

共青城市低空经济场景下无人机治理与反制技术研究

郑悦 李房云 周丰镭 杨阳
南昌航空大学科技学院, 江西 南昌 332020

[摘要]随着低空经济被确立为国家战略性新兴产业,无人机规模化应用与公共安全管理之间的矛盾日益突出。文中以共青城市为典型研究对象,系统分析城市低空经济场景下无人机治理面临的现实挑战,围绕“探测-识别-决策-反制-评估”全链条,构建面向城市复杂电磁环境的无人机治理与反制技术策略体系。文章分析了城市背景下无人机探测与识别的技术难点,提出了多模态信息融合、分布式协同决策、精准反制与效果评估等关键技术路径,并结合共青城市实际条件探讨了策略落地的可行性与应用前景。研究旨在为城市低空无人机治理提供技术参考与政策建议,服务地方低空经济高质量发展。

[关键词]低空经济; 无人机治理; 无人机反制; 电磁环境; 多模态融合; 共青城市

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20351

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Research on UAV Management and Countermeasures Technology in the Low altitude Economic Scenario of Gongqingcheng City

ZHENG Yue, LI Fangyun, ZHOU Fenglei, YANG Yang

Science and Technology College of NCHU, Nanchang, Jiangxi, 332020, China

Abstract: With the establishment of low altitude economy as a national strategic emerging industry, the contradiction between the large-scale application of drones and public safety management is becoming increasingly prominent. The article takes Gongqingcheng City as a typical research object, systematically analyzes the practical challenges faced by drone governance in the low altitude economic scenario of the city, and constructs a drone governance and countermeasures technology strategy system for the complex electromagnetic environment of the city around the entire chain of "detection identification decision-making countermeasures evaluation". The article analyzes the technical difficulties of unmanned aerial vehicle detection and recognition in urban backgrounds, proposes key technological paths such as multimodal information fusion, distributed collaborative decision-making, precise countermeasures, and effect evaluation, and explores the feasibility and application prospects of strategy implementation based on the actual conditions of Gongqingcheng City. The research aims to provide technical references and policy recommendations for the management of low altitude unmanned aerial vehicles in cities, and to serve the high-quality development of local low altitude economy.

Keywords: low altitude economy; UAV management; UAV countermeasures; electromagnetic environment; multimodal fusion; Gongqingcheng City

引言

低空经济是以低空空域(通常指真高 1000 米以下)为依托,以无人机、通用航空器等为载体,融合先进制造、新一代信息技术和现代服务业的综合性经济形态。2023 年中央经济工作会议明确提出打造低空经济等若干战略性新兴产业,2024 年低空经济首次写入国务院政府工作报告。各省市纷纷布局低空经济产业,江西省将低空经济列为新质生产力高质量发展的重要方向,共青城市依托区

位优势和南昌航空大学科技学院的学科资源,正加快推动低空经济示范区建设。

随着低空经济的快速发展与现在市场上无人机规模的快速扩张,低空的安全问题也随之变得日益严峻。大量没有得到授权的无人机“黑飞”“乱飞”。这种“乱飞”的现象,对城市的公共安全、居民隐私、国家安全等构成了重大的安全隐患。根据中国民航局在 2023 年的统计数据显示:全国有几千起无人机违规飞行的现象,其中有些违

规的飞行行为导致了多起航班延误、多场大型的活动中断，造成了巨大的经济损失和社会危害。因此，城市环境下，无人机治理与反制技术的研究已经成为一个热门的方向。

本文以共青城市为典型研究对象，依托已经建立的南昌航空大学科技学院“低空信息对抗实验室”的场地条件和实验平台，深入“探测-识别-决策-反制-评估”等全方面体系，来构建城市环境下的无人机治理与反制策略。

1 城市低空经济场景下无人机治理的现实挑战

城市是典型的楼层高密度、干扰源种类复杂多样、短时间内辐射源动态变化的复杂电磁环境。以共青城市为例，区域内分布有科教城高校密集区、高新技术产业园区、居民生活区、交通枢纽等不同类型的电磁辐射源，频谱资源利用充分，信号类型多样。如：

