

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2025.01.001

“低空雪亮”城市低空安全立体防控体系研究

左涛^{1,2}, 孙龙², 王晓艳^{1,2}, 莫申林², 何丹娜^{1,2}, 唐飞²,
刘露¹, 樊浩^{1,2}, 付庆霞¹, 徐明飞^{1,2}, 苏纪娟¹, 王影^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088; 2. 四创电子股份有限公司, 安徽合肥 230094)

摘要: 面向低空经济健康发展的安全需求, 聚焦城市“黑飞”监视处置难、溯源查处难、大规模低成本基建等行业突出难题, 借鉴城市“雪亮工程”防控体系成功经验模式, 提出了“低空雪亮”城市立体防控体系理念; 攻关了低成本雷达监视、“空中警察”等关键设备, 以及“黑飞”飞手空地协同查处等关键技术, 充分复用已建“视频网”设备设施, 并完善空中“监视网”和监管平台, 搭建了“低空雪亮”演示系统, 在体系理念、核心能力验证等方面达到了预期效果, 可为低空安全的城市级低成本管控体系建设等行业难点提供解决方案参考。

关键词: 低空经济; 低空安全; 雷达监视; 要地防护; 黑飞监管

中图分类号: TN959.5; TN99 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2025)01-0001-09

引用格式: 左涛, 孙龙, 王晓艳, 等. “低空雪亮”城市低空安全立体防控体系研究[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(1): 1-9.

ZUO Tao, SUN Long, WANG Xiaoyan, et al. Research on the “Low-Altitude Xueliang Project” Three-Dimensional Prevention and Control System for Urban Low-Altitude Safety[J]. Radar Science and Technology, 2025, 23(1): 1-9.

Research on the “Low-Altitude Xueliang Project” Three-Dimensional Prevention and Control System for Urban Low-Altitude Safety

ZUO Tao^{1,2}, SUN Long², WANG Xiaoyan^{1,2}, MO Shenlin², HE Danna^{1,2}, TANG Fei²,
LIU Lu¹, FAN Hao^{1,2}, FU Qingxia¹, XU Mingfei^{1,2}, SU Jijuan¹, WANG Ying^{1,2}

(1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;
2. Sun Create Electronics Co Ltd, Hefei 230094, China)

Abstract: In order to meet the security needs of the healthy development of low-altitude economy, this paper focuses on the industry's outstanding problems, such as the difficulty of monitoring and disposal of urban illegal flying, the difficulty of traceability investigation, and the difficulty of large-scale and low-cost infrastructure construction. Based on the successful experience mode of urban “Xueliang Project” prevention and control system, the concept of “Low-Altitude Xueliang” urban three-dimensional prevention and control system is put forward. Key equipment such as low-cost radar surveillance and “airborne police”, and key technologies such as illegal flying pilots air ground cooperative investigation and punishment are tackled. The existing “video network” equipment and facilities are fully reused, and the air “surveillance network” and supervision platform are improved. A “Low-Altitude Xueliang” demonstration system has been built, which has achieved the expected results in terms of system concept and core capability verification, and can provide solutions for industry difficulties such as the construction of low-altitude safety city-level low-cost management and control system.

Key words: low-altitude economy; low-altitude safety; radar monitoring; key target protection; illegal flying supervision

0 引言

高密度、高频次、多样化的低空飞行活动是低空经济发展为新兴经济形态的内在需求, 在运行

保障方面有两大首要问题: 一是如何构建适合的运行管理体系以支撑未来规模化的低空运营, 行业为此提出了诸如低空智能网、低空航行系统等体系方案, 通过入网网联等核心功能来保障大规

收稿日期: 2025-02-09; 修回日期: 2025-02-16

基金项目: 安徽省科技攻关计划重大项目(No.202423h08050007)

模低空飞行活动的运行管理;二是如何构建可行的低成本安全防控体系来支撑规模化运营下的风险管控。两大问题前者解决的是运行效率,重点在于运管服,以保障大量合规低空飞行器从事规模化运营活动^[1-2];后者解决的是安全治理,侧重于公安条线,监管处置少量非合规飞行以防范化解安全风险。由于城市地理电磁环境复杂、存有大量非合作飞行风险源等特殊原因,监视处置溯源查证等多个监管环节,不仅技术实现困难而且部署成本巨大^[3],因此,针对低空安全需要,要构建政府负担得起、适合城市大范围推广、满足安全托底要求的防控体系,当前仍面临很大挑战,相关的整体解决方案还未系统性突破。本文在分析行业痛点和技术挑战的基础上,结合“雪亮工程”先进理念与成功经验,首次提出了一种城市低空安全立体防控体系整体解决方案“低空雪亮”,并重点介绍了体系概念、关键核心攻关以及演示系统验证等内容,展示了在行业难题解决上的可行路径。

