变化来评估导引头的抗干扰能力^[20]。目标成像对比度是指目标成像平均灰度值与背景平均灰度值之比,计算公式如下:

$$\gamma = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (6)$$

式中, σ_1 为目标成像平均灰度值, σ_2 为背景平均灰度值。

2.3 跟踪精度指标

红外成像导引头在截获目标后转入对目标的自动跟踪状态,并连续测量目标的运动方位,控制导弹指向目标。在目标跟踪阶段,目标实施光电干扰措施或进行紧急机动都会对红外成像制导系统的跟踪精度造成影响,具体体现在对目标水平或俯仰方位上的跟踪角度误差。红外导引头方位/俯仰跟踪角度误差定义如下:

$$\eta_{dir} = \frac{\sum_{i=0}^n |\theta_1 - \theta_2|}{n} \quad (7)$$

$$\eta_{ele} = \frac{\sum_{i=0}^n |\alpha_1 - \alpha_2|}{n} \quad (8)$$

式中, θ_1 为目标与导弹连线方位角, θ_2 为导引头光轴指向方位角, α_1 为目标与导弹连线俯仰角, α_2 为导引头光轴指向俯仰角, n 为跟踪次数。

红外成像制导系统在跟踪角误差逐渐累积,或目标置信度严重下降的情况下,导引头可能会丢失目标,打断连续跟踪状态而转入判断状态。因此,平均连续跟踪时间比是评价导引头持续抗干扰和稳定跟踪能力的重要指标之一。平均连续跟踪时间比定义为:

$$\tau = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n T_i \times 100\% \quad (9)$$

式中, T_i 为导引头单次连续跟踪时间, n 为目标丢失次数, n 为跟踪次数, T_0 为导引头开机时刻, T_s 为导引头销毁时刻。

3 光电对抗仿真平台

本文使用的光电对抗仿真平台基于场景想定数据创建作战任务,在整个任务仿真过程中,根据红外环境信息以及目标、目标的红外辐射特征进行建模与红外可视成像仿真,实时进行目标识别和跟踪,并且模拟测试红外成像导引头对抗面源红外干扰信号的情况下打击目标的能力。光电对抗仿真系统通常由场景想定模块、红外环境模块、平台运动模块、红外成像导引头模块和干扰弹模块组成,其中红外成像导引头模块为核心组件,主要具有红外成像、目标识别和目标跟踪功能。

3.1 红外成像及图像处理

红外成像导引头模块通过光栅化渲染的方式,获取场景中的所有物体位置以及物体对应的模型文件数据,读入其中的网格体数据,然后通过坐标变换到对应三维空间中,

通过将红外成像导引头看作虚拟相机进行渲染成像,最终成像结果由物体的温度信息以及位置信息,结合红外辐射成像计算结果进行赋值。

整个仿真场景主要由天空和背景、多个潜在目标物体以及可能的干扰目标组成。红外可视渲染视图与三维渲染视图的视角一致,因此图像中各个物体位置信息以及轮廓等特征均保持一致,区别在于图像颜色。红外可视渲染场景中不考虑光照信息、物体纹理信息等有关于颜色信息的资源与数据,而是通过场景中的物体与环境的温度信息,通过真实辐射亮度的计算公式,代入场景当前温度信息,渲染得出贴合真实物理规则的红外灰度图像。最终红外成像模块所得到的信息即为红外场景渲染图,红外图像无 RGB 信息,以灰度图的形式保存。

由于仿真生成的红外图像信息与真实红外成像采到的数据之间的差异,以及使用原始的红外图像直接传入识别、追踪算法中效果无法达到最佳,因此在信号处理仿真模块中添加高斯噪声、白噪声以及滤波处理操作,将处理后的红外图像数据提供给目标识别跟踪模块,可以获得更好的目标识别、跟踪效果。

3.2 目标识别

红外成像导引头识别目标的过程是先找出目标和背景的差异,提取目标特征,将目标特征进行比较,选则最匹配结果特征,再进行决策分类处理。从兼顾效果与效率上进行选择,在目标识别算法上主要采用 YOLO 和 SSD 算法。

