

文章编号: 1672-8785(2025)03-0029-13

复杂战场环境下的红外导引头 抗干扰分析

高宇轩* 庄亚明 姚佳东

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610045)

摘 要: 红外导引头是武器制导系统识别跟踪目标的核心部件, 决定导弹能否成功准确命中目标。现代战争的作战条件复杂多变, 存在云雾、烟幕、点源诱饵、激光压制、伪装和多波次打击等干扰因素。红外导引头在各类干扰条件下实现对目标特征进行识别并保持持续跟踪, 是一项极具挑战的任务。对战场环境下各类干扰因素进行了归纳整理, 分析了干扰机理及其对红外导引头的性能影响。介绍了目前主要采用的几种抗干扰技术, 然后对其设计原理和工作流程进行了分析, 并展示了红外导引头在各类应用场景下的抗干扰效果。该研究对红外导引头抗干扰策略的制定具有一定的参考意义。

关键词: 红外导引头; 战场环境; 红外干扰; 抗干扰技术; 红外制导

中图分类号: TJ765.333 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.03.005

Analysis on Anti-Interference of Infrared Seeker in Complex Battlefield Environment

GAO Yu-xuan*, ZHUANG Ya-ming, YAO Jia-dong

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610045, China)

Abstract: The infrared seeker is the core component of the weapon guidance system to identify and track the target, and determines whether the missile can successfully and accurately hit the target. The combat conditions of modern warfare are complex and changeable, with interference factors such as clouds, smoke, point source decoys, laser suppression, camouflage, and multi-wave strikes. It is a very challenging task for the infrared seeker to identify the target characteristics and maintain continuous tracking under various interference conditions. Various interference factors in the battlefield environment are summarized and sorted out, and the interference mechanisms and their impacts on the performance of the infrared seeker are analyzed. Several anti-interference technologies currently used are introduced, and then their design principles and workflows are analyzed, and the anti-interference effect of the infrared seeker in various application scenarios is demonstrated. This study has a certain reference significance for the formulation of anti-interference strategies for infrared seekers.

Key words: infrared seeker; battlefield environment; infrared interference; anti-interference technology; infrared guidance

收稿日期: 2024-11-14

基金项目: 型号预研项目

作者简介: 高宇轩(1998-), 男, 四川邛崃人, 硕士, 主要研究方向为光电探测与控制。

*通讯作者: E-mail: 13880166113@163.com

0 引言

随着科技发展,现代化作战理念和形态不断更新升级,对中近程导弹作战系统提出了更高的任务需求。如何实现高精度瞄准、抗干扰能力强、打击成本低、可多波次打击的远距离打击目标任务,是当前军事研究领域的关键目标和重要发展方向。红外导引头具有自主目标识别与跟踪功能,确保高精度导弹系统能够锁定和跟踪目标,连续观察目标状态并制定相应的制导指令,完成精确打击目标的任务^[1]。

在作战任务中,典型目标包括指挥机构、通信节点、雷达阵地、机场跑道、飞机掩蔽库、军用港口、弹药库、桥梁、隧道以及兵营等地面固定目标,目标区背景类型包括城区、农田、林地、山地和岛岸等典型背景。在此类复杂战场环境下要完成对目标的自主搜索、捕获、识别和跟踪,存在作战场景复杂、干扰类型众多、目标识别跟踪算法需具有较强的场景适应性和抗干扰性能等难点。本文从复杂战场环境下红外导引头目标受到的各类干扰展开分析,并介绍目前应用的抗干扰技术,为红外导引头抗干扰策略的制定提供参考。

1 红外导引头结构及原理

红外导引头由位标器和电子舱组成,如图1所示。位标器可以分为红外探测系统和陀螺定标系统两部分。红外探测系统主要实现光电转换功能,并将电信号传递给电子舱;其内部结构包括光学结构和红外探测器。陀螺定标系统再基于提取到的红外辐射信息实现对目标的追踪与定位功能。电子舱内主要有跟踪电路和各种辅助电路。跟踪电路可以对跟踪信号进行有效控制,实现信号提取和噪声抑制等功能^[2]。

红外导引头的主要功能是对目标进行检测、识别和持续跟踪,同时在整个工作工程中对目标的方位、速度、加速度等信息参数进行测量,最终形成导引信号并将其传输给导弹的制导回路^[3]。红外导引头的工作流程如图2所

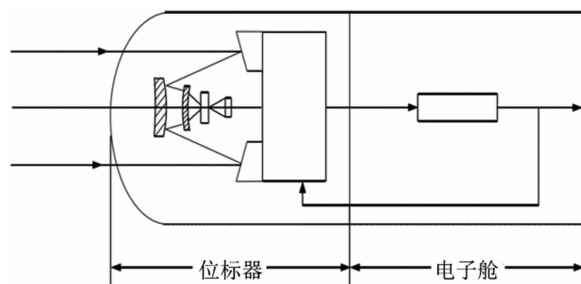


图1 红外导引头的结构示意图^[2]

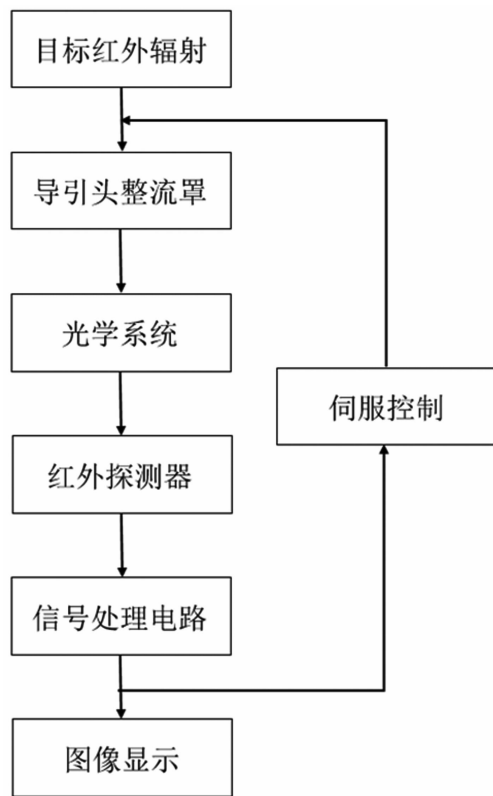


图2 红外导引头的工作流程^[2]

