

光电探测技术在空海无人目标识别中的研究综述

朱云昊*

海军装备部, 陕西西安, 中国

*通讯作者

【摘要】 无人机与无人艇的广泛使用对反无人系统提出了迫切需求, 光电探测因被动成像、分辨率高等优势成为目标识别的关键技术。本文综述光电探测技术在空海无人目标识别中的研究进展。分析可见光、红外、偏振等手段对UAV与USV的适用性, 揭示UAV“小目标”与USV“弱目标”的本质差异。梳理从传统特征工程到深度学习检测的技术演进, 重点讨论YOLO及其改进、多尺度融合、注意力机制及多模态融合等优化方向。最后总结了数据集与实时性的挑战, 展望了多模态协同与轻量化部署的发展趋势。

【关键词】 光电探测; 无人目标识别; 深度学习; 小目标检测; 多模态融合

1. 引言

近年来, 无人系统在军事与民用领域的快速普及带来了严峻的安全挑战。在俄乌冲突、纳卡冲突及红海航运危机中, 无人机蜂群与自杀式无人艇展现出低成本、高机动、难拦截的作战特点, 对传统防御体系构成了显著的非对称威胁。在民用领域, 无人机扰航、非法侦察及无人艇港口入侵事件频发, 使得机场、核电站、港口及重要基础设施的安防需求急剧上升。反无人系统(Counter-Unmanned Systems, C-UxS)作战已从单纯的硬杀伤拦截转向“先识别、后处置”的精准防御模式, 其中快速、准确的目标识别是后续电子干扰、网捕及火力打击的前提。

在反无人传感器体系中, 雷达可实现远距离搜索与多目标跟踪, 但主动辐射易暴露自身, 且对低慢小(Low Altitude, Slow Speed, Small Target, LSS)目标的微多普勒特征提取易受杂波干扰[1]; 射频探测依赖无人系统的通信链路, 对静默飞行或预设航路的无人目标探测效能有限[2]。相比之下, 光电探测技术通过接收目标反射或辐射的电磁波实现被动成像, 具有空间分辨率高、可获取目标纹理与轮廓细节、不主动发射电磁信号等突出优势, 特别适合在复杂电磁环境下对无人目标进行精细识别与威胁确认[3]。

本文聚焦无人目标的光电“识别”问题, 涵盖目标检测与分类, 不涉及跟踪与行为预测。在平台覆盖上, 以无人驾驶飞行器(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)为核心研究对象, 同时拓展至无人水面艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)领域, 通过对比分析

提炼两类平台在光电识别中的共性技术与差异化需求。

全文结构安排如下: 第2章分析光电探测手段与无人目标成像特性; 第3章系统阐述无人目标识别的关键技术, 涵盖传统图像处理方法、基于深度学习的目标检测、小目标与弱目标检测、跨域迁移与多模态融合等核心方向; 第4章讨论UAV与USV的典型应用场景, 分别聚焦远距离小目标检测与海面高动态背景下的弱目标识别; 第5章总结当前研究面临的主要挑战与发展趋势, 并对未来研究方向进行展望。

2. 光电探测手段与成像特性

2.1 光电探测手段

光电探测涵盖可见光、红外、多光谱、激光和偏振等多种手段[4], 各类手段在对UAV和USV的识别任务中因成像机理与环境适配性不同而展现出显著差异, 如表1所示。

从表中可以看出, 可见光成像因其成本低且算法体系成熟, 是目前UAV识别中最常用的模式[4]。红外成像利用目标与背景的热辐射差异, 在夜间或低照度条件下具有不可替代的优势, 对于UAV电机发热及USV发动机尾迹的探测尤为有效[5]。偏振成像通过获取光线的偏振态信息, 能够显著抑制海面太阳耀斑与天空散射光, 提升USV在海天线附近的对比度, 已成为海上光电识别的重要辅助手段[6,7]。

