

解构面向低空运行管控的低空物联网体系

张祖耀^{1,2}, 田野^{3*}, 张学军^{1,4}

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191; 2. 网络化协同空管技术北京市重点实验室, 北京 100191;
3. 工业和信息化部装备工业发展中心, 北京 100846; 4. 空地一体新航行系统技术全国重点实验室, 北京 100191)

摘要: 作为我国战略性新兴产业, 低空经济是以无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)、电动垂直起降飞行器(electric vertical takeoff and landing aircraft, eVTOL)等新型智能载具的飞行活动为核心, 带动低空多领域发展的一种综合性经济形态。然而, 现有空域管理体系难以应对低空飞行器多样化、高密度、异构协同的复杂需求。低空物联网技术基于通信、导航、监视和服务基础设施, 通过整合多种技术手段, 推动低空空域的高效管控与规模化应用。文章着眼于低空空域运行管控的实际能力需求, 结合低空典型运行场景, 系统分析低空物联网体系下 5G 移动通信、北斗差分定位、通感一体监视等关键技术方案的可行性, 从运行概念的角度梳理了低空物联网体系从场景牵引, 到业务需求, 再到支撑业务所需的技术能力, 最后到具体技术落地实现的一条科学路线, 为低空空域管控提供技术路径与理论依据, 助力我国现代化空域管理体系的建设与新兴产业的战略布局。

关键词: 低空经济; 低空物联网; CNS 基础设施

中图分类号: TP13; V247.1 文献标志码: A

文章微信二维码:



文章编号: 1673-159X(2025)05-0060-10

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.5853

Deconstructing the Low-altitude Intelligent Networked System for Low-altitude Operation Management

ZHANG Zuyao^{1,2}, TIAN Ye^{3*}, ZHANG Xuejun^{1,4}

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

2. Beijing Key Laboratory for Network-Based Cooperative Air Traffic Management, Beihang University, Beijing 100191 China;

3. Ministry of Industry and Information Technology Equipment Industry Development Center, Beijing 100846 China;

4. State Key Laboratory of CNS/ATM, Beihang University, Beijing 100191 China)

Abstract: Low-altitude economy, as a strategic emerging industry in China, represents a comprehensive economic ecosystem centered on flight activities of new intelligent vehicles such as unmanned aerial vehicle (UAV) and electric vertical takeoff and landing aircraft (eVTOL), driving multi-domain development in low-altitude. However, existing air traffic management systems struggle to address the complex requirements of diversified, high-density, and heterogeneous collaborative operations of low-altitude aircraft.

收稿日期: 2025-04-22

* 通信作者: 田野(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为低空产业、民用航空、重大技术装备。

E-mail: tianye@eidc.org.cn

引用格式: 张祖耀, 田野, 张学军. 解构面向低空运行管控的低空物联网体系[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2025, 44(5): 60-69.

ZHANG Zuyao, TIAN Ye, ZHANG Xuejun. Deconstructing the Low-altitude Intelligent Networked System for Low-altitude Operation Management[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2025, 44(5): 60-69.

low-altitude intelligent networked technology enables efficient management and large-scale application of low-altitude airspace by integrating communication, navigation, surveillance, and service infrastructure through coordinated technological approaches. This paper focuses on the practical operational requirements of low-altitude airspace management and systematically analyzes the feasibility of key technological solutions—such as 5G mobile communication, BeiDou differential positioning, and integrated sensing and communication surveillance—within typical low-altitude operational scenarios. The findings provide a technological roadmap and theoretical foundation for low-altitude airspace management, and support the modernization of China's airspace management system and the strategic deployment of emerging industries.

Keywords: low-altitude economy; low-altitude intelligent networking; CNS infrastructure

随着低空经济被纳入国家战略性新兴产业布局,低空空域开放与利用成为推动新质生产力发展的重要引擎。无人机、eVTOL等新型航空器的普及,以及城市空中交通、低空物流等多样化场景的涌现,对传统空域管理体系提出了严峻挑战:现有通信、导航、监视(communication, navigation and surveillance, CNS)技术难以满足高密度、异构飞行器的实时协同需求,非合作目标监视能力不足,且城市复杂环境下的信号干扰与遮挡问题亟待解决。

针对上述问题,本文聚焦低空智能网联技术,系统地提出“通信-导航-监视-监管服务”技术框架。通过整合5G移动网络、低轨卫星通信等多模态网络,卫星导航及增强系统等导航手段,低空雷达、通感一体监视技术,构建适应不同场景需求的性能驱动运行模式。基于“全模态接入网关”设计理念,打通机载终端、地面基础设施、卫星与低空核心网的传输通道,将通信、导航、监视以及信息化能力无缝连接起来,并构建低空智能网联监管服务平台,实现各类业务和资源的优化与调度。

1 低空经济的定义和内涵

1.1 低空经济的定义

低空经济是以低空飞行活动为核心,通过低空智能载具、低空智能网联等技术组成的新质生产力与空域、市场等要素相互作用,带动低空基础设施、低空飞行器制造、低空运营服务和低空飞行保障等领域发展的综合性经济形态^[1-2]。