示。目标的红外辐射信息通过整流罩和光学系统处理后汇聚到系统焦平面处,探测器再将光信号转换成电信号,随后跟踪系统再将电信号处理后显示图像,完成对目标的跟踪和锁定^[2]。

2 战场干扰分析

红外导引头在末制导阶段面临大量自然因素干扰和战场环境下的各种主被动干扰。典型作战场景下,主要干扰类型包括云、雾等气候条件干扰以及烟幕、点源诱饵、激光压制、红外伪装、多波次打击下的目标毁伤等主被动干

扰。目标、场景的多样性以及各类干扰的复杂性和随机性给导引头目标识别与跟踪造成了极大的困难。为提高干扰场景下导引头的识别跟踪能力,需要对各种干扰进行机理分析。

2.1 烟幕干扰

烟幕干扰是指通过发烟装置在目标区形成烟幕墙,利用烟幕对光辐射的折射、散射和吸收作用,衰减目标红外辐射能量,使光电探测设备难以发现目标的一种无源干扰方式^[4]。烟幕干扰场景图像如图 3 所示。发烟装置产生烟幕的浓度和形态变化是一个随时间变化的非线性动态过程。在烟幕生成的最初阶段,其浓度和覆盖面积会逐渐增大,当达到最大值后再逐渐减小。这种变化过程在红外图像上体现为图像会从最开始清晰到模糊甚至完全覆盖(即目标被完全遮蔽),当烟幕浓度随时间变化逐渐降低后,图像又变得清晰^[5]。



图 3 烟幕干扰场景

烟幕干扰会造成红外导引头上红外探测器接收到的目标辐射能量衰减,导致图像灰度级减少,目标成像清晰度降低,图像质量下降。当目标局部或完全遮蔽,导引头获取的图像中目标特征发生变化,导致目标识别与跟踪性能下降。

2.2 点源红外干扰

点源红外干扰是常见的红外干扰技术之一,通常使用干扰弹(红外诱饵弹)来实现。当

诱饵弹燃烧时,形成的热图像比被保护目标的红外辐射强度大若干倍,导致视场中大部分场景灰度被压制在较小的范围内,无法呈现图像细节,对目标检测与识别造成很大影响。点源红外干扰对红外导引头的干扰主要有两点:

(1)点源诱饵的高温造成红外探测器在数字图像转换过程中出现对比度压制,导致视场中大部分场景灰度被压制在较小的范围内,无法呈现图像细节。图像中目标的边缘等特征缺失,导致导引头目标识别能力下降。

(2)点源诱饵形成的点状或面状亮斑导致目标及周围场景特征发生变化,从而造成导引头目标跟踪稳定性下降。

2.3 激光压制干扰

激光压制干扰是指通过高能量激光对红外探测系统进行照射,在探测器上形成干扰激光光斑。激光压制干扰图像如图 4 所示。对于红外成像系统,探测器会在吸收的激光功率超过其饱和阈值时进入非线性响应区,导致信噪比下降、探测能力减弱,甚至产生致眩、致盲现象^[6]。



图 4 激光压制场景

激光压制红外干扰技术以其作用距离远、打击速度快、灵活性强、攻击能量高等优点,成为当前对抗红外成像制导武器的主流技术。表 1 列出了几种典型红外波段的激光器性能参数。

表 1 典型红外激光器性能参数

激光器类型	波长	功率	干扰机理
Nd:YAG 型激光器	1.064 μm	10.84 W	致盲
掺 Er 晶体固体激光器	1.654 μm	6.1 W	致盲
声光调 Q 固体激光器	3.84 μm	16.7 W	致盲
HF/DF 化学激光器	3.8 μm	2.2 MW	软/硬损伤

激光压制红外干扰会造成导引头红外探测器的大量像元饱和, 导致视场中大部分场景灰度被压制在较小的范围内, 无法呈现图像细节。而且在末制导目标跟踪阶段, 除了激光压制红外干扰造成对比度压制和目标遮蔽之外, 激光脉冲式发射还会引起图像闪烁现象, 造成图像在时间上连续变化, 从而导致跟踪丢失。

2.4 云层遮挡干扰

云层遮挡是红外成像制导面临的主要干扰模式之一。红外辐射虽然对薄雾和轻微沙尘等弱干扰具有一定的穿透能力^[7], 但无法穿过较厚的云层。当地面目标被云层遮挡时, 无法对目标进行准确的特征提取, 从而影响捕获、识别、跟踪的效果。根据遮挡程度、遮挡时间、云层薄厚的不同, 云层遮挡可以分为局部遮挡和完全遮挡、短时间遮挡和长时间遮挡、薄云遮挡和厚云遮挡^[8], 在不同情况下对红外导引头的干扰效果也具有差异。

云层遮挡对红外导引头的干扰主要发生在末制导目标捕获阶段。导引头视场被云层部分遮挡会造成目标成像特征变化, 从而导致导引头目标捕获能力下降。视场被云层完全遮挡会导致导引头目标捕获距离缩短。在末制导目标跟踪阶段, 由于云层遮挡, 导引头跟踪的目标特性发生连续变化, 可能导致目标跟踪漂移或丢失。云层遮挡的红外图像如图 5 所示。

2.5 隐身与伪装干扰

红外隐身与伪装干扰是指采用特殊涂料、材料等改变目标的红外特性, 从而降低目标被红外成像系统探测或识别跟踪的概率。它是电子对抗防护的重要手段。红外隐身涂料和红外伪装的主要类型及特点如表 2 所示。



