• 专题一：双清论坛“低空经济信息系统与安全管理理论及关键技术” •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0034

低空数智网的大规模无人机网络化管控理论与关键技术*

冯志勇 周 映 王 琳 黄丹蓝**
尉志青 王曦阳 李佳澎 张奇勋

北京邮电大学 信息与通信工程学院，北京 100876

[**摘 要**] 低空大规模无人机的网络化管控是低空信息网络安全高效发展的重要前提，但传统通航管理技术体系的管控效率、管控规模等无法满足低空经济大规模无人机开放服务的需求，同时传统以信息论为理论基础的无线通信网络无法实现大规模无人机的闭环控制，亟需突破理论和关键技术挑战，构建面向低空大规模无人机的新型安全高效的低空数智网。本文将探讨低空数智网构建面临的信息论与控制论融合理论难题，以及大规模无人机管控的闭环信息流交互与网络化控制等关键技术，并给出新型泛在低空数智网构建思路，提出跨域联动的低空飞行管控方法，支撑大规模低空无人机的全时空信息交互与高效智能管控。

[**关键词**] 低空数智网；大规模无人机；网络化管控；闭环信息交互；低空经济

低空经济作为国家战略性新兴产业的核心载体，正成为衡量国家科技创新与高端制造能力、牵引经济社会高质量发展的新质生产力。随着无人机（Unmanned Aerial Vehicle，UAV）技术的迅猛发展与机队规模的激增，其任务复杂度亦显著提升，低空经济的规模化发展正面临系统性技术挑战。

传统基于民航体系的管控模式存在三重根本性局限：其一，感知维度缺失—城市峡谷地形遮蔽导致雷达探测盲区，复杂电磁环境削弱定位精度，单一技术难以保障低空目标的连续可观测性；其二，协同机制断层—现有飞控系统多呈孤立状态，致使多机避撞主要依赖预规划航线，缺乏实时协同能力。同时，空域属地化管理与无人机注册地控制权分离，导致跨域飞行管理权责不清；其三，管控实时性不足—以事前备案为主的管理模式难以动态响应空情变化，对违规无人机的快速溯源与有效处置仍面临重大技术挑战。上述“难感知、难协同、难管控”的瓶颈，严重制约低空空域资源的高效利用与安全治理。亟需突破系统性技术瓶颈，研发面向低空经济的新型通信、感知、导航、监视（通感导监）装备，构建具备通感导监一体化能力的低空智联网数智底座。

低空经济的未来技术发展将聚焦智能化与网联化。随着人工智能（Artificial Intelligence，AI）技术的进步，AI深度融入低空经济将成为关键方向。智能化不仅体现在机载飞控系统由基础的无人机姿态控制，向具备完整“感知—通信—控制”闭环的自主智能体演进；也体现在低空空管基础设施由人工决策向AI辅助决策的智能化升级。网联化则依托边缘计算和网络切片技术，构建算网融合的支撑体系，将无人机受限的机载计算需求卸载至边缘节点，从而提供伴随式智能算力支持。在网联化赋能下，无人机不仅能实现“空—地—云”一体化的业务运营，更能达成全域空域管理的协同，将其运行范围从视距内扩展至网络覆盖的超视距域，满足低空经济泛在

收稿日期：2025-08-06；修回日期：2025-11-15
* 本文根据国家自然科学基金委员会第407期“双清论坛”讨论的内容整理。
** 通信作者，Email：huangdl@bupt.edu.cn
本文受到国家自然科学基金项目（62321001，92267202）、国家重点研发计划项目课题（2020YFA0711303）的资助。

引用格式： 冯志勇，周映，王琳，等. 低空数智网的大规模无人机网络化管控理论与关键技术. 中国科学基金，2026，40（1）：19–34.
Feng ZY，Zhou Y，Wang L，et al. Theory and key technologies for large-scale unmanned aerial vehicle networked control in low-altitude digital intelligence networks. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，2026，40（1）：19–34.（in Chinese）

化安全运行的需求。

1 低空数智网的重大机遇与挑战

1.1 低空数智网的概念与内涵

2024年,“低空经济”首度写入《政府工作报告》,标志着其已纳入国家顶层战略[1]。无人机应用场景加速突破传统农林植保等范畴,向城市物流、应急救援及空中交通等高价值复杂领域延伸,直接驱动民用无人机保有量呈指数级增长。数据显示,截至2023年底我国在册无人机达126.7万架,同比增长32.2%;预计2030年产业规模将突破万亿[2,3]。这种由分散作业向高密度网络化运行的范式跃迁,宣告大规模无人机时代的全面来临。