2.2 UAV与USV成像特性对比

尽管UAV与USV同属无人目标, 但其光电成像特性存在本质差异, 直接决定了识别算法的技术路线选择。

UAV通常工作于天空背景中,背景相对均匀,纹理复杂度较低,但防御方往往需要在1 km以上的远距离对其进行早期预警。此时UAV在图像中仅占极少像素,呈现“小目

标”特征,细节纹理严重丢失,且高速运动易引入动态模糊[8]。此外,旋翼UAV的旋翼微动在短曝光成像中会产生独特的微多普勒可视特征,可作为辅助判别依据。

表1.主流光电探测手段及其对无人目标的适用性

探测手段	核心优势	UAV适用性	USV适用性
可见光	纹理细节丰富、成本低	极好(需应对光照变化)	中等(受水面反光与低照度干扰)
红外	昼夜工作、热特征敏感	较好(电机与机体热辐射)	较好(尾迹与排气热辐射,但海面热噪声较高)
多光谱	材质识别	中等	中等(水/船光谱差异,但实际应用较少)
激光	三维测距与轮廓重建	中等(远距小目标信噪比低)	较好(精度高,但受烟雾和距离限制)
偏振	抑制强反光	较差	极好(抑制太阳耀斑等海面强烈反射)

针对UAV识别的相关研究中,Dong等[9]提出一种用于红外弱小飞机的目标识别方法,基于YOLOv5集成卷积块注意力模块与Res2Net模块,以解决数据类别不平衡及弱小目标特征表示弱的问题。Misbah等[10]提出基于动态上下文注意力网络(Dynamic Context Attention Network,DCA-Net)的无人机红外小目标检测模型,采用高效通道注意力与C3-ECA模块动态捕获复杂特征,并引入高效多感受野池化层处理多尺度空间层次,提升了特征表示与处理效率。Jin等[11]构建C3K2-PF特征提取单元融合多核Inception与特征增强模块以强化细粒度特征,引入注意力尺度融合策略自适应融合多级特征,并设计任务同步动态头分解并同步优化分类与回归任务,实现一种特征增强YOLO无人机小目标检测算法。Liang等[12]设计轻量重参数化卷积增强特征表达,中心引导跨尺度融合网络实现多尺度特征高效交互,共享动态对齐检测头减少参数冗余,实现轻量高效UAV小目标检测算法。Liu[13]基于YOLOv11,采用风车形卷积替代标准卷积以增强小目标方向性空间模式,引入轻量自适应提取模块沿多尺度融合路径选择性细化聚合特征。

USV工作于海面背景,背景具有高动态、非平稳特性。波浪起伏、太阳耀斑、天空反射及水雾导致图像局部对比度剧烈变化,目标与背景的边界模糊[14]。与UAV不同,USV的识别难点并非单纯的“像素尺寸小”,而是“强杂波中的弱目标”问题:即使中近距离USV像素占比足够,海面反光与波浪干扰仍可能使目标淹没于背景中。此外,USV随波浪产生姿态俯仰与起伏,导致成像视角与目标形状持续变化,进一步增加

了识别难度。

针对USV识别的相关研究中,Fang等[15]提出一种基于Lasso特征选择与四分量极化散射分解的船舶检测方法,将表面散射、二次散射、体散射和定向偶极子作为最优特征,利用定向偶极子分量描述船舶的复合散射结构。Zhang等[16]建立海洋辐射能量模型,采用一阶差分计算线偏振梯度,基于梯度方向余弦值构建权重矩阵进行加权融合,结合主成分分析(Principal Component Analysis,PCA)提取主成分实现极化高光谱图像融合方法。王玉松等[17]基于YOLOv8,引入Copy-Paste与非配对图像风格迁移生成多视角及低质量图像,增加面向USV视角的专用小目标检测头并优化损失函数实现海上光学图像目标检测。Zhou等[18]在骨干网络中设计SWNet模块利用通道交互与分组卷积减少冗余,颈部引入小金字塔网络强化目标轮廓纹理细节,用增强的低层特征引导高层特征提取关键信息,实现面向USV的轻量级船舶检测网络YoloS。Yang等[19]采用GhostSPPCSPC扩大感受野,融合无参注意力SimAM与优化池化,引入深度可分离卷积降低计算量,实现面向USV的GDS-YOLOv7水面障碍物检测模型。

3.无人目标识别关键技术

3.1传统图像处理方法

在深度学习兴起之前,无人目标光电识别主要依赖传统图像处理流程,包括背景建模、特征工程与机器学习分类三个环节。背景建模方面,帧差法、高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)及视觉背景提取器(Visual Background Extractor, ViBe)算法被广泛应用于UAV的空中背景减除[20];特