低空经济作为一种新的经济业态,具有创新引领、绿色低碳、产业链长、应用场景复杂、高质量等发展新质生产力的核心特征,是我国抢占

发展机遇、建立现代化产业体系的重要布局^[2-3]。2023年12月的中央经济工作会议也明确提出,打造生物制造、商业航天、低空经济等若干战略性新兴产业^[4]。2024年全国两会期间,低空经济首次被写入政府工作报告,报告提及要加快发展新质生产力,打造低空经济等新增长引擎^[5]。2025年政府工作报告^[6]再次强调:“因地制宜发展新质生产力,加快建设现代化产业体系。”“开展新技术新产品新场景大规模应用示范行动,推动商业航天、低空经济等新兴产业安全健康发展。”

1.2 低空经济的新质态内涵

低空经济发展强调产业间的融合共生,形成包含技术研发、制造生产、运营服务、政策监管等环节的完整生态链^[7]。通航作为低空经济的重要组成部分,具备良好的产业基础和运营经验,因此在低空经济的发展过程中,需要高效融合通航产业生态,升级改造现有的航空基础设施,以实现传统通航的无人化、电动化、智能化^[8]。

传统通用航空主要指在1000~3000 m的低空空域中,使用民用航空器进行包括空中通勤、航空旅游、飞行培训等非商业运输飞行活动,它主要依赖已有的飞行器及航空技术,应用场景相对集中在交通运输和特定行业。低空经济将低空空域直接下探至120 m以下范围,还涵盖了无人机、电动垂直起降航空器、空中汽车等新型航空器,更将应用场景拓展到城市空中交通、低空物流、航空救援、农业喷洒、无人机监测等多个领域。

综上所述,低空经济的空域范围更大,管理对象更广泛,业务场景更复杂多变,现有基础设施和管控方法难以满足未来低空大规模、高密度、异构

飞行的需求。为适应低空经济的发展,需要制定完善的应用规范和关键技术标准,建设数字化、网联化、智能化的基础设施,实现低空全域的通信、导航、监视和管控服务,确保低空飞行器的安全高效运行。

2 低空互联网与基于性能的运行

2.1 低空智能网的定义

2024 年工业和信息化部等四部联发的《通用航空装备创新应用实施方案》提出要推动新型基础设施配套设施体系建设,完善通信、导航、气象等功能服务,充分利用好现有的航空基础设施,构建智能高效新型运行服务体系^[8]。

低空互联网基于云服务平台、智能终端设备和先进的通信技术,实现广域互联、泛在感知和智能管控,将新型飞行器、数字化基础设施、高质量智能计算云服务无缝衔接为一个整体的综合智联系统。通过地面 5G/6G 移动公网、宽带通信网、低轨卫星互联网等通信手段,结合全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)、地基增强系统(ground based augmentation systems, GBAS)、星基增强系统(satellite based augmentation systems, SBAS)等导航手段,以及远程识别(remote ID)、广播式自动相关监视(ADS-B)、低空雷达及光电探测等监视手段和智能化的管控服务,实现空地一体的 CNS 基础设施构建,满足大规模、高密度、复杂、异构飞行的实际运行需求,确保低空空域内的飞行器安全高效运行^[9]。

2.2 基于性能的低空空域管控

安全高效的低空运行依赖飞行器、航空信息基础设施和管控系统之间的相互作用和适应性。在低空空域管控中,这意味着不仅要考虑飞行器的性能,还要考虑空域条件、通信导航监视(CNS)技术条件、管控系统能力等多方面因素,需要各个要素之间的能力匹配,实施基于性能的运行。低空运行场景丰富,不同的运行场景对应着差异化的能力需求,因此,需要选取合适的技术方案来满足各类运行场景的所需性能^[10]。

低空互联网的发展是渐进式的。针对当前低空的典型应用场景,整合并依托现有的航空基础设施、资源、技术手段,给出适应各场景需求的低空

智联、智算的解决方案;随着低空经济的发展,运行场景逐步丰富,飞行量快速提升,低空互联网也将实现更多新技术的融合应用。现阶段低空运行的典型场景按照业务主要可分为城市 eVTOL 载人运行、城市小型无人机末端配送、公共服务(应急救援、医疗物资投送、城市巡查)等,如图 1 所示。



图 1 低空运行典型场景及所需能力要求

Fig. 1 Low-Altitude operational scenarios and required capabilities

不同的业务场景分别对应不同的运行模式。例如,城区物流配送和 eVTOL 载人运输这类常态化的运行往往在空中廊道开展飞行活动,而公共服务这类特殊飞行活动没有固定飞行航线,一般根据自身需求,在运行和管理规则下开展飞行活动。其中,物流配送通常运行在 120 m 以下空域,可能会穿越城市内部狭窄地带,以快速到达目的地。eVTOL 载人运输通常运行在 300 m 以上空域,以避免地面障碍物和低空其他飞行器,同时较高的高度可以减小信号的遮挡和下洗流对周围环境的影响,确保导航精度,保障高效安全地运行。公共服务通常根据任务特点在各高度空域内进行飞行活动,以便快速、高效地到达目标任务作业区域^[11-12]。

低空差异化的运行模式对航空通信、导航、监视、指挥控制、态势感知、识别处置、避障、边缘计算等能力有不同的要求,但通信、导航及监视是核心能力。图 2 列举了 4 个低空典型场景,并梳理了各场景可能的能力需求情况。

