

〈综述与评论〉

红外制导导弹抗诱饵干扰策略研究

陈永鹏¹, 祝雯生¹, 周遵宁², 袁大钟¹, 李 聪¹, 吕瑞恒¹

(1. 上海机电工程研究所, 上海 201109; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

摘要: 提升红外制导导弹的抗诱饵干扰能力是保证其作战效能的重要研究内容。本文首先介绍了红外导引头对诱饵的响应原理和过程; 然后, 阐述了红外制导导弹与诱饵的对抗与反对抗历程, 据此提炼出了红外制导导弹抗诱饵干扰的技术途径; 最后, 分析总结了红外制导导弹的典型抗诱饵干扰策略。

关键词: 作战效能; 红外制导; 诱饵; 对抗与反对抗; 抗干扰

中图分类号: TN976

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2025)06-0663-08

Study on Anti-Decoy Jamming Strategy of Infrared Guided Missile

CHEN Yongpeng¹, ZHU Wensheng¹, ZHOU Zunning², YUAN Dazhong¹, LI Cong¹, LYU Ruiheng¹

(1. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China;

2. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Improving the anti-decoy jamming ability of infrared-guided missiles is an important research topic for ensuring combat effectiveness. This paper first introduces the principle and process of the infrared seeker response to a decoy. Subsequently, it describes the course of their confrontation and anti-confrontation between infrared-guided missiles and decoys and extracts the anti-decoy jamming technical approach of infrared-guided missiles. Finally, a typical anti-decoy jamming strategy for an infrared-guided missile was analyzed and summarized.

Key words: combat effectiveness, infrared guidance, decoy, confrontation and counter-confrontation, anti-interference

0 引言

红外制导导弹自进入战场以来, 以其制导精度高、发射后不用管、隐蔽性能好和可全天候作战等优点在制导武器领域中被广泛使用, 一直是各型飞机、舰船、地面装备车辆等军事目标的重度威胁^[1-2]。

红外对抗诱饵是炽热物质的热辐射形成的具有一定辐射能量和特定红外光谱特性的辐射源, 用于模拟飞机、舰船、导弹和地面装备车辆等军事目标的红外辐射特征, 对红外侦测或制导系统起引诱、迷惑或扰乱的作用, 以保护飞机、舰船、洲际弹道导弹弹头(飞行器)和空间系统等作战武器免受红外制导导弹跟踪的威胁, 提高被保护目标的生存能力。

近年来, 针对红外制导技术存在的薄弱环节, 日益发展的各种红外对抗诱饵技术对其命中率构成了

很大的威胁, 使其作战效能明显降低^[3-5]。因此, 提升红外制导导弹的抗诱饵干扰能力已成为该领域亟待解决的问题之一^[6]。

张喜涛提出了基于导弹总体、制导系统、导引头3个层次的抗干扰性能评估指标体系, 实现抗干扰性能评估的分解, 提高了对制导系统和导引头抗干扰性能的评估能力^[7], 但未考虑各类型红外诱饵的作用方式与干扰原理。杨栋研究了红外诱饵的基本类型及其干扰机制, 并从辐射强度、波段辐射差异、目标/诱饵运动特征差异、末端成像技术4个方面提出了红外导引头的抗干扰技术途径^[8], 但未结合典型对抗场景阐述导引头的抗干扰过程。查月提出了基于目标识别、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, 并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了仿真, 验证了该评估体系的合理

收稿日期: 2024-03-12; 修订日期: 2024-08-14.

作者简介: 陈永鹏(1993-), 男, 博士, 工程师, 主要从事光电对抗技术研究。E-mail: cyp199304@163.com.

通信作者: 李聪(1991-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电子对抗总体技术研究。E-mail: 897655452@qq.com.

性^[9]，但未给出具体的抗干扰策略及途径。

本文从红外导引头工作原理和诱饵干扰原理出发，梳理了两者的博弈对抗历程，总结归纳了红外制导导弹的抗诱饵干扰技术和典型抗干扰策略，以期为该方向的发展提供参考。

1 红外导引头对诱饵辐射的响应

红外导引头作为红外制导导弹的“眼睛”，其基本组成及工作流程如图1所示，在目标红外辐射信号的导引下，通过光学系统、调制器、红外探测器、电子线路以及陀螺伺服系统完成跟踪回路，实现对目标的识别跟踪^[10-12]。不难看出，红外导引头面临的典型挑战是从复杂的背景环境中提取具有特定光谱信息和物理特征的目标，并在攻击结束前一直保持跟踪。

红外对抗诱饵的作用方式包括引诱、迷惑和扰乱，恰当的诱饵部署可有效对抗红外导引头。当目标察觉其正在被跟踪时，可通过抛洒红外诱饵对导引头实施干扰，以期使导引头跟踪器解除锁定。在两者对抗的过程中，若辐射源对红外探测器的张角小于探测器的瞬时视场，诱饵主要通过“示假”起诱骗的作用；反之，当辐射源对红外探测器的张角大于探测器视场时，辐射源可屏蔽目标辐射信号^[13-14]。

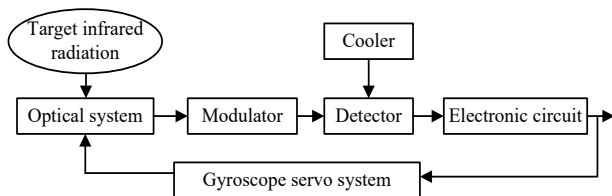


图1 红外导引头组成框图^[10]