征工程方面, 方向梯度直方图(Histogram of Oriented Gradients, HOG)、尺度不变特征变换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)及局部二值模式(Local Binary Pattern, LBP)等手工特征被用于描述UAV与USV的轮廓与纹理信息, 并结合支持支持向量机(Support Vector Machine, SVM)或AdaBoost进行分类[21]。然而, 传统方法对特征的先验假设较强, 在UAV远距离小目标细节缺失、USV海面复杂杂波及动态光照变化等场景下鲁棒性显著下降, 泛化能力有限[22]。随着大规模标注数据集的建立与GPU算力的提升, 基于深度学习的方法已逐步取代传统方法, 成为当前无人目标光电识别的主流技术路线[23]。

相关研究中, Li等[24]结合改进局部二值模式算子(Local Binary Pattern Operator, LBP)算子与高斯混合模型进行背景建模, 利用LBP纹理对阴影不敏感的特性抑制干扰, 将LBP图像信息与KLT特征点跟踪融合, 实现准确稳定跟踪姿态变化的飞机。Alzboon等[25]针对UAV与鸟类的空中区分问题, 评估了相关机器学习模型的识别效果。结果表明, kNN、AdaBoost和CN2规则归纳在降低误报和漏报方面表现优异, 能够有效区分UAV与鸟类, 适用于实时空域安全监控。Liu等[26]采用带空间平滑约束的高斯混合模型进行语义分割, 同时生成水体掩码并拟合水天线, 基于背景先验与对比先验的显著性检测在水天线下方搜索障碍物, 并利用相邻帧连续性滤除太阳反光、波浪等虚警。宋敏敏等[27]提出基于方向梯度直方图(Histogram of Oriented Gradients, HOG)特征与SVM分类器的红外目标检测与分类方法, 实现红外图像的智能化分类, 为目标特性分析和导引头算法设计提供支撑。

3.2 基于深度学习的目标检测

深度学习目标检测器按流程可分为两阶段与单阶段两类。两阶段方法以Faster R-CNN为代表, 通过区域提议网络(Region Proposal Network, RPN)生成候选框, 再经分类器精细识别, 精度较高但计算成本高[28]。单阶段方法以YOLO系列与单次多框检测器(Single Shot MultiBox Detector, SSD)为代表, 将检测与回归整合为端到端网络, 推理速度显著优于两阶段方法, 更适合实时性要求较高的光电识别场景[29]。

在无人目标识别领域, 研究者通常将ImageNet上预训练的通用检测器迁移至UAV

或USV数据集上进行微调[30]。然而, 直接迁移存在明显性能瓶颈。通用检测器针对自然图像中的常规尺度目标优化, 当应用于远距离UAV或波浪中仅露出半截船体的USV时, 小目标与弱目标的平均精度均值(Mean Average Precision, mAP)往往显著下降。

为缓解上述问题, 多尺度特征融合成为关键优化方向。特征金字塔网络(Feature Pyramid Network, FPN)通过自顶向下的路径融合深层语义特征与浅层位置特征, 显著提升了小目标检测能力。相关研究中, Liang等[31]针对UAV红外小目标检测, 采用多尺度卷积与通道注意力提取特征, 分层特征融合模块增强浅层边缘, 边缘自融合模块整合边缘与多尺度信息, 有效缓解下采样导致的目标信息丢失。简钰洪等[32]在骨干网络引入卷积块注意力模块(Convolutional Block Attention Module, CBAM), 并增加小目标检测层, 实现面向“低慢小”UAV的改进YOLOv7与DeepSort检测跟踪算法。刘一诺等[33]提出面向UAV航拍小目标检测的改进YOLOv7, 采用SPD-Conv模块替代原有卷积与池化层, 解决细粒度信息丢失问题。

