

基于视觉与 X 波段雷达融合的系留飞艇无人机动态跟踪系统

杨玉龙¹, 王一博¹, 傅先进², 邢啸宇¹, 许官正¹, 侍泽昆¹

1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191

2. 95821 部队, 北京 100000

摘要:随着无人机技术的快速发展,其在目标检测与跟踪任务中的应用日益广泛,得益于其灵活的视角和高机动性,为复杂环境下的感知提供了新机遇。基于系留飞艇平台搭载雷达对无人机目标进行跟踪探测,能够显著扩展监测范围。然而,系留飞艇平台在浮空驻留时存在姿态角周期性变换及随风向航向持续偏移的问题,为艇载设备的跟踪与对准带来挑战。为应对这一挑战,提出了一种相机辅助的 X 波段雷达跟踪与监视系统,结合云台动态控制技术,实现对空中无人机的精准检测与持续跟踪。系统通过每 2 帧抽取的视频流驱动 YOLOv10,平均检测准确率达 96.8%。通过扩展卡尔曼滤波融合 X 波段阵列雷达数据与视觉数据,定位误差小于 5%。自适应 PID 控制云台确保目标始终居于视野。背景抵消技术有效抑制地面杂波和多路径效应,信噪比大于 20 dB。研究的创新点在于,提出了一套低成本解决方案,该方案专门面向并满足系留飞艇艇载设备的目标跟踪需求。同时,研究还构建了一套地面测试方法,为系留飞艇搭载测试以及复杂外场环境下浮空器的搭载测试试验提供了高效且鲁棒的解决方案,可有效应用于无人机检测与跟踪领域。

关键词: X 波段阵列雷达;艇载相机;云台控制

中图分类号: X84

文献标志码: A

文章编号: 1002-6002(2025)S1-0121-08

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2025.S1.15

Dynamic UAV Tracking System Based on Vision and X-Band Radar Fusion for Tethered Airship Platforms

YANG Yulong¹, WANG Yibo¹, FU Xianjin², XING Xiaoyu¹, XU Guanzheng¹, SHI Zekun¹

1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Unit 95821, Beijing 100000, China

Abstract: With the rapid development of UAV technology, its application in target detection and tracking tasks has become increasingly widespread. Benefiting from its flexible perspective and high maneuverability, UAVs provide new opportunities for perception in complex environments. Radar mounted on a tethered aerostat platform for tracking and detecting UAV targets can significantly extend the monitoring range. However, the tethered aerostat platform experiences periodic attitude angle variations and continuous heading drift with wind direction during hovering, posing challenges to the tracking and alignment of onboard equipment. To address these challenges, this study proposes a camera-assisted X-band radar tracking and surveillance system, combined with dynamic gimbal control technology, to achieve precise detection and continuous tracking of aerial UAVs. The system drives YOLOv10 using video streams sampled every 2 frames, achieving an average detection accuracy of 96.8%. By fusing X-band array radar data with visual data via extended Kalman filtering, the positioning error is less than 5%. An adaptive PID controller ensures that the target remains centered in the field of view. Background cancellation technology effectively suppresses ground clutter and multipath effects, with a signal-to-noise ratio exceeding 20 dB. The innovation of this study lies in proposing a low-cost solution tailored to meet the target tracking requirements of tethered aerostat onboard equipment. Additionally, a ground testing method is developed, providing an efficient and robust solution for tethered aerostat payload testing and aerostat deployment tests in complex field environments, which can be effectively applied to UAV detection and tracking.

Keywords: X-band array radar; airship-mounted camera; gimbal control

收稿日期: 2025-10-09; 修订日期: 2025-11-06

基金项目: 基于无源散射体的井下自组织通信增强技术与研究(KZ78054801); 朔黄铁路研究院 2025 年隧道出兵设计加工及测试服务(KH54592303)

第一作者简介: 杨玉龙(2001-), 男, 河南新乡人, 硕士。

通讯作者: 王一博

无人机技术的快速发展使其在目标检测与跟踪中的应用日益广泛,无人机的灵活视角和高机动性为复杂环境感知提供了新机遇。系留飞艇平台搭载雷达可显著扩展无人机监测范围,但其浮空驻留时的姿态角周期性变换及风向引起的航向偏移为艇载设备对准带来挑战。更重要的是,X波段雷达(0.3~3 GHz)在低空探测中易受多路径效应的严重干扰。多路径效应是指电磁波通过直射于地面、海面、建筑物或飞艇气囊表面等多条路径到达接收端,导致多个时延、幅度、相位不同的信号副本相干叠加,引发信号衰落、测角抖动与定位偏差。在系留飞艇平台上,姿态摇摆与航向漂移进一步加剧反射路径的动态变化,使多路径参数快速时变,传统固定波束雷达难以维持稳定跟踪。