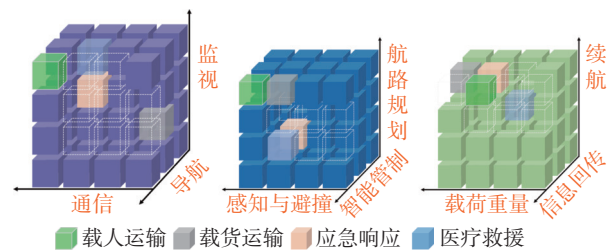


图 2 典型场景能力需求示意图

Fig. 2 Capability requirements diagram for typical scenarios

本文结合现有 CNS 技术手段及低空运行场景特点,总结了通信、导航、监视的可选技术^[11],如表 1 所示。

表 1 城市低空载人运输场景下可选技术方案

Tab.1 Feasible technical solutions for urban low-altitude manned transportation scenarios

通信	导航	监视-合作目标	监视-非合作目标
5G蜂窝通信	GNSS 地基/空基/星基	远程识别	低空监视雷达
低轨卫星通信	增强惯性导航	类ADS-B	5G-A通感一体
低空通信专网	视觉导航		光电/红外探测
VDL模式3	高度计		频谱探测
自组网电台	激光雷达(LiDAR)		
北斗短报文			

2.3 城市低空载人运输场景所需性能

本文以性能要求最高的城市低空载人运输场景为例,列举出了 CNS 在城市低空载人运输场景下的运行需求和阶段^[13-14],并对低空运行中需要满足的性能指标进行了描述^[11],如表 2 所示。

表 2 城市低空载人运输场景所需性能及技术方案

Tab.2 Required performance and technical solutions for urban low-altitude manned transportation scenarios

所需性能类别	场景目标、功能/性能要求	技术
通信	飞行器位置和飞行意图信息广播	5G-A通信技术
	飞行计划报送和变更	卫星组网通信
	飞行器状态和健康信息报送	VHF语音通信
	飞行器态势感知(视景推流)	
	语音指令	
	乘客应急通信	
导航	航路(水平/垂直)	北斗/GPS地基增强
	进近(水平/垂直)	RTK载波相位差分技术
	着陆(水平/垂直)	GNSS+5G融合定位
监视	合作目标监视	ACAS-X
		ADS-B
		5G-A通感融合

2.3.1 城市低空载人运输场景所需通信性能(RCP)

在城市低空载人运输场景中,通信的业务场景主要分为以下几方面:飞行器位置、状态和健康信息的实时报送;飞行器与各单位之间飞行计划的报送和变更;飞行器实时视景向地面用户下行推流;

乘客应急通信;地面站上行推送气象信息。

基于上述场景的通信需求,给出了技术方案的可行性分析,如表 3 所示。

表 3 低空通信技术手段及可行性分析

Tab.3 Low-altitude communication technologies and feasibility analysis

技术手段	可行性分析
5G-A移动通信	5G-A技术面向低空场景做了大量拓展,但必须考虑用户优先级、市场接纳度、天线指向、信号容量等问题
卫星组网通信	卫星网络拓扑变化快,多普勒频移大且快,实验变化率大,星间链路切换频繁;可能具备通导一体化的能力
VHF 语音通信	可以用于与乘客应急通信,拥有合适的带宽,使用需要获得空管部门允许

当前 5G 网络的基础设施仍主要面向地面用户,基站天线的垂直覆盖能力有限,低空通信场景存在盲区。同时,低空飞行器的较快移动会引发频繁的小区切换,增加通信中断风险。5G-Advance (5G-A)技术存在解决上述问题的潜力。5G-A 移动通信技术具备高速率(Gbps 级)、低时延(可达 1 ms)及大连接密度等优势,能够支持低空飞行器的高精控制、高清图传及乘客联网等多样化需求。

卫星组网通信(尤其是以低轨道卫星为核心的宽带卫星系统)具备覆盖范围广、不依赖地面网络的突出优势,能够为移动通信空白区提供连续、稳定的通信服务和良好的冗余保障能力。但受限于物理特性,现阶段卫星链路的通信时延难以满足高实时性的飞行控制要求,同时城市复杂环境也会引起卫星信号的遮挡和多径干扰,影响链路的稳定性。

VHF 语音通信是当前民航领域广泛应用的标准通信方式,具有系统成熟、标准化程度高、监管体系完善等特点。其稳定可靠的语音通信能力,能够支撑飞行员与空管人员之间的航行指令传达,特别适合用作飞行过程中的基本安全通信方式。然而,VHF 仅支持语音,不具备数据传输能力,难以满足低空智能交通系统对图像、位置、航迹等多维数据交互的需求。同时,VHF 频段在城市区域较为紧张,通信容量有限,难以承载高密度飞行器同时通信的需求,适合作为应急技术手段。

2.3.2 城市低空载人运输场景所需导航性能(RNP)

现有全球卫星导航系统(GNSS)已经有了广泛的使用,但在复杂多变的低空环境中,这种传统的导航方式可靠性受到极大挑战,需要对其进行补充。由于低空飞行器在航路、进近、着陆阶段对各方向的导航有着不同的精度需求,因此,需要对不同阶段提供对应的导航手段。表4给出各阶段导航技术方案的适用性分析。

表4 导航技术在不同飞行阶段的适用性分析

Tab. 4 Applicability analysis of navigation technologies in different flight phases