Fig.1 Composing diagram of infrared seeker^[10]

2 红外制导导弹与诱饵的对抗与反对抗发展历程

红外制导导弹和红外诱饵技术整体上呈现出“相生相克”的关系，彼此促进着各自的发展，是一项永无止境的斗争。总体而言，红外导引头技术从早期几乎不具备抗干扰能力的点源制导发展成具备强抗干扰能力的先进多元凝视焦平面成像制导。相应地，光谱匹配型诱饵、气动型诱饵、拖曳式诱饵、面源诱饵等诸多红外诱饵技术应运而生，依据辐射特性及效果可分为两种：一是压制型诱饵，即通过产生大面积的强辐射信号以压制或掩盖平台的信号特征，实现“隐真”；二是相似型诱饵，通过辐射出与载机平台尽可能一致的信号以诱骗导引头，实现“示假”。两者对抗与反对抗的具体博弈历程大致分为三个阶段^[15-21]。

2.1 第一阶段

第一阶段是20世纪60年代中期，始于美国响尾蛇导弹的研制。在此期间红外制导技术主要是点源探测，重点用于攻击空中飞行速度较慢的目标，典型代表型号为美国的“红眼睛”、前苏联的“萨姆-7”地空导弹。此阶段红外制导导弹采用的光电探测器材料是硫化铅（PbS），响应波段为1~3 μm，通过自旋扫描跟踪目标，适用于锁定热尾喷管发出的辐射，只能尾追攻击飞机，攻击角度小，其抗干扰能力较弱。

MTV（Magnesium/Teflon/Viton）点源型诱饵是对抗此阶段导弹的有效技术，其主要组分为镁粉、聚四氟乙烯和氟橡胶，燃烧时火焰温度高达2000~2200 K，红外辐射强度远高于飞机等主要军事目标的辐射强度，通过质心干扰原理可成功实现对导引头的诱骗。几种典型的MTV点源型诱饵如图2所示^[22]。

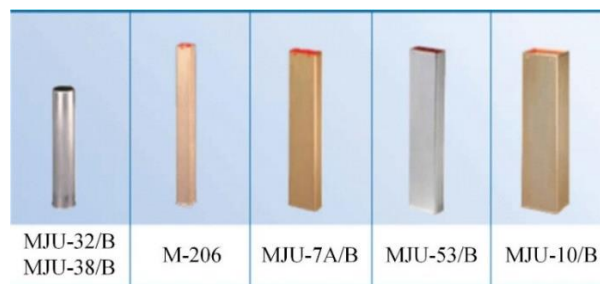


图2 典型的点源红外诱饵^[22]

Fig.2 Typical point source infrared decoy^[22]

2.2 第二阶段

第二阶段为20世纪60年代中期到70年代中期，此时飞机的机动性能得到大幅提升，在作战过程中配合红外诱饵弹的投放使得第一代红外制导导弹作战效能明显下降。随着碲化铟（InSb）红外器件投入到工程应用中，催生了响应波段位于1~3 μm的第二代红外制导导弹，这一代导弹采用圆锥扫描跟踪方式，其视场不是直视前方，而是产生了一定程度的偏移，此种扫描方式相比自旋扫描而言，其扫描范围明显增大，实现了后半球的攻击，且由于静态增益曲线的负离轴斜率而提高了抗干扰能力。代表性产品为美国的“尾刺”及法国的“西北风”等地空导弹。

然而，第二代红外制导导弹的制导系统仍为非成像型，目标在其导引视场中显示为点源辐射信号，在跟踪目标过程中遵循“谁辐射强、就跟踪谁”的原则，因此通过投放MTV诱饵依然可对其实现有效干扰。

2.3 第三阶段

第三阶段始于20世纪70年代中期，由于响应波段位于8~14 μm、高性能线列长波碲镉汞（HgCdTe）红外器件的研制成功及红外成像制导技术的发展成熟使得红外制导导弹的抗干扰性能产生了革命性的

提升。第一代红外成像制导导弹的代表型号是“幼畜-65D”空地导弹,它采用双色(红外/紫外或双色红外)多瓣梅花图形扫描的成像制导体制,虽然成像质量比较低,清晰度不高,但实现了从点源制导到成像制导的飞越,抗干扰能力显著增强。

红外导引头的进步推动了诱饵对抗技术的发展。如前所述,MTV 诱饵燃烧温度较高,其峰值波长集中在 $1\sim3\mu\text{m}$, 导引头可通过光谱识别技术,依据打击目标与诱饵在不同波段的辐射强度之比滤除诱饵,在此对抗场景下光谱匹配型诱饵应运而生。研究人员通过调节诱饵剂的配方组分,降低了其在 $1\sim3\mu\text{m}$ 波段的辐射强度,使其辐射特征更贴近被保护目标,改善干扰效果。

此外,MTV 诱饵在投放后会迅速与被保护目标分离,故导引头可通过对比目标与诱饵的运动特征滤除诱骗信息。针对这一技术短板,学者们优化了诱饵弹的气动布局或投放方式,分别研制出了气动改进型诱饵(见图 3^[12])、推进型诱饵(见图 4^[23])和拖拽型诱饵(见图 5^[15]),此类诱饵投放后,可减缓与被保护目标的分离速度,使两者的“粘连”时间延长,或在一定时间内保持与目标相似的运动特征,进而使得导引头难以依据运动轨迹识别出真假目标,迫使其跟踪多个信号源的能量中心,实现诱骗的目的。