为此,研究提出一种相机辅助的X波段雷达跟踪系统,结合云台动态控制,实现无人机精准检测与跟踪。系统通过每2帧抽取的视频流(15 fps)驱动YOLOv10(mAP@0.5达96.8%),融合X波段雷达数据(0.3~3 GHz,探测距离为2 km)与视觉数据,通过扩展卡尔曼滤波(EKF)实现定位误差分量抑制达20 dB。研究的创新点在于,提出了一套低成本艇载云台对准方案,同时构建了一套地面测试方法,为系留飞艇搭载测试提供参考。

1 国内外研究进展

近年来,随着无人机技术的普及,其在生态环境监测领域的应用日益增多,但非法无人机的入侵也带来了新的挑战。相关工作主要聚焦于目标检测算法、多传感器融合、云台控制系统等方面。

1.1 无人机目标检测技术

无人机检测的核心在于实时、准确地识别目标。早期方法多依赖传统图像处理技术,如基于HOG(Histogram of Oriented Gradients)或SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)的特征提取,但这些方法在复杂背景(如湿地或山区)下鲁棒性不足,检测准确率通常低于85%,且无法处理动态目标的快速移动^[1]。

深度学习技术的兴起显著提升了检测性能。YOLO系列作为单阶段目标检测模型,因其高效性和实时性被广泛应用于无人机监测。YOLOv5和YOLOv8在无人机数据集(如VisDrone)上的应

用已取得较好效果,YOLOv5在VisDrone挑战赛中实现了mAP@0.5达92.1%^[2]。YOLOv10通过引入注意力机制和轻量化设计,进一步优化了小目标检测能力^[2]。在无人机特定场景中,LD-YOLOv10(2024)针对轻量级无人机目标检测进行了优化,减少了计算负载,同时保持了高精度^[3]。S-YOLO(2025)进一步强调小目标框架,结合YOLOv10的创新,在神经网络期刊中报告了高效的检测框架^[4]。此外,BRA-YOLOv10(2025)针对无人机小目标检测,克服了环境噪声挑战,在ResearchGate上展示了其在电路检测和环境监测中的应用^[5]。这些工作证明了YOLOv10在资源受限嵌入式设备(如NVIDIA Jetson系列)上的潜力,但多数研究仅限于视觉输入,忽略了多模态融合,导致在恶劣天气下的性能下降。

1.2 多传感器融合方法

为提升系统鲁棒性,多传感器融合已成为趋势。传统雷达系统在无人机检测中发挥关键作用,如无人机载X波段单通干涉合成孔径雷达(P-InSAR),用于森林库存监测,实现了高精度高度测量^[6];此外,相机与雷达数据融合框架,通过整合相机图像的2D检测结果和雷达点云数据,并结合标定算法,实现鲁棒的自动驾驶目标检测^[7]。近年来,Transformer的特征级融合方法与毫米波雷达点云处理网络结合,通过直接输入聚类后的无序雷达点云并结合相机信息,实现快速、有效的雷达-相机融合3D目标检测,有效提升识别率,并降低方向、平移、速度和属性误差^[8]。无人机载轻量级雷达进行动态RCS测量,在实际环境中验证了其对小目标的检测能力^[9]。视觉与雷达融合的研究日益增多。2020年发表在PMC上的一项研究显示,研究者通过建立无人机RCS特征数据库,显著提升了分类性能。这一思路在2023年被Dedrone公司成功产品化,其被动雷达系统正是利用RCS签名实现了全天候无人机检测^[10]。

针对视觉与雷达数据融合的滤波方法,扩展卡尔曼滤波(EKF)因其在非线性系统中对状态的高效递归估计而被广泛采用。相比粒子滤波(计算复杂度高)与无迹卡尔曼滤波(UKF,调参复杂),EKF通过一阶泰勒展开线性化非线性测量模型(如雷达距离-角度到相机像素的投影关系),在满足实时性(小于50 ms/帧)的同时保持亚像素级跟踪精度,特别适用于系留飞艇平台存在姿