1 现状挑战

发展低空经济成为国家的战略部署,战略意义在于激活低空空域这一自然资源变为巨大的经济资源,因此产业发展的内在需求和必然趋势是要推动低空飞行活动的规模化和多样化,随之带来的安全挑战日益严峻^[4-5]。低空的安全问题尤为复杂:一方面,无人机的非法组装和改装门槛低,难以通过生产许可、市场准入等大监管体系管控住风险源头,非合作飞行器常态存在是相比于中高空的一大监管难题;另一方面,无人机目标特征小、机动性高且轨迹刁钻,低空飞行又处在与地面相衔接的广大复杂电磁地理空间中,监视盲区大,防范查处非法非合规飞行困难;同时,成本低廉的普通民用无人机经过简单改装后,极易非法军用或用于恐怖袭击,会进一步加剧低空的安全隐患。当前,在飞行安全、公共安全乃至国家安全等多个需求层面上,低空安全的治理水平还无法跟上。

在公共安全领域,具体到公安条线,针对“黑飞”监管和城市安保等迫切需求,构建安全管控体系仍是一大难题。技术手段维度上有“四难”:一是目标探测难,无人机的雷达截面积(RCS)低至

0.002 m²,且城市复杂地理电磁环境下遮挡和多径影响很大^[6];二是识别跟踪难,无人机材质和形态呈现多样化,飞行轨迹多变,包含悬停、急转等,且干扰目标众多,包含鸟类、空飘物、气象干扰源、地面运动物体等^[7];三是处置防护难,无人机具有超高机动性和灵活性,加速度能高达10 m/s²,急转半径低至2 m,穿越机速度达60 m/s,而且目前反制手段多为净空设备,随着飞行密度增加,非合规目标空域周围存在大量合规飞行时更加难以敏捷定向处置^[8];四是溯源查证难,无人机操控是人机分离、人在控制环路外,必须要有手段能对背后违规操控的飞手进行查处,否则难以震慑恶意倾向或危险行为,安全无法托底^[9]。体系建设维度上也有“两难”:一是核心设备能力不足,传统空管体系中较成熟的雷达、ADS-B等监视设备以及军用为主的无人机反制设备,从效能和使用成本上,大多难以直接满足城市场景下的低空应用;二是低成本路径缺乏,不同于建设机场,要在一个个城市广阔的区域建设对非合规低空飞行的监视网络和管控体系,投资效费比低是大障碍,特别在商业模式尚不明晰的现状下,成本是最大的制约因素。

因此,构建一种建得起(符合低成本经济形态发展要求)、用得好(满足“看得见、辨得清、管得住、防得了”的实战需求)的安全防控体系,支撑高质量低空经济与高水平低空安全的良性互动与动态平衡,是当前面临的重要课题。

2 体系提出

2.1 “低空雪亮”体系概念

2.1.1 设计理念

“低空雪亮”充分复用现有“雪亮工程”基础设施资源^[10],通过整合地面“视频网”和完善低空“监视网”,构建多源感知、分级防控、空地协同的低成本“立体防护网”,实现平安城市从二维到三维的跃升。

“低空雪亮”在“雪亮工程”体系能力上孵化生长,采用可兼容、可拓展、能解耦、可重构的体系架构,为合作(侧重警政无人机)、非合作飞行器的低空安全管控提供有力保障;同时,将无人机监管与地面人员、车辆监管统筹,并将空中无人

机手段充分赋能地面管理,重塑城市安全监管体系,解决低空经济发展给城市治安防控体系带来的挑战,如图1所示。



图1 地面“视频网”+低空“监视网”的城市立体防控体系示意图

2.1.2 设计特点

“低空雪亮”体系设计具有四方面优势:1)成本控制,设备设施充分复用是低成本建设的必由之路,尤其是在公安条线管控体系建设中,合理控制成本是体系规划与落地实施的核心变量;2)能力赋能,无人机在空中飞但是飞手在地面,无人机起飞降落点也在地面,“雪亮工程”的地面视频网无疑是飞手定位查证、无人机轨迹溯源的重要能力手段;3)权责统一,从权责清晰的已有城市治安防控体系向立体拓展延伸,满足治安、特警、交警

