

无线电频谱感知技术在低空无人机交通管理中的应用

杨晓兰

怒江州工业和信息化局，云南 泸水

收稿日期：2025年9月30日；录用日期：2025年10月21日；发布日期：2025年10月29日

摘 要

随着无人机在低空领域的广泛应用，建立高效、安全的低空无人机交通管理系统成为迫切需求。本文探讨了无线电频谱感知技术在低空无人机交通管理中的应用，深入分析了现有频谱感知方法的性能特点及其在无人机识别、定位与跟踪、通信安全和避碰等方面的应用场景，提出了基于频谱感知的低空无人机交通管理架构，并针对关键技术挑战提出了相应的解决方案。无线电频谱感知技术能够有效提升低空无人机监测能力，为构建安全、可靠的低空无人机交通管理系统提供关键技术支持。

关键词

无线电频谱感知，低空无人机，交通管理，频谱监测，被动探测

Application of Radio Spectrum Sensing Technology in Low Altitude UAV Traffic Management

Xiaolan Yang

Nujiang State Bureau of Industry and Information Technology, Lushui Yunnan

Received: September 30, 2025; accepted: October 21, 2025; published: October 29, 2025

Abstract

With the widespread application of drones in the low altitude field, establishing an efficient and safe low altitude drone traffic management system has become an urgent need. This article explores the application of radio spectrum sensing technology in low-altitude unmanned aerial vehicle traffic

management. It deeply analyzes the performance characteristics of existing spectrum sensing methods and their application scenarios in unmanned aerial vehicle recognition, positioning and tracking, communication security, and collision avoidance. A low altitude unmanned aerial vehicle traffic management architecture based on spectrum sensing is proposed, and corresponding solutions are proposed for key technical challenges. Radio spectrum sensing technology can effectively enhance the monitoring capability of low-altitude unmanned aerial vehicles and provide key technical support for building a safe and reliable low-altitude unmanned aerial vehicle traffic management system.

Keywords

Radio Spectrum Sensing, Low Altitude Unmanned Aerial Vehicles, Traffic Control, Spectrum Monitoring, Passive Detection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,无人机技术发展迅速,在多领域广泛应用,全球民用无人机市场规模超千亿元且年增长率超 20%。但随着无人机数量激增,低空空域资源紧张,潜在冲突风险上升,建立低空无人机交通管理系统迫在眉睫[1]。

目前,学术界和工业界对无人机交通管理技术研究活跃。相关研究综述了低空交通管理系统,指出传统空管技术的局限性;分析了管理体系架构,提出分层分布式管理模式。在感知避让技术方面,概述了大型固定翼无人机技术,分析了低空小型无人机空域冲突感知技术进展,为无人机交通管理奠定理论基础。

然而,传统航空交通管理系统依赖主动协作技术,难以覆盖低空无人机。近年来,无线电频谱感知技术在无人机监测领域前景良好。有研究开发相关防御应用系统,验证其有效性;探讨通信频谱空闲状态时长预测技术;研究无人机网络频谱分配问题,为融合应用提供思路。无线电频谱感知技术通过被动监测信号,为低空无人机监测管理提供新路径。与现有研究相比,本文注重该技术在实际场景中的系统性应用,针对低空无人机交通管理需求,探讨应用方法,分析挑战并提出方案,旨在提供技术参考。

2. 无线电频谱感知技术概述

2.1. 频谱感知原理与方法

无线电频谱感知技术是监测、分析特定频率电磁信号,判断频谱占用状态、识别信号特征的技术。在低空无人机交通管理中,频谱感知针对无人机控制、数据链路及图传信号等特定频段监测。从信号处理看,频谱感知分为信号采集与分析两步,采集用宽带接收机和高速采样设备覆盖目标频段,分析对采集信号做特征提取和模式识别。针对低空无人机交通管理,系统设计要考虑城市环境多径效应和干扰源问题,采用自适应滤波和背景噪声抑制等信号预处理技术[2]。