然而, FPN在连续降采样获取深层语义特征的过程中, 小目标的浅层纹理信息容易被稀释甚至完全丢失。针对这一问题, Kang等[34]采用轻量SEConv替代标准卷积, 设计SESPPCSPC模块提取多尺度特征, 在特征融合部分引入CBAM形成CBAMCAT模块以优化通道与空间特征。赖勤波等[35]在ResNet50中引入SENet通道注意力与并行空洞卷积特征融合模块, 并基于K-Means重设RPN锚框尺寸, 有效提升了面向UAV图像目标与多尺度目标的检测精度。Qiu等[36]提出面向UAV航拍图像的AUFFNet检测网络, 设计加性自注意力卷积门控融合模块增强多维特征交互, 并引入遥感密集小目标检测损失函数。

3.3 小目标与弱目标检测

小目标与弱目标检测是UAV远距离识别与USV海面识别的共性问题, 也是当前技术难点所在。针对UAV远距离成像导致的分辨率不足, 超分辨率(Super-Resolution, SR)预处理技术在用来增强目标细节。基于生成对抗网络(Generative Adversarial Network, GAN)的SR重建方法能够在保持实时性的前提下, 将低分辨率UAV图像恢复至较高清晰度, 从而改善后续检测器的特征提取效果[37]。近年来, 扩散模型在低光照图像增强与

图像修复领域展现出潜力,有望进一步改善夜间UAV红外图像的可用性[38]。

在检测网络内部,特征融合策略的优化是提升小目标检测率的核心。除FPN及其变体外,重采样策略与特征融合后的重加权机制能够减少上采样过程中的信息损失。相关研究中,唐克等[39]提出面向UAV图像的轻量化YOLOv8改进算法,设计小目标检测层及额外检测头减少特征损失,提出Wise-Inner-MPDIoU损失函数,并结合幅度层自适应剪枝实现轻量化。贺智轩等[40]提出面向UAV航拍图像的DMF-YOLOv11检测算法,设计双重双向辅助FPN实现多层次特征双向融合,构建多分支混合卷积提升小尺度感知,融合自调特征聚合网络与C3K2模块提出C3K2_FMB。郭杰等[41]提出并行轻量化的双注意力特征交互机制,主干中设计C2f_SMT模块融合浅层细节与高层语义,并引入COSPFM多尺度融合模块强化小目标感知。

在损失函数层面,焦点损失通过降低易分类背景样本的权重,缓解了小目标训练中前景背景极度不均衡的问题。针对USV的“弱目标”问题,施宇等[42]提出面向UAV航拍图像的CFE-YOLO小目标检测模型,设计跨层级强化特征金字塔增加浅层高分辨率特征并去除深层检测头,引入深度可分离卷积实现轻量化空间金字塔池化。Feng等[43]移除大目标检测层P5,设计自适应多尺度特征融合模块,并引入动态检测头,实现了模型轻量化的同时显著提升了小目标检测精度。Ma等[44]采用C2f-DCNv4可变形卷积提取不规则目标特征,引入DySample动态上采样优化多尺度融合,并设计Focaler-ECIoU损失函数,实现了面向UAV航拍小目标的DDF-YOLO模型。

3.4 跨域迁移与多模态融合

无人目标光电识别系统在实际部署中面临严峻的跨域问题。白天训练的模型在夜间红外图像上性能骤降,仿真环境中训练的模型迁移至真实场景时产生显著域偏移,海面训练的模型在内陆水域难以适用。域自适应(Domain Adaptation, DA)技术通过最小化源域与目标域之间的特征分布差异,实现模型在无标注或弱标注目标域上的性能保持[45]。对抗性域自适应方法通过域判别器与特征提取器的对抗训练,进一步提升了跨昼夜、跨天气的泛化能力[46]。多模态融合是提升光电识别鲁棒性的另一重要途径。可见光

与红外融合可充分利用前者纹理丰富与后者昼夜工作的互补优势,通过早期像素级融合、中期特征级融合或晚期决策级融合实现全天候识别[47]。

相关研究中,Li等[48]基于IR-UWB雷达,采用自适应增益控制与离散小波分解提取微多普勒特征,利用Mamba骨干网络捕获长期运动动态,并结合对抗学习与相关对齐的双自适应策略增强跨域泛化。Chen等[49]设计动态步长反馈掩码调整自编码器,根据训练进度与损失动态调节掩码率,提出方差反馈平滑阈值策略,结合均值与方差动态调整伪标签筛选阈值,提升伪标签质量。Wang等[50]通过对教师模型施加对抗攻击生成对抗性伪标签,以纠正类别偏置、抑制过置信并激活欠置信提议,引入自适应伪标签正则化,并过采样可靠的少数类伪标签以缓解数据不平衡。Zhang等[51]设计双域自适应多尺度特征融合模块联合空域与频域减少信息损失,混合注意力检测头激活更多像素并抑制冗余特征,非步长下采样卷积保留细粒度信息。