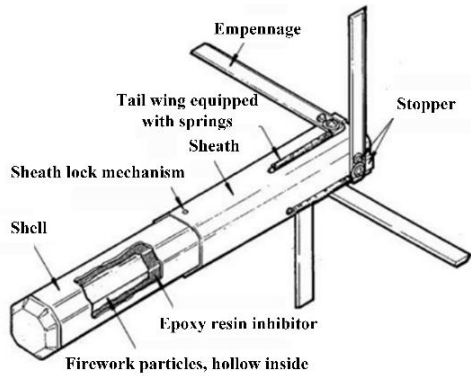


图 3 气动型诱饵示意图^[12]
Fig.3 Schematic diagram of pneumatic decoy^[12]

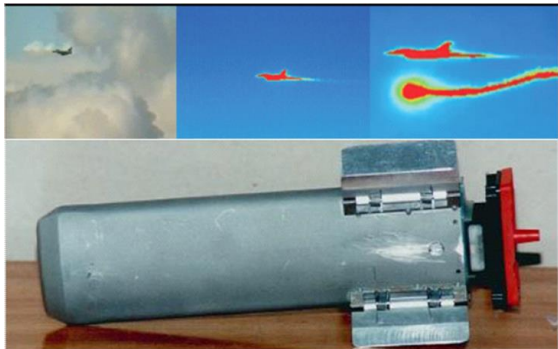


图 4 推进型诱饵实物图及战术效果图^[23]

Fig.4 Diagram of propellation-type decoy and its tactical effect^[23]

20 世纪 80 年代后期,采用凝视型红外焦平面成像探测器(Infrared Focal Plane Arrays, IRFPA)的第二代成像制导技术,在信号处理上采用了先进的图像处理、模式识别及目标跟踪算法,从而大幅度提高了其探测灵敏度,使其可从红外图像轮廓上识别目标,极大增强了导引头对抗传统诱饵的能力。

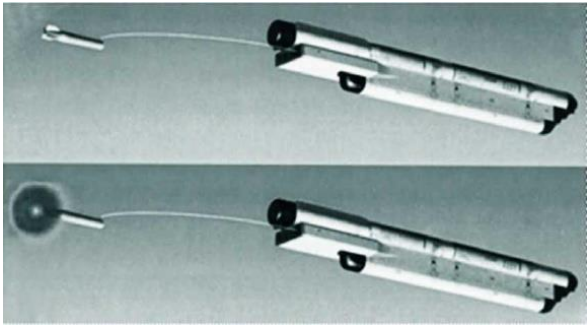


图 5 拖拽型诱饵(上)及其释放状态(下)^[15]

Fig.5 Drag-type decoy (up) and its release condition (down)^[15]

因此,研究大面积、强辐射的面源红外诱饵技术成为了红外对抗领域的发展方向。如图 6 所示^[21],大面积辐射云团可完全屏蔽目标的红外辐射特征,使得导引头瞬间失锁。虽然导弹可转入记忆跟踪模式,但若辐射云团持续时间足够,导弹的跟踪和制导回路将迟迟得不到更新,弹目相对位置信息的误差逐渐增大,若目标再产生适当的机动,即可使得导引头脱靶。

3 抗诱饵干扰技术途径

抗干扰性能本质上反映的是导引头从各种复杂干扰场景中提取目标信息的能力,其着力点在于寻求目标与诱饵的特征差异,并据此滤除诱骗信息,命中目标。由红外制导导弹与诱饵的博弈历程可知,传统红外导引头主要是根据目标和诱饵的相对运动、光谱特征和强度上升时间来识别目标和诱饵^[13-16]。

3.1 视线角速度变化识别

视线角速度变化是根据目标在视场中的运动来区分诱饵。非动力型诱饵从被保护目标处投放后减速非常快,其运动轨迹与目标的运动轨迹会呈现出巨大的差异。若导引头锁定了一个诱饵,视线角就会迅速变化。如果变化超过某个阈值,将触发导弹进入反对抗模式并应用适当的响应来重新获取真实目标。

3.2 辐射强度上升速率识别

红外诱饵出现在导引头视场中时会引起显著的辐射强度变化,这一特性可用于诱饵的识别。诱饵最初的设计目的是非常迅速地达到其峰值强度,以便有效地保护空中目标。导引头设计人员利用了诱饵的这一特性,并将其作为一种识别技术。如果导引头探测到视场中强度的快速变化,它可以依据预先设置的强度阈值做出适当的反对抗措施。

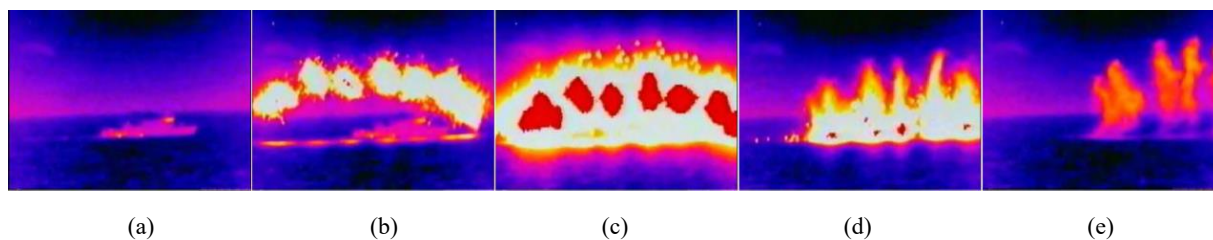


图6 分布式面源诱饵红外图像 (a)诱饵投放前的图像; (b)-(e)诱饵投放后的图像变化^[21]