等各警种新的需求,都容易实现监管主体和责任的协调统一,有利于落地实施;4)统筹发展,低空经济与城市立体交通、智慧城市加快融合发展,可复用、能延续、集约化的监管体系建设思路更符合这一发展趋势的要求。

2.2 “低空雪亮”体系实现

2.2.1 体系架构

“低空雪亮”基于“雪亮工程”现有架构进行必要升级,如图2所示。

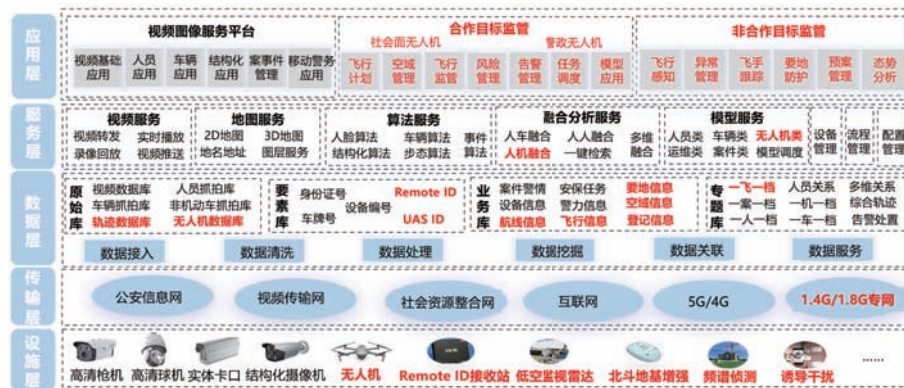


图2 “低空雪亮”体系架构图

1) 设施层:复用“雪亮工程”中的枪机、球机、高点监控、人像卡口、微卡、Wi-Fi探针等多维感知系统,增加飞行器识别接收站、远程识别设备(Remote ID)、低空监视雷达、北斗地基增强、频谱侦测、“空中警察”以及“无人警务站”等低空感知设

备设施,从综合治理防控、车辆特征捕获、人像采集抓拍、飞行器状态监控、低空立体防控、Wi-Fi信息采集等多个角度构建前端采集防控子系统,实现人、车、机等重点监控目标的全方面多手段数据采集。

2) 传输层:“雪亮工程”以视频传输网作为承载网进行市级视频监控系统网络的建设,在视频传输网基础上,进一步增强覆盖的广度和深度,打通与互联网、政务网、公安信息网、移动警务网的连接,为低空和地面不同用户、不同业务提供安全的跨网数据服务。

3) 数据层:基于“雪亮工程”健全的数据标准体系,围绕多源异构数据接入、数据治理、数据存储、数据开发、数据安全及数据共享,实现数据全生命周期管理,将低空飞行中产生的通航数据、气象数据、业务数据、空域数据、航线数据及飞行数据等历史和实时数据汇聚至数据标准体系,提高数据资源目录服务、数据共享服务和数据交换管理服务能力,实现对数据资源的有序管理与灵活应用,满足业务应用对数据支撑的需要,实现数据共享、业务协同。

4) 服务层:“雪亮工程”具备视频管理服务系统和视频云计算数据中心,为上层业务应用系统提供视频处理及数据服务的支撑。扩展现有视频管理服务实现飞行器视频汇聚接入,满足对视频资源统一管理、统一存储和统一调度的要求;基于视频共享服务平台为政府各委办局、行业单位、社会公众提供视频服务。扩容视频云计算数据中心,将飞行器数据统一汇聚接入提供给视频解析平台、大数据存储平台及数据挖掘平台,实现对视频图片的特征提取、结构化数据的海量存储以及人车机数据的关联分析功能;基于音视频融合通信技术实现各种通信终端间的不重复编解码以及多点通信终端之间的会话控制与管理,支撑“低空雪亮”的各种宽窄带网络以及各性能终端的应用场景。

5) 应用层:警政无人机运行管理平台,采用异构融合架构,汇聚多平台无人机数据,实现全市警政无人机的管理统一化、使用规范化、数据标准化;空地一体监管平台实现高效的“监测、研判、预警、处置”等系列功能;无人机综合应用平台为现有公安视频图像服务平台、综合治理视频服务平台、系统管理平台、社会公众视频服务平台提供赋能支撑,从管理、业务应用、运维等多个维度提供高效的解决方案。