导航技术	航路侧向	航路垂直	进近侧向	进近垂直	着陆侧向	着陆垂直
GNSS地基增强			√	√	√	√
RTK载波相位差分			√	√	√	
GNSS+5G融合定位	√	√	√	√	√	

GNSS地基增强系统(ground-based augmentation system, GBAS)技术成熟,已在现有民航系统中实现广泛应用。在城市低空载人运输场景中,GBAS系统能够将GNSS定位精度从数米提升至亚米级别,满足低空飞行航迹管理与态势感知的基础需求。然而,其对通信链路依赖程度较高,若增强信号传输受阻,系统整体性能将受影响。

RTK(real-time kinematic)载波相位差分定位技术,作为GBAS的技术分支,能够提供更高精度的厘米级甚至亚厘米级的动态定位。在城市低空飞行器中,RTK技术可显著提升航迹跟踪与路径控制的精度,支持高密度航路规划、避障和精确起降等关键功能。特别是在配合高频IMU(惯性测量单元)使用时,可实现高精度、低延迟的融合导航系统。然而,RTK对基准站与飞行器之间的通信质量要求较高,通常依赖蜂窝网络或专用链路,城市复杂地形可能导致链路中断,影响定位连续性。此外,GNSS信号在城市峡谷等环境中易受遮挡,RTK定位质量受可见卫星数量严重制约,存在精度跳变或失锁风险。

2.3.3 城市低空载人运输场景所需监视性能(RSP)

监视技术需要实现对低空合作目标及非合作目标的监视,飞行器将会利用机载和地面监视获取

的低空空域中其他飞行器的位置和意图监视信息,自主维持安全间隔,保障自身的飞行安全。此外,这些机载和地面监视手段可以为飞行过程、动态空域流量密度管理和安全提供易于获取的数据支撑,如表5所示。

表5 城市低空载人运输场景下的监视技术

Tab. 5 Surveillance technologies for urban low-altitude manned transportation scenarios

监视目标	监视技术
合作目标监视-机载	ACAS-X
	ADS-B In/Out
合作目标监视-地面	ADS-B地面站
	5G-A通感融合

ADS-B系统结构简单,部署成本较低,适用于低空协同运行的需求,特别是在飞行器自主避撞、航迹同步及交通状态信息共享等方面具备优势,但低空飞行器数量的激增可能会引发频谱拥塞和消息碰撞,制约系统容量。另外,ADS-B缺乏主动感知功能,无法对非合作目标或者静态障碍物进行探测。

在城市低空载人运输场景中,5G-A通感融合系统可通过5G基站反射回波实现对飞行器的位置、速度、姿态等信息的主动探测,突破传统依赖飞行器自报信息的模式。其具备对低空非合作目标的感知能力,能探测传统系统难以识别的目标,同时,依托现有5G网络基础设施升级,具备良好的部署扩展性与经济性。现有研究表明,其感知精度可达亚米级甚至更高,适配高密度航路管理与精细化调度需求。但该技术尚处于理论实验阶段,面临的挑战和技术体系尚未完全建立,感知精度受天气与复杂地形影响较大,在后续的发展中需要进一步优化通信与感知资源的协调调度^[14-15]。

3 低空智能网的体系架构

低空智能网是依托空天地一体化网络基础设施,以先进的信息通信、人工智能、大数据等技术手段,构建的网联化、数字化、智能化网络体系,旨在实现低空通信、导航、监视以及一体化的管控服务^[7]。

3.1 低空智能网通信系统

面向低空经济战略性新兴产业的网联化、数字化与智能化技术需求,提出“全模态低空智能网

信息服务体系架构”,通过定制的多模态接入网关,打通地面移动网络、专用网络、卫星网络等与低空核心网的传输通道,保障空基平台、传感设备的按需高效接入;通过部署边缘计算服务器、中心计算服务器并连接云服务平台,保障阶梯式分层级低空智能网联业务模式,为终端用户、运营企业与政府部门提供差异化定制服务。

低空飞行器数传业务需要连续稳定的网络覆盖,图传业务对上行速率有较高要求。因此,低空智能网联需要基于不同数据用户和终端用户的各链路信号强度和通信成本等业务的 QoS 需求,利用低空智能网联核心网技术集成 5G、北斗、天通卫星链路、无人机 C2 链路、低轨卫星数据链等多种数据链网络。面向复杂多场景的低空智能网联通信系统

架构,如图 3 所示。

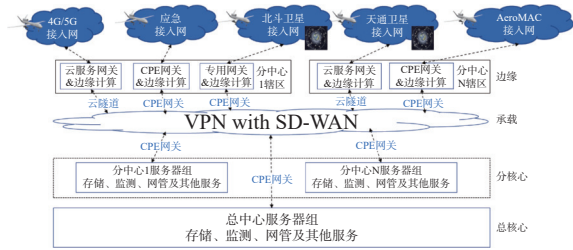


图 3 低空智能网联通信系统规划部署
Fig. 3 Planning of the low-altitude intelligent networked communication system

各通信技术体系有自身的主要特点和适用场景,需要在满足低空各运行场景的图传和数传需求的基础上,选择合适的通信技术。表 6 列出了各技术的主要特点,以及图传和数传业务的通用性能指标。

表 6 低空智能网联通信技术及其主要特点^[7]

Tab. 6 Communication technologies and their main features for the low-altitude intelligent network^[7]