Fig.6 Infrared image of distributed surface-decoy (a) image before decoy deployment, (b)-(e) image changes after decoy deployment^[21]

3.3 光谱信号识别

飞机、舰船、导弹和地面装备车辆等军事目标都有其固有的辐射特征,导引头可根据目标与诱饵辐射信号的差别区分两者。例如,飞机的红外辐射特性主要由机身蒙皮、发动机尾喷口和尾部喷射而出的羽流决定,其在短/中波段的辐射强度之比 $I_{1.8\sim 2.5\mu\text{m}}/I_{3.5\sim 5.0\mu\text{m}} = 0.5\sim 0.8$,而广泛使用的MTV红外诱饵光谱比 $I_{1.8\sim 2.5\mu\text{m}}/I_{3.5\sim 5.0\mu\text{m}} = 1.3\sim 1.4$,因此导引头可将视场中各种目标的光谱分布比与预先设定的阈值进行比较。如果目标不符合光谱比的标准值,则将其归类为诱饵,并作为假目标拒绝。

3.4 人工智能识别

随着人工智能技术发展和高性能探测器、信息处理器等关键器件的更新迭代,基于深度学习的目标智能识别技术工程化应用逐渐兴起。目标智能识别技术具备对样本数据的学习能力,能有效实现对数据计算视觉和多传感器融合方法的快速优化,同时利用神经网络强大的特征提取能力可为目标和诱饵的空间定位和分类提供重要的信息,并通过逻辑推理进行分析,达到去除干扰、分辨出真假目标的目的。如采用卷积神经网络、循环神经网络等深度学习模型,引入通道空间注意力机制,使网络模型在复杂场景中聚焦到显著区域,关注更多高价值目标信息,并抑制无效信息,有效地对目标和干扰物进行准确区分和精确定位。但该项技术目前仍面临着红外目标图像的数据源有限以及多目标识别红外图像的复杂多变性问题,这在一定程度上制约了其发展步伐^[24-28]。

3.5 典型目标跟踪

当目标被检测或识别出来后,需要对目标进行实时图像跟踪,跟踪算法的设计对命中目标起着至关重要的作用。在跟踪目标时,为了提高运算效率和尽可能排除背景干扰的影响,通常采用一个波门将目标套住,如此可将波门外的背景、噪声等排除在外,使之不影响对目标的正常跟踪,其中波门的大小随目标面积发生变化,并与目标的运动速度相匹配。根据不同的作战态势,目前典型的跟踪方法主要有质心跟踪、相关跟踪、记忆外推跟踪和多模跟踪等^[29-30]。

3.5.1 质心跟踪

在目标与导弹距离较远时,导引头一般采用质心跟踪。质心跟踪以波门视场内目标的灰度值分布能量中心(质心)作为跟踪点,即当导引头视场中存在两个或多个红外辐射源时,导引头将跟踪所有辐射源的能量中心。

该算法对波门内所有目标灰度值的图像进行计算,以求取波门内目标区域的质心。设波门内像素 (i, j) 处的灰度为 $f(i, j)$,经过分割后的数据为 $g(i, j)$, T 为分割门限,则:

$$g(i, j) = \begin{cases} f(i, j), & f(i, j) \geq T \\ 0, & f(i, j) < T \end{cases} \quad (1)$$

于是,目标的质心坐标 (x_d, y_d) 为:

$$\begin{cases} x_d = \frac{\sum_{(i,j) \in G} ig(i, j)}{\sum_{(i,j) \in G} g(i, j)} \\ y_d = \frac{\sum_{(i,j) \in G} jg(i, j)}{\sum_{(i,j) \in G} g(i, j)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: G 为选定的波门区域。质心跟踪利用了灰度的加权作用,灰度大的像素贡献也大,利用质心跟踪可以精确地定位目标的位置。

3.5.2 相关跟踪

当导弹与目标距离较近时,目标在探测器视场中的面积较大,此时导引头会启动相关跟踪模式。相关跟踪是在实时图像中寻找与预先设置的模板最相似的子区域,将其位置作为跟踪点。在运算过程中,需计算各处实时图与模板图的相关函数,该相关函数峰值的对应位置就是跟踪点。

归一化积相关算法是图像匹配算法中较为经典的算法,其相关函数为归一化的实时图与模板图对应像素积的平均值。设实时图像矩阵为 $f(i, j)$ 、像素大小为 $m \times n$,模板图像矩阵为 $g(i, j)$ 、像素大小为 $m_1 \times n_1$,其中 $m > m_1$ 、 $n > n_1$, (i_0, j_0) 为模板在实时图上的偏移,满足 $0 < i_0 < m - m_1$ 、 $0 < j_0 < n - n_1$,则 (i_0, j_0) 处的

相关度量值为:

$$c(i_0, j_0) = \frac{\sum_{i=0}^{m_1-1} \sum_{j=0}^{n_1-1} f(i+i_0, j+j_0) g(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m_1-1} \sum_{j=0}^{n_1-1} f^2(i, j)} \sqrt{\sum_{i=0}^{m_1-1} \sum_{j=0}^{n_1-1} g^2(i, j)}} \quad (3)$$