4. 典型应用场景与平台差异分析

4.1 无人机光电识别

UAV光电识别的主要场景包括要地防空、机场净空、重大活动安保及伴随式蜂群探测。在这些场景中,防御方通常要求在1 km甚至更远距离上发现入侵UAV,此时目标在图像中仅占极少像素,且与飞鸟、风筝等空中干扰物尺度相近,极易产生虚警[52]。因此,UAV识别的技术重点在于远距离小目标检测与细粒度分类。除深度学习方法外,旋翼UAV的旋翼微动特征在短曝光成像中呈现为周期性的模糊条纹或微多普勒可视特征,可作为区分UAV与飞鸟的重要辅助判据[53]。

相关研究中,Kurmashev等[54]提出面向UAV与鸟类区分的YOLOv12-ADBC检测模型,在YOLOv12中引入自适应层次特征集成机制,增强多尺度空间融合与类间区分能力,为传感器融合系统中的光学通道提供了高效可靠的UAV检测方案。Liang等[55]设计轻量重参数化卷积增强特征表达,中心引导跨尺度融合网络实现多尺度特征高效交互,共享动态对齐检测头减少参数冗余,实现面向UAV的轻量小目标检测算法。Bangde等[52]采用ViT和移动窗口Transformer,利用自注意力机制区分鸟与无人机以减少反无人机

系统的误报。Feng等[56]在YOLOv11n基础上,设计LoGStem模块利用高斯拉普拉斯算子保留边缘几何形状,方向感知上下文模块增强上下文理解,高效路径聚合颈部优化多尺度特征融合。

4.2无人艇光电识别

USV光电识别主要应用于港口安防、近岸巡逻、重要航道监控及反无人艇集群防御。与UAV不同,USV识别面临的核心挑战并非单纯的“像素尺寸小”,而是海面高动态背景下的“弱目标”问题。波浪起伏、太阳耀斑及水雾导致目标与背景的对比度极低,即使中近距离USV像素占比足够,仍可能被背景杂波淹没。

针对上述问题,通过海天定位将图像分割为天空与海面区域,可显著减少无关背景干扰。同时,通过计算偏振度与偏振角图像,能够有效抑制太阳耀斑与水面镜面反射,增强USV目标的轮廓可见性。其中,Pan等[57]融合线偏振度、偏振角和平行偏振辐射特征,结合GFNet抑制太阳耀斑,采用相关性驱动特征分解融合网络分离高低频特征,有效提升了浅水慢速小目标的检测与分割精度。黄子亮等[58]建立舰船尾迹红外辐射模型,基于MODTRAN获取不同大气透过率,并结合Cox-Munk海面坡度分布并考虑波浪遮挡,仿真不同环境与距离下的舰船尾迹红外图像。Wang等[59]改进YOLOv5m融合注意力机制与自适应空间特征金字塔增强多尺度目标检测,采用决策级融合实现针对USV的可行域分割与障碍物检测。Yu等[60]引入面向USV的多尺度交叉轴注意力捕获全局特征,采用SimSPPF提升预测精度,使用重聚焦卷积压缩模型参数,并构建了包含13类、9097张图像的MODD-13数据集。

5.总结与展望

当前光电探测技术在UAV与USV识别领域已取得显著进展,但远距离小目标特征缺失、海面高动态杂波干扰、跨域泛化能力不足及实时轻量化部署需求等核心挑战依然突出。未来研究需重点突破多模态协同感知机制,深度融合可见光纹理、红外热特征与偏振信息以构建全天候鲁棒识别体系,同时探索面向边缘设备的轻量化网络架构与神经形态计算范式,实现高精度与低延迟的平衡。此外,构建覆盖复杂场景的大规模多模态数据集、发展物理可解释的检测模型及自适应对抗学习策略,将是推动光电反无人技术从

