

无人机探测技术发展现状及外辐射源探测技术研究

贾显成

浙江交通职业技术学院，浙江杭州，311112；

摘要：随着无人机不同领域的深入应用，针对无人机探测的技术变得越发重要。本文综述了国内外在无人机探测定位与识别技术方面的研究进展，并指出了现有研究存在的问题。此外，探讨了外辐射源探测技术在无人机探测中的应用。

关键词：无人机；探测识别；外辐射源

DOI:10.69979/3041-0673.25.02.008

引言

低空经济作为新质生产力代表，促进无人机行业应用蓬勃发展，无人机产业呈爆发式增长，无人机产业链不断完善，无人机开始走向生活中的各个领域。然而无人机在给人们的生活带来方便的同时，也引发了诸多公众安全问题，无人机的“黑飞”影响民航安全、铁路安全、城轨安全、道路安全以及人身安全。

为了应对无人机的“黑飞”问题，实时检测与准确识别是实施有效反制的前提条件与关键基础，研究学者们正积极探索新型探测技术和装备。本文将通过传统的无人机探测技术以及外辐射源探测技术，研究无人机探测技术现状。

1 传统无人机探测技术

无人机的位置可以通过多种技术进行检测，一般通过各种类型的传感器获取无人机的特征信号，通过信号过滤提取，再进行算法分析，从而对目标无人机进行识别。无人机探测识别的特征参数如表1所示。

表1 无人机探测识别参数

参数	描述
距离	探测设备与无人机之间的距离
高度	无人机的飞行高度（以地面为基准）
数量	无人机数量（单个或集群）
飞行模式	悬停模式、飞行模式等
类型	无人机的品牌、型号

1.1 基于声波探测的定位技术

无人机在飞行时，电机和旋翼会进行旋转，从而产生声波信号。声波探测技术通过采集无人机电机和旋翼

发生旋转时声波产生的固定周期调制信息，包括线性预测编码、傅里叶系数和梅尔频率倒谱系数等特征^[1]，通过与既有无人机音频数据库分析匹配，利用音频算法进行识别，实现无人机探测。

文献^[2]提出了一个用于无人机监视的光纤准分布式声学传感系统，为光纤的分布式声传感开发了增强型光纤声学传感器(FOASs)来检测无人机的声音，识别了无人机声音的波形和频谱特征，通过声场测绘和数据融合，实现精确的无人机定位。文献^[3]利用麦克风阵列对无人机进行实时定位、跟踪和监测的方法，并在硬件平台上实现了128通道的麦克风阵列系统，通过划分网格点，对无人机的定位准确度进行测试，结果表明系统能够很好地对无人机进行跟踪。

声波信号不受光照、地形等影响，有一定的隐蔽性，适用于相对安静的环境，但是在嘈杂环境中，易受噪音影响，导致识别性能大幅下降，探测距离有限。

1.2 基于光电探测的定位技术

基于光电探测的定位技术，主要针对可见光波段和红外波段信号来获取无人机的定位信息，可见光波段适用于白天，红外波段适用于夜晚。利用摄像头捕捉无人机的图像信息，通过图像处理和分析实现识别。其依赖于无人机的外观特征，如形状、颜色和纹理等。

近年来，深度学习技术的应用显著提高了视觉识别的精度和效率，是应用最广泛的检查算法。深度学习是机器学习的一个分支，其核心在于利用多层人工神经网络自动学习数据中的多层次抽象特征。卷积神经网络(CNN)是神经网络的一种重要模型，能够自动学习和提取数据。基于深度学习的无人机探测方法利用大量光电传感器获取到的图像数据，训练出一个深度神经网络模型，

达到准确获取无人机相关特征的目的。深度学习的目标检测算法根据算法的检测步骤可以分为两大类，一类是单阶段（One-Stage）算法，另一种是两阶段（Two-Stage）算法。

1.2.1 单阶段算法

单阶段算法在计算的过程中，直接对无人机的位置进行计算并对无人机进行分类，模型结构简单，单阶段算法的运行速度快，更能适应对实时性要求高的应用场景。但是单阶段算法没有单独的无人机目标筛选的过程，在检测的精准性上较低。常见的单阶算法主要有 YOLO 系列、SSD 等。