2.2.2 系统组成

建设维度上由“1+7+3”构成,即:1套设备设施基座,包括各类主被动监视设备、通导设备、地面处置反制设备和“空中警察”,重点形成对空的监视、跟踪和处置能力;7大保障支撑能力,包括覆盖空地数据传输的网络安全子系统、数据分类存储统一管理的存储子系统、AI智能解析算法子系统、统一的数据服务子系统、涵盖航路航线智能划设和微气象服务的要素服务子系统、城市实景三维建模子系统、异构的无人机综合管理子系统;3大城市管理服务能力,包括1)实现低空合作目标(侧重于警政无人机)和非合作目标的监管,确保空域安全可控,2)对城市重要区域建立立体化防控网络,实现空地目标的统一监管处置,确保区域安全可控,3)联动空地资源深化一体应用,提升城市治理、安全防控水平,如图3所示。

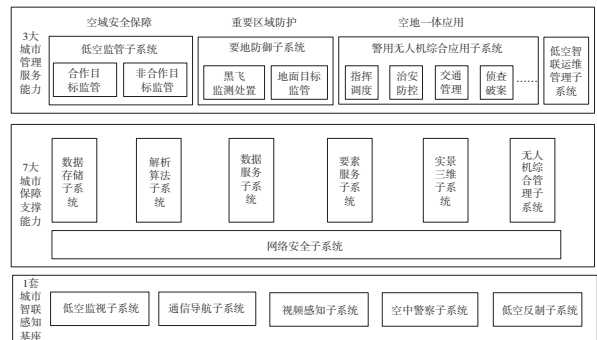


图3 “低空雪亮”系统组成示意图

2.2.3 体系能力

“低空雪亮”体系构建4大方面核心能力:一是构建合理有效的低空监视能力,实现合作目标飞行合规性监管和非合作目标飞行探测预警,联动开展飞手的溯源查证;二是构建立体分层的城市重要目标要地防护能力(要地防护),对地实现人、车、事件的监测预警,对空实现“黑飞”的链条式发现跟踪和处置;三是构建统一智能的警政无人机管理能力,实现多元异构无人机从整合接入、协同控制、智能调度到飞行感知的全过程管理;四是构建空地一体的实战服务能力,统筹联动低空和地面视频资源,赋能智慧警务建设,为交通管理、侦查破案等公安业务提质增效。

3 关键攻关

3.1 低成本雷达监视

3.1.1 功能要求

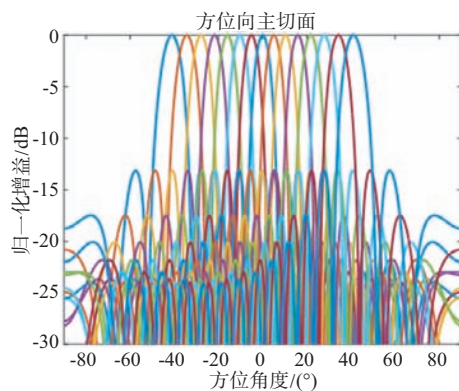
雷达是发现非合作无人机的核心手段,体系建设的關鍵之一是研发适合在城市大范围部署电磁友好的低成本雷达监视设备,相比行业现有典型产品,成本要大幅压减并能实现多功能和灵活部署,针对城市“黑飞”监管和重要目标防护等需求,布局研发了超近程(≥ 500 m)、近程(≥ 3 km)、中程(≥ 5 km)、远程(≥ 10 km)等产品系列,其中,超近程雷达用于城市大面积监视,需求迫切且对性能和成本控制要求更高,本文重点进行介绍,雷达探测威力:搜索模式 >500 m(0.01 m², 80%发现概率, 1 s数据率),高数据率(拦截)模式 >200 m(0.01 m², 90%发现概率, 100 ms数据率);精度:距离 <1 m,方位 $<1^\circ$;总重量 <8 kg,功耗 <20 W,制造成本万级。

3.1.2 核心技术

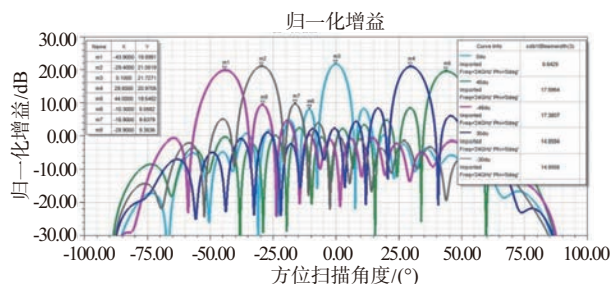
产品采用芯片化、模块化设计思路以降低成本,并选用高频段二维相控阵体制,这样容易获得较高测量精度和角分辨率,波束调度快速灵活,可实现快速搜索和高数据率跟踪多功能一体化,具有体积小、重量轻和低功耗的优势,符合携带便捷、架设撤收方便、安装后即可工作的要求。