通信技术	主要特点	图传需求	数传需求
4G/5G移动通信	移动公网通信覆盖广泛,能够在大多数地区提供移动网络定位和稳定、高质量的数据链通信服务		
天通卫星网络	天通卫星通信确保飞行器在地面基础设施覆盖不佳的飞行过程中时依然能够保持通信连接,提供高质量的空地语音、短消息和数据通信服务	5Mbs@1080p	时延: <100 ms
北斗卫星通信	北斗卫星系统在定位和时间同步方面具有独特优势,提供RDSS短报文通信以及基于北斗卫星的定时、授时和定位服务,以确保精准的位置和时间信息	25Mbps@4K	速率: kbps
应急专网通信	应急专网在紧急情况下能提供可靠的通信支持,可提供高带宽的语音、影像和控制业务服务,具有灵活的覆盖范围。保障应急响应能力		

3.2 低空智能网联导航系统

2021 年 2 月《国家综合立体交通网规划纲要》提出要“构建基于性能导航为主、传统导航为辅的适应各类航空用户需求的中低空航路航线网络”^[9]。传统导航设备大多基于 GNSS 导航,由于城市低空复杂环境如局部信号干扰、建筑遮挡等因素,存在较大误差,因此,需要利用北斗差分定位等地基增强技术作为辅助导航手段,对导航盲区进行加强覆盖,以提供精准导航定位。此外,还要求导航设备具备联网功能,可以接入智能网联进行管控,同时也利用智能网联数据进行实时导航数据纠正。表 7 列出了低空智能网联导航技术及其主要特点。

随着移动通信网络技术的发展,未来低空智能网联可以利用 5G 高带宽、低延迟和大规模 MIMO 技术特点,显著提升城市环境中的定位精度。未来

研究应优化多源融合定位算法,如通过融合北斗/GPS 信号进行组合导航,探索移动通信网络与 GNSS 的协同机制及高精度定位系统的应用,提升定位精度和系统冗余性^[16-19]。

3.3 低空智能网联监视系统

低空的飞行目标根据能否接入低空网络化监管系统、接受通信和管控指令,分为合作和非合作两种类别。

针对合作目标的监视技术重点解决城市市场中低空小型航空器、乡村场景中复杂地形下中大型航空器、海岛场景下航空器的入网监测、网络化探测及协同感知问题。通过合作飞行器的机载通信监视设备,实现入网授权、机载识别及目标定位,再通过广播式监视技术(类 ADS-B),对目标进行实时的跟踪监视,并且通过数据网络将飞行器的身份、位置、状态信息上传到管控系统,以确保实

表 7 低空智能网导航技术及其主要特点

Tab. 7 Navigation technologies and their main features for the low-altitude intelligent network

导航技术	主要特点
GNSS地基增强定位	利用北斗/GPS差分技术,通过通信基准站接收卫星信号并计算精确位置,进而校正卫星导航信号中的误差,为空域内飞行器提供更为准确的导航服务;该技术系统导航信息更新频率为100 Hz,识别飞行器位置的准确率要求为99%以上,系统提供导航引导的准确率要求为95%以上
5G精确定位	5G网络的新特性(毫米波、微型蜂窝网络、大规模MIMO与波束成形)能够提高定位精度,特别是在城市复杂环境中GNSS信号受限的情况下,可以利用高带宽、低延迟和大规模MIMO技术,实现低空飞行器的精确定位。5G R16标准实现了米级定位精度,R17将进一步将定位精度提升到亚米级(商业1 m,工业100 ms内小于0.2 m)并进一步降低了定位时延
GNSS+5G融合定位	5G R17支持GNSS增强,可利用GNSS辅助信息提高5G定位性能和效率,同时利用GNSS和5G定位实现互补。GNSS系统与5G网络的融合能够有效解决GNSS盲区覆盖问题,扩展导航范围,提高定位精度和系统冗余性

时高效的管控服务,如图 4 所示。

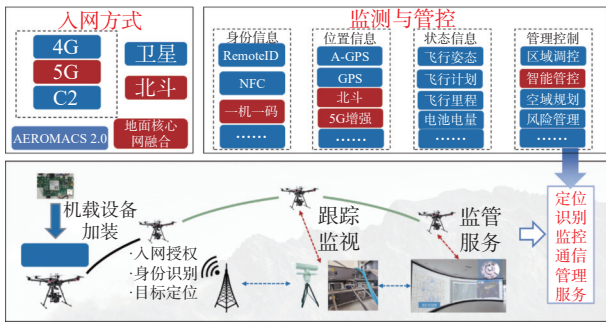


图 4 低空合作目标监视

Fig. 4 Surveillance for low-altitude cooperative target

非合作目标由于其飞行高度低、反射截面小、飞行速度慢等特点,单一的雷达或光电监视技术存在很大的局限,加之无法接受监管系统的管控指令,对空域内其他飞行器、地面的人身财产和关键基础设施等具有巨大的安全威胁,所以需要构建基于频谱探测、视觉感知、5G 泛在雷达等监视技术的网络化多传感器融合感知监视体系来保障低空安全高效地运行^[7],如图 5 所示。