1) YOLO 算法: YOLO 算法 (you only look once) 是一个 one stage 的实时目标检测算法,采用单个神经网络直接预测类别概率和物体边界,融合了目标类别和目标区域预测,能够实现端到端的物体检测。YOLO 相对于基于 Region Proposal 如 R-CNN 的算法准确度较低一些,但它的检测速度更快。YOLO 算法训练过程的流程如图 2 所示。

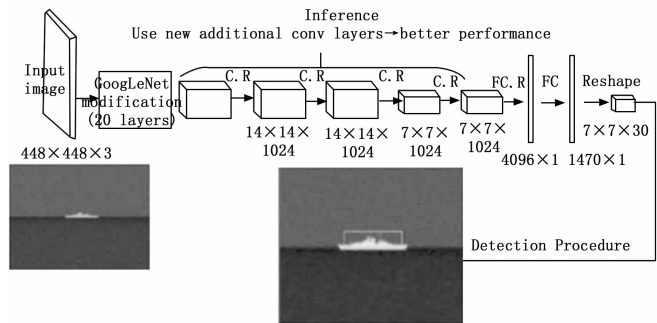


图 2 YOLO 算法训练流程

YOLO 算法首先使用卷积神经网络提取图像特征,其次预测候选区域的类别和位置。设定每个预测框为一个样本,标注真实框的相对类别和位置并得到标签值,通过网络模型预测其类别和位置并比较网络预测值和标签值,建立损失函数。在图像上依据一定规则产生一系列的候选区

域, 再根据图像上物体的真实框和候选区域间的位置关系标注候选区域。标注与真实框接近的候选区域为正样本, 并设定真实框的位置为正样本的位置目标。标注偏离真实框较大的候选区域为负样本, 负样本不用预测类别或位置。

2) SSD 算法: SSD (single shot multibox detector) 与 YOLO 一样, 也是一个 one stage 的实时目标检测算法, 译为“单激发多框探测器”, 思路是在图像多层特征图上密集均匀地抽样, 可以采用不同尺度和长宽比的抽样方式, 通过 CNN 提取特征后直接分类和回归。

SSD 沿用了 YOLOv1 的基本思路, 糅合了 Faster R-CNN 的 anchor-box, 又开创性地提出了多分辨率预测, 整个过程只需要一步, 所以其优势是速度快, 精度高于 YOLO, 速度胜于 faster R-CNN。实时 SSD300 模型的运行速度, 比最初版本的实时 YOLO 更快, 同时产生了显著优越的检测精度。其训练流程如图 3 所示, 最后通过极值抑制得到置信度最高的目标。训练还涉及到选择一些默认框检测尺度, 负难例挖掘, 数据增强策略。

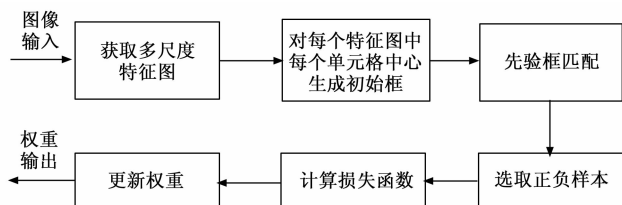


图 3 SSD 算法训练流程

SSD 预测过程和训练过程相比较为简单, 首先将待预测的图片输入网络, 将初始框根据输出的目标类别和偏移量进行对应调整, 得到预测框, 并确定预测框的类别, 然后过滤掉属于背景的预测框和阈值较低的预测框。对于留下的预测框执行 NMS 算法, 将重叠度较大的预测框再次过滤掉, 留下的预测框为最终的检测结果。预测过程如图 4 所示。使用中先输入图像信息, 将得到置信度最高的目标作为识别目标, 若置信度不足则认为识别失败。

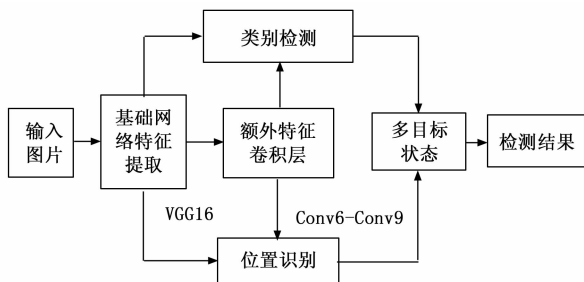


图 4 SSD 算法预测流程

3.3 目标跟踪

目标跟踪算法主要运用到了 Byte Track 以及基于 Mean Shift 的带有模板匹配思路的目标追踪算法。其中 Mean Shift 算法仅支持单目标追踪, 但具有较强的抗干扰能力; Byte Track 算法鲁棒性强, 能完成多目标追踪。