实验室走向实战部署的关键路径。随着生成式人工智能与智能决策技术的融合,光电探测系统有望从单一识别功能向“感知-认知-决策”一体化的智能防御节点演进,为应对日益复杂的无人系统威胁提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1]徐辰宇,曹杰,杨峰等.远距离“低慢小”目标探测技术研究进展[J].激光与光电子学进展,2024,61(20):37-50.
- [2]魏俊宇,胡柳顺,苏绍璟等.空地光电装备协同智能化目标感知技术及发展[J].国防科技,2024,45(04):22-33.
- [3]李丽亚,樊芮锋,宋亚等.低空光电探测系统的研究现状及发展趋势[J].激光与红外,2023,53(11):1627-1636.
- [4]魏俊宇,胡柳顺,苏绍璟等.空地光电装备协同智能化目标感知技术及发展[J].国防科技,2024,45(04):22-33.
- [5]N. Shi, Z. Yang, G. Yang et al. Super Mamba feature enhancement framework for small object detection [J]. Scientific Reports, 2025, 15
- [6]胡浩丰,黄一钊,朱震等.基于深度学习复杂环境的偏振成像技术研究进展[J].红外与激光工程,2024,53(03):9-26.
- [7]李岩松,赵慧洁,李娜等.基于中红外偏振的海面太阳耀光背景下的目标探测[J].中国激光,2022,49(19):296-304.
- [8]吴一全,童康.基于深度学习的无人机航拍图像小目标检测研究进展[J].航空学报,2025,46(03):181-207.
- [9]H. Dong, J. Yin, H. Li et al. HIRSA: A Novel Hybrid Method for the Infrared Object Recognition of Weak and Small Aircrafts [C]. 2025 IEEE 31th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2025, 1-10.
- [10]M. Misbah, H. Sadia, N. Saeed. DCA-Net: Advanced Small Object Detection Scheme for UAVs Using Contextual Feature Extraction [C]. 2025 12th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2025, 337-343.
- [11]B. Jin, Z. Lu, L. He et al. FT-YOLO: a UAV-oriented small-object detection algorithm based on feature enhancement and task synchronization [J]. The Journal of Supercomputing, 2025, 81(16): 1503.
- [12]X. Liang, Y. Zhang, N. Wu et al. LCS-