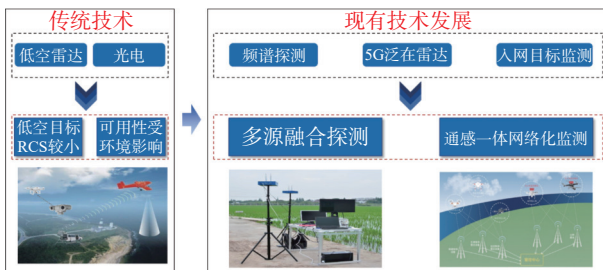


图 5 低空非合作目标监视

Fig. 5 Surveillance for low-altitude non-cooperative target

3.4 低空智能网监管服务系统

低空智能网的监管服务系统为用户、监管系统、服务提供方搭建了一个网络化、智能化的互动平台,旨在解决多场景、多尺度、多要素的低空空

域运行管理和低空飞行器的安全协同管控问题,如图 6 所示。

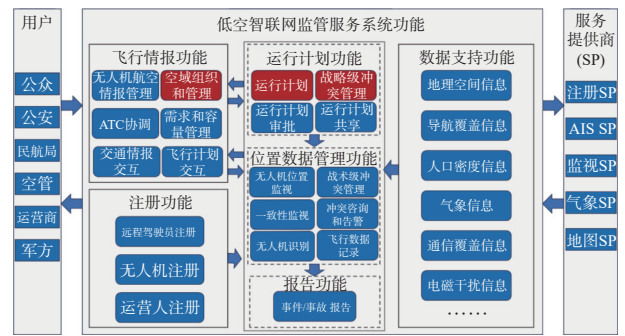


图 6 低空智能网监管服务系统功能架构

Fig. 6 Functional architecture of the low-altitude intelligent networked surveillance and service

低空智能网的监管服务系统需要根据不同的低空运行场景需求、低空飞行器的飞行特性和任务特点,开展运行监管与服务支撑。其中的关键功能如表 8 所示。

4 未来展望

低空经济的发展是一个循序渐进的阶段性过程。现阶段的工作重点在于高效地整合和筛选现有技术,以实现初步的应用和探索。随着系统规模的增加,需求量将会大幅提升,同时,5G-A、6G、通感一体、通导一体等新技术也会逐步成熟,从而赋能整个低空经济的发展。

4.1 通信技术发展

随着 2024 年 6 月,3GPP 正式冻结 Release 18,5G 标准进入 5G Advanced(5G-A)的阶段,并开始为后续的 6G 标准做准备。R18 标准进一步拓展 5G 的应用场景,针对网联无人机低空通信组网的覆盖碎片化、干扰大等问题,提供了定制化的技术

表 8 低空智能网联监管服务系统关键功能^[20-21]Tab. 8 Key functions of the low-altitude intelligent networked surveillance and service system^[20-21]

通信技术	主要特点	图传需求
空域组织与管理	空域栅格化	根据实际低空运行环境对空域进行精细的栅格化描述,根据不同用空需求,合理分配空域资源
	空域风险管理	对空域风险进行评估,形成可用的飞行空域和三维空间的空域划设策略,确保飞行安全和效率。
	航路网设计	依据空域划设规则,确定飞行器的起降区位置并设计航路网络。
	空域动态调整	根据实时飞行状态和需求,对空域进行动态调整,以优化空域资源的使用。
运行计划	航路规划	根据任务需求和空域风险状态,规划无人机的飞行路线,确保飞行的安全和效率
	实时安全风险评估	根据低空运行风险动静态的风险指标体系,实时评估当前空域的冲突风险。
战略级冲突管理	冲突多元威胁要素冲突预测、调度、消解	构建冲突预警模型和的冲突调控模型,实现空域冲突的预测、调度策略。将实时安全风险作为冲突管理的决策影响因子,优化区域安全协同管控策略,实现冲突消解。

解决方案,可以有效提高无人机低空网联性能、覆盖能力,同时,R18 还通过优化终端与卫星通信的协同网络,实现低空飞行器在卫星通信网络下的无感知切换,进一步提升低空通信的覆盖能力^[22-27]。

未来,随着 6G 技术的发展,将实现卫星与地面通信的深度整合。基于 6G 的天地一体融合网络利用低轨卫星网络,面向偏远地区、海洋、航空等全域立体空间实现“泛在连接”和低延迟服务,为地面网络无法部署或建网维护成本高昂的地点填补覆盖空洞,同时,发展动态灵活的网络资源管理技术以适应高速移动的网络拓扑。此外,6G 还将统一空口和频率,确保不同网络环境下的兼容性和高效接入,并通过星地智能动态协作网元优化覆盖和资源调度,实现星地资源的高效协同^[28-32]。

4.2 导航技术发展

通导一体化系统通过多源数据融合、误差校正和信号增强等技术手段,在低空智能载具、低空基础设施、卫星通信服务一体化系统架构的基础上,制定特定协议和机制,提供更精准、高效以及可靠的通信导航服务。同时,系统对服务网络进行协同监测,通过实时评估和数据处理,确保服务质量和可靠性。低空飞行器(如无人机、eVTOL 等)通过通信链路与卫星和地面基站保持实时连接,并将自身的状态和位置数据回传到地面控制中心和其他飞行器,实现低空的协同飞行^[28]。