YOLO 系列算法是一种基于全卷积神经网络的目标检测算法，能够将复杂的识别问题转化为回归问题，直接对无人机目标图像进行分类和检测，具备非常高效的检测速度。针对无人机图像中，YOLO 系列算法通常采取各种方法来调整 YOLO 的超参数。文献^[4]提出了一种基于云-边-端架构的视觉识别系统用改进的 YOLOv5 算法，能够以 96% 的平均精确度实时高效地在复杂环境下识别无人机，准确跟踪其运动轨迹。文献^[5]为解决现实场景下无人机目标被部分遮挡，导致不易检测问题，提出了基于 YOLOX-S 改进的反无人机系统目标检测算法 YOLOX-drone，YOLOX-drone 与 YOLOX-S、YOLOv5-S 和 YOLOX-tiny 相比，平均准确率 (IoU=0.5) 提升了 3.2%、4.7% 和 10.1%。

SSD 算法直接在原始图像上进行卷积操作，同时进行目标分类和位置回归。SSD 算法检测速度快，不需要进行区域标注，但是特征图利用率较低，以及小目标检测率较低。文献^[6]提出提出改进型 SSD 算法，设计一种特征图融合模块，在不过多增加计算量的情况下，同时通过引入 IoU 值对 SSD 算法损失函数中位置回归部分进行改进，提高目标检测精度在 IoU 阈值和类别置信度同为 0.5 的条件下，相比原始 SSD 算法改进型 SSD 算法在训练精准度有明显提高。

1.2.2 两阶段算法

两阶段算法指的是在计算的过程中可以分为两个检测步骤：第一阶段是对无人机目标区域进行候选区域坐标筛选，第二阶段是对无人机目标进行二次分类和坐标提取并进行回归。两阶段算法的模型的复杂程度和计算量较高，检测速度相比单阶段算法较慢，但是相应的检测的准确率会得到一定的提高。常见的两阶算法主要

有 Fast R-CNN、Faster R-CNN 等。

R-CNN 首次将卷积神经网络引入到目标检测中，Fast R-CNN 通过 SS 算法在原始图像上提取出大约 2000 个候选区域，引入了 RoI Pooling 层，能够处理不同大小的输入特征图，并输出固定长度的特征向量，在单次训练中同时完成这两个任务，不仅简化了训练流程，还提升了检测速度和精度。Faster R-CNN 是 R-CNN 系列目标检测模型的改进版本，设计了一种基于卷积神经网络的区域生成网络，主要增加区域生成网络以实现端到端的目标检测。文献^[7]基于 Faster R-CNN 流水线的骨干网络，定义了一个 MS-Faster R-CNN 对象检测器，能够持续检测视频序列中的对象，该探测器与基于深度关联度量的简单在线实时跟踪算法，以实现对无人机图像的实时跟踪能力。

1.2.3 技术特点

基于光电探测的定位技术系统复杂度较低，硬件设备简单，成本比较低，易于部署。光学信号可以提供丰富的图像信息，可以实现较高分辨率的图像识别，从而可以详细分析无人机的类型和飞行状态。然而光学信号的获取受光照、天气和遮挡物等因素影响较大，使用场景受限；此外，对于高速移动的情况，图像捕捉和处理的难度较大，识别效果较差。

1.3 基于有源雷达探测的定位技术

雷达探测是依靠电磁波进行无人机探测的技术，通过雷达发射信号和接收回波信号，然后计算发送和接收信号的频率差异，从而实现对无人机的定位和识别。有源电子扫描阵列雷达是在二维阵列中利用多个天线发射相同相移波形的相控阵雷达，它是基于波束形成原理，扫描视线范围内的所有区域来观察整个图像。

文献^[8]提出了基于实时载波相位差分 RTK 技术与无人机结合的动态检飞标校数据获取改进方法，并建立了基于轴系误差的系统误差数据配准改进模型，并提出了基于 SVD 的标校参数解算方法。文献^[9]针对“低慢小”无人机，雷达探测的独立过程将其分为“信号检测”和“目标识别”，雷达自动目标识别 ATR 技术可以显著提升无人机的探测距离、识别能力，并增强态势感知能力。

