 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i5.5695

Based on 5G-A and other multimodal fusion sensing technologies —— Application research in the field of low-altitude security

Qiwen Zheng Xiangrong Chen* Biao Xing

Zhejiang Mobile Communications Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310016, China

Abstract

To meet the new demands of low-altitude security in the context of "low-altitude economy," this paper integrates existing low-altitude sensing and detection technologies to construct an urban low-altitude security system based on 5G-Advanced integrated communication and sensing, radar, and other multimodal fusion techniques. The system combines various sensing methods to create a comprehensive, multi-level, and intelligent low-altitude security framework. It can achieve real-time monitoring, precise early warning, and efficient countermeasures for low-altitude aircraft, making it suitable for a wide range of low-altitude security applications, including key areas, major events, and urban air traffic management

Keywords

low-altitude security, 5G-A integrated communication and sensing, radar, radar vision linkage, multi-modal fusion technology

基于 5G-A 等多模态融合感知技术——在低空安防领域的应用研究

郑淇文 陈向荣* 邢彪

中国移动通信集团浙江有限公司，中国 · 浙江 杭州 310016

摘 要

为适应“低空经济”发展新形势下的低空安保需求，本文综合运用现有低空感知侦测技术，构建基于5G-A通感一体、雷达等多模态融合技术的城市低空安防系统。该系统整合多种感知手段，构建了全方位、多层次、智能化的低空安防体系，能够实现对低空飞行器的实时监测、精准预警和高效反制，可广泛运用于重点区域、大型活动、城市空中交管等低空安防应用场景。

关键词

低空安防；5G-A通感一体；雷达；雷视联动；多模态融合技术

1 引言

近年来，随着无人机技术的快速发展，无人机物流、航拍摄影等低空业态不断涌现。低空经济作为一种以民用有人驾驶和无人驾驶航空器为主，以载人、载货及其他作业等多场景低空飞行活动为牵引，辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态，正成为经济发展的新引擎。2024 年 1 月 1 日，国务院与中央军委联合发布的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》正式实施，明确提出安全底线，开放空域，管放结合，为低空经济的规范化发展提供了政策保障。

然而，低空经济的迅猛发展对城市公共安全、空域管理、隐私保护等方面构成了严重威胁，亟需构建高效、智能、立体的城市低空安防体系。在此背景下，“低空智联网”的概念被提出，被国务院列为低空开放和低空经济发展的重要新基建，以空天地多网融合、网络化感知、计算服务为核心，构建支撑低空网络化、数字化、智能化、服务化的综合系统，旨在实现高密度、大流量、多用户等场景下的通信、导航、监视和服务的统一 [1]。低空智联网为解决城市低空安防监管痛点提供了全新的技术路径：

（1）实时在线监管：通过 5G-A 通感一体和雷达等感知技术的融合，实现对低空目标的实时在线监管，解决传统

【作者简介】郑淇文（1998–），女，中国浙江杭州人，高级工程师，从事涵盖低空安全、无人机侦测、移动互联网、无线通信、大数据、物联网等领域方向研究。

【通讯作者】陈向荣（1979–），男，中国浙江杭州人，高级工程师，从事涵盖行业信息化、新一代通信技术、信创国产化、嵌入式系统、过程改进等领域方向研究。

监管手段滞后、盲区多的问题。

（2）可靠通信链路：提供统一的通信服务，替代传统的私有数图传链路，提升数据传输的实时性和可靠性，满足监管部门对无人机飞行状态实时监控的需求。

（3）人机绑定与责任追溯：通过数字化管理平台，建立无人机与操控者的可信绑定关系，实现飞行活动的全程记录和追溯，为责任认定和事故追责提供技术支撑。

2 低空感知侦测常用技术概述

低空空域通常定义为海拔 1000 米以下的飞行空间，此区域内雷达等感知侦测设备易受到多种干扰，包括背景噪声、信号强度减弱以及物理遮挡等 [2]。为了满足多场景、多类型、广覆盖的低空飞行器监测需求，以国产化 5G-A 技术为核心，融合多模态低空感知侦测技术，能够构建高效、自主可控的低空感知网络体系。

2.1 5G–A 通感一体技术原理

5G-A（5G-Advanced）是第五代移动通信技术的演进版本，5G-A 比现有 5G 网络性能提升约 10 倍，同时扩展支持通感一体、通算智一体、天地一体等新能力 [3]。5G-A 通感一体技术借助大规模天线阵列与波束赋形技术，实现了通信与感知功能的深度融合，依托先进的信号处理算法和通信技术，赋予了通信网络对环境和目标对象的全方位感知能力，能够输出距离、速度、位置、角度等关键信息。