1) Byte Track 算法: Byte Track 是基于 tracking-by-detection 范式的跟踪方法, 是一种简单高效的数据关联方法 Byte。它是利用跟踪轨迹和检测框之间的相似性, 保留住高分检测结果, 并除去低分检测结果中的背景, 识别出需要的目标, Byte Track 能够降低目标漏检并提高目标轨迹的连贯性。由于 Byte Track 没有采用外表特征进行匹配, 所以跟踪的效果非常依赖检测的效果, 若检测器的效果很好, 跟踪也会取得不错的效果, 若检测的效果不好, 就会严重影响跟踪的效果。为降低该算法缺陷, 采用的检测算法都是基于神经网络准确率更高的算法, 在跟踪出现置信度不足时会进入判断状态, 重新使用准确度更高的检测算法重新确定跟踪目标信息。

2) Mean Shift 算法: Mean Shift 算法是一种基于密度的非参数聚类算法, 思路是假设不同簇类的数据集不同的概率密度分布, 寻找样本数据点密度增大最快方向, 样本密度高的局部区域对应于该分布局部极值, 样本点会在局部密度极值处收敛, 收敛到相同局部极值的点即是同一簇类的成员。

状态初始化阶段, 算法的主要工作是对导引头探测到的图像进行初步处理, 以提高下一步中导引头追踪目标的成功率。在这一阶段, 除去一般的像素展开操作外, 算法还会使用包括二值化、众数滤波等一系列的传统图像处理手段。在初始化步骤中完成红外图像的初步处理之后, 导引头便根据预设参数更新自身的跟踪制导行为。通过均值漂移操作和四向延拓之后, 导引头将标记出目标的追踪框图, 进而调整导弹的运动方向等行动参数。

4 抗干扰效能评估仿真实验

4.1 仿真实验场景构造

通过光电对抗平台仿真软件构造两种实验场景, 一种为无干扰场景, 一种为红外诱骗干扰场景。在两种场景下分别对红外成像导引头的“SSD+Mean Shift”(以下称算法 1) 及“YOLO+Byte Track”(以下称算法 2) 识别跟踪算法进行数字仿真验证, 获取效能评估指标样本数据。仿真设置红外成像制导弹速度为 0.7 Ma, 距离目标 5 km, 目标直航速度为 20 kn, 并通过执行红外面源诱骗干扰战术对红外成像导引头实施干扰, 干扰设置参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

| 实验场景 | 干扰类型 | 参数 |
|------|--------|-----------|
| 场景一 | 无干扰 | 无 |
| 场景二 | 红外诱骗干扰 | 干扰数量 4 次 |
| | | 时间间隔 3 s |
| | | 方位角间隔 10° |