1) 低成本二维相扫技术

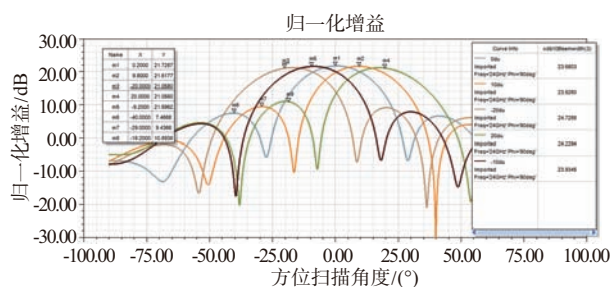
低成本有源二维相扫采用模拟波束形成和单波束相扫体制,对雷达的搜索、跟踪时间和能量资源进行合理分配、管理,采用边扫描边跟踪TWS或搜索加跟踪TAS实现对多个目标快速精确跟踪。技术实现过程的关键点有:高频段天线阵面与低损耗馈电网络,精确的幅度和相位控制,多通道幅相校准与微秒级波束调度切换等,方位波束覆盖如图4(a)所示,对接收阵面方位向采用 -28 dB Taylor加权进行激励,采用HFSS进行了全波仿真,得到在方位扫描 $\pm 45^\circ$ 的辐射方向图,如图4(b)所示,以及俯仰扫描 $\pm 20^\circ$ 时的辐射方向图,如图4(c)所示。



(a) 方位波束覆盖



(b) 接收阵方位向扫描 $\pm 45^\circ$ 远场波瓣扫描图



(c) 接收阵俯仰向扫描 $\pm 20^\circ$ 远场波瓣扫描图

图4 波束二维扫描的仿真设计结果图

2) 目标检测技术

高频段对多普勒频率相对更灵敏,检测低速目标有优势,针对低空目标RCS小、飞行速度低、杂波背景大等特点,在目标检测中,采用了全相参、动目标检测、和差波束测角、杂波抑制和运动补偿、自适应恒虚警率(Constant False-Alarm Rate, CFAR)等技术,图5是低速目标检测速度维滤波器的仿真结果。

3.1.3 样机效果

超近程雷达样机雷达阵面大小为 224 mm(长) $\times 208$ mm(宽) $\times 50$ mm(高),质量小于 2 kg,分别在中国电科低空安全验证试验基地、合肥市蜀西湖演示样板进行了外场试验,经摸底测试,对

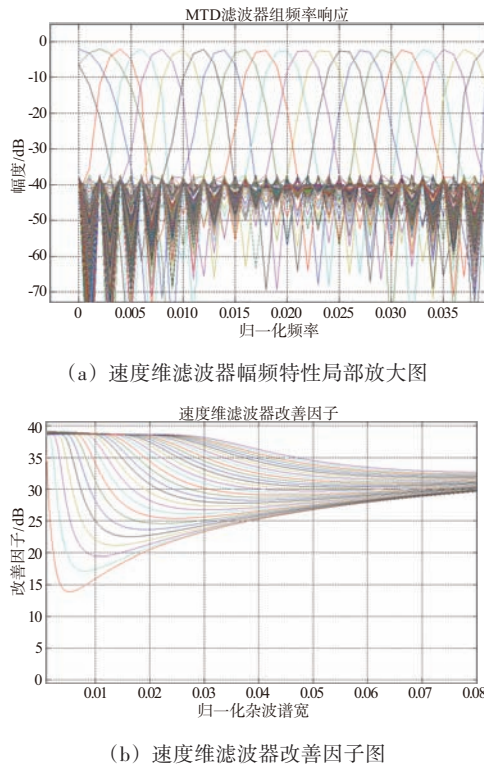


图5 低速目标检测速度维滤波器的仿真结果

RCS为 0.002 m^2 以上的低空目标可有效检测,并对高机动和无人机群探测效果较好,符合预定指标和低成本的要求,如图6所示。其中,针对大疆御3无人机最远探测距离为 1.2 km ,针对切向低速飞行,最低探测速度为 0.5 m/s ,同时可输出高达 2 Hz 的高数据率航迹,可稳定跟踪S型、直角、圆形等多种机动飞行轨迹等。