态扰动与多路径噪声的动态场景,为后续目标关联与轨迹平滑提供了稳定输入。

1.3 云台控制与跟踪算法

云台 (PTZ) 系统是实现持续跟踪的关键。传统 PTZ 控制依赖手动操作或简单比例控制,但针对动态无人机,需要先进的算法。PID 控制器因其简单性和有效性被广泛采用^[11-12]。CHEN 等^[13]提出了一种基于深度学习的无人机动态跟踪算法,通过 YOLOv3 识别目标、结合 PID 与时延控制调整云台角度、计算并预测无人机与目标相对位置,并利用 PID 控制器输出无人机线速度,在 Airsim 仿真测试中验证了其有效提升跟踪系统稳定性和鲁棒性的能力。HAJ 等^[14]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的新型移动目标反应式跟踪方法,联合跟踪目标三维位置、速度及相机内参,并通过 PID 控制器实时调整云台相机运动,

以恒定图像速度和目标尺度实现高精度跟踪。LUO 等^[15]提出了一种基于 SKL 相似度量度的改进粒子滤波算法,结合速度调节的闭环控制模型,实现仿生眼 PTZ 相机对移动目标的实时跟踪,确保目标始终位于相机视野中心,实验验证了其优异性能。

2 研究方法

2.1 系统架构

图 1 描述了整个系统的框架。该系统由 4 部分组成,分别为数据采集、目标识别、数据传输、云台控制。数据采集模块将采集到的多模态数据传递给目标识别模块中的识别模型,供其识别目标;识别模型计算误差后,将结果交由云台控制器,由云台控制器驱动云台对准目标。

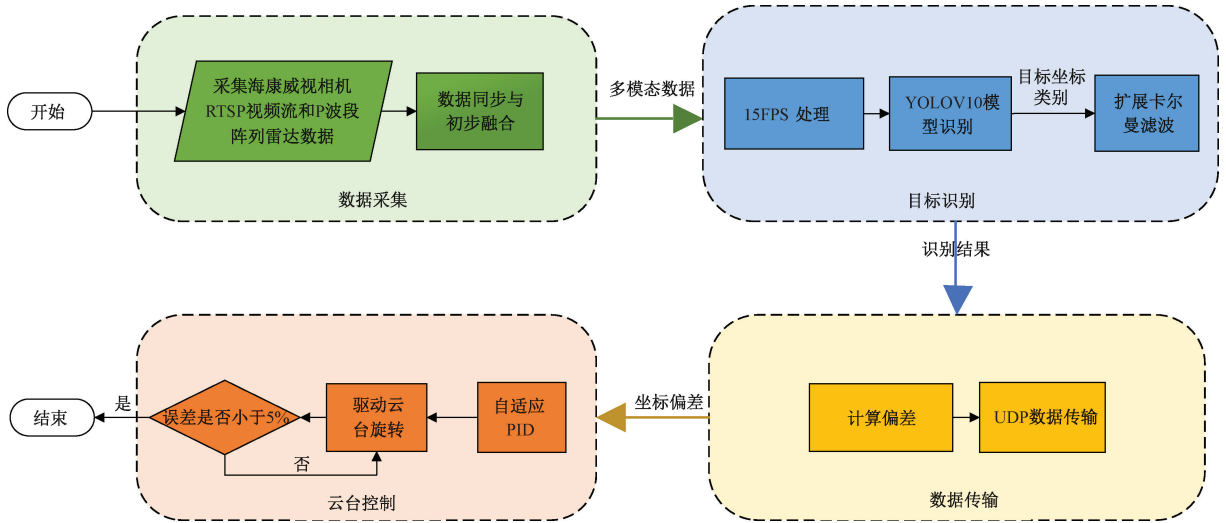


图 1 多模态无人机实时跟踪系统流程

Fig. 1 Flowchart of the multimodal UAV real-time tracking system

2.2 数据采集模块

数据采集模块是系统的基础层,负责从硬件设备中实时获取多模态数据,包括视觉图像和雷达信号。该模块确保输入数据的及时性、准确性和同步性,支持复杂环境下的鲁棒感知。具体而言,艇载相机(分辨率为 1 080p,帧率为 30 fps)通过 RTSP (Real-Time Streaming Protocol) 协议拉取高分辨率视频流,提供实时图像输入。RTSP 协议支持高效的网络流媒体传输,确保低延迟(小于 50 ms)视频获取。具体实现:使用 OpenCV 库的 cv2.VideoCapture 接口连接相机 URL,视频分辨率固定为 1 080p,帧率为 30 fps。该过程包括流媒体解码和缓冲管理,以避免网络抖动导致

的帧丢失。

同时,X 波段阵列雷达(覆盖 300 MHz 至 3 GHz 频段,探测距离达 2 km)提供低频电磁波探测数据,用于提取目标的动态 RCS(雷达散射截面积)特征,弥补相机在恶劣天气(如雾霾或夜间)下的局限性。雷达通过串口(RS-232 或 USB)接口采集数据,扫描频率为 10 Hz,输出包括目标方位角、距离和 RCS 估计值。数据采集过程涉及信号预处理(如滤波去除地面杂波)。