仿真实验过程中实时记录仿真时间、目标识别概率、目标成像灰度值、目标跟踪方位/俯仰角误差数据, 仿真结果如图 5~8 所示。

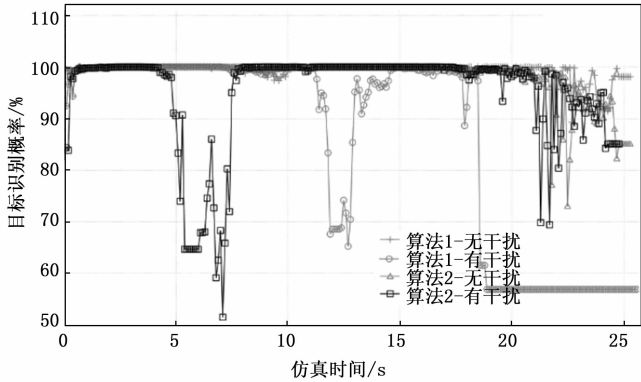


图 5 目标识别概率仿真曲线

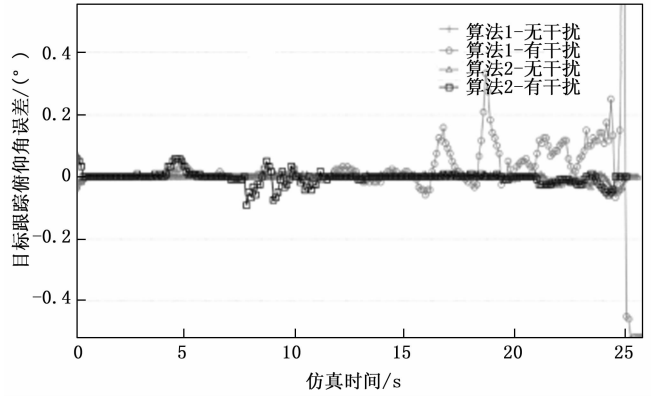


图 8 目标跟踪俯仰角误差仿真曲线

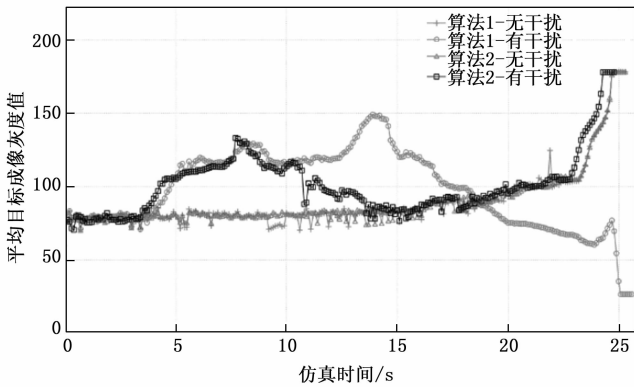


图 6 平均目标成像对比度仿真曲线

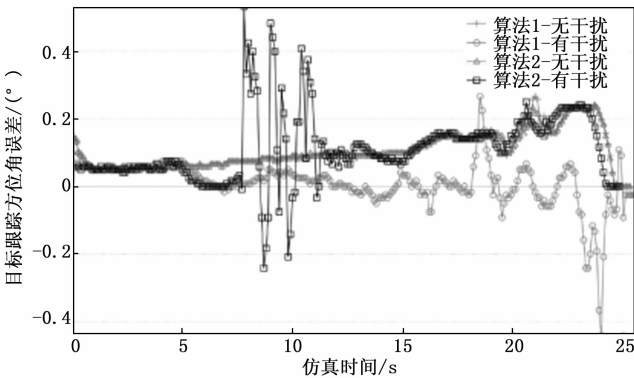


图 7 目标跟踪方位角误差仿真曲线

4.2 仿真结果分析

4.2.1 目标识别概率分析

从目标识别概率仿真曲线可以看出，两种算法在无干扰场景下都能够对目标进行准确识别，平均识别概率可以保持在 80% 以上。面对干扰对抗场景，算法 1 对红外诱饵的识别反应有一定延迟，并且在仿真时间 15 s 左右被干扰物引偏，致使目标脱离导引头视场范围，仿真后段持续跟踪干扰物，识别概率维持在 57%；算法 2 在仿真时间第 5 s 时对红外诱饵完成抗干扰识别，第 8 s 后继续转向跟踪目标，识别概率稳定在 70% 以上。通过以上分析可知，算法 2 的抗干扰识别能力强于算法 1。

4.2.2 平均目标成像对比度

在红外成像灰度图中，红外诱饵和目标相对于海天背

景具有较高的灰度值，并且诱饵灰度值大于目标。从平均目标成像对比度仿真曲线可以看出，在无干扰场景下，导引头稳定跟踪目标，随着弹目距离的减小，目标成像在识别跟踪框中的图像占比提高，因此平均成像对比度稳定增大。面对干扰对抗场景，算法 1 导引头被引偏后跟踪诱饵，由于诱饵红外辐射强度更大，短时间能具有较高的成像对比度，随着距离的接近和诱饵的消散，海天背景凸显，成像对比度急剧下降；算法 2 在干扰对抗期间，识别跟踪框内被面源诱饵占据，成像对比度增大，摆脱干扰后成像对比度曲线与无干扰场景几乎吻合。