使相关度量值最大的 (i_{\max}, j_{\max}) 即为相关匹配点。

3.5.3 记忆外推跟踪

在导引头跟踪目标的过程中,若目标丢失或被干扰物遮蔽导致其原有特征消失时,导引头可采用记忆外推跟踪算法,该方法根据目标过去和当前的运动特征预测其后续的位置。其中,线性预测法和平方预测法具有算法简单、计算量小的优点,是最为常用的记忆外推跟踪算法。

线性预测公式为:

$$\hat{x}\left(\frac{k+1}{k}\right) = \frac{1}{3}[4x(k) + x(k-1) - 2x(k-2)] \quad (4)$$

$$\hat{y}\left(\frac{k+1}{k}\right) = \frac{1}{3}[4y(k) + y(k-1) - 2y(k-2)] \quad (5)$$

平方预测公式为:

$$\hat{x}\left(\frac{k+1}{k}\right) = 3[x(k) - 3x(k-1) + x(k-2)] \quad (6)$$

$$\hat{y}\left(\frac{k+1}{k}\right) = 3[y(k) - 3y(k-1) + y(k-2)] \quad (7)$$

式中: $\hat{x}\left(\frac{k+1}{k}\right)$ 和 $\hat{y}\left(\frac{k+1}{k}\right)$ 为 $k+1$ 时刻位置坐标的估计值; $x(k-2)$ 、 $x(k-1)$ 、 $x(k)$ 和 $y(k-2)$ 、 $y(k-1)$ 、 $y(k)$ 分别为 $k-2$ 、 $k-1$ 和 k 时刻的位置坐标。

3.5.4 多模跟踪

由于不同的跟踪算法具有不同的适应范围,在不同的对抗场景下有着不同的跟踪性能,因此为了提高跟踪算法适应不同目标与背景变化的能力,可以综合运用多种跟踪算法,组合形成多种跟踪算法的复合制

导方式,具有多模跟踪的导引头可根据当前作战态势选择最优跟踪方式,也可以使几个跟踪器同时工作,输出各自的跟踪信息,然后运算得到总的跟踪信息。显然,多模跟踪与单模跟踪相比,具有更强的自适应能力与抗干扰能力,可以提高对目标的跟踪概率。

4 抗诱饵干扰策略

在导弹追踪目标的过程中,随着弹目相对距离由远至近的变化,导引头视场内的目标会产生从点源阶段至成像阶段的变化,因此可从远/中距离的点源目标和近距离的成像目标两个角度阐述导引头的抗诱饵干扰策略^[8]。为便于讨论,本章将目标统一设定为飞机。

4.1 远/中距离干扰对抗策略分析

导引头对抗诱饵干扰的过程将经过跟踪目标、目标被遮挡、识别目标、锁定目标的过程。图7为远/中弹目距离场景下载机投放诱饵的示意图,其中红色框表示当前跟踪的目标,蓝色框表示被识别出的诱饵,目标与诱饵均以“点源”形式出现,此时导引头采用质心跟踪算法跟踪目标。

在诱饵投放后,导引头视场中的能量会突然增大,导弹随即进入抗干扰模式;待诱饵与导弹分离时,导引头根据诱饵和目标的辐射性能和运动特性,采用轨迹识别(视线角速度变化率)技术和光谱匹配技术即可辨别出诱饵和目标,滤除诱骗信号,重新锁定目标。如图8所示^[31],电子科技大学的曹永盛课题组依据上述抗干扰策略,采用特征归一化残差法,分别选取目标投放传统点源红外诱饵、光谱匹配型红外诱饵及轨迹优化型红外诱饵的红外原始数字图像进行仿真,从提取面积、灰度、长宽比、能量差和不变矩5个要素区分目标和诱饵特征,成功滤除了诱饵(图像中“+”中心为红外图像中检测到的所有点的质心位置,“+”后面的数字为编号,“ $m=1$ ”指目标概率为1),实现了预期的抗诱饵干扰目的^[31]。

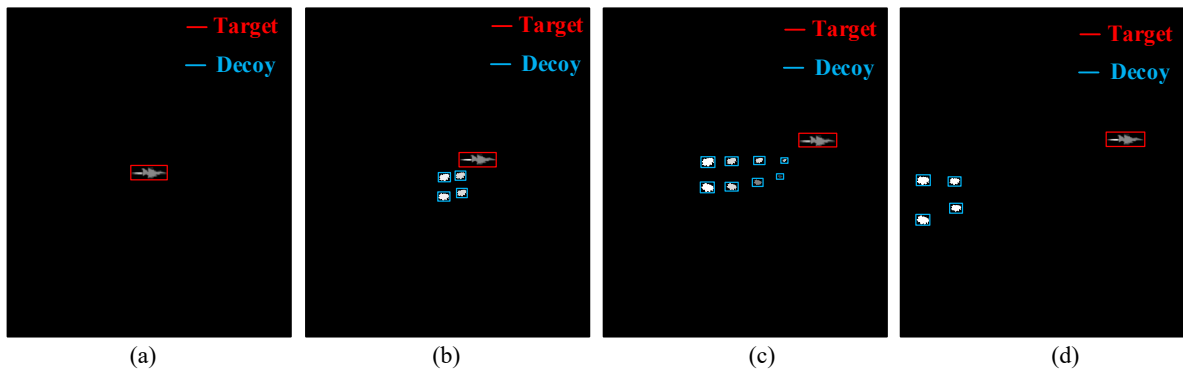


图7 远/中距离下诱饵投放示意图 (a)诱饵投放前的视场; (b)-(c)诱饵投放后的视场变化

Fig.7 Schematic diagram of decoy delivery at long or medium distance (a) field of view before decoy deployment, (b)-(c) changes in field of view after decoy deployment