- YOLO: A lightweight and efficient small object detection algorithm for UAV [J]. Earth Science Informatics, 2026, 19(6): 75.
- [13] J. Liu. DP-Det: A Real-Time Small Object Detection Network for UAV Imagery Integrating Direction-Aware Convolution and Adaptive Feature Refinement [C]. 2026 5th International Conference on Electronics Technology and Artificial Intelligence (ETAI), 2026, 771-775.
- [14] J. Wang, J. Duan, G. Xie et al. Sea surface target image enhancement method based on separable reflection and refraction [J]. OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, 2025, 181: 112012.
- [15] L. Fang, Z. Yang, W. Mu et al. A Novel Polarization Scattering Decomposition Model and Its Application to Ship Detection [J]. Remote Sensing, 2024, 16(1): 178.
- [16] Y. Zhang, X. Ju, C. Yan et al. Polarized hyperspectral image fusion method for targets in sea clutter background [J]. OPTICS COMMUNICATIONS, 2025, 591: 131993.
- [17] 王玉松, 纪延琚, 陈勤辉. 面向无人艇视角的海上光学图像目标检测算法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2025, 47 (05): 49-57.
- [18] W. Zhou, W. Shao, W. Hu. A Yolo-like lightweight ship detection network for unmanned surface vehicles [J]. COMPUTER JOURNAL, 2025, 68(9): 1118-1127.
- [19] X. Yang, L. Huang, F. Ke et al. GDS-YOLOv7: A High-Performance Model for Water-Surface Obstacle Detection Using Optimized Receptive Field and Attention Mechanisms [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2025, 14(7): 238.
- [20] 王欣宇, 陈广锋, 李侠. 基于改进ViBe算法的运动目标检测[J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2023, 49 (01): 95-102.
- [21] 卢盼成. 基于注意机制与深度学习的无人机机视觉目标检测与跟踪[D]. 南京航空航天大学, 2021.
- [22] 聂光涛, 黄华. 光学遥感图像目标检测算法综述 [J]. 自动化学报, 2021, 47 (08): 1749-1768.
- [23] M. Phil. Comprehensive Analysis of Feature Detectors and Descriptors for Stitching UAV Images with Perspective Distortion [J]. Journal of Image and Graphics, 2025: 1-13.
- [24] J. Li, X. Wen, G. Pan et al. Airport surface target tracking method based on improved LBP algorithm and KLT [C]. 2024 IEEE 6th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), 2024, 460-464.
- [25] M.S. S Alzboon, M. Alqaraleh, M. A Wahed et al. AI-Driven UAV Distinction: Leveraging Advanced Machine Learning [C]. 2024 7th International Conference on Internet Applications, Protocols, and Services (NETAPPS), 2024, 1-7.
- [26] J. Liu, H. Li, J. Liu et al. Real-Time Monocular Obstacle Detection Based on Horizon Line and Saliency Estimation for Unmanned Surface Vehicles [J]. Mobile Networks and Applications, 2021, 26(3): 1372-1385.
- [27] 宋敏敏, 周泽亚, 邱燕等. 基于HOG特征和SVM分类器的红外图像智能检测与分类方法[J]. 红外, 2022, 43 (04): 25-32.
- [28] G. Cui, L. Zhang. Improved faster region convolutional neural network algorithm for UAV target detection in complex environment [J]. Results in Engineering, 2024, 23: 102487.
- [29] A. Madhani, K. Bingi, M. Omar et al. Real-time object detection on DJI Ryze Tello quadrotor drone with YOLO and SSD algorithms[C]. International Conference on Green Energy, Computing and Intelligent Technology 2024 (GEn-CITY 2024), 2024, 66-71.
- [30] C. Zhao, R.W. Liu, J. Qu et al. Deep learning-based object detection in maritime unmanned aerial vehicle imagery: Review and experimental comparisons [J]. ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 2024, 128: 107513.
- [31] Z. Liang, H. Shen. Edge-Guided Feature Pyramid Networks: An Edge-Guided Model for Enhanced Small Target Detection [J]. SENSORS, 2024, 24(23): 7767.
- [32] 简钰洪, 杨辉跃, 王星罡等. 基于改进YOLOv7和DeepSort的“低慢小”无人机目标检测跟踪算法[J]. 指挥控制与仿真, 2025, 47 (01): 23-31.
- [33] 刘一诺, 张琪, 王蓉等. 针对航拍小目标检测的YOLOv7改进方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(07): 2506-2512.