4.2.3 目标跟踪方位角误差

导引头跟踪目标的过程中，图像处理系统实时计算弹目方位和俯仰误差，并输入导弹随动系统，导弹根据自身的制导方法输出机动指令，常见的有比例引导和前置角引导等方法。仿真曲线中体现了在无干扰场景下，面对目标，导弹跟踪目标的方位角误差按照导引律稳定变化。面对干扰对抗场景，算法 1 导引头被引偏后跟踪诱饵，由于诱饵红外在水平方位几乎没有移动速度，因此算法 1 的跟踪方位角误差在 0° 附近振荡；算法 2 在干扰对抗期间，跟踪方位急剧摆动，干扰对抗成功后稳定跟踪目标，此时方位角误差按照导引律稳定变化。通过以上分析可知，跟踪方位角误差并不是越小越好，而是要符合相应的制导规律。

4.2.4 目标跟踪俯仰角误差

从目标跟踪俯仰角误差曲线中可以看出，导引头稳定跟踪目标时几乎没有俯仰角误差，那是因为目标在高度俯仰方向没有运动趋势，而被诱饵诱骗后的算法 1 导引头，受诱饵自由落体运动的影响，在俯仰指向上出现较大的误差摆动。通过以上分析可知，跟踪俯仰角误差越小，越能体现导引头识别跟踪算法的优越性。

仿真数据表明，算法 2 的平均目标识别概率大于算法 1，因此算法 2 的目标识别能力更强；由于跟踪诱饵时目标成像对比度会先增大后减小，产生较大变化，因此成像对比度需要根据实时数据进行分析，其平均值难以表明导引头的抗干扰效能；两种算法的平均跟踪角度误差结果也如分析结论一致，容易被引偏并跟踪水平方位几乎静止的诱

饵的算法 1 具有更小的平均跟踪方位角误差, 而跟踪俯仰高度稳定的目标的算法 2 具有更小的平均跟踪俯仰角误差, 说明算法 2 的目标跟踪能力更强; 综上所述, 算法 2 具有更好的抗干扰效能。

5 结束语

本文从目标识别、图像特征和跟踪精度三个维度构建评估了效能评估指标体系。通过构造典型场景, 对两种红外成像识别跟踪算法进行了红外诱骗干扰对抗仿真实验, 通过对抗仿真结果与效能评估指标的数据表现, 对比分析可知算法 2 具有更好的抗干扰效能, 验证了效能评估体系的有效性。

参考文献:

- [1] 孙 伟, 林 木. 典型干扰样式下反舰导弹捕捉概率评估方法研究 [J]. 上海航天, 2016, 33 (5): 114-118.
- [2] 李 奇, 李 凡, 唐善军, 等. 红外导引头抗干扰性能仿真试验与评估技术研究 [J]. 空天防御, 2020, 3 (4): 127-133.
- [3] 杨 栋, 高德亮, 曹耀心, 等. 红外导引头抗诱饵干扰研究 [J]. 飞控与探测, 2020, 3 (3): 79-84.
- [4] 周永恒, 崔少辉, 方 丹. 红外成像导引头抗干扰评估指标体系构建 [J]. 现代防御技术, 2016, 47 (3): 175-180.
- [5] 闫 舟, 杨望东. 红外成像导引头抗干扰性能评价指标体系 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (9): 68-273, 278.
- [6] 刘松涛, 王赫男. 光电对抗效果评估方法研究 [J]. 光电技术应用, 2012, 27 (6): 1-7.
- [7] 庞艳静. 基于层次分析法的某红外导弹的抗干扰性能评估 [J]. 红外技术, 2014, 36 (3): 234-237.
- [8] 李 凡, 耿 旭, 董效杰, 等. 多层次模糊算法在光电抗干扰性能综合评估的应用 [J]. 系统仿真学报, 2015, 27 (9): 2176-2180.