图 5 受云层遮挡影响的红外图像

表 2 红外隐身涂料和红外伪装的特点

伪装类型		特点
红外隐身涂料	反射型	改变涂层发射率
	转换型	波长变化使波段转移
静态红外伪装	热红外伪装涂料	低太阳吸收率
	热红外伪装网	伪装成常温目标
动态红外伪装		高频变换红外辐射特征

红外隐身与伪装干扰对红外导引头的干扰主要体现为造成导引头视场内目标特征发生变化, 导致导引头目标捕获能力下降。因此, 针对红外隐身与伪装干扰, 红外导引头需要采取的抗干扰措施是提高目标捕获算法对目标特征变化的鲁棒性, 以提升目标在红外隐身与伪装条件下的捕获能力。

2.6 多波次打击干扰

多波次打击是指针对重点目标, 采用多弹同时发射或者短时间内多次发射的方式, 实现对目标的饱和攻击, 可能会产生烟雾、火光、目标毁伤、强光点源等复杂场景干扰。弹坑红外图像如图 6 所示。



图 6 多波次打击下产生的弹坑

多波次打击干扰造成后续导弹采集的实时图像和预先装订的目标图像出现很大的差异、实时图像发生连续变化等,从而给目标识别与跟踪带来困难。多波次打击干扰对红外导引头的干扰主要包括:

(1)前次打击产生的弹坑、毁伤等会造成场景及目标的图像特征发生变化,目标捕获概率下降。

(2)前次打击产生的战场烟雾、灰尘等在一段时间内不会消散,造成导引头成像质量下降或对目标全部或局部遮挡,从而导致目标捕获概率下降或跟踪精度降低。

(3)前次打击产生的爆炸火光、燃烧物等高温区域,在短时间内形成红外遮蔽干扰或者红外干扰压制,使得红外导引头图像细节丢失或被遮挡,目标跟踪精度下降,甚至无法保持跟踪状态。

3 抗干扰技术

在末制导阶段,导引头面临大量自然因素干扰和战场环境下的各种主被动干扰。目标、场景的多样性以及各类干扰的复杂性和随机性给导引头目标识别造成了极大的困难。根据干扰类型的不同,在各个阶段引入抗干扰设计,对作战过程中面临的各种自然和人工干扰进行抑制,实现末制导全流程抗干扰,提高导引头在干扰条件下的目标捕获概率以及跟踪稳定性

和可靠性。目前已应用的抗干扰技术主要包括红外图像自适应细节增强技术、多特征联合决策干扰检测技术、全域离散子区模板匹配技术和在线学习目标跟踪抗干扰技术。

3.1 红外图像自适应细节增强技术

红外图像自适应细节增强技术对原始图像分层并采用不同的增强方法,兼顾低动态范围和高动态范围图像的细节信息。对于烟幕、雨雾干扰造成的红外图像动态范围下降,能够增强对比度,提升图像质量。对于点源压制、火光、激光等干扰造成的高动态范围对比度压制,能够保留目标场景图像中的目标细节,抑制强辐射源对成像特性的影响。

红外图像自适应细节增强技术的基本原理及工作流程如图 7 所示。首先通过引导滤波器将高动态的原始数据分解为不同尺度、不同对比度的基底图像和细节图像;对基底图像采用自适应直方图拉伸算法,增强低频信息的对比度;对细节图像进行小动态扩展和细节增强;最后对两部分的处理结果进行动态范围分配及融合^[9],从而实现图像增强。算法主要由数据修正以及图像分层拉伸增强算法两部分构成,能有效改善图像的对比度,增强成像细节展现效果,消除高温点源压制问题。下面介绍各模块的详细设计。

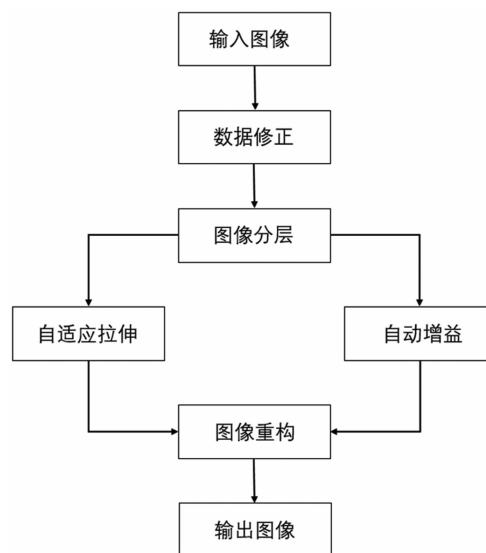


图 7 红外图像自适应细节增强算法的流程图

图像分层时首先使用引导滤波器处理图像数据,可以得到:

$$I = I_{\text{detail}} + I_{\text{base}} \quad (1)$$

式中, I_{detail} 为小尺度、低对比度的细节图像; I_{base} 为大尺度、大对比度的基底图像。再用自适应直方图拉伸处理基底图像,以直方图波谷为端点进行灰度分区间,每个区间内自适应求得最适应线性映射斜率,最终构成整体分段线性映射功能。算法原理如图 8 所示。

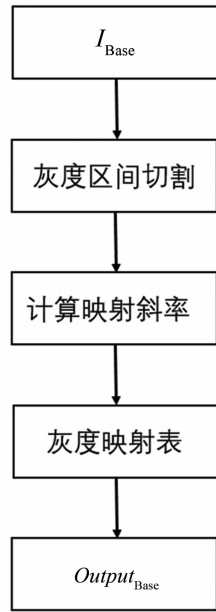


图 8 自适应直方图拉伸的流程图

下一步采用自动增益控制处理细节图,通过自动增益控制矩阵 G 调制细节层图像以降低其噪声水平。

$$\tilde{I}_{\text{detail}} = I_{\text{detail}} \cdot G \quad (2)$$

再使用融合权重系数 m 将处理后的基础层图像与细节层图像进行融合重构,得到最终输出的增强图像:

$$\text{Output} = m \cdot \tilde{I}_{\text{base}} + (1 - m) \cdot \tilde{I}_{\text{detail}} \quad (3)$$