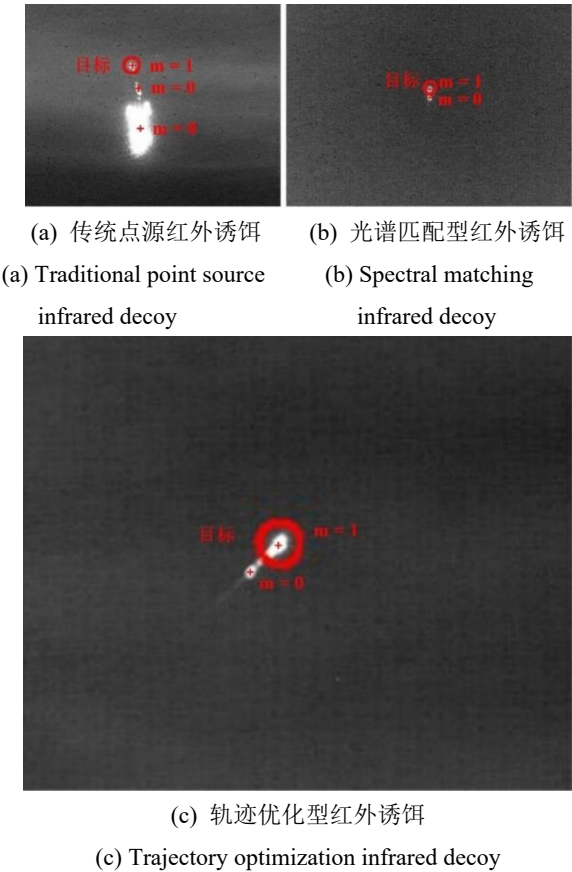


图8 不同类型红外诱饵的对抗仿真图^[31]

Fig.8 Confrontation simulation diagrams of different types of infrared decoy^[31]

此抗干扰策略适用于点源制导和成像导引头的远距小目标识别跟踪阶段,该策略的抗干扰成功率主要取决于对诱饵和目标分离时间段的充分利用,在两者分离间隔期间,导引头须完成制导和跟踪回路误差的修正,并依据诱饵与目标的运动轨迹和辐射信号迅速识别出真假目标。然而,若载机同时齐射或在短时

间内投放多发诱饵,新旧诱饵及载机将呈现出胶着粘连的状态,载机与诱饵的分离时间亦会延长,导引头难以在短时间内通过上述策略区分真假目标,载机则会有机动逃逸出视场的可能,此时可考虑采用记忆跟踪预测目标的飞行轨迹,待诱饵与目标分离后再进行识别跟踪,进而锁定目标。

4.2 近距离干扰对抗策略分析

当弹目距离较近时,目标对探测器的张角增大,导引头由质心跟踪转为相关跟踪,此时若目标投放点源型诱饵,导引头根据其长宽比、运动轨迹等特征可迅速辨别出真/假目标。

若载机在告警后投放辐射面积较大的面源型诱饵,导引头的抗干扰难度将增大。如图9所示,在诱饵投放初期,其灰度图像会与飞机部分重合,进而改变“目标”的几何特性,此时导引头会进入抗干扰态。待干扰云与飞机分离时,导引头根据两者的辐射光谱信息、运动特征及几何外形即可识别出诱饵与目标。

然而,若载机投放如图6所示的大面积强辐射干扰云团,载机平台的辐射信号将被干扰云完全屏蔽,此时导引头短时间内无法截获目标。如果干扰云辐射的持续时间超过制导系统预测跟踪的有效时间,加之载机配合相应的机动,上述抗干扰策略将难以识别出目标,导引头脱靶概率较高。此时应该采用非典型的特殊抗干扰方法,如借助人工智能技术,基于典型目标机动航路信息库将目标自动识别、航迹规划等深度学习算法引入导引头中,充分利用海量的战场对抗信息,发挥自主学习和自主推理能力,打破现有的抗干扰模式^[24-25]。如:当目标被大面积辐射云团完全屏蔽时,导弹在“闭眼”的同时依据自主推理出的作战信息立即进行预设的典型机动,待绕开辐射云团后重新开启识别跟踪模式,进而捕获目标。