- [34]Z. Kang, Y. Liao, S. Du et al. SE-CBAM-YOLOv7: An Improved Lightweight Attention Mechanism-Based YOLOv7 for Real-Time Detection of Small Aircraft Targets in Microsatellite Remote Sensing Imaging [J]. Aerospace, 2024, 11(8): 605.
- [35]赖勤波, 马正华, 朱蓉.基于注意力机制和空洞卷积的无人机图像目标检测[J].计算机应用与软件, 2025, 42 (02) : 227-235.
- [36]S. Qiu, L. Zi, X. Cong. AUFFNet: an attention-based fusion network with an upsampler-free feature pyramid network for object detection in UAV aerial images [J]. JOURNAL OF ELECTRONIC IMAGING, 2025, 34: 53017.
- [37]V.I.C. Correa, P. Funk, N. Sundelius et al. Thermal Image Super-Resolution Using Real-ESRGAN for Human Detection [J]. 2025,
- [38]B. Ding, D. Bu, B. Sun et al. Low-Light Image Enhancement with Residual Diffusion Model in Wavelet Domain [J]. Photonics, 2025, 12(9): 832.
- [39]唐克, 魏飞鸣, 李东瀛等.基于改进YOLOv8的轻量化无人机图像目标检测算法[J].计算机工程, 2026, 52 (03) : 97-106.
- [40]贺智轩, 陈里里, 王翔等.DMF-YOLOv11: 基于改进YOLOv11n的无人机航拍图像目标检测算法[J].计算机工程与应用, 2025, 61 (14) : 88-100.
- [41]郭杰, 胡建龙, 张俊超等.改进RT-DETR的无人机图像小目标检测算法研究[J].计算机工程与应用, 2026, 62 (08) : 93-104.
- [42]施宇, 王乐, 姚叶鹏等.基于强化特征金字塔和聚焦损失的小目标检测[J].计算机科学与探索, 2025, 19 (03) : 693-702.
- [43]F. Feng, Y. Hu, W. Li et al. Improved YOLOv8 algorithms for small object detection in aerial imagery [J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2024, 36(6): 102113.
- [44]Z. Ma, C. Wang, C. Chen et al. DDF-YOLO: A Small Target Detection Model Using Multi-Scale Dynamic Feature Fusion for UAV Aerial Photography [J]. Aerospace, 2025, 12(10): 920.
- [45]唐浩, 彭焯, 熊伟等.海上无人艇雷达相机拓扑双向融合探测算法[J].光子学报, 2025, 54 (01) : 166-182.
- [46]G. Cheng, H. Yang, Y. Tian et al. WMFA-AT: Adaptive Teacher with Weighted Multi-Layer Feature Alignment for Cross-Domain UAV Object Detection [J]. Remote Sensing, 2025, 17(23): 3854.
- [47]成桢灏, 杨小冈, 卢瑞涛等.基于原型对齐与自适应恢复的可见光-红外增量域适应目标检测[J].红外与激光工程, 2025, 54 (11) : 197-211.
- [48]S. Li, X. Dong, Y. Fan et al. Domain-Adaptive UAV Recognition Using IR-UWB Radar and a Lightweight Mamba-Based Network [J]. IEEE SENSORS JOURNAL, 2025, 25(18): 34913-34926.
- [49]H. Chen, J. Liu, Y. Wang et al. Teaching in adverse scenes: a statistically feedback-driven threshold and mask adjustment teacher-student framework for object detection in UAV images under adverse scenes [J]. ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 2025, 227: 332-348.
- [50]K. Wang, Y. Shen, M. Lauer. Adversarial Attacked Teacher for Domain Adaptive Object Detection Under Poor Visibility Conditions [C]. 2025 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2025, 195-201.
- [51]Y. Zhang, X. Sang, Y. Sun et al. DMTNet: dual-domain adaptive multi-scale feature fusion network with transformer for small target detection [J]. The Visual Computer, 2025, 41(10): 7585-7601.
- [52]S. Bangde, S. Verma, H. Gupta et al. Transformer-based Bird vs Drone Classification for Anti-drone System: A Strategy and Comparative Study to Reduce False-Positive Alarms [C]. 2025 International Conference on Emerging Technology in Autonomous Aerial Vehicles (ETA AV), 2025, 1-6.
- [53]张建隆, 刘满国, 陈皓晖等.基于激光微多普勒的旋翼无人机探测和识别技术进展[J].飞控与探测, 2024, 7 (03) : 1-14.
- [54]I. Kurmashev, V. Semenyuk, A. Lupidi et al. Study of the Optimal YOLO Visual Detector Model for Enhancing UAV Detection and Classification in Optoelectronic Channels of Sensor Fusion Systems [J]. Drones, 2025, 9(11): 732.
- [55]X. Liang, Y. Zhang, N. Wu et al. LCS-YOLO: A lightweight and efficient small object detection algorithm for UAV [J].

- Earth Science Informatics, 2026, 19(6): 75.
- [56]Y. Feng, L. Xiong, H. Zhou et al. Enhancing small object detection in UAV imagery through edge-preserving context fusion [J]. Discover Computing, 2026, 29(1): 233.
- [57]T. Pan, X. He, Y. Bai et al. Polarization-enhanced GFNet for glint-influenced water surface object segmentation [J]. EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS, 2026, 296: 128956.
- [58]黄子亮, 张昊春, 王琦. 舰船尾迹和海面红外仿真成像[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 286-294.
- [59]H. Wang, S. Wu, Y. He et al. UYF-Net: A fusion network for feasible domain recognition and obstacle detection based on infrared thermography [J]. INFRARED PHYSICS & TECHNOLOGY, 2024, 141: 105430.
- [60]C. Yu, H. Yin, C. Rong et al. YOLO-MRS: An efficient deep learning-based maritime object detection method for unmanned surface vehicles [J]. APPLIED OCEAN RESEARCH, 2024, 153: 104240.