通过外场验证试验,可以得到红外图像自适应细节增强技术对低对比度图像以及高动态范围对比度压制图像的增强效果,如图 9 和图 10 所示。

3.2 多特征联合决策干扰检测技术

不同类型的干扰在红外图像上呈现出不同

的亮度、纹理等特征,可以通过特征模式识别方式进行干扰检测。多特征联合决策干扰检测技术利用分形维数、灰度共生矩阵、Tamura 纹理特征和 LBP 纹理特征等多维度特征构建特征向量空间,通过分类器实现干扰检测分类。

首先建立红外干扰图像样本库,分别提取干扰和非干扰区域样本的多维度特征,采用主成分分析法进行特征空间维度压缩;然后采用向量机对样本库进行训练,得到干扰分类器;在干扰检测阶段,对输入的红外图像进行粗、精区域划分,遍历所有区域提取多维度特征并压缩,接着采用干扰分类器进行检测;最后,联合粗、精干扰分类结果及空间位置信息等进行综合决策,输出干扰检测结果。干扰检测流程图 11 所示。

多维度特征提取的流程包括计算图像区域的分形维数、灰度共生矩阵、Tamura 纹理特征和 LBP 纹理特征。

3.2.1 分形维数

分形维数表达了区域的空间结构特点。通过计算复杂形体空间有效性,表述各类特征目标的复杂程度。首先通过尺度因子 r 计算总单元数目 N_r :

$$N_r = \sum_{i,j} n_r(i,j) \quad (4)$$

式中, $n_r(i,j)$ 为对应单元区域的单元数目。再以对数为坐标轴绘制散点图并解出线性回归方程,得到的斜率即为分形维数^[10]。

3.2.2 灰度共生矩阵

灰度共生矩阵是一种表述图像纹理信息的分析方法,即通过对影像中灰度值空间分布进行统计分析来计算各种描述子。

对比度为

$$\text{CON} = \sum_{i,j=0}^{N-1} p_{i,j}^2(i,j) \quad (5)$$

相关性为

$$\text{CORR} = \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} p_{i,j} \cdot (i - u_i) \cdot (j - u_j)}{\sqrt{\sigma_i \sigma_j}} \quad (6)$$

角二阶矩为



图 9 烟雾干扰红外图像的增强效果



图 10 火光压制红外图像的增强效果

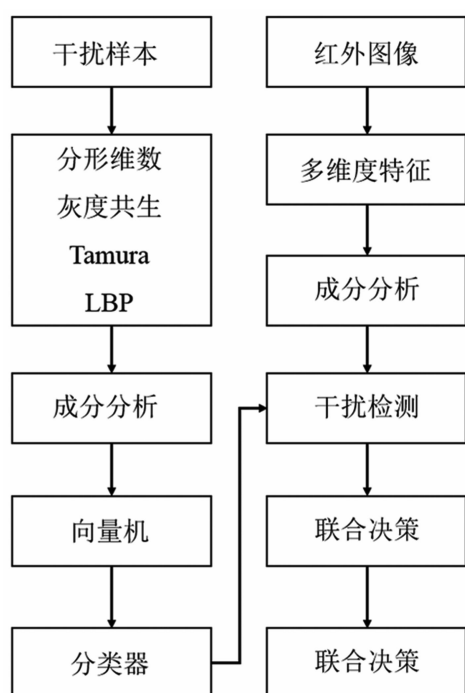


图 11 多特征联合决策干扰检测流程图

$$ASM = \sum_{i,j=0}^{N-1} p_{i,j}^2 \quad (7)$$

同质性为

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{p_{i,j}}{1 + (i-j)^2} \quad (8)$$

式中, N 为灰度级; $p(i, j)$ 是像素灰度值为 j 的概率; G 为 $N \times N$ 的灰度共生矩阵。这些描述子可以定量表达图像的纹理信息^[10]。

3.2.3 Tamura 纹理特征

Tamura 纹理特征是指通过计算粗糙度、对比度和方向度三种特征来表达干扰区域和非干扰区域样本间的区别。粗糙度反映了影像纹理的粒度性, 其计算方法为先计算图像中 $2^k \times 2^k$ 窗口内像素的平均强度值^[10]:

$$A_k(x, y) = \sum_{i=x-2^{k-1}}^{x+2^{k-1}} \sum_{j=y-2^{k-1}}^{y+2^{k-1}} g(i, j) / 2^{2k} \quad (9)$$

式中, $g(i, j)$ 为对应位置的灰度值。再计算不同方向窗口内每个像素的平均强度差:

$$\begin{cases} E_{k,h}(x, y) = |A_k(x + 2^{k-1}, y) - A_k(x - 2^{k-1}, y)| \\ E_{k,v}(x, y) = |A_k(x, y + 2^{k-1}) - A_k(x, y - 2^{k-1})| \end{cases} \quad (10)$$

当 E 取最大值时得到 k 值, 再计算最佳尺寸 $S_{best}(x, y) = 2^k$; 计算 S_{best} 的平均值, 可以得到粗糙度 T_{crs} 的表达式:

$$T_{crs} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{best}(i, j) \quad (11)$$

对比度描述的是图像中像素分度值强度的分布情况:

$$\alpha_4 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} T_{con} = \frac{\sigma}{\alpha_4^{1/4}} \quad (12)$$

式中, T_{con} 为对比度; μ_4 是图像灰度强度分布的四阶矩; σ 是标准差。方向度描述了图像纹理沿某些方向的分布情况。首先计算每个像素点的梯度向量:

$$\begin{cases} |\Delta G| = (|\Delta_H| + |\Delta_V|)/2 \\ \theta = \tan^{-1}(\frac{\Delta_V}{\Delta_H}) + \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} V_d = \{G_d, CON_d, CORR_d, ASM_d, HOM_d, T_{dcrs}, T_{dcon}, T_{ddir}, LBP_d\} \\ V_n = \{G_n, CON_n, CORR_n, ASM_n, HOM_n, T_{ncrs}, T_{ncon}, T_{ndir}, LBP_n\} \end{cases} \quad (16)$$