- [9] 韩培骏, 姜长生, 许友平. 红外导引系统抗干扰性能评估研究 [J]. 电光与控制, 2012, 19 (5): 82-83.
- [10] 韩本刚, 董敏周, 于云峰, 等. 用基于指数标度的层次分析法评估红外导弹导引头抗干扰性能 [J]. 西北工业大学学报, 2008, 26 (1): 69-70.
- [11] 孙 敏. 基于层次分析法的红外制导系统抗干扰性能评估指标分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [12] 张 良, 黎海雪. 舰空导弹红外制导系统抗干扰性能评估方法研究 [J]. 兵工自动化, 2015, 34 (11): 17-22.
- [13] 胡朝晖, 闫 杰. 红外空空导弹抗干扰性能的综合评估方法研究 [J]. 火箭与制导学报, 2009, 29 (1): 61-70.
- [14] 谢泽锋, 罗华锋. 舰空导弹导引头抗干扰性能综合评估方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2020, 40 (1): 152-156.
- [15] 钱 欢, 艾 盼, 何 缓. 基于灰色层次法的电子对抗侦察装备作战效能评估 [J]. 舰船电子工程, 2022, 42 (10): 133-135.
- [16] 葛辰杰, 陆志洋, 洪泽华, 等. 基于支持向量回归与多核集成的红外成像导引头抗干扰性能评估方法 [J]. 上海航天, 2019, 36 (5): 94-98.
- [17] 牛得清, 伍友利, 徐 洋, 等. 点源红外诱饵干扰下环境复杂度量化建模 [J]. 红外与激光工程, 2020, 49 (2): 211-219.
- [18] 王 泉, 董维浩, 刘新爱, 等. 新型红外空空导弹抗干扰能力评估分析 [J]. 航天电子对抗, 2019, 3 (3): 16-19.
- [19] 刘松涛, 周晓东, 陈永刚. 光电成像制导系统干扰与抗干扰的性能评估 [J]. 激光与红外, 2007, 37 (1): 10-13.
- [20] 韩培骏. 红外导引系统抗干扰性能评估准则与方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [21] 唐善军, 王 枫, 陈晓东. 红外导弹抗干扰能力指标体系和评估研究 [J]. 上海航天, 2017, 34 (4): 144-149.
- [22] 闫晓珂, 荀 杨. 面源红外诱饵对红外成像反舰导弹干扰效果评估方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2018, 38 (11): 164-168.

(上接第 279 页)

- [10] SCHOOR G, VUUREN P, ROUX R. Parsing and analysis of a Xilinx FPGA Bitstream for generating new hardware by direct bit manipulation in real time [J]. South African Computer Journal, 2019, 31 (1): 5-8.
- [11] WANG G, KANG W, CHENG Y, et al. Low power computing paradigms based on emerging non-volatile nanodevices [J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2014, 12 (2): 163-172.
- [12] XILINX. 7Series FPGAs Packaging and Pinout [EB/OL]. (2014-03-06) [2023-03-03]. <http://www.XILINX.com/products>.
- [13] 陈胜刚, 付兴飞, 等. 用于 DDR3 访存优化的数据缓冲机制 [J]. 国防科技大学学报, 2017, 39 (6): 39-44.
- [14] 屈惠明, 陈 钱, 等. 红外焦平面阵列特性参数测试系统 [J]. 激光与红外, 2006, 36 (10): 950-952.
- [15] 汤书森, 刘 栋, 李建明. 基于 FPGA 的 CAN 总线控制器 SJAL000 软核的设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2011

- (4): 23-25.
- [16] XILINX. 7Sedes FPGAs GTX/GTH Transceivers [EB/OL]. (2014-02-06) [2023-03-03] <http://www.xilinx.com/products>. 2014,2.
- [17] 张彦梅. 基于 FPGA 的高速图像采集系统 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30 (9): 1117-1120.
- [18] 黄 进, 郭立红, 李 岩, 等. 高速 CCD 数字视频采集和并行存储技术 [J]. 长春理工大学学报, 2004, 27 (3): 104-106.
- [19] 李经章. 基于 FPGA 的 PCI Express 传输设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [20] 王 齐. PCI Express 体系结构导读 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [21] 叶杨云. 基于 PCIE 的数据传输控制软件模块的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [22] 唐 雷, 贺占庄. PCI Express 总线中消息断的研究 [J]. 微电子学与计算机, 2013, 7: 137-140.