3.2 “空中警察”空基系统

3.2.1 功能要求

空基监视处置能力是立体防控体系的另一关键所在,无人机具有高空俯瞰的视角、超大的监控范围、快速的机动响应能力,能够将传统的以地面为主的防控扩展到立体空间,在人、车无法快速到达的地方,实现快速、高效的部署,节省大量人力和时间,大幅降低出勤成本。

“空中警察”空基系统由无人机搭载和集成的雷达、频谱、摄像机、喊话器等各类传感器与网捕等处置设备,以及地面配备的多功能补能和管控平台(车)等组成。可为公安各警种的活动安保、指挥调度、交通管理、侦查办案、空中执法等日常

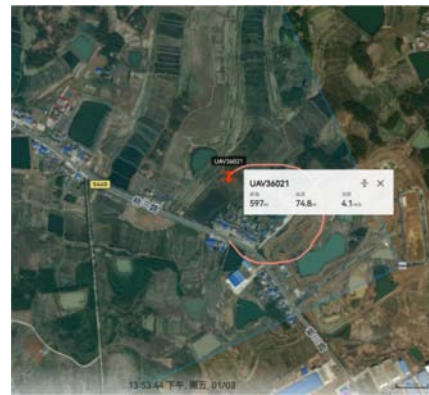


图6 低成本低空监视雷达样机以及试验效果图

业务提供空中机动力量,也可编队协同和空地协同,应对应急响应、防突处突等突发任务。

3.2.2 关键技术

1) 无人机异构协同调度技术

解决不同厂家无人机统一控制和调度的问题,从飞控协议、地面站协议、遥控协议三层构建适配器,覆盖多种通信协议、数据结构、接口载体,形成对下兼容、对上统一的标准协议和数据规范,打造统一飞控中心。包括:构建遥控协议适配器,适配无人机遥控器端,构建地面站协议适配器,适配QGroundControl地面站控制系统,并扩展控制系统定制数据推送链路,构建飞控协议适配器,适配目前市场上普遍使用的MQTT、HTTP、WEBSOCKET协议,获取无人机远程控制和负载控制权限,打通遥控协议、地面站协议与飞控协议的层级级联,形成一套标准的管理接口和数据接口为上层应用服务,打破不同协议之间的壁垒,实现管理的统一化、控制的一致性。

2) 平台载荷多功能一体集成技术

解决多种功能模块集成所带来的无人机平台挂载和续航能力受限的问题,通过模块化设计,研发多功能载荷,通过轻量化一体化设计,优化集成方式和能源分配,通过统一控制,提升信息处理和多任务并行处理能力等。

3.2.3 样机效果

初样样机基于大疆 M600pro 六旋翼无人机平台进行二次开发,包括机载监视处置设备、硬件接口支架、协议转化板卡、地面站控制软件等,空基平台挂载质量 ≥ 4 kg,挂载监视处置载荷实现主要指标:探测威力 ≥ 1 km($RCS=0.01$ m²),定位方位精度 $\leq 10^\circ$,网捕距离 ≥ 30 m,图传延时 ≤ 200 ms(不含公网专网传输延时),定向喊话音量 ≥ 110 dB,Mesh 终端传输 ≥ 10 km(带宽 70 MHz),如图 7(a)所示。样机在中国电科低空安全验证试验基地、合肥市演示样板中开展多次试飞与应用验证,测试结果显示,样机能有效对接“低空雪亮”体系平台开展空地协同作业,基本具备跨平台数据汇聚、业务融合、设备调度和远程控制等功能,如图 7(b)所示。



(a) “空中警察”样机



(b) 空地协同作业示意图

图7 “空中警察”样机以及试验效果图

3.3 空地协同飞手查证

3.3.1 功能要求

结合“雪亮工程”地面视频网开展空地协同飞

手定位查证是立体防控体系的一大特点。基于无线电逆向协议解析、视频行为分析、大数据分析研判等技术手段,在初步判断“黑飞”飞手的大致方位后,可联动周边一定范围内的地面视频监控网,进行目标搜索锁定和细节特征捕捉,或同步出动“空中警察”视频追踪,通过空地视频的接力进行目标的精准锁定、识别定位,解决以往“黑飞”飞手难以定位、飞手身份难以确认、飞手轨迹无法溯源等问题。