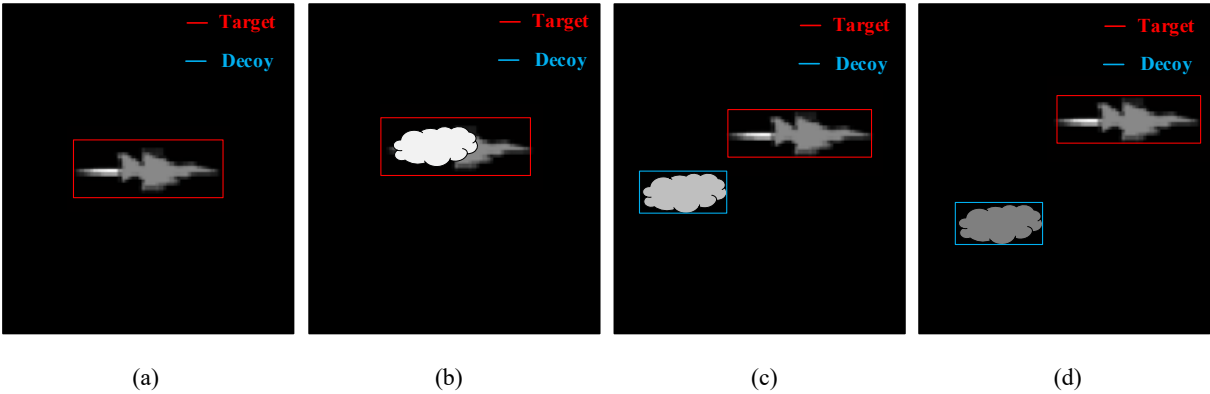


图9 近距离下诱饵投放示意图 (a) 诱饵投放前的视场; (b)-(d) 诱饵投放后的视场变化

Fig.9 Schematic diagram of decoy delivery at close range (a) field of view before decoy deployment, (b)-(d) changes in field of view after decoy deployment

5 结语

面对日益严峻的战场环境,提高导弹的抗干扰性能是保证其作战效能的必要环节。随着红外诱饵等各种对抗技术的发展,导弹的制导精度、抗干扰技术等要求也将变得越来越高,在制定其抗干扰策略时需从作战环境、攻击目标特性、对抗目标特性和发射平台等多方面综合考虑,以更好地适应复杂的交战环境,提升制导武器的作战水平。

参考文献:

- [1] 马潮, 陆志沣, 余海鸣, 等. 红外成像导引头抗干扰性能评估方法研究[J]. 空天防御, 2018, 1(4): 44-47.
MA Chao, LU Zhifeng, YU Haiming, et al. Research on evaluation method of anti-interference performance of infrared seeker[J]. *Air & Space Defense*, 2018, 1(4): 44-47.
- [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.
LI Qi, LI Fan, TANG Shanjun, et al. Research on anti-jamming performance simulation test and evaluation technology of infrared seeker[J]. *Air & Space Defense*, 2020, 3(4): 127-133.
- [3] Polasek M, Nemecek J, Pham I Q. Counter countermeasure method for missile's imaging infrared seeker[C]//2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2016: 1-8.
- [4] 杨栋, 曹耀心, 李建, 等. 机载红外诱饵分离特性仿真研究[J]. 红外技术, 2018, 40(6): 585-589.
YANG Dong, CAO Yaoxin, LI Jian, et al. The study on separation characteristic of airborne infrared decoy and simulation[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(6): 585-589.
- [5] 张静元, 郑宇, 姜萍, 等. 国外光谱型诱饵装备发展现状研究[J]. 光电技术应用, 2023, 38(4): 15-19.
ZHANG Jingyuan, ZHENG Yu, JIANG Ping, et al. Development research on spectral decoy equipment at abroad[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2023, 38(4): 15-19.
- [6] 韦卓, 黄建忠. 红外成像导引头抗红外诱饵弹动态干扰试验系统构建[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(2): 97-100.
WEI Zhuo, HUANG Jianzhong. Construction of dynamic jamming test system of infrared imaging seeker against infrared decoy[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2020, 40(2): 97-100.
- [7] 张喜涛, 白晓东, 闫琳, 等. 红外空空导弹抗干扰性能评估指标体系研究[J]. 红外技术, 2020, 42(11): 1089.
ZHANG Xitao, BAI Xiaodong, YAN Lin, et al. Anti-jamming performance evaluation index system for infrared air-to-air missiles[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(11): 1089.
- [8] 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): 79-85.
YANG Dong, GAO Deliang, CAO Yaoxin, et al. Study on anti-jamming technology of IR seeker[J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(3): 79-85.
- [9] 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.
ZHA Yue, CAO Yuyin. Research on anti-interference effectiveness evaluation system construction and simulation of infrared imaging seeker[J]. *Computer Measurement & Control*, 2023, 31(8): 300-305.
- [10] 周遵宁, 张同来, 乔小晶, 等. 强辐射对抗红外制导导弹机理探讨[J]. 红外激光与工程, 2010, 39: 442-445.
ZHOU Zunning, ZHANG Tonglai, QIAO Xiaojing, et al. Discussions on mechanisms of intense radiation vs IR imaging guided-missiles[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39: 442-445.
- [11] 刘杰, 王博, 万纯, 等. 红外导引头工作原理及抗干扰措施分析[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(2): 34-37, 43.
LIU Jie, WANG Bo, WAN Chun, et al. Working principle and anti-jamming measures analysis of infrared guidance[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2022, 38(2): 34-37, 43.
- [12] 周遵宁. 光电对抗材料基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.
ZHOU Zunning. *Fundamentals of Electro-Optical Countermeasure Materials*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017.
- [13] LI S, ZHANG K, YIIN J, et al. A study on IR target recognition approach in aerial jamming environment based on Bayesian probabilistic model[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 50300-50316.
- [14] 潘博臣, 赵非玉, 过凯, 等. 飞机光谱辐射特性及诱饵匹配性作战应用研究[J]. 光电技术应用, 2023, 38(1): 52-59.
PAN Bochen, ZHAO Feiyu, GUO Kai, et al. Spectral radiation characteristics of aircraft and application of infrared decoy matching in combat[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2023, 38(1): 52-59.
- [15] 李石川, 王刚, 陈元泰, 等. 机载红外诱饵技术及干扰策略研究[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(2): 38-41, 44.
LI Shichuan, WANG Gang, CHEN Yuntai, et al. Study on airborne IR decoy technology and tactical strategy[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2018, 34(2): 38-41, 44.
- [16] 陈宁, 王刚, 王鹏, 等. 先进的机载红外诱饵对抗技术措施发展研究[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(5): 27-31.
CHEN Ning, WANG Gang, WANG Peng, et al. Research on the development of advanced airborne infrared decoy countermeasures[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2017, 33(5): 27-31.
- [17] 张颜伟, 白春华, 蔡猛. 红外干扰弹与定向红外对抗系统协同使用研究[J]. 电光与控制, 2023, 30(2): 82-85, 105.
ZHANG Yanwei, BAI Chunhua, CAI Meng. Cooperative usage of infrared jamming projectile and directional infrared countermeasure system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2023, 30(2): 82-85, 105.