对特征向量进行归一化和主成分分析, 可得:

$$\begin{cases} \hat{V}_d = \{\hat{G}_d, \hat{CON}_d, \hat{CORR}_d, \hat{ASM}_d, \hat{HOM}_d, \hat{T}_{dcrs}, \hat{T}_{dcon}, \hat{T}_{ddir}, \hat{LBP}_d\} \\ \hat{V}_n = \{\hat{G}_n, \hat{CON}_n, \hat{CORR}_n, \hat{ASM}_n, \hat{HOM}_n, \hat{T}_{ncrs}, \hat{T}_{ncon}, \hat{T}_{ndir}, \hat{LBP}_n\} \end{cases} \quad (17)$$

构造用于向量机训练的干扰图像训练集, 从而获得目标的最优分类结果。核函数使用径向基核函数, 算法采用线性分类模型^[11], 其表达式为

$$\begin{cases} \min_{w, b} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 \\ \text{s.t. } y_i |\langle \omega, x_i \rangle + b| \geq 1, i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (18)$$

式中, ω 为分类器的参数向量; b 为偏移量。在干扰检测阶段, 对输入的图像进行区域划分, 遍历所有区域提取多维度特征, 并将其输入到已训练的分类器, 最终得到干扰检测结果。

目前已有导引头项目采用多特征联合决策干扰检测技术对云层、烟幕、红外点源诱饵、激光干扰等干扰进行检测。通过外场试验验证, 干扰检测概率能达到 90% 以上。干扰检测效果如图 12、图 13 所示。

式中, Δ_H 和 Δ_V 分别为水平和垂直方向上图像卷积的变化量。再计算直方图的峰值尖锐程度, 可以得到方向度 T_{dir} :

$$T_{dir} = \sum_p^{n_p} \sum_{\Phi \in W_p} (\Phi - \Phi_p)^2 H_D(\Phi) \quad (14)$$

式中, p 为峰值; n_p 为峰值集合; W_p 为离散区域; Φ_p 为波峰。

3.2.4 LBP 纹理特征

LBP 纹理特征描述了图像的纹理特征, 其计算量相对较小, 并且对光照变化不敏感, 有利于对不同程度的干扰进行检测, 其表达式为

$$LBP(x, y) = \sum_{j=1}^8 S(I(j) - I(c)) \cdot 2^j \quad (15)$$

式中, $I(j)$ 为窗口内除中心像素点外的第 j 个像素点; $I(c)$ 为中心像素点的灰度值; $S(x)$ 为判别函数。根据这些特征建立干扰区域和非干扰区域的特征向量, 其表达式为

3.3 全域离散子区模板匹配抗干扰技术

在云层、烟幕遮挡、毁伤、弹坑等场景干扰下, 目标成像的特征会发生变化, 导致后续导引头获取的实时图像与加载的目标参考图差异变大, 给目标捕获识别带来困难。从干扰机理分析, 两者都属于干扰造成目标区域图像发生变化, 目标区域实时图特征与参考图特征出现差异。因此可以采用离散化子区处理方法, 通过对不同区域赋予不同的匹配权重, 降低干扰区域对匹配结果的影响; 同时增加全域匹配模块, 将实时图与全域参考图匹配, 扩大目标捕获范围, 提升目标捕获的鲁棒性。全域离散子区模板匹配抗干扰技术的工作流程如图 14 所示。