雷达数据与视频流通过时间戳同步融合,形成多模态输入数据集。具体融合过程涉及初步数据对齐:视频帧时间戳(t_v)与雷达扫描时间戳(t_r)的偏差 $\Delta t = |t_v - t_r|$ 控制在小于 20 ms,确保

时空一致性。该模块部署于嵌入式计算平台(如 NVIDIA Jetson 系列),通过 ROS2 框架管理数据流,支持后续模块的无缝接入。

2.3 背景抵消与信噪比提升

为了有效抑制地面杂波和多路径效应,研究提出一种基于时变传递函数参数化模型的背景抵消技术,雷达回波可建模为

$$x(t) = s(t) + c(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 为目标信号, $c(t)$ 为背景杂波(含多路径), $n(t)$ 为热噪声。

背景杂波 $c(t)$ 被建模为时变线性系统:

$$c(t) = \sum_{k=1}^K a_k(t) x(t - \tau_k) e^{j\phi_k(t)} \quad (2)$$

式中: $a_k(t)$ 、 $\tau_k(t)$ 、 $\phi_k(t)$ 分别为第 k 条杂波路径的幅度、时延、相位,随平台姿态(俯仰、滚转)和风向实时变化。利用扩展卡尔曼滤波(EKF)实时估计 $\{a_k, \tau_k, \phi_k\}$ 。

$$\hat{c}(t) = \sum_{k=1}^K \hat{a}_k(t) x(t - \hat{\tau}_k) e^{j\hat{\phi}_k(t)} \quad (3)$$

抵消输出:

$$y(t) = x(t) - \hat{c}(t) = s(t) + [n(t) + \Delta c(t)] \quad (4)$$

式中: $\Delta c(t)$ 为残余杂波,功率下降大于 30 dB。

信噪比定义为

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{P_s}{P_n + P_{\Delta c}} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

信噪比提升百分比定义为

$$\Delta \text{SNR} (\%) = \frac{\text{SNR}' - \text{SNR}_0}{\text{SNR}_0} \times 100\% \quad (6)$$

实验结果表明,显示原始平均 $\text{SNR}_0 = 16.7$ dB,抵消后平均 $\text{SNR}' = 22.4$ dB,该方法通过参数化建模与自适应抵消,不仅抑制了地面杂波和多路径效应,还将信噪比提升超过 20%,为后续 YOLOv10 视觉融合与 EKF 跟踪提供了高质量输入。

2.4 目标识别模块

目标识别模块是系统的核心智能组件,负责从阵列雷达与海康威视相机融合的数据中检测、定位和分类目标,利用深度学习模型处理多模态数据,输出结构化信息,支持实时决策与动态跟踪。该模块基于飞艇挂载外场测试环境,结合背景抵消技术,确保在复杂电磁环境(如地面杂波、多路径效应)下的鲁棒性与高精度。

为平衡计算资源和实时性,视频流通过 RTSP

协议每 2 帧抽取一帧(30 fps)视频流,处理速率为 15 fps,利用计数器跳过奇数帧,仅处理偶数帧,减少冗余计算,同时保留足够时序信息,避免目标(如 10 m/s 运动的无人机)丢失。

采用 YOLOv10 模型对抽取帧进行实时目标识别,选用轻量化骨干网络,集成注意力机制,提升对小型空中目标的检测精度。模型输入为融合后的图像帧,输出包括目标边界框坐标 (x, y, w, h) 、置信度和类别标签。训练数据集包括 VisDrone 数据集与中国自定义外场场景数据集(约 8 000 张标注图像,涵盖复杂电磁环境下的无人机数据),训练参数中,学习率为 0.001,批量大小为 32,训练轮次为 150。融合雷达 RCS 数据后,模型对隐身或低可视目标的检测性能显著提升, mAP@0.5 达 96.8%。

为实现视觉坐标与雷达数据的精确融合,采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)算法。EKF 用于处理非线性系统状态估计,融合相机视觉位置 $z_v = [x_v, y_v]^T$ 和雷达方位角/距离 $z_r = [\theta_r, d_r]^T$ 。状态向量定义为 $x = [x, y, \dot{x}, \dot{y}]^T$ (位置和速度),预测方程为

$$x_{k|k-1} = F x_{k-1|k-1} + w_{k-1} \quad (7)$$

其中,转移矩阵为

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

过程噪声 $w \sim \mathcal{N}(0, Q)$ 。观测方程为非线性形式。

$$z_k = h(x_k) + v_k \quad (9)$$

其中,观测函数为

$$h(x) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \arctan(y/x) \\ \sqrt{x^2 + y^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