频谱拥挤：2.4GHz 和 5.8GHz ISM 频段被大量 Wi-Fi 设备、蓝牙设备、无线摄像头等占用，与部分无人机的通信频段高度重叠，形成了天然的背景噪声。

多径效应显著：城市建筑群对电磁波的反射、绕射和散射使得信号传播路径复杂化，同一目标可能在多个方向产生回波，严重影响测向和定位精度。

干扰源分布复杂：工业设备、通信基站、广播电视发射塔等大功率辐射源的存在，使得局部区域的电磁背景噪声呈现非平稳、非高斯的统计特性。

除上述城市的复杂性带来的这些挑战外。当前，城市场景中的无人机威胁已从单一的“黑飞”入侵，演变为涵盖多种形式的复合型安全挑战。如：无人机自主性不断提升，部分消费级无人机已具备预设航线自主飞行能力，无需持续遥控指令，增加了探测与处置难度；微型化趋势使无人机尺寸可小至十几厘米，雷达散射截面积积极小，传统探测手段难以发现；部分无人机具备跳频和扩频通信能力，射频特征不固定，被动侦测识别困难。此外，随着无人机集群技术的民用化，多机协同入侵的潜在风险上升，对分布式协同决策能力提出了更高要求。

2 无人机探测与识别策略

2.1 雷达探测技术及其城市适应性优化

雷达是实现无人机有源探测的核心装备，能够全天候、全天时提供目标距离、方位和速度信息。然而，城市背景下的雷达探测面临严峻挑战：低慢小目标雷达散射截面通常仅为 $0.01 \sim 0.1\text{m}^2$ ，回波信噪比极低；城市多径效应导致同一目标产生多个虚假回波，建筑物遮挡造成探测盲区。

针对上述问题，可采取以下优化策略：一是采用频率捷变和宽带信号技术，提升雷达在频率选择性衰落信道下的探测稳健性；二是研究基于时频分析的微多普勒特征提取方法，利用旋翼转动产生的微多普勒调制区分无人机与飞鸟等虚警目标；三是采用多基雷达协同探测方案，利用多站观测数据融合实现对非视距区域的目标检测。南昌航空大学科技学院团队在雷达通信一体化波形设计和小目标检测方面已积累了较好基础，能够稳定实现低信噪比条件下的动目标特征提取。

2.2 无线电被动侦测与频谱识别

与有源雷达不同，无线电被动侦测通过截获无人机的图传、遥控信号实现目标的探测与识别，具有隐蔽性好、不产生电磁污染的优势。但城市环境下，各类通信信号密集交织，如何从复杂的频谱环境中准确提取无人机信号特征成为核心难点。

基于深度学习的频谱语义分割技术为这一难题提供了新的解决方案。通过构建包含不同型号无人机图传信号的城市频谱数据集，训练语义分割网络实现目标信号的检测与分类。针对跳频信号，可结合短时傅里叶变换与时频图深度特征提取，实现即便在部分频点被干扰条件下的可靠识别。在多站定位方面，采用多重信号分类等超分辨率算法实现高精度到达角估计，结合到达时间差信息可实现百米级的目标定位精度。

2.3 多模态信息融合识别

雷达、射频、光电等单一探测手段各有其性能边界和应用局限。雷达在远距离探测方面优势明显，但近距离存在盲区且易受多径干扰；光电探测分辨率高，但受天气和光照条件制约；射频侦测隐蔽性好，但对静默目标无效。多模态信息融合能够利用各传感器的互补特性，显著提升系统综合性能。

多模态融合的要点在于异构数据的时空对准和特征级融合。在时间维度上，不同传感器的数据率差异较大（雷达通常为 $10 \sim 20\text{Hz}$ ，光电为 $25 \sim 30\text{Hz}$ ，射频侦测为 $1 \sim 5\text{Hz}$ ），需要通过插值和预测实现时间同步；在空间维度上，需建立统一的坐标系实现各传感器观测结果的关联。在特征融合层面，可采用基于注意力机制的多模态深度学习模型，使网络自适应地关注不同模态中信息量最丰富的部分，实现优于单模态的识别性能。具体的研究技术路线图如图 1 所示：