- [18] 杨锁昌, 张敦絮, 郑旭, 等. 导弹抗红外诱饵干扰的六自由度半实物仿真研究[J]. 红外, 2022, **43**(11): 1-7.
YANG Suochang, ZHANG Dunxu, ZHENG Xu, et al. Research on six degrees of freedom hardware-in-the-loop simulation for missile anti-infrared decoy jamming[J]. *Infrared*, 2022, **43**(11): 1-7.
- [19] LI S, WANG C, HUANG H. Infrared imaging guidance missile's target recognition simulation based on air-to-air combat[C]//*Optical Sensing and Imaging Technologies and Applications. SPIE*, 2018, **10846**: 768-780.
- [20] 向宇, 方航. 直升机红外诱饵干扰研究与仿真[J]. 航天电子对抗, 2022, **38**(1): 41-47.
XIANG Yu, FANG Hang. Study on helicopter infrared decoy interference and simulation[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2022, **38**(1): 41-47.
- [21] 宁功韬, 栗萍, 苏斌, 等. 面源诱饵对抗红外凝视成像制导机理研究[J]. 红外技术, 2015, **37**(6): 514-518.
NING Gongtao, LI Ping, SU Bin, et al. Mechanism of Surface-decoy Effectiveness against IR FPA Imaging Guidance[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(6): 514-518.
- [22] 马贤杰, 李国平, 王洪静, 等. 国外红外导引头及红外诱饵发展历程与展望[J]. 航天电子对抗, 2020, **36**(3): 58-64.
MA Xianjie, LI Guoping, WANG Hongjing, et al. Development roadmap and direction of infrared seekers and infrared decoys[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2020, **36**(3): 58-64.
- [23] 刘杰, 刘国生, 周建波, 等. 自推进红外诱饵发展现状及干扰红外导引头机理分析[J]. 航天电子对抗, 2021, **37**(2): 33-37.
LIU Jie, LIU Guosheng, ZHOU Jianbo, et al. Development of thrust flares and mechanism analysis of interfering infrared guidance[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2021, **37**(2): 33-37.
- [24] 石钊铭. 多体制协同目标智能识别技术发展综述[J]. 舰船电子工程, 2022, **42**(1): 5-8.
SHI Zhaoming. Review on the development of target intelligent recognition technologies based on multi-system cooperation[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2022, **42**(1): 5-8.
- [25] 李柯, 李智军, 梁玉英, 等. 红外成像导引头目标探测与自动识别关键技术分析[J]. 光电子, 2022, **12**(1): 13.
LI Ke, LI Zhijun, LIANG Yuying, et al. Analysis on key techniques of infrared imaging seeker target detection and automatic recognition[J]. *Optoelectronics*, 2022, **12**(1): 13.
- [26] 马晓平, 赵良玉. 红外导引头关键技术国内外研究现状综述[J]. 航空兵器, 2018(3): 3-10.
MA Xiaoping, ZHAO Liangyu. An overview of infrared seeker key technology at home and abroad[J]. *Aero Weaponry*, 2018(3): 3-10.
- [27] 陈咸志, 任钢, 罗镇宝, 等. 先进光电导引头应用技术研究[J]. 红外与激光工程, 2021, **50**(9): 20210531-1-20210531-8.
CHEN Xianzhi, REN Gang, LUO Zhenbao, et al. Research on application technology of advanced photoelectric seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, **50**(9): 20210531-1-20210531-8.
- [28] 范晋祥, 刘嘉. 精确制导自动目标识别智能化的挑战与思考[J]. 航空兵器, 2019, **26**(1): 30-38.
FAN Jinxiang, LIU Jia. Challenges and thinking for the precision guidance ATR intelligentization[J]. *Aero Weaponry*, 2019, **26**(1): 30-38.
- [29] WU S, ZHANG K, NIU S, et al. Anti-interference aircraft-tracking method in infrared imagery[J]. *Sensors*, 2019, **19**(6): 1289.
- [30] 刘刚, 张丹. 红外成像制导图像处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
LIU Gang, ZHANG Dan. *Infrared Imaging Guidance Image Processing Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [31] 师晨. 抗红外诱饵干扰的目标识别研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
SHI Chen. Research on Target Recognition for Anti-Jamming Towards Infrared Decoys[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020.