基于雷达的探测技术可以针对大范围无人机探测，并且较远距离的识别，适用于空旷区域大面积监控扫描。并且雷达传感器不受光照和天气条件的限制，使探测系统具有较高的适用性。由于多普勒效应的存在，可以通

过回波信号，实时计算无人机的飞行轨迹、速度及高度等信息，适合动态监控。然而，由于较小的反射面积，针对小型无人机的探测效果较差；雷达设备成本较高，且需要专业的技术人员进行操作和维护；探测需要连续主动发射高功率电磁信号，易对环境造成电磁干扰。

1.4 基于无线电探测的定位技术

基于无线电探测的定位技术主要捕捉无人机的无线电信号，如通信信号、遥控信号等，对无人机进行识别和定位。无线电探测技术利用无线电接收器来扫描和捕获无人机与探测器之间的无线电信号，并通过测向定位技术确定无人机及其操作者的位置。

文献^[10]提出了一种基于射频RF信号的无人机ID标签检测模型的技术，能够通过解码无人机ID数据包，提取实时遥测数据。文献^[11]提出了利用无人机旋翼声音的射频信号和声学信号进行无人机自动探测的新方法，并且使用深度机器学习技术对无人机的射频和声学特征进行高效准确的分类，实验结果表明，在-10dB的信噪比下，使用LSTM网络和融合特征的分类准确率约为91%。

无线电探测技术探测距离远、定位精度高，并且探测系统成本较低，能同时探测到无人机及其操作者的位置。但是无线电探测只能被动探测，无法探测追踪自主飞行的无人机，也难以探测使用未知控制协议或在探测频段外的无线电信号，也难以破解加密无线电信号。在城市环境中，因为有大量电子设备和通信设施，容易造成无线电信号干扰，影响无人机识别的准确性。

2 外辐射源探测技术

外辐射源探测技术通过频谱共享，利用环境中已有信号，如广播、电视信号等，实现目标探测^[11]。基于信号提纯技术，接收环境中的电磁辐射信号，不再需要专用的电磁信号发射站，解决了传统探测系统中，构建专用信号发射站造成成本高问题。此外，可以配合使用视觉信息增强技术，提高无人机识别的准确率。

2.1 信号提纯技术

复杂环境现有电磁辐射信号获取使用信号提纯技术，参考图1，设置参考天线和回波天线。参考天线指向已有电磁信号发射基站方向，回波天线指向无人机的探测区域，根据信号先验结构信息，对电磁信号进行提纯。

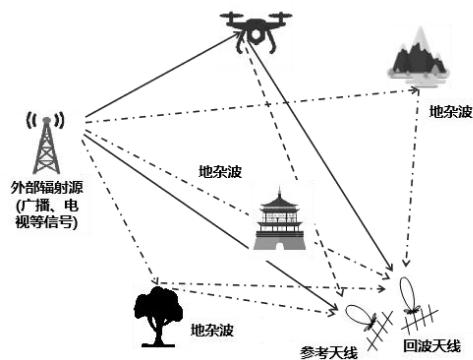


图1 复杂环境现有电磁辐射信号获取

无人机目标检测采用微弱信号能量积累算法，检测的所有电磁信号均源于第三方，目标检测不产生额外电磁辐射，对周边环境没有干扰，并且算法使用已提纯电磁信号作为基准信号，设置监测天线接收目标回波信号，利用两路信号的时间相关性，对目标无人机参数进行计算。具体数据流如图2所示，已提纯电磁信号作为基准信号，设置监测天线接收目标回波信号，利用两路信号的时间相关性，对目标参数进行检测；针对回波天线收到的电磁信号，进行反向叠加，进行杂波抑制；剩余回波信号和参考时间及其时间延时进行共轭点乘，然后抽出有效部分，通过FFT等一系列的算法，实现目标距离测视图和目标多普勒测视图的分离。