图 1 无人机探测与识别方向研究技术路线图

3 智能决策与协同控制策略

该研究方向针对无人机反制系统的资源协调和智能化提升要求, 以多目标优化和多智能体控制理论为基础, 开展分布式设备的监管区域布站优化、面向群体智能涌现的对抗任务规划以及基于区块链的群体自主协同与控制等理论方法与关键技术研究。

3.1 分布式设备的监管区域布站优化

分布式设备布站优化对无人机反制系统的性能提升具有重大意义。在探测和识别方面, 合理部署传感器设备能够实现多角度、多模态数据采集和融合, 可以最大化探测覆盖范围、减少探测盲区的同时, 显著提升目标识别的准确性和抗干扰能力; 在跟踪方面, 分布式设备网络可以实现无缝切换和协同跟踪, 有效提高对机动策略较强的无人机目标的航机保持能力; 对于反制环节, 优化反制设备布局不仅确保了关键区域的有效覆盖, 还能最小化电磁干扰对周边环境的影响。然而, 在高楼林立的城市环境下, 分布式布站带来的设备管理维护困难、视线受阻、数据高负荷传输等问题使得系统整体性能的优化变得困难。

针对上述难题, 可开展以下研究: 综合考虑覆盖率、能耗、维护成本等因素探索多目标多约束布站优化的数学模型构型, 并研究新的高效演化计算方法来求解; 设计智能设备组网应用环境并应用深度强化学习算法优化决策流程的实施。这些技术和算法的协同应用, 将显著提升分布式设备在复杂城市环境下的部署效能和系统性能。

3.2 多目标任务规划与资源分配

无人机管制需充分发挥物联网和分布式布站优势, 集

中提升反无人机任务规划的自主化和智能化水平, 提供精准、实时的决策支持, 减轻操作员的指控负担。对抗任务规划结合了优化和多智能体控制理论, 旨在提高系统对无人机的探测和反制效率。在对多目标无人机进行监管和处置的场合, 系统基于现有观测自动识别无人机群运动规律, 快速完成任务自主分解、资源协同策略生成、行动规划等, 随着历史数据的积累, 其性能会持续提升。城市环境下, 随着管制目标数量增多, 对抗任务规划面临着设备承载能力的限制。包括: 智能算法的高复杂度、决策模型的在线更新, 以及决策结果的数据分发问题。

针对上述难题, 可开展以下研究: 引入边缘计算架构, 将复杂计算任务分散到网络边缘, 减轻中心设备负担。其次, 研究颗粒度可调整的演化计算算法, 以适应不同规模的设备计算能力限制; 利用高精度目标航迹保持模型和设备通信拓扑模型, 设计快速响应的局部决策和全局优化的高层策略。这些方法的综合应用预期将显著提升系统在城市环境下的性能, 同时克服设备承载能力的限制。

3.3 系统协同机制的构建

基于多智能体系统优化的自主协同与控制技术, 可消除单点故障风险, 提高系统决策的鲁棒性和抗干扰能力, 这在复杂的城市环境中尤为重要, 能够确保即使部分节点失效, 系统仍能继续运行, 从而为分布式无人反制技术提供了一种创新的协同机制。通过预设的智能合约, 可以赋予不同探测点位设备不同的任务职责, 从而有效整合多传感器的探测信息, 并对反制设备进行角度以及功率引导, 即实现任务指令下放、资源调度和奖惩机制的自动化执行,

大幅提高协同效率和响应速度。然而,在城市环境下,区块链网络的通信稳定性、节点连接性不佳、计算资源消耗巨大、节点间的频繁同步都给软硬件平台提出了苛刻的要求。

针对上述问题,采取以下研究办法:设计定制化的多智能体系统优化算法,以提升性能和降低资源消耗。其次,

优化数据处理和存储策略,引入多站协同的伺服跟踪算法,确保多探测/反制设备的效能提升;攻克大规模分布式系统的一致性与性能平衡、复杂城市环境下智能决策模型构建等技术,从而提升系统的整体性能和决策可靠性。具体的研究技术路线图如图2所示:

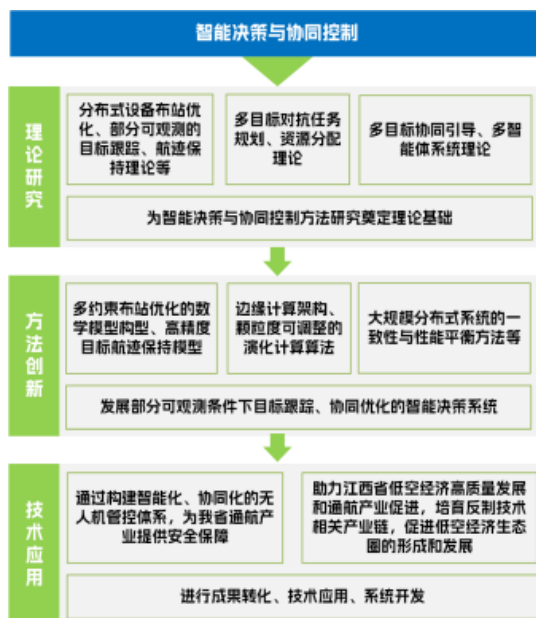


图2 智能决策与协同控制策略

4 精准反制与效果评估策略

4.1 宽带阵列多目标自适应干扰

城市背景下宽带干扰频谱泄露对合法通信造成的影响、多目标干扰时受建筑群遮挡形成的方向调整瓶颈,以及有源设备规模化部署带来的成本问题,都会降低实际公共服务的质量和技术性能。

开展宽带阵列多目标自适应干扰理论与方法研究,包括:探索楼间多径反射信号与自由衰落信道的物理耦合机理,梳理感知数据采样特性和环境先验分布,研究以频带划分为基础的非相干信号子空间处理方法,通过波束动态调整实现非目标信号的自适应置零,降低频谱泄露对合法通信的干扰;其次,针对多目标干扰时的资源约束,瞄准非凸优化分配模型的约束松弛、分段线性化等模型重构理论,全面提高干扰波束与干扰策略的生成效率;分析宽带阵列天线单元的相互耦合和频率响应特性,探索多通道数字-微波-功放模块的一体化低损构型,以降低设备的整体成本并提高其宽频带适应性。

4.2 近场目标无人机自主拦截

反制效果的量化评估是指导策略优化和支撑决策制定的重要依据。然而,城市环境的复杂性和随机性使得反

制效果受多种因素耦合影响,单一指标难以全面反映治理效能。

开展近场目标无人机自主拦截理论与方法研究,通过建立部分可观测的无人机分层控制架构,设计适合拦截无人机上部署的轻量级目标识别和跟踪模型,提升边缘计算和自主分析能力;利用迁移学习和模型预测控制技术,开发不同城市环境下的通用自动避障和跟踪策略,加强非连续引导信息下自主拦截的有效性和鲁棒性,从而提高在视线受阻情况下的目标拦截能力;基于深度学习模型挖掘无人机历史航迹与外部引导信息时滞参数间的关系,并形成校正和补偿方案,确保拦截无人机能够在复杂城市环境中实时、可靠地生成最优拦截轨迹,提高物理拦截的安全性。

4.3 反制效果高置信智能评估

反制效果评估在指导反制技术优化和性能提升方面具有重要意义,它能够客观、全面地评估反制措施的有效性,降低次生灾害的发生。

开展反制效果高置信智能评估理论与方法研究,包括:构建基于深度神经网络多输入多输出评估模型,输入包括反制手段参数、目标特征、环境因素等,输出包括反制成功率、法规遵从度等多个指标,模型架构采用注意力机制