3.3.2 关键技术

1) 大数据分析研判技术

基于“雪亮工程”已建的人像大数据、车辆大数据系统,融合无人机/飞手登记数据、位置播报数据、监视轨迹数据、购买寄递数据等,构建“低空+雪亮”数据中心,通过公安大数据治理标准体系,形成人车机登记、轨迹类原始库,以身份证号、车牌号、无人航空系统识别号(UASID)为中心等要素库,以一人一档、一车一档、一机一档为核心的主题库,以公安日常监管、预警处置等为方向的业务库,利用多维监管目标的规律、时空要素关联、数据血缘回溯等手段,实现以人找机、以人找车、以机找人,挖掘人、车、无人机多维关联关系。

2) 视频行为分析技术

收集各类环境下飞手低头操作遥控器的照片,利用深度学习、多模态大模型等技术,完成样本标注、模型建立、训练调优、测试验证等步骤,突破飞手行为精准识别算法,结合地面视频监控覆盖实现飞手识别定位。

3) 无线电逆向协议解析技术

通过对无人机通信协议进行分析并提取特征,包括但不限于信道分布、调制方案、编码方案、导频序列、同步序列、链路层结构等,形成无人机检测数据库,通过实时检测匹配,识别无人机、遥控器等类型种类。

3.3.3 技术效果

演示验证展示了“由机到人”技术方案的可行性,详见后续章节。

4 演示验证

4.1 演示样板建设

为验证“低空雪亮”立体防控体系,以合肥市

蜀西湖为中心,联动博微产业园,先期建设演示样板并开展应用示范,后续根据城市空中交通(UAM)试点城市的发展需要,可复制推广到整个市区。蜀西湖区域位于合肥高新区的城市核心区,周围有中科院量子信息中心等大科学装置科研区和商务金融区,总面积约 1 350 000 m²,其中陆地面积约 750 000 m²,水面约 600 000 m²。样板采用分步建设模式,首先完成单点全要素建设,搭建警用无人机综合应用平台和立体化防控系统;其次完成连片体系化建设,构建低空监管平台及低空运维管理平台;最后拓展优化体系能力,包括引入低空微气象服务,实现飞行态势一览统知等。在低空监视核心能力方面,采用可解耦开放式架构,融合部署 Remote-ID、雷达、频谱等探测感知设备,部署大光电、小光电、微光摄像机、全景摄像机等不同类型的前端感知设备,同时结合“雪亮工程”已建人卡、车卡等视频资源,构建低空立体化监视网,核心设备能力如下:夜视摄像机:30~50 m;小光电:50~100 m;RID:200~500 m;大光电:1~2 km(夜间),3~5 km(日间);全景高点:2~3 km;频谱:2~5 km;低空监视雷达:1~3 km,如图 8 所示。



图 8 “低空雪亮”演示样板建设区域示意图

为保证系统健康高效运行,在框架层面设计注册配置中心、服务保障、分布式事务、消息中间件、链路追踪、服务监控、数据库监控服务;在微服务层面,部署前端服务、认证中心、网关服务、系统管理服务、文件管理服务、工作流服务、定时器服务、大屏报表服务;存储层面是框架产生的各种数据的存储设计,包括关系性数据库、分布式存储服务、搜索引擎、缓存数据、日志中心。系统在部署

层面实现了集研发、测试、发布为一体的容器化部署,如图 9 所示。

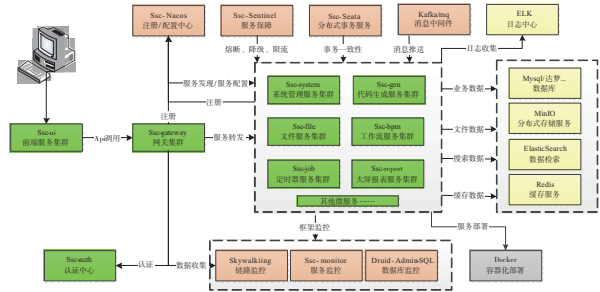


图 9 系统部署方案图

4.2 演示验证效果

累计测试和二轮实际比测显示,演示样板在核心范围 1 350 000 m²的区域上,对合作目标监视的水平精度≤5 m,垂直精度≤10 m,发现概率≥99%,覆盖高度≤600 m(可扩展);对非合作目标监视的水平精度≤10 m,垂直精度≤20 m,发现概率≥90%(5 帧起始),覆盖高度≤1 000 m;对合作目标识别时间≤1 s,跨平台接管时间≤2 s,非合作目标识别时间≤5 s(准确率 90%),处置手段到达时间≤1 min。监管平台支持接入无人低空航空器≥20 000 个,千亿级模糊检索响应时间≤3 s;千亿级多条件复杂检索响应时间≤5 s,消息处理端到端平均时延<100 ms;流处理系统支持的数据流量 350 000 TPS/Node,系统致命故障间隔时间(MTBCF)≥3 500 h,在线用户数量≥500 个。