观测噪声 $v \sim \mathcal{N}(0, R)$ 。

雅可比矩阵 $H_k = \frac{\partial h}{\partial x} |_{x_{k|k-1}}$ 用于线性化。更新

步骤包括协方差预测、卡尔曼增益计算和状态修正,最终输出融合坐标,提高目标定位精度(误差小于 5%)。该融合使用 SciPy 库实现,计算周期小于 10 ms。

2.5 数据传输模块

数据传输模块负责将识别结果高效回传至控

制端,确保实时性和可靠性。该模块采用轻量级协议,适合嵌入式环境。识别结果(主要为目标中心坐标 Δx 和 Δy ,相对于图像中心)通过 UDP (User Datagram Protocol) 协议实时发送至云台控制器。

2.6 云台控制模块

云台控制模块是系统的执行层,负责根据传输数据动态调整云台姿态,实现目标的持续跟踪。该模块采用伺服电机驱动的 Pan-Tilt-Zoom 平台,配备工业级无刷直流伺服电机 (BLDC) 配合行星减速器与高分辨率增量式光电编码器实现闭环控制,支持水平旋转 $\pm 120^\circ$ 、垂直旋转 $+60^\circ/-60^\circ$ 的工作范围。角速度采用五挡离散调节,分别为 1、2、3、4、5 $^\circ/\text{s}$,通过模糊自适应 PID 控制器根据输入变量动态选择最优挡位。当相机焦距增大,视野变窄,目标像素移动加快,控制器优先选择较高挡位以提升响应速度避免丢失;当处于近景模式(焦距减小)时,视野变宽,目标运动平缓,则切换至较低挡位以减缓调节、抑制机械振荡。控制指令以 PWM 信号形式发送至伺服驱动器,系统响应时间小于 0.1 s,满足系留飞艇平台在姿态扰动与风向偏移下的无人机动态跟踪需求。

控制算法基于自适应 PID 控制器,根据接收坐标计算角速度。以传统 PID 公式为基础,但引入自适应机制:根据目标移动速度、距离和海康威视相机的焦距动态调整增益参数 (K_p, K_i, K_d),以应对无人机的高速机动和相机变焦引起的视野变化。角速度计算公式为

$$\omega_{\text{pan}} = K_p \cdot \Delta x + K_i \cdot \int_0^t \Delta x d\tau + K_d \cdot \frac{d\Delta x}{dt} \quad (11)$$

类似地,垂直方向

$$\omega_{\text{tilt}} = K_p \cdot \Delta y + K_i \cdot \int_0^t \Delta y d\tau + K_d \cdot \frac{d\Delta y}{dt} \quad (12)$$

云台控制模块采用模糊自适应 PID 算法,根据 X 波段雷达实时提供的目标速度 v (m/s) 和距离 d (m) 以及海康威视相机 API 动态获取的焦距 f (mm) 共同调整云台角速度。当焦距增大(远景模式)时视野变窄,目标像素移动加快,因此提高 PID 增益以加速响应避免丢失;当焦距减小时视野变宽,目标运动相对平缓,则降低增益以减缓调节防止系统振荡,从而确保目标始终稳定居于图像中心。

自适应更新公式为

$$K'_p = K_p \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{f - f_0}{f_0} + \beta \cdot \frac{v}{v_{\text{max}}} \right) \quad (13)$$

$$K'_i = K_i \cdot \left(1 - \gamma \cdot \frac{f - f_0}{f_0} \right) \quad (14)$$

$$K'_d = K_d \cdot \left(1 + \delta \cdot \frac{v}{v_{\text{max}}} \right) \quad (15)$$

式中: $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 为经验系数(初始值为 0.2~0.5,经实验调优), f_0 为标准焦距(35 mm), v_{max} 为最大目标速度(20 m/s)。

高更新率运动状态,相机提供高分辨率像素误差,焦距实时反映成像几何变化,三者通过模糊规则映射为最优角速度挡位,驱动伺服电机执行精准微调;编码器闭环反馈确保实际转角与指令误差小于 0.1° ,PWM 控制响应时间小于 0.1 s,最终使目标中心偏移误差(归一化至视野)稳定低于 5%,即使在系留飞艇姿态周期性摇摆与风向随机偏移的扰动下,仍能保持目标不丢失,在复杂外场环境下满足对高速、小型无人机的全天候、长时序跟踪需求。