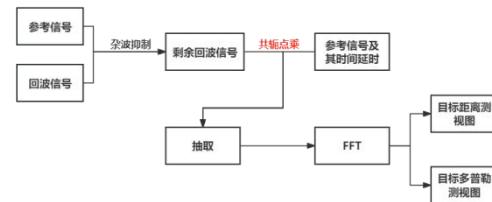


图2 无人机目标检测数据流

2.2 视觉信息增强技术

视觉信息增强技术部分通过自适应增强图像算法，实现全天时-全天候下的高精度、稳定目标识别。通过构建深度卷积神经网络模型，并结合实时目标追踪算法，实现对无人机在复杂背景下的准确识别与跟踪。基于深度学习双重Q网络和时间平滑（DDQN-TS）算法，强化学习训练不同天气条件的图像增强模型，DDQN引入了两个神经网络，一个用于选择动作，另一个用于评估所选择的动作的价值；时间平滑TS通过对动作价值函数进行平滑处理，以提高训练的稳定性和收敛速度。

2.3 技术特点

外辐射源探测配合引导视觉增强，可以实现低成本、高可靠、零干扰的无人机目标探测。外辐射源探检测的所有电磁信号均源于第三方，目标检测不产生额外电磁辐射，对周边环境没有干扰。外辐射源探测作为硬件功能部分，视觉信息增强作为软件功能部分，软硬结合，共同集成到反无人机探测系统中。

3 结语

当前针对交无人机探测和识别的技术各有各的优缺点，本文针对声波探测、光电探测、有源雷达探测、无线电探等无人机探测技术进行了探讨，在实际应用中，可以根据不同探测技术的优缺点结合具体需求和场景选择合适的无人机探测技术。外辐射源无人机探测技术，可以实现低成本、高可靠、零干扰的无人机目标探测，为后续研究提供新的思路。

参考文献

- [1]蒋罗婷.当代反无人机系统技术综述[J].电子质量,2023,(02):96-100.
- [2]JIAN FANG, YAOSEN LI, PHILIP N. JI, et al. Drone Detection and Localization Using Enhanced Fiber-Optic Acoustic Sensor and Distributed Acoustic Sensing Technology[J]. Journal of Lightwave Technology: A Joint IEEE/OSA Publication, 2023, 41(3):822-831.
- [3]徐若铭.基于麦克风阵列的无人机定位与跟踪[D].电子科技大学,2022.
- [4]李艺良,宋海鹰,黄彦嶂,等.基于YOLOv5的微小飞行器自主识别及云-边-端视觉跟踪监控系统[J].机电工程技术,2024,53(11):143-147.
- [5]薛珊,王亚博,吕琼莹,等.基于YOLOX-drone的反无人机系统抗遮挡目标检测算法[J].工程科学学报,2023,45(9):1539-1549.
- [6]甄然,苏康,周金星,等.改进SSD的无人机目标检测研究[J].现代电子技术,2022,45(22):33-37.
- [7]Danilo A ,Luigi C ,Anxhelo D , et al. MS-Faster R-CNN: Multi-Stream Backbone for Improved Faster R-CNN Object Detection and Aerial Tracking from UAV Images[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9):1670-1670.
- [8]黄永升,王干,刘周.无测姿传感器条件下反无人机雷达的标校方法研究[J].信息化研究,2024,50(05):13-17.
- [9]李德仁,龚江昆,闫军,等.基于雷达自动目标识别技术的反无人机雷达[J].无线电工程,2024,54(04):765-779.
- [10]Driss A ,Ettien K ,Virginie D , et al. Drone Detection and Tracking Using RF Identification Signals. [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2023, 23(17):7650.
- [11]Frid A ,Shimol B Y ,Manor E , et al. Drones Detection Using a Fusion of RF and Acoustic Features and Deep Neural Networks. [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2024, 24(8):2427.
- [12]Zaimbashi A , Greco M S, Gini F. Integrated MIMO passive radar target detection[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2024.

作者简介：贾昱成（1990.11），男，汉族，浙江杭州人，硕士研究生，浙江交通职业技术学院，研究方向：通信与信息系统

基金项目：浙江交通职业技术学院2024年度学校科研项目“外辐射源探测与视觉增强协同无人机探测技术研究”（项目编号：2024KJ02）