2.2 雷达等常用侦测技术原理

常用的低空感知侦测技术还包括 TDOA（Time Difference of Arrival，到达时间差）、低空探测雷达、光电探测、远程识别报文等。

2.3 多模态融合感知技术原理

“低空经济”建设如火如荼，建设基于 5G-A 通感一体和雷达等多模态融合感知技术的城市低空安防系统，通过整合多种感知手段，能够实现对无人机的高精度、全天候、全方位的监测。

3 基于多模态融合感知技术的城市低空安防系统设计

3.1 总体架构设计

城市低空安防系统总体架构设计包括探测系统、预警系统、反制系统，并运用有效的数字化管理手段，形成集探测、发现、反制、管控等一体化功能的城市低空安防系统。

探测系统：结合城市不同圈层、不同区域的安防要求，合理部署 5G-A、雷达、远程报文、TDOA、光电探测等侦测设备，其中 5G-A 通感与雷达等主要用于主动全量探测，远程报文、TDOA 等主要用于合作目标信息接收，光电探测可与雷达联动实现视觉识别取证。

预警系统：基于 AI 技术，对侦测到的低空飞行器各类信号进行实时分析，判断威胁，及时警报。预警系统与反制系统紧密衔接，确保在入侵事件发生时，能迅速启动应急预案，采取有效反制措施。

反制系统：综合运用软杀伤（如信号干扰、导航欺骗）、硬杀伤（如激光武器、微波武器）和协同反制（如多手段联动、区域联防）等多种技术手段，结合探测系统和预警系统提供的目标信息，对威胁性低空飞行器进行精准、快速和合法的处置。

数字化管理手段：构建低空监管数字化平台，实现探测系统、预警系统和反制系统的数据共享和协同，建设统一标准的飞机、飞手、网联等基础数据能力，从侦测感知、数据比对、地面出警到反制打击的全流程形成业务闭环。

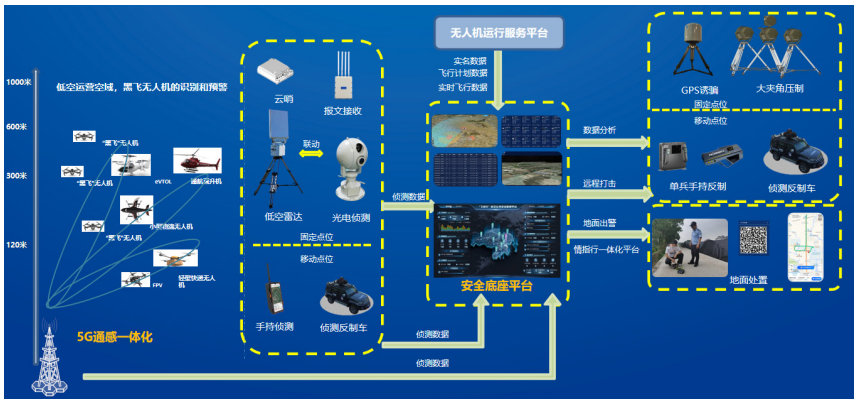

图 2 城市低空安防系统“侦 – 查 – 处”业务流程

3.2 多模态融合感知系统的实践

以某多模态融合试验区建设为例，该区域总面积约 10 平方公里，南北约 4 公里，东西约 3 公里，实现了 5G-A（4.9GHz、26GHz 毫米波）、远程报文、TDOA、雷达、雷视联动、ADS-B 等多种技术融合，具体包括建设 4.9G 通感一体站点 9 站 27 扇区，毫米波站点 3 站 9 扇区，雷视一体站 2 个，远程识别报文识别接收设备 3 台，TDOA 设备 8 台，雷达设备 1 台。

5G-A 连片组网能够主动、无差别识别 600 米以下所有无人机，尤其是网联无人机、静默无人机、跳频无人机等常见机型。TDOA 能够实现基于 WiFi 图传的白名单无人机破解识别，远程报文能够识别国标 RID 广播无人机。雷达用

于远距离、600 米以上净空场景识别。雷视一体站利用高清摄像头和红外热成像仪，对无人机进行精确锁定和成像，为后续的分析处置提供有力支持。

试验系统通过融合算法将不同厂家、不同型号的多模态设备侦测到的感知数据进行点迹拟合，形成高精度、完整的飞行目标轨迹，同时支持单感知设备输出与多感知设备融合输出的一键切换。

4 典型城市低空安防应用场景研究

4.1 重点区域低空安保

政府机关、军事设施、核电站、油库、机场等重点区域是国家安全和社会稳定的核心地带，重点区域低空安全保障场景具有高安全性要求、全天候监控需求、复杂环境挑战和快速响应能力等特点。运用多模态融合感知技术可对重点区域低空实现分层分级布控。如针对某地民用机场区域的安防等级从平面上可分为“核心区”、“管制区”和“监视区”。核心区绝对严控，满足“零侵入”要求；管制区重点防护，阻止任何未授权的无人驾驶航空器飞入；监视区实现常态巡控，要求实时监管及时处置，随时介入可防范。从立体上可分为“禁飞层”、“预警层”和“监视层”。禁飞层在障碍物限制面上方全部空域及障碍物限制面外（监视区内）600 米以上，预警层为障碍物限制面外（监视区内）600 米以下 120 米以上，监视层为障碍物限制面外（监视区内）120 米以下。结合管控分层的不同要求，设计部署 5G-A、雷达、光电探测、TDOA、远程报文接收等侦测设备，实现设备部署与联动，运用多模态感知数据拟合技术，实现各个分区的有效侦测。