然而,随着无人机运行规模与密度的快速攀升,现有空域治理体系正承受着巨大的压力。非合作无人机引发的“黑飞”扰航事件频发,严重威胁民航秩序、关键基础设施及空防安全[4]:传统空管依赖程序化人工指令的开环模式,缺乏与海量异构无人机实时交互的技术基础,难以构建“感知—通信—控制”闭环,导致管控容量、响应效率与自动化水平无法满足未来开放空域需求。

本文提出低空数智网,深度融合信息论与控制论的,其核心是构建具备通感导监一体化能力的数智底座[5]。该体系全域连续覆盖,实现低空空域通信、导航、探测与管控的全时空连续性;具备多源协同感知,依托空空/空地多源异构数据融合,支撑大规模无人机集群的泛在化智能管控;实现通感算控内生耦合,将环境感知与精准定位能力内生于通信网络,形成“指令精准下达—状态实时反馈”的闭环控制,从根本上解决高密度无人机集群的协同管控难题。

在低空数智网中,大规模无人机指的是一个由数量庞大(通常达到数十架甚至上百架)、具备通信、感知与计算能力的无人机,通过低空通信网络相互连接,并在一体化智能管控系统的调度下,为实现共同任务目标而进行高效、自主、协同作业的智能体集群。

1.2 国内外发展现状及趋势

1.2.1 低空数智网国内外发展现状

2025年未来移动通信论坛数字低空工作组发布《泛在安全低空数智网技术体系白皮书》,白皮书提到传统航空管控网络主要保障较高空域飞行器安全,其依赖雷达网络、导航设备与人工决策的运行模式存在显著局限:系统间协同薄弱,管控效率低下,难以满足低空大规模无人机的动态管控需求,亟需构建新型信息通信基础设施。

我国低空经济尚处于初级发展阶段,还未形成体系化能力,全球也无成熟的经验和范式可以借用。美国国家航空航天局主导的无人机交通管理系统依托4G/5G与地理围栏技术构建分布式协同平台,并于2024年联合SkyGrid拓展城市空域应用;联邦航空管理局开发的低空授权与通知能力系统实现了近地空域飞行自动审批。欧盟U-space框架通过U1-U4四级服务体系,逐步实现从基础电子注册到复杂自主编队的全流程管控,法国Thales公司据此开发了空域监测平台。日本先进空中交通计划推动“通信—感知—指挥”一体化系统建设,KDDI与日本航空开发的远程管理系统支持多机协同监控与应急干预。

《通用航空装备创新应用实施方案(2024-2030年)》明确推进空天地设施互联的低空智联网架构,构建智能调度与动态监测体系[6];深圳首发全球智能融合低空系统,通过“设施网—空联网—航路网—服务网”四维网络实现异构飞行器安全管理;长沙依托量子加密与人工智能技术建成通感算一体化试验区,强化“低慢小”目标监测[7]。

整体而言,低空数智网正经历从传统分立架构向通感导监一体化架构的范式跃迁。其通过智能化决策、网联化协同、全域化管控的技术特征,形成支撑高密度无人机集群安全运行的技术基座,标志着低空经济基础设施进入系统性重构阶段。

1.2.2 网络架构的演进

低空数智网正经历由分立架构向一体化融合架构的根本性转变。传统低空系统主要依赖单机遥控或自主控制,适用于小规模、低复杂度的应用场景;然而,伴随低空经济的规模化发展,点对点管控模式已难以支撑海量无人机的高效、安全运行。为此,技术体系正从“通信—感知—控制(通感控)”相互割裂的传统形态,向“通感控一体化”的新范式演进。在此架构下,系统通过构建统一的资源调度与智能决策机制,实现从环境感知、任务规划到动态控制的闭环运行,全面提升低空系统的协同效率与自主水平。

如图1所示,低空数智网构建了以AI为统一智能基座的协同架构,涵盖通信、感知与控制三个层面。其中,通信面融合低空接入与卫星回传能力,形成“空—天—地”协同的立体化网络,保障广域覆盖下的高可靠、低时延通信;感知面集成雷达、光学设备等多种传感器,构建基于AI的多模态数据融合框架,实现全域精细化态势感知与目标识别;控制面依托通感一体化技术实现硬件级功能融合,显著降低系统间处理时延,支撑无人机编队控制、实时避障等闭环控制任务。人工智能作为系统核心引擎,贯穿感知、通信与控制全流程,驱动“感知—通