多特征提取在不同尺度下分别计算实时图与参考图的空间结构特征与边缘特征, 提取异源图像的共性特征; 完成特征提取后, 将实时

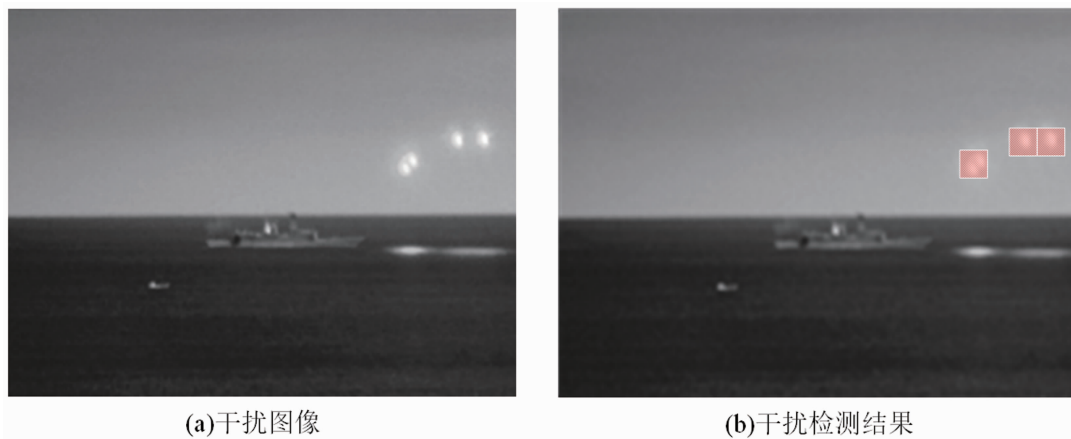


图 12 红外点源干扰弹检测结果

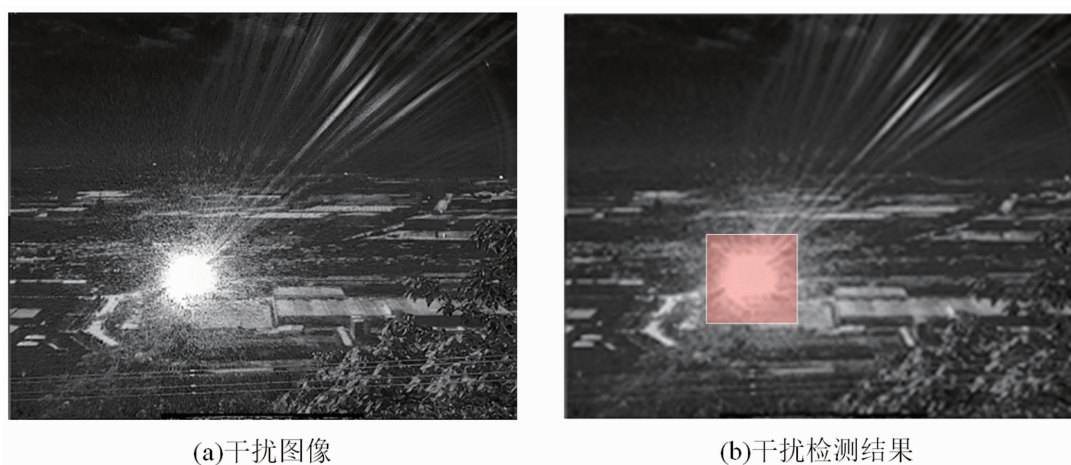


图 13 激光压制干扰检测结果

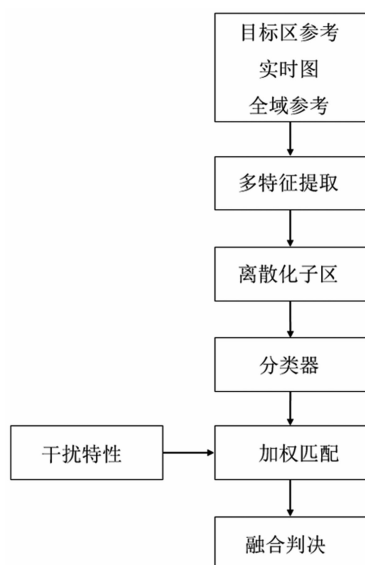


图 14 全域离散子区模板匹配抗干扰技术工作流程图按照相同的尺寸划分为多个子区。对于 640×512 的图像, 以 32 个像素为步长, 划分为 20×16 个子区, 如图 15 所示。

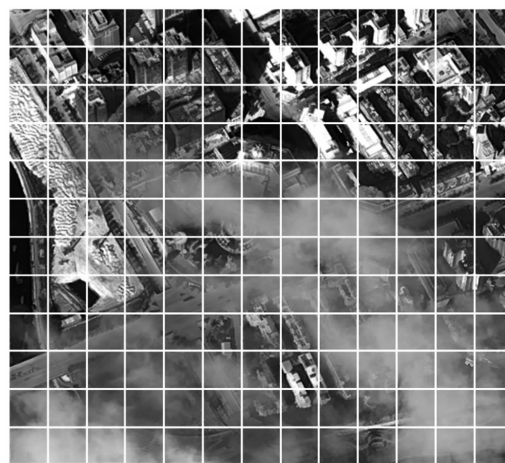


图 15 实时图子区分

根据干扰检测阶段得到的干扰检测结果, 对实时图不同的子区分配不同的权重, 然后用重新分配权重的实时图与参考图进行搜索匹配, 计算相关曲面和最佳匹配点位置, 如图 16 所示。

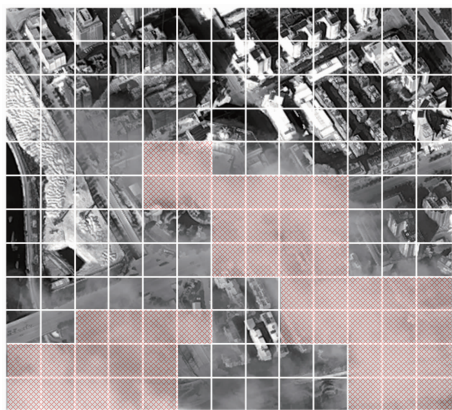


图 16 干扰子区掩码

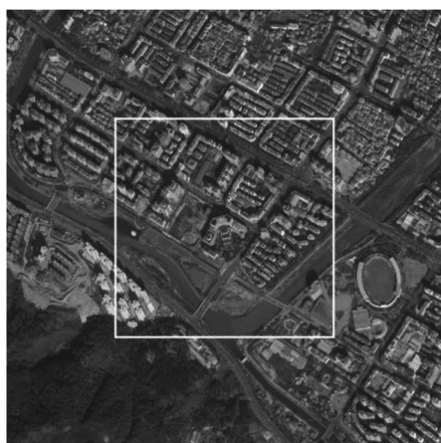
为提升模板匹配的抗干扰能力，增加实时图与全域参考图匹配模块。全域匹配同样采用离散化子区计算方式，计算流程同样包括多特征提取、离散化子区、加权匹配三个步骤。在

完成目标区参考图-实时图匹配、实时图-全域参考图匹配后，对两级匹配结果进行融合判决。结合干扰类型、干扰程度、飞行状态等各种因素，输出最终的捕获结果。

通过外场试验验证，全域离散子区模板匹配抗干扰技术在不同干扰类型下的匹配结果如图 17 和图 18 所示。

3.4 在线学习目标跟踪抗干扰技术

在目标跟踪阶段，导引头面临的干扰包括云层遮挡、战场烟雾及火光、红外点源诱饵、激光主动压制干扰等。云层、烟雾和火光表现为对视场的遮挡以及形态连续变化。红外点源诱饵表现为目标附近的多个形状相似、运动的亮斑，激光主动压制干扰表现为视场中部分区