4.2 大型活动低空安保

大型体育赛事、演唱会、展览会等人员密集场所是城市低空安防的重点场景。在大型活动低空安保场景中，活动场地通常集中在特定区域，周边环境复杂，可能存在高楼、树木等遮挡物，这对监测系统的覆盖范围和精度提出了更高要求。同时，活动现场需要对低空目标进行实时监控和快速处置，以应对突发情况，对系统的实时性和响应速度提出了挑战。此外，活动现场可能存在多架无人机同时进入监控区域，对系统的多目标处理能力提出了要求。复杂的环境干扰（如电磁干扰、信号遮挡等）也可能影响侦测效果。

基于多模态融合技术的城市低空安防系统能够实时显示低空目标的位置、轨迹、速度等信息，为安保人员提供决策支持。结合 AI 技术，对多模态感知数据进行分析，识别可疑无人机和异常行为。在发现疑似“黑飞”无人机后，系统可以触发告警，实现“侦 - 查 - 处”闭环业务管理。

4.3 城市空中交通管理

在“低空经济”大发展背景下，城市低空空间正逐渐成为新的交通领域，低空飞行器的数量激增也带来了空中交通管理的巨大挑战。通过构建城市低空安防系统能够有效管理城市低空交通，保障飞行安全，避免空中交通事故。

城市低空交通管理场景具有高密度、高动态和高复杂的特点。首先，低空飞行器的种类繁多，其飞行速度、高度和航线各异，增加了管理的复杂性。其次，城市低空环境复杂，高楼林立、电磁干扰多，对飞行器的定位和导航提出了更高要求。此外，低空交通需要实时监控和快速响应，以确保飞行安全和交通秩序。

以某市城市空中交通管理为例，该市构建了全域全息低空感知网，划分常态、低、中、高四级风险等级，在全市域推进报文解析、物联网射频、低空通感、定点侦测反制为一体的四级管控布局，实时获取飞行器的位置、速度、航向等信息，为空中交通管理提供数据支持。常态级风险通过布设远程报文识别基站实现对品牌类具备报文功能的无人机的全量管控；低等级风险通过对全市登记在册无人机进行全量 RFID 覆盖实时掌握地面动态轨迹；中等级风险通过在商圈、景区等人员密集场所安装低空通感 5G-A 设备进行侦测补盲；高等级风险通过在重点部位布设专业侦测反制设备，确保形成管控闭环。通过多模态融合组网实时监测，形成高精度、完整的飞行目标轨迹，并通过平台精准匹配无人机与飞手身份信息，将“疑似黑飞”无人机及飞手位置推送街路面巡控警力，落实见面核查处置，大大缩短黑飞处置时限。

5 总结与展望

本文着眼于城市低空安防领域，通过构建基于 5G-A 通感、雷达等多模态感知技术的城市低空安防系统，实现对低空目标的全天候、全方位监测，在重点区域低空安保、大型活动低空安保、城市空中交通管理等典型场景中，该系统展现了强大的应用潜力，能够有效应对无人机非法入侵、黑飞扰航等安全威胁，为城市低空安防提供了强有力的技术支撑。

未来，随着 5G-A 技术的进一步成熟和低空智联网的全面投建，城市低空安防系统将朝着更加智能化、一体化的方向发展。一方面，5G-A 通感一体技术的感知精度和覆盖范围将进一步提升，结合低轨卫星网络，形成空天地一体化融合组网。另一方面，人工智能算法的深度应用将进一步提升多模态融合感知的目标监测成效，并推动系统向自主决策和智能反制方向发展，进一步提升响应速度和处置效率。此外，本系统将与低空运营服务、智慧安防等平台深度融合，构建更加全面的城市安全防护体系。最后，随着低空经济的持续发展，低空安防系统的标准化和规范化建设将成为重要方向，为低空经济的健康发展提供坚实保障。

参考文献

[1] 樊邦奎,李云,张瑞雨.浅析低空智联网与无人机产业应用[J].地理科学进展,2021,40(09):1441-1450.

[2] 刘光辉.低空无人机探测技术的发展前景与趋势[J].现代雷达,2022,44(04):99-100.

[3] 刘冉.对低空经济背景下5G-A通感一体基础设施规划的思考[J].智能建筑与智慧城市,2024,(S1):4-6.