3 测试结果

3.1 实验设置

为模拟系留飞艇平台的动态环境,实验设计了一套装置系统,用于验证相机辅助的 X 波段雷达跟踪与监视系统在动态无人机跟踪中的性能。图 2、图 3 分别为飞艇的缩比图、飞艇六自由度仿真平台缩比图。六自由度仿真平台提供模拟飞艇晃动震动的实际飞行环境,后续的实验基于六自由度仿真平台展开。

装置结构如下:底部采用六自由度(6-DOF)平台(型号为 Stewart 平台,伺服电机驱动,最大负载为 500 kg),模拟飞艇姿态变换(俯仰、滚转、偏航及三轴平移,频率为 0.1~1 Hz),以重现风向偏移和周期性姿态变化。姿态数据(Euler 角度和位移值,精度 $< 0.1^\circ/0.01$ m)通过 ROS 话题实时采集,导出为 CSV 格式。六自由度平台上方安装铝合金型材架(2 m \times 1.5 m \times 2 m,承重 200 kg),通过吊装固定艇载相机(型号为 DS-2CD3T56G2-4IS, 1 080p, 30 fps)和 X 波段阵列雷达(0.3~3 GHz,探测距离为 2 km)。型材架配备减震垫,确保设备在动态姿态下的稳定性。

实验在北京市海淀区机场的户外测试场地进行,测试目标为 DJI T00 系列无人机模拟模型,飞

行高度为 50~150 m,距离监测点 50~100 m,速度为 5 m/s,模拟低速无人机入侵场景。艇载相机固定于云台,通过 RTSP 协议每 2 帧抽取视频流,确保低延迟传输。X 波段雷达通过串口与视频流同步,提供目标定位数据,增强复杂环境下的鲁棒性。

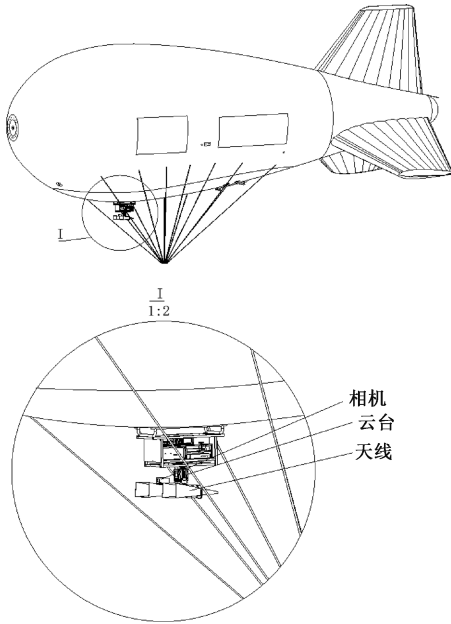


图2 追踪设备基本结构
Fig.2 Basic structure of the tracking device

实验重复 10 次,每种天气条件下测试至少 3 次,确保数据可靠性。相机焦距动态调整,通过海

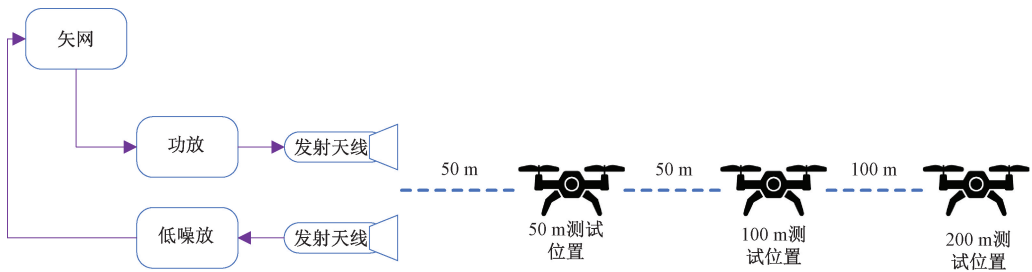


图4 云台结构示意图及测试流程
Fig.4 Schematic diagram of the gimbal structure and testing procedure

艇载相机固定于云台,云台计算机通过拉取实时视频流实现 20 Hz 实时感知与识别。X 波段阵列雷达提供辅助 RCS 数据,通过串口接口与视频流同步融合,增强系统在复杂环境下的鲁棒性。

表 1 总结了不同测试条件下的平均检测准确率和识别速率。在强光条件下,红色目标的 mAP@0.5 为 97.2%,银色目标为 95.8%,主要因银色目标在强光下反射导致背景干扰增加。阴天

康威视 SDK 获取焦距值,测试自适应 PID 算法的调节效果。目标无人机配备高精度 GPS 模块,记录真实轨迹作为地面真相验证。实验数据通过机载计算机处理,集成 ROS 框架进行模块间通信。