在“黑飞”监管和重要目标防护上,构建的“空中三道圈、地面两层网”,基本能对人、车、无人机、事件四大目标进行实时监测、识别、跟踪和处置,如图 10 所示,综合防控成功概率≥99%;“黑飞”判定时间≤30 s;处置响应时间≤90 s;诱骗干扰等处置距离(视距条件)≥1 km。



图 10 城市重要目标立体多层防护效果图

在飞手追踪查证上,试验显示,结合人员行为

特征识别、飞行轨迹回溯、无线电协议解析等数据融合分析,初步定位疑似飞手位置后,联动地面视频网,通过“空中警察”对飞手位置周边进行视频巡检,跟踪抓拍可疑人员并同步进行特征布控和轨迹还原的成功概率约为85%,如图11所示。下一步,充分融合“雪亮工程”已建成的人像大数据、车辆大数据,通过多维监管目标活动规律、时空要素关联、数据血缘回溯等手段,以人找机、以人找车、以机找人,挖掘人、车、无人机多维关联关系,深挖无人机同起降、结伴飞行、异常徘徊等行为特征及潜在关系,基于“一飞一档”知识图谱,进一步提升城市综合防控能力。



图11 空地协同飞手跟踪查证演示效果图

5 结束语

随着低空经济的快速发展,无人机在城市空域的活动日益频繁,给城市安全带来了新的挑战,低成本构建城市低空安全立体防控体系显得尤为重要。本文首次提出了“低空雪亮”体系概念,通过复用已有城市治安防控体系“雪亮工程”的基础资源,整合地面“视频网”和完善低空“监视网”,构建多源感知、分级防控、空地协同的低成本“立体防护网”,实现管控能力从二维到三维的跃升,一方面,强化空地多源监管手段融合,提升对低空飞行“看得见、辨得清、管得住、防得了”的安全防控体系能力;另一方面,强化警政无人机赋能地面应用,提升城市的综合治理能力。通过攻关关键核心技术,搭建的演示系统基本验证了这一体系理

念,可为提升城市低空安全治理水平提供整体解决方案参考。

参考文献:

- [1] 王俊潼,包丹文,周佳怡.低空空域规划研究现状与展望[J].航空学报,2025,46(9):1-27.
- [2] 廖小罕,屈文秋,徐晨晨,等.城市空中交通及其新型基础设施低空公共航路研究综述[J].航空学报,2023,44(24):6-34.
- [3] PULLUM W S. Drones: Safety, Technology and Legislation [M].New York: Nova Science Publishers,2024.
- [4] HUANG Xun. The Small-Drone Revolution is Coming-Scientists Need to Ensure it will be Safe [J]. Nature, 2025 (12):29-30.
- [5] SWINNEY C J, WOODS J C. A Review of Security Incidents and Defense Techniques Relating to the Malicious Use of Small Unmanned Aerial Systems [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,2022,37(5):14-28.
- [6] 徐辰宇,曹杰,杨峰,等.远距离“低慢小”目标探测技术研究进展[J].激光与光电子学进展,2014,61(20):37-50.
- [7] 汤新民,顾俊伟,刘冰,等.低空监视技术及其发展趋势综述[J].南京航空航天大学学报,2024,56(6):973-993.
- [8] 张晓杰,郑纪彬,苏涛,等.无人机集群协同搜索跟踪任务规划方法[J].雷达科学与技术,2022,20(5):480-491.
- [9] 束哲,刘芳,徐海洋,等.国外反无人机装备发展态势及启示[J].国防科技,2024,45(4):43-53.
- [10] 周陈锋.“雪亮工程”让社会更安全[J].中国公共安全,2018(1):151-152.

作者简介:

左涛 男,博士,研究员、中国电科首席专家,主要研究方向为低空安全、雷达测控和超导量子。

孙龙 男,博士,研究员,主要研究方向为成像雷达、低空智联。

王晓艳 男,博士,研究员,主要研究方向为低空监视、空管气象。