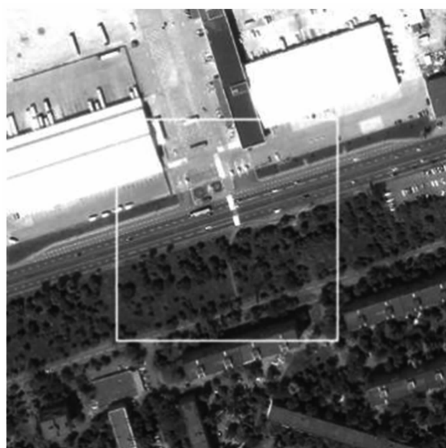


(a)参考图



(b)匹配结果

图 17 云层遮挡干扰匹配效果



(a)参考图



(b)匹配结果

图 18 战场烟幕干扰匹配效果

域图像饱和并闪烁, 各种干扰因素均可能导致目标跟踪漂移或丢失。

针对导引头在目标跟踪阶段面临的各种干扰, 采用在线学习目标跟踪抗干扰技术进行干扰抑制, 以保证跟踪精度及稳定性。在线学习目标跟踪抗干扰技术在尺度自适应目标跟踪算法的基础上增加在线学习模块, 同时对前景目标样本和背景样本进行学习, 并在跟踪过程中引入干扰检测模型, 对场景中的干扰物进行实时监控, 将干扰信息反馈给学习模块, 以调整目标跟踪模型, 检测模型更新策略。工作流程如图 19 所示。

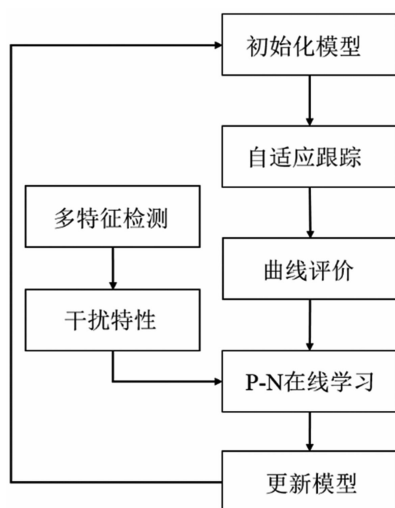


图 19 在线学习目标跟踪抗干扰技术的工作流程

在线学习模块是基于 $P-N$ 半监督学习理论而建立的。 P 、 N 分别指正、负约束, 代表了发现新目标特性的正样本数和目标周围环境的负样本数。正、负约束都会对学习结果产生反馈, 并对结果进行评估, 从而筛选出与约束条件矛盾的样本并进行重新训练, 直到满足约束条件为止。

$P-N$ 学习模块分为分类器、训练集、监督训练和 $P-N$ 专家四个部分^[12]。先用带标记数据对分类器进行初始化, 然后分类器再对无标记数据进行标记和记录。对不满足条件的样本数据进行纠正, 然后重新加入训练集, 不断循环上述过程, 直到满足条件为止^[13]。学习过程框图如图 20 所示。

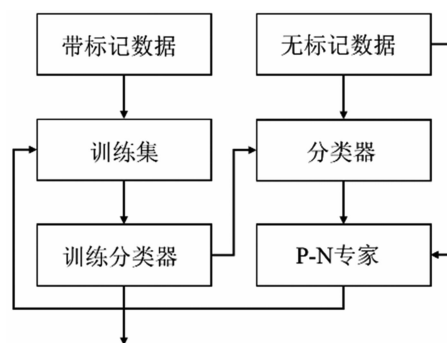


图 20 $P-N$ 学习过程框图

在 $P-N$ 学习的基础上, 进一步引入干扰物检测识别和跟踪响应曲面质量评价, 从而有效提高学习模型的判别能力。干扰检测识别采用多特征联合决策检测结果, 并依据干扰位置、干扰程度等对正负样本进行筛选。若样本中有干扰存在, 且干扰程度达到一定阈值, 则丢弃该样本。将筛选完成后的样本加入训练集中进行分类器训练, 如图 21 和图 22 所示。



图 21 丢弃样本

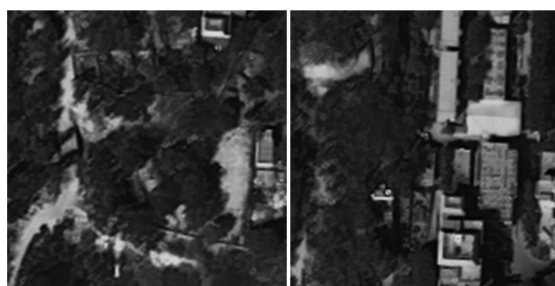


图 22 筛选后样本

跟踪响应曲面质量评价是在跟踪阶段加入匹配的相关响应曲面计算, 通过对不同情况下匹配的响应曲面进行统计分析, 发现在目标正常跟踪和出现遮挡时, 相关曲面的峰值标准差 σ 、峰值均值 μ 、峰值旁瓣比 psr 、曲面熵值 E 以及平均峰值相关能量 $apce$ 分别出现了不同