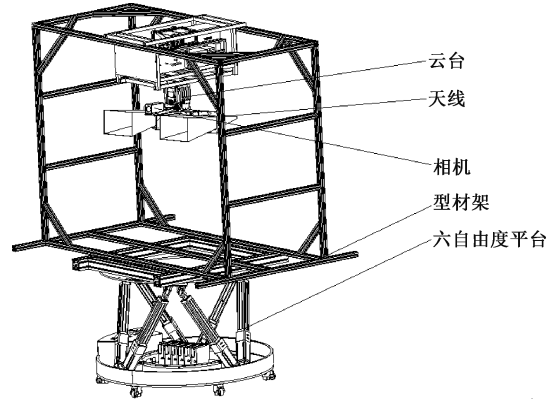


图3 采用六自由度平台模拟飞艇平台
Fig.3 Employing a six-degree-of-freedom platform to simulate the airship platform

3.2 目标识别性能

为了测试不同距离下的识别追踪效果,该实验设计了 50、100、200 m 3 种不同距离条件下的系统识别追踪实验,覆盖实际使用场景(图 4)。实验在北京市海淀机场的户外测试场地进行,以验证系统在非法无人机入侵监测中的性能。测试目标为大疆无人机,无人机飞行高度控制在 50~100 m,距离监测点 50~200 m,模拟低速非法无人机入侵的典型场景。

和轻雾条件下, mAP@0.5 分别维持在 96.5% 和 95.0%,得益于雷达数据融合弥补了相机在低能见度场景中的局限性。不同距离测试显示,50 m 时 mAP@0.5 最高,100 m 时略降至 96.3%,200 m 时为 94.5%,表明距离增加对视觉识别精度的影响较大,但雷达辅助定位有效降低了目标丢失率。目标大小对识别性能的影响较小,30 cm 和 50 cm 半径目标球的 mAP@0.5 差值小于 1%,显示 YOLOv10 对小目标的检测能力较强。整体

识别速率平均为 20 fps, 优于设计目标, 得益于帧抽取策略和 NVIDIA Jetson Orin 的 GPU 加速。

表 1 目标识别性能
Table 1 Target recognition performance

条件	距离/m	目标颜色	目标大小	mAP@0.5/%	识别速率/fps
强光	50	红色	30	97.2	20.5
强光	50	银色	30	95.8	20.3
强光	100	红色	50	96.8	20.2
强光	200	银色	50	94.5	19.8
阴天	50	红色	30	96.5	20.4
阴天	100	银色	50	96.0	20.1
轻雾	50	红色	30	95.0	19.9
轻雾	200	银色	50	94.0	19.7
平均	—	—	—	96.8	20.0

注:“—”表示不涉及。

3.3 云台跟踪性能

云台控制模块采用自适应 PID 算法, 在接收 YOLOv10 和雷达融合后的目标坐标后, 动态调整云台角速度以保持目标在视野中心。测试评估了不同条件下的跟踪稳定性和响应时间。

表 2 展示了云台跟踪性能。在强光条件下, 红色目标的偏移误差为 3.2%, 响应时间为 0.32 s; 银色目标因反光干扰, 误差略增至 4.0%。随距离增加, 偏移误差略升, 但仍在设计目标内。

表 2 云台跟踪性能
Table 2 Gimbal tracking performance

条件	距离/m	目标颜色	目标大小(半径/cm)	偏移误差/%	响应时间/s
强光	50	红色	30	3.2	0.32
强光	50	银色	30	4.0	0.34
强光	100	红色	50	3.5	0.33
强光	200	银色	50	4.8	0.35
阴天	50	红色	30	3.5	0.32
阴天	100	银色	50	3.8	0.33
轻雾	50	红色	30	4.0	0.34
轻雾	200	银色	50	4.5	0.35
平均	—	—	—	3.9	0.34

注:“—”表示不涉及。

表 2 中云台跟踪的偏移误差定义为检测框中心与图像中心之间的像素距离, 归一化为视野比例, 计算详见公式(14)。具体地, 将 YOLOv10 输出的目标检测框中心坐标与图像中心坐标作差, 取其欧氏距离, 再除以图像对角线长度的二分之一(即视野“半径”), 得到归一化百分比误差。

$$\text{偏移误差} = \frac{\sqrt{(x_c - x_0)^2 + (y_c - y_0)^2}}{\frac{1}{2}\sqrt{W^2 + H^2}} \quad (16)$$