4.3 监视技术发展

随着通信技术在低空行业应用的不断发展,低空入网目标的监视识别技术将趋于成熟和完善,但非合作目标由于自身“低、小、慢”特点,需要通过

更加先进和灵敏的技术手段进行识别和监控,以确保系统的整体安全性和可靠性。

通信感知一体化主要针对非合作目标,通过基于通信感知一体融合网络,识别低空飞行物的位置、速度与方向等。相比雷达,通感融合网络在覆盖范围、距离分辨率、测角精度等方面优势明显。通信感知融合基站需要基站在时域和空域配置专用的感知资源,并且需要基站具有支持感知探测和处理感知数据的功能。当前 5G-A 技术的发展可能会加速通感一体方案的应用和落地^[19-24]。

4.4 未来低空管控技术发展

未来低空运行管控面临的核心挑战是如何在安全可控的前提下,支撑以“高密度、高频次,复杂、高风险,异构、多样”为特征的大规模融合运行。未来低空运行系统下的智能载具,在飞行密度、起降频次上将以数量级跃增,使得低空运行环境非常复杂,再加之飞行器性能和功能的异构以及运行数据类型和维度的不统一等因素,加剧了未来低空空域的运行风险,这都对飞行器的精准定位、导航、航路规划以及应急避障等提出了新的要求。因此,亟须一套智能互联基础设施来支撑未来规范化、精细化、数字化的低空运行需求。

未来低空管控技术将依托智能和互联的基础设施,确保态势感知终端、智能载具、智算服务无缝连接,实现动态的空域资源优化配置,保障低空大规模异构飞行器的融合运行。智能和互联的关键在于将数据感知、通信与决策过程无缝连接起来,紧密融合。低空数据是基础要素,基于底层数据和物理模型的感知协同,可以实现对低空全域态

势的实时动态感知,利用数字孪生技术构建现实世界的映射规则,为 AI 数据自主决策核心提供共享互通的数据支撑。决策过程是感知协同的核心,这意味着需要将感知到的数据与气象、地理信息和空域管理模型等相互连接,并通过自适应的计算输出最优化的决策模型。最后通过智能的管控决策,能够响应低空运行需求,提供高度个性化的运行服务,以确保低空运行的安全和效率。

低空飞行活动会利用低延迟的数据交互,将载具、空域、气象等数据完整可靠地推送到 AI 数据决策核心,利用智能决策模型提供精准稳定的推理服务。AI 数据决策核心本质上是提供一个开放并且可扩展的数据接入、计算以及决策服务框架,底层的感知数据能动态实时接入并调用决策服务,并根据数据自身性能匹配相应的计算过程和空域服务需求,同时,还可以将决策模型迁移到数据存在的基础设施的边缘,以进一步降低决策的延迟,进而高效、安全地匹配数据和决策服务、空域服务的供需关系,满足低空飞行活动的服务需求。图 7 为未来低空管控服务示意图。



图 7 未来低空管控服务示意图

Fig. 7 Diagram of future low-altitude management and control services

未来低空运行场景的落地应用将围绕泛在互联网、精准导航、协同感知、智能管控服务等关键技术,呈现出阶段性的稳步发展。从政策法规到行业标准,从顶层规划到应用落地,从理论研究到技术落地,这一过程不能依赖单一领域的突破,而是需要航空、通信、材料、人工智能等各领域的专家和从业者,在研发设计、生产制造、运营服务等各环节的通力合作。只有这样,才能使低空经济的源泉充分涌流,才能让提高公共服务效率、形成新质生产力、改变生产生活方式这一发展愿景照进现实。

参 考 文 献

[1] 赛迪顾问. 中国低空经济发展研究报告 (2024)[R/OL]. [2025-04-23]. <http://www.ccidconsulting.com/detail/newdetail?id=5000>.

[2] 陈志杰. 加强天地融合智联, 助推低空经济腾飞[J]. *信息通信技术*, 2023, 17(5): 4-7.

CHEN Z J. Strengthen the integration of hea-ven and earth and Zhilian to boost the low-a-ltitude economic take-off[J]. *Information and Communications Technologies*, 2023, 17(5): 4-7.

[3] 樊邦奎, 李云, 张瑞雨. 浅析低空互联网与无人机产业应用[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(9): 1441-1450.

FAN B K, LI Y, ZHANG R Y. Initial analysis of low-altitude Internet of intelligences(IOI) and the applications of unmanned aerial veh-icle industry[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(9): 1441-1450.

[4] 中央经济工作会议在北京举行 习近平发表重要讲话[R/OL]. (2023-12-12). http://www.xinhuanet.com/politics/2023-12/12/c_1130022917.htm.

[5] 新华社. 2024 年政府工作报告[R/OL]. (2024-03-12). https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939153.htm?pc.

[6] 新华社. 2025 年政府工作报告[R/OL]. (2025-03-12). https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202503/content_7013163.htm.

[7] 中国移动通信集团有限公司. 低空互联网技术体系白皮书[R]. 2024.

[8] 通用航空装备创新应用实施方案(2024—2030年)[R/OL]. (2024-03-27). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/content_6942115.htm.

[9] 国家综合立体交通网规划纲要[R/OL]. (2021-02-24). https://www.gov.cn/zhengce/202203/content_3635479.htm.

[10] FAA. Urban air mobility (UAM) concept of operations version 2.0 [R/OL]. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/Urban%20Air%20Mobility%20%28UAM%29%20Concept%20of%20Operations%202.0_0.pdf.

[11] NASA GRC. Reliable, secure, and scalable communications, navigation, and survei-llance (CNS) options for Urban Air Mobility(UAM)[R/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/202050066612020>.