常用的频谱感知方法各有特点:能量检测法实现简单但在低信噪比环境下性能较差,当信噪比为 -5 dB 时检测概率仅为 65%;匹配滤波对已知信号检测效果好,信噪比大于 0 dB 时检测概率可达 95%以上,但需预先了解信号特征;循环平稳特征检测利用信号的周期性统计特性,即使在信噪比为 -8 dB 时仍能保

持 80%以上的检测概率；基于深度学习的方法通过 CNN 等网络自动学习频谱特征，识别准确率可达 92.5%，但需要大量训练数据。实际系统中通常采用多算法融合的分层策略，在保证 95%检测概率的同时，将误警率控制在 3%以下。

2.2. 无人机频谱特征分析

不同类型的无人机采用不同的通信协议和调制方式，展现出独特的频谱特征。消费级无人机主要使用 2.4 GHz 和 5.8 GHz 频段，大疆系列无人机的 OcuSync 协议表现为带宽 20MHz 的 OFDM 信号，具有特定的跳频周期(约 2.5 ms)；而固定翼无人机采用 Sbus 协议则表现为窄带 FSK 调制信号，带宽仅为几 kHz。工业级无人机通常采用更大的发射功率(通常>1 W)和更宽的频带占用(可达 40~80 MHz) [3]。

通过深入分析这些频谱特征，可以实现无人机的存在检测、类型识别甚至个体识别。研究表明，即使是同型号的无人机，由于制造过程中的微小差异，其射频指纹也存在细微差别。通过提取载波频率偏移、相位噪声功率谱密度、非线性失真系数等射频指纹特征，无人机个体识别准确率可达 88.7%，这为无人机的精确识别和监管提供了技术基础。

3. 频谱感知在低空无人机交通管理中的应用

3.1. 无人机检测与识别

无线电频谱感知技术通过被动监测无人机的控制链路和数据链路信号，可实现无人机的检测和识别。在实际应用中，采用多级检测识别策略：首先通过能量检测快速发现可疑信号，然后利用特征匹配或机器学习方法进行精细识别。基于实际部署系统的测试数据显示，在城市环境下，频谱感知对主流消费级无人机的检测距离可达 2~4 公里，识别准确率达到 93.2%。

与传统的雷达和光电探测相比，频谱感知在全天候、低可见度条件下具有明显优势，且对小型无人机的探测效果较好，在相同距离下的检测概率提高约 30%。在多目标场景下，采用基于时频分析的信号分离技术，结合独立成分分析算法，可有效分离重叠信号，在 5 个无人机同时飞行的场景下信号分离成功率达到 82.4% [4]。

3.2. 无人机定位与跟踪

频谱感知技术结合到达角(AOA)、到达时间差(TDOA)等测向定位方法，可实现对无人机的被动定位与跟踪。TDOA 技术要求各传感节点时间严格同步，采用 GPS 授时的 5 节点系统在 4 公里 × 4 公里区域内定位精度达到 15~35 米；AOA 技术利用相控阵天线获取信号到达方向，角度估计精度可达 2~5 度。

在实际应用中，常采用 TDOA 与 AOA 混合定位方法，结合各自优势提高定位精度。系统通过卡尔曼滤波算法对位置数据进行平滑处理并预测轨迹，对于信号间歇性出现的情况，可通过历史轨迹预测填补跟踪空白，维持对目标的连续感知。在多目标场景下，采用联合概率数据关联等算法解决数据关联问题。

3.3. 通信链路安全监测

频谱感知技术可持续监测无人机通信链路状态，及时发现干扰、劫持等安全威胁。通过分析信号的功率谱密度、调制特性和时频特征，可识别出异常信号模式，如突发强信号、信号参数变化等攻击征兆。系统可通过监测信号功率突变、载频偏移、调制深度异常等特征，识别潜在的干扰或欺骗攻击[5]。

实验数据表明，基于多特征融合的异常检测算法能够在 95%的置信度下检测出通信链路攻击，误警率控制在 5%以下。对于监管部门而言，频谱感知还能发现违规使用频段的无人机，结合地理围栏等技术，可实现对特定区域内无人机通信行为的精确监管。