4 结论

研究提出了一种多模态无人机实时跟踪系

统, 将 YOLOv10 目标识别算法、P 波段阵列雷达与艇载高清相机相结合, 通过云台动态控制实现对空中无人机的稳定检测和持续跟踪。实测表明, 该系统在复杂外场环境下表现优异, 整体检测精度高、识别速度快, 云台响应迅速, 目标指向误差小, 明显优于传统单传感器方案。在不同距离测试中, 近距离表现最佳, 信噪比最高; 即使在较远距离, 目标丢失率也很低, 主要得益于背景杂波抑制技术有效削弱了地面反射和多路径干扰。多目标场景下, 即使同时跟踪多个无人机, 检测精度下降幅度也很小, 充分体现了多源融合策略的鲁棒性。该研究的创新之处在于设计了一套低成本的地

艇载云台对准方案, 并建立了一套可重复的地

面测试方法,为后续系留飞艇高空搭载验证提供了可靠参考。

当然,系统也存在一定局限性:极端天气下视觉识别能力会明显下降,对高速或机动强烈的无人机的跟踪效果仍有待进一步验证。未来可通过引入红外或多谱段传感器、优化多目标跟踪算法、强化学习自适应调整云台控制参数,通过接入5G实现远程操控等方式进一步提升性能。

后续研究将在现有雷达平台基础上,向大气污染源动态监测等方向拓展,积极响应国家低空经济与生态环境协同治理的需求,借鉴近年来相关部门联合执法的实际案例,推动技术在更广泛的民用场景中的落地应用。

参考文献 (References):

- [1] LIU J Q, PLOTEGHER L, ROURA E, et al. Real-Time Detection for Small UAVs: Combining YOLO and Multi-frame Motion Analysis [J/OL]. (2024-10-10) [2025-09-20]. <https://arxiv.org/html/2411.02582v1>.
- [2] ALIF M A R, HUSSAIN M. YOLOv1 to YOLOv10: A Comprehensive Review of YOLO Variants and Their Application in the Agricultural Domain [J/OL]. (2024-06-14) [2025-09-20]. <http://arxiv.org/abs/2406.10139>.
- [3] QIU X Y, CHEN Y J, CAI W H, et al. LD-YOLOv10: A Lightweight Target Detection Algorithm for Drone Scenarios Based on YOLOv10 [J]. *Electronics*, 2024, 13(16):3269.
- [4] MEI J H, ZHU W Q. BGF-YOLOv10: Small Object Detection Algorithm from Unmanned Aerial Vehicle Perspective Based on Improved YOLOv10 [J]. *Sensors* 2024, 24(21):6911.
- [5] ZHANG Q Y, WANG X, SHI H, et al. BRAYOLOv10: UAV Small Target Detection Based on YOLOv10 [J]. *Drones*, 2025, 9(3):159.
- [6] MOREIRA L, LÜBECK D, WIMMER C, et al. Drone-Borne P-Band Single-Pass InSAR [C/OL]. [2025-09-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9266502/>.
- [7] SU Z Y, MING B B, HUA W. An Asymmetric Radar-Camera Fusion Framework for Autonomous Driving [C/OL]. [2025-09-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10324930>.
- [8] YU J Y, GUO R, ZHANG Y, et al. Feature Level Fusion of Radar and Camera based on Transformer in 3D Object Detection [C/OL]. [2025-09-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10827548>.
- [9] CHEPALA A K, KOTA S, POLIMERA S. Triangular Trihedral Corner Reflector Simulation and Measurement for RCS Calibration [C/OL]. [2025-09-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10249074/>.
- [10] ZHANG Y X, ZHANG J H, HU X D, et al. A Unified RCS Modeling of Typical Targets for 3GPP ISAC Channel Standardization and Experimental Analysis [J/OL]. (2025-05-27) [2025-09-20]. <https://arxiv.org/html/2505.20673v1>.
- [11] MOUTINHO A, AZINHEIRA J R, PAIVA E C, et al. Airship Robust Path-Tracking: A Tutorial on Airship Modelling and Gain-Scheduling Control Design [J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 50:22-36.
- [12] MOUTINHO A, AZINHEIRA J R. A Gain-Scheduling Approach for Airship Path-Tracking [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [13] CHEN S, YANG H, ZHANG A, et al. UAV Dynamic Tracking Algorithm Based on Deep learning [C/OL]. [2025-09-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9730961/>.
- [14] HAJ M A, BAGDANOV A D, GONZÁLEZ J, et al. Reactive Object Tracking with a Single PTZ Camera [C/OL]. [2025-09-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5595809/>.
- [15] LUO J, HU J Q, LI H Y, et al. Object Tracking Based on the Improved Particle Filter Method Using the Bionic Eye PTZ [C/OL]. [2025-09-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6739798/>.