和残差连接,提高对关键要素的捕捉能力。为适应不同反制手段,设计电磁干扰评估和物理拦截评估模块等,每个模块针对特定反制手段优化数据内容;模型验证采用交叉验证和留出法相结合的策略,先在仿真环境中进行大规模

训练和初步验证,然后选择典型场景进行实地测试,收集真实数据并进行模型微调,通过建立评估模型的迭代优化机制,确保不同环境下模型的高置信度和长期有效。具体的研究技术路线图如图3所示:

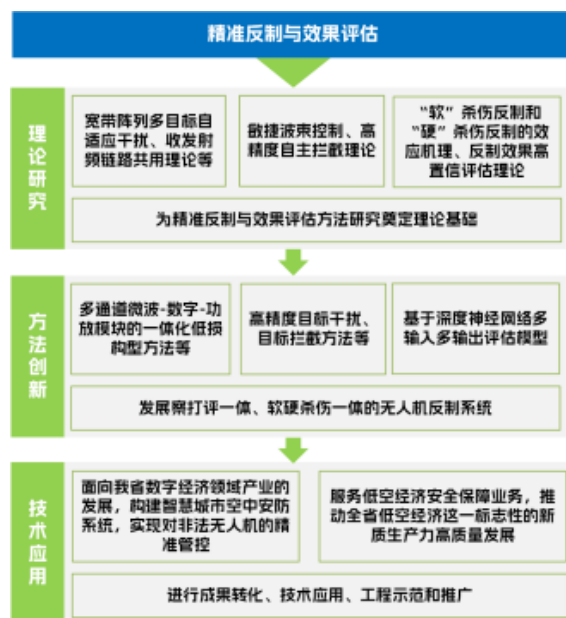


图3 精准反制与效果评估方向研究技术路线图

5 结论

本文以共青城市电磁环境为典型研究对象,在无人机探测与识别、智能决策与协同控制、精准反制与效果评估等方面提出了相应的策略与技术研究路线。为城市无人机的治理与反制提供了一种策略和思路。

当前的研究局限于共青城环境下,未来研究可在下面方向进一步深化:前往电磁环境更为复杂的大城市地区;将人工智能与无人机反制相结合等。

[参考文献]

[1]新华社.中央经济工作会议在北京举行[N].人民日报,2023-12-13(1).
[2]李强.政府工作报告——2024年3月5日在第十四届全国人民代表大会第二次会议上[N].人民日报,2024-03-13(1).
[3]江西省人民政府.江西省低空经济高质量发展三年行动计划(2024-2026年)[EB/OL].(2024-10-25)[2026-09-15].
https://drc.jiangxi.gov.cn/jxsfzhggwyh/col/col4990/content/content_1865356808375468032.html
[4]张洪海,张连东,刘嶧.城市低空无人机管控关键技术研究综述[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(3):1-13.

[5]何佳婕.基于微多普勒效应的多旋翼无人机检测与跟踪技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
[6]陈小龙,袁旺,杜晓林,等.多波段FMCW雷达低慢小探测数据集(LSS-FMCWR-1.0)及高分辨微动特征提取方法[J].雷达学报,2023(12):1-15.
[7]Fu H Y, Li Q. Light arrays measure up on a chip the size of a fingertip[J].Nature,2022(603):232-233.
[8]Huang B, Li J, Chen J, et al. Anti-UAV410: A thermal infrared benchmark and customized scheme for tracking drones in the wild[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2023,46(5):2852-2865.
[9]宛处好.基于多源融合的无人机探测与个体识别[J].成都:电子科技大学,2022:10-17.
[10]高梅国,林升泰.雷达信号与遥感地图融合的深度低慢小目标检测算法[J].信号处理,2024,40(1):82-93.
[11]周钦全,孙希平,余晓洁,等.高分辨毫米波雷达与摄像融合目标跟踪方法[J].电子信息对抗技术,2024,39(4):47-55.
作者简介:郑悦(1995—),男,汉族,江西九江人,硕士,讲师,南昌航空大学科技学院,研究方向为电路与系统。