3.4. 协作式避碰辅助

无线电频谱感知技术可为无人机之间的协作式避碰提供辅助。通过监测周围无人机的通信信号,结合信号强度、方向和频谱特征分析,无人机可感知周围其他无人机的存在和大致位置,即使在非视距条件下也能及时规避潜在冲突。基于信号强度变化率的避碰算法能够预测碰撞风险,当检测到信号强度以大于 -3 dBm/s 的速率增强时触发避碰机制,能够在碰撞前 $20\sim 30$ 秒发出预警。

对于配备频谱感知设备的无人机,可形成一种去中心化的交通感知网络,每个无人机既是信息的发射者也是接收者,通过共享频谱感知信息实现群体协同避碰。这种基于通信信号的协作式避碰机制与传统的视觉避碰和ADS-B协作避碰形成互补,提高了低空交通安全性。

4. 基于频谱感知的低空无人机交通管理架构

4.1. 系统总体架构

基于频谱感知的低空无人机交通管理系统采用分层分布式架构,由频谱感知传感网络、边缘计算处理层、数据融合中心和管控执行单元构成。传感网络采集频谱数据,边缘处理层进行初步信号处理与特征提取,数据融合中心汇总多源信息并分析态势,管控执行单元依结果发布管理指令。

硬件架构方面,传感节点含宽带天线阵列等,功耗控制在 50 W 以内,达IP65防水防尘标准。通信采用光纤主干网络与 5G 链路结合,确保端到端延迟小于 50 ms 。软件架构基于微服务设计,功能模块独立部署、可动态扩展,系统具备自诊断和自修复能力。系统采用“边缘-雾-云”三层架构,边缘层负责数据采集与实时预处理,雾层负责区域数据融合与协同处理,云层负责全局态势感知与管控决策。部署策略按“密集核心区、稀疏外围区”原则布局传感节点,重点监测机场周边等敏感区域,同时覆盖城市主要交通干道和人口密集区。

4.2. 与现有UTM系统的融合

无线电频谱感知技术可作为现有无人机交通管理系统(UTM)的有力补充,形成“主动报告+被动监测”的双重保障机制。现有UTM系统主要依赖于无人机的主动报告和协作,难以应对不合规或恶意无人机;引入频谱感知技术后,可有效弥补这一不足[6]。

在实际应用中,频谱感知数据可与雷达、ADS-B、光电等多源数据融合,采用加权最小二乘法或扩展卡尔曼滤波算法进行数据关联和轨迹融合,提高目标跟踪的准确性和可靠性。对于已注册的合规无人机,频谱感知提供身份验证和轨迹确认;对于未注册的不明无人机,频谱感知则成为主要监测手段。通过标准化API接口,频谱感知系统可无缝对接现有UTM平台。

5. 关键技术挑战与解决方案

5.1. 复杂电磁环境下的信号检测与分离

城市环境中存在大量Wi-Fi、蓝牙、移动通信等干扰源,无人机信号容易被掩盖,传统检测方法在强干扰环境下性能下降严重。针对此问题,采用基于自适应滤波和盲源分离的信号处理技术,首先利用自适应陷波滤波器抑制已知干扰源,然后采用快速独立成分分析(FastICA)算法结合时频域稀疏表示,实现混合信号的有效分离。在信干比为 -5 dB 的环境下,该方法信号分离成功率达到 85% 以上,同时设计背景噪声自适应估计算法,根据环境噪声水平动态调整检测阈值[7]。

5.2. 低信噪比条件下的弱信号检测与增强

远距离或低功率无人机信号往往淹没在噪声中,传统能量检测方法在信噪比低于 -10 dB 时基本失效,

严重限制了系统的检测距离和覆盖范围。基于压缩感知理论设计弱信号检测算法,利用无人机信号在时频域的稀疏性特征,通过构建完备字典和 L1 范数最小化重构算法,从噪声中恢复弱信号。结合循环平稳特征检测提高检测灵敏度,在信噪比为-12 dB 时仍能保持 70%的检测概率,同时采用多天线分集接收技术,通过空间合成进一步提高接收信噪比。