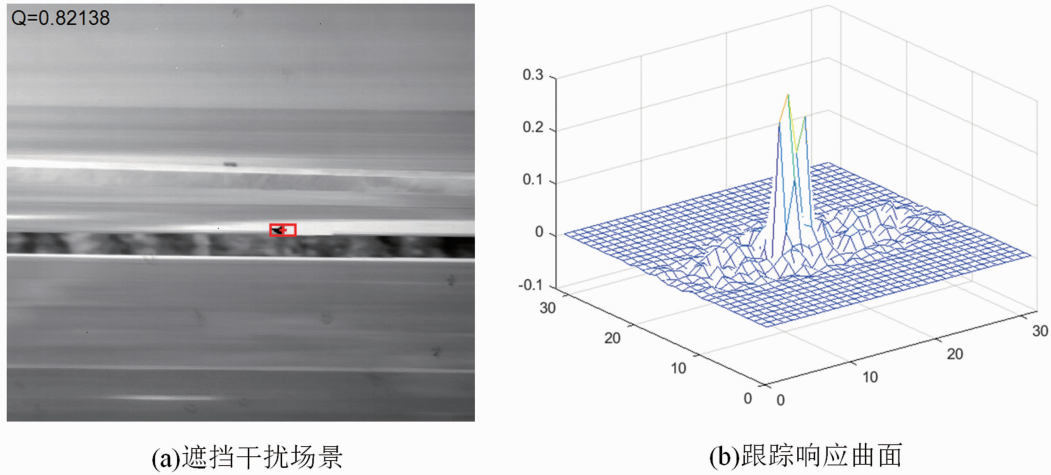


图 23 跟踪响应曲面质量评价

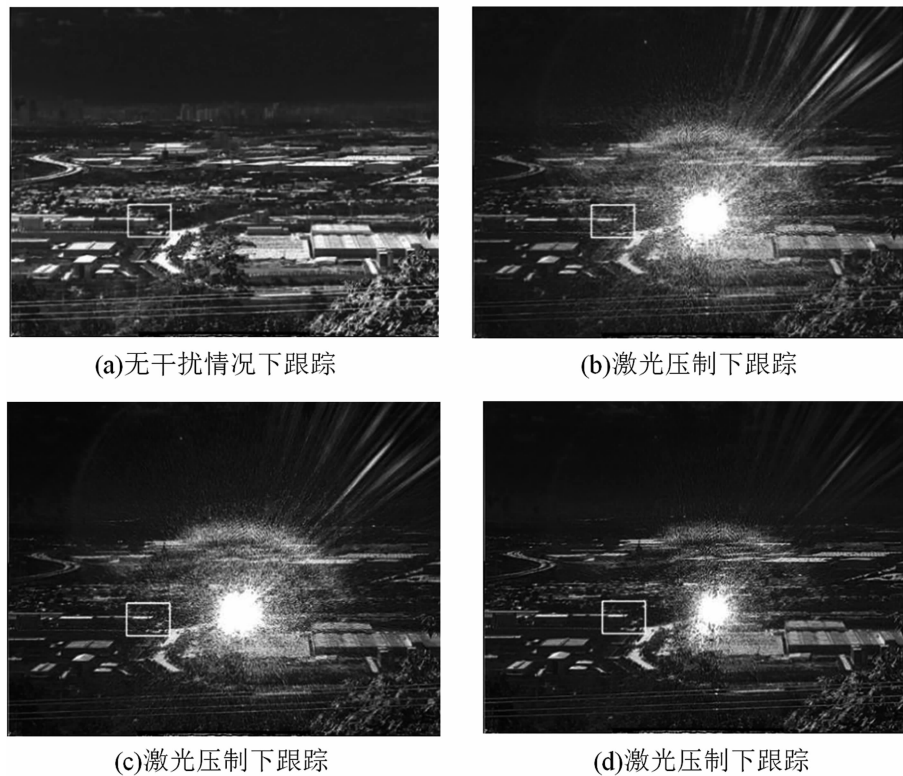


图 24 激光压制下跟踪的红外图像

情况的变化。基于其不同统计量的相关性，设计响应曲面质量函数 Q 来对跟踪置信度进行判定：

$$Q = g_{\max} \cdot \frac{\min(psr, apce)}{E} \quad (19)$$

式中，峰值旁瓣比 psr 、曲面熵值 E 以及平均峰值相关能量 $apce$ 的表达式分别为

$$psr = \frac{g_{\max} - \mu_{s1}}{\sigma_{s1}} \quad (20)$$

$$E = - \sum_{i=0}^{255} \hat{g}_i \log(\hat{g}_i) \quad (21)$$

$$apce = \frac{g_{\max} - g_{\min}}{\text{mean}(g - g_{\min})} \quad (22)$$

根据统计分析结果，当跟踪质量函数 Q 小于 3 时，目标跟踪失败的可能性较高。此时，暂停尺度估计以及对跟踪与检测模型的更新，减少干扰对目标跟踪的影响。跟踪响应曲面质量评价如图 23 所示。

通过外场试验验证, 在线学习目标跟踪抗干扰技术目前成功应用于多款导引头。在激光压制干扰下导引头保持稳定跟踪的效果, 如图 24 所示。

4 结束语

现代战争环境复杂多变, 除了文中所列举的各类自然环境干扰和人为干扰因素以外, 还存在极端天气的影响以及随技术进步产生的干扰效果更强的新式干扰设备。因此红外导引头的抗干扰技术需要不断发展, 才能适应日益复杂的战场环境。目前应用于导引头的抗干扰技术主要采用图像处理、模型训练等手段。针对典型环境干扰如烟幕、云层遮挡、激光干扰等, 这些技术可以有效地提升导引头在干扰下对目标的识别、捕获和跟踪等性能。在其他领域已经有结合深度学习、卷积神经网络等新兴技术的抗干扰技术研究, 这些将是未来红外导引头抗干扰技术发展的重要方向。

参考文献

- [1] 李祉涵. 激光干扰红外导引头成像制导性能仿真研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [2] 李奕. 气动效应及激光干扰红外导引头成像建模仿真研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [3] 张新朝. 基于双 DSP 的红外导引头信息处理机设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [4] 王琦, 张洪波. 红外探测设备抗烟幕干扰试验及评估方法 [J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(1): 138-142.
- [5] 许敬, 刘滨, 杨俊彦, 等. 烟幕干扰与复合导引头对抗策略研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 62-68.
- [6] 阮江洋. 激光干扰下红外成像系统性能预测研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [7] 梁杰, 李磊, 任君, 等. 基于深度学习的红外图像遮挡干扰检测方法 [J]. 兵工学报, 2019, 40(7): 1401-1410.
- [8] 成荣旺. 基于 KCF 的抗云遮挡目标跟踪方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [9] 孙刚. 图像处理方法及系统: CN202011359674.2 [P]. 2021-02-09.
- [10] 黄宇. 基于显著性分析和多纹理特征的遥感影像云检测 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [11] 金左轮, 韩静, 张毅, 等. 基于纹理显著性的微光图像目标检测 [J]. 物理学报, 2014, 63(6): 417-428.
- [12] 杨玉锋. 基于目标检测与跟踪的智能监控系统设计 [D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [13] 姚沛. 基于 TLD 多目标跟踪算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.