[12] VERMA S, DULCHINOS V, WOOD R D, et al. Design and analysis of corridors f-or UAM operations[C]//2022 IEEE/AI-AA 41st Digital Avionics Systems Conference(DASC). Portsmouth: IEEE, 2022: 1-10.

[13] CENK ERTÜRK M, HOSSEINI N, JAMAL H, et al. Requirements and technologies towards uam: communication, navigation, and surveillance[C]//2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference(ICNS).Herndon: IEEE, 2020: 2C2-1-2C2-15.

[14] 3GPP. Study on integrated sensing and communica-

tion[R/OL].<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=4044>.

[15] LU S H, LIU F, LI Y X, et al. Integrated sensing and communications: recent advances and ten open challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(11): 19094 – 19120.

[16] ZUO Z Y, YANG B, LI Z, et al. A GNSS/IMU/vision ultra-tightly integrated navigation system for low altitude aircraft[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(12): 11857 – 11864.

[17] LIM J, ACHERMANN F, GIROD R, et al. Safe low-altitude navigation in steep terrain with fixed-wing aerial vehicles[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(5): 4599 – 4606.

[18] ICAO. Performance-based communication and surveillance (PBCS) manual[R/OL]. <https://store.icao.int/en/performance-based-communication-and-surveillance-pbcs-manual-doc-9869>.

[19] CHEN J F, WANG W Z, HE C, et al. Direction finding based on time-modulated array with multiharmonic analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(7): 5753 – 5758.

[20] 谢华, 尹嘉男, 朱永文, 等. 数字低空空域栅格化的表征度量与最优标定[J]. *数据采集与处理*, 2024, 39(1): 31 – 43.

XIE H, YIN J N, ZHU Y W, et al. Characterization, calculation and optimal calibration for rasterization in digital low-altitude airspace system[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2024, 39(1): 31 – 43.

[21] 陈志杰, 朱永文, 刘杨. 基于数字化空域系统的城市无人机管理对策研究[J]. *中国民航大学学报*, 2023, 41(3): 8 – 12.

CHEN Z J, ZHU Y W, LIU Y. Management strategy of the urban UAV based on digital airspace system[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2023, 41(3): 8 – 12.

[22] 3GPP. Release 18[R/OL]. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-18>.

[23] IMT2020. 5G-Advanced 通感融合场景需求研究报告

(第二版)[R/OL].(2022-08-02).<https://www.3gpp.org/News/863486601290842112.html>.

[24] IMT2020. 5G-Advanced 通感融合网络架构研究报告(第二版)[R/OL].(2024-03-19). <http://221.179.172.81/images/20240319/89951710830157414.pdf>.

[25] IMT2030. 6G 通感融合系统设计研究报告[R/OL]. [2025-04-23].<https://www.fxbaogao.com/detail/4008045>.

[26] 中国电信. 中国电信: 通感一体低空网络白皮书[R/OL]. [2025-04-23].<http://claei.com.cn/files/file/20241119/1731987437>.

[27] 中国联通. 中国联通 5G-A 通感算融合技术白皮书 V3.0[R/OL]. [2025-04-23].<https://13115299.s21i.faiusr.com/61/1/ABUIABA9GA>.

[28] 华为 6G 研究团队. 华为研究: 通信感知一体化从理论走向标准[R/OL]. [2025-04-23].<https://www.file.huawei.com/-/media/corp2020/pdf/publications/huawei-research/2023/huawei-research-issue5-cn.pdf>.

[29] 中国移动. 面向 6G 的天地一体融合网络技术白皮书[R/OL]. [2025-04-23]. <http://221.179.172.81/images/20240204/2971707048250617.pdf>.

[30] 中国移动. 中国移动 6G 网络架构技术白皮书[R/OL]. [2025-04-23]. <http://221.179.172.81/images/20220622/369-41655883996900.pdf>.

[31] 中国移动. 面向天地一体的卫星互联网创新应用场景白皮书[R/OL]. [2025-04-23]. <http://221.179.172.81/images/2022-0622/36941655883996900.pdf>.

[32] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通感一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. *导航定位与授时*, 2022, 9(2): 1 – 14.

YU B G, BAO Y C, YANG M H, et al. Conceptual framework and research progress on communication and navigation integration[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2022, 9(2): 1 – 14.

(责任编辑: 饶莉)

(上接第 47 页)

[17] GHADERMAZI J, SHAH A, BASTIAN N D. Towards real-time network intrusion detection with image-based sequential packets representation[J]. *IEEE Transactions on Big Data*, 2024 (99): 1 – 17.

[18] 彭斌, 白静, 李文静, 等. 面向图像分类的视觉 Transformer 研究进展[J]. *计算机科学与探索*, 2024, 18(2): 320 – 344.

PENG B, BAI J, LI W J, et al. Survey on visual transformer for image classification[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2024, 18(2): 320 – 344.

[19] HE H T, SUN X B, HE H D, et al. A novel multimodal-

sequential approach based on multi-view features for network intrusion detection[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 183207 – 183221.

[20] SHARAFALDIN I, HABIBI LASHKARI A, GHORBANI A A. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy*. Funchal: SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2018: 108 – 116.

[21] YU H, WU J X. Compressing transformers: features are low-rank, but weights are not![J]. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2023, 37(9): 11007 – 11015.

(责任编辑: 饶莉)