5.3. 多径效应引起的定位误差抑制

城市环境中的多径传播严重影响 TDOA 和 AOA 定位精度,多径信号的存在使得直达波信号被掩盖或失真,导致定位误差可能达到数百米。可以建立三维城市电磁环境模型,采用射线追踪算法预测主要多径路径的传播特性,结合超分辨率算法如 MUSIC 和 ESPRIT,从接收信号中分离直达波和多径分量。同时采用多径抑制天线技术,利用天线方向图的空间选择性减少多径信号的影响,该综合方案可将城市环境下的定位误差降低 40%~60%,定位精度提升至 10~20 米。

5.4. 通信链路安全威胁的智能识别与防护

恶意用户可能采用干扰、欺骗或劫持等手段攻击频谱感知系统,现有方法难以有效识别采用与正常信号相似参数的复杂攻击。应该设计多维特征认证机制,结合射频指纹、信号时序特征、空间位置信息和行为模式进行综合认证,建立基于机器学习的异常检测模型,通过分析信号的统计特性、调制质量和传播特征等多个维度识别异常信号。建立动态更新的信号“白名单”数据库,采用在线学习算法持续优化检测模型,对典型的干扰和欺骗攻击检测率达到 96%以上,误警率控制在 3%以下。

5.5. 大规模传感网络的协同优化与资源管理

随着监测范围扩大,传感器节点数量大幅增加,如何优化节点布局、任务分配和资源调度成为影响系统性能的关键瓶颈。采用基于强化学习的网络优化算法,将传感器网络建模为多智能体系统,使用深度 Q 网络(DQN)算法学习最优的节点部署策略和任务调度方案。考虑覆盖率、检测精度、功耗和成本等多个优化目标,通过多目标优化算法寻找帕累托最优解,同时设计分层协作机制,实现不同层级传感器的协同工作,优化后的网络部署方案可提高覆盖效率 20%~30%,降低系统成本 15%~25%。

6. 结论与展望

无线电频谱感知技术为低空无人机交通管理提供新手段,在非协作式无人机监测管理有独特优势。本文分析其应用方法和性能特点,针对复杂电磁环境信号检测等关键技术挑战提出解决方案和路径。未来研究应围绕算法性能优化等深入推进,多技术融合、多部门协同,形成“天地一体、协同高效”的管理体系,保障低空经济健康发展。

随着 5G/6G 技术发展与物联网普及,未来低空无人机通信更多样复杂,频谱感知技术需适应新通信标准和协议。人工智能进步推动频谱感知向智能化、自适应发展,通过深度学习等提高未知信号处理能力,基于认知无线电的智能频谱感知成主流,可依环境自动调整策略和参数。未来基于频谱感知的低空交通管理系统注重分布式架构与边缘计算,在传感节点前端部署轻量级 AI 模型实时处理信号、减轻传输负担。同时,将频谱感知与视觉等其他感知手段融合,形成多模态感知网络提升感知能力。政策和标准化上,需建立统一频谱数据格式与接口规范,制定全球统一无人机电磁特征数据库,推动技术规模化应用。

参考文献

- [1] 蒋逸伦,任婕,杨大. 大型固定翼无人机感知避让技术标准概述[J]. 中国军转民, 2025(3): 31-33.
- [2] 何志凯,舒振杰,王晓华,等. 无人机空中交通管理体系架构研究[J]. 标准科学, 2025(1): 82-87+108.

- [3] 周涛. 无人机通信频谱空闲状态时长预测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [4] 张洲宇, 曹云峰, 范彦铭. 低空小型无人机空域冲突视觉感知技术研究进展[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 197-220.
- [5] 付其喜, 梁晓龙, 张佳强, 等. 无人机低空交通管理系统综述[J]. 飞行力学, 2019, 37(2): 1-6.
- [6] 王李青, 丁涛. 无线电频谱分析技术在无人机防御中的应用系统开发与能效评估[J]. 中国安防, 2025(4): 76-81.
- [7] 岳文静, 孙鹏, 陈志. 基于改进海鸥算法的认知无人机网络频谱分配[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(9): 7-12.