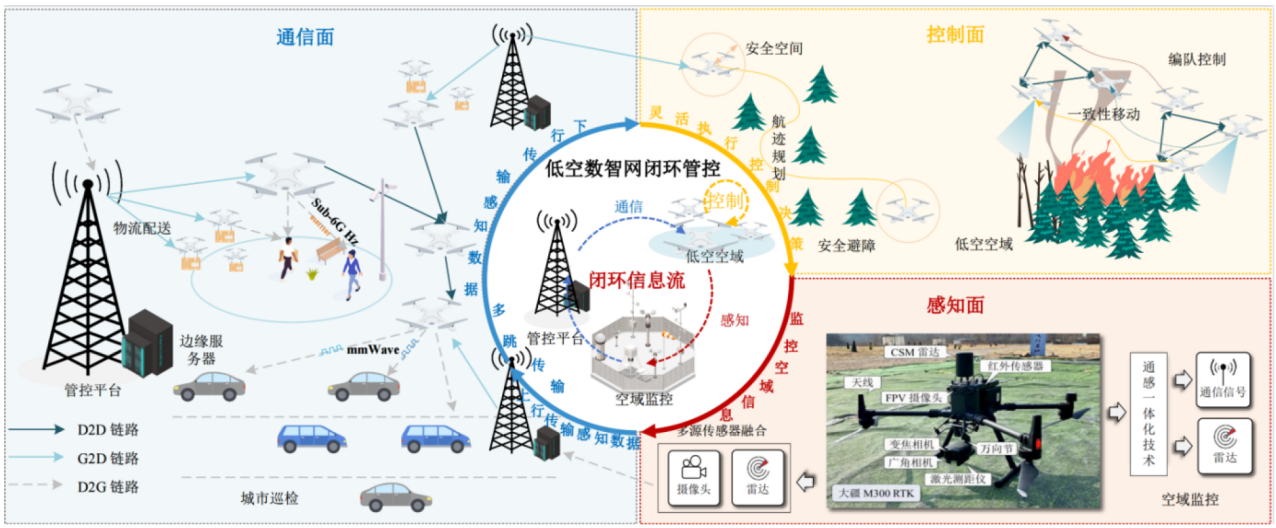


图 1 低空数智网网络架构

Fig.1 Low-altitude Digital Intelligence Network Architecture

信—控制”闭环的高效收敛与智能协同。

1.3 低空数智网挑战与难题

低空经济已步入“深水区”,对通信基础设施、管控体系及制度规范提出更高要求。当前低空通信网络正加速从地面覆盖向空地融合智能立体网络演进,核心矛盾体现为架构僵化,通信网络未适配三维空域特征,多源信息融合薄弱,闭环控制体系缺失。这严重制约多场景复杂任务下大规模无人机的全时空交互与智能管控能力。

1.3.1 通信架构固化问题

随着大规模无人机广泛部署,通信网络从传统地面覆盖向智能化地面低空三维立体网络转型,为高可靠低时延低空数智网带来新的发展机遇。实证表明:百架级无人机集群通过蜂窝基站与自组网协同,需实现10-100 Mbps数据传输与超高可靠低时延控制(误码率<10^{-5},时延< 10 ms)[8]。然而,现有4G/5G/ADS通信技术主要面向地面或有人航空域,基础设施在天线部署、信号成形和资源分配等方面均未针对空域用户进行优化,难以满足低空多节点、高密度、强协同场景下的通信需求。现有通信技术的不足在于,空域覆盖失配,地面基站天线主瓣下倾,导致空域信号弱化(旁瓣增益衰减>20 dB),引发覆盖盲区与链路震荡[9];三维适配不足,平面架构难以应对低空动态电磁环境,频现链路中断;《低空智联网技术体系白皮书》指出业务特征错配,传统以下行为核心的优化目标与低空上行主导、时延敏感型业务需求背离,无法保障任务级QoS动态需求。

更深层挑战在于理论框架缺失,传统信息论聚焦单向比特流传输,尚未建立通感控闭环耦合模型,难以刻画三维动态拓扑下多节点协同的性能边界。典型案例显示,城市巡检中建筑物遮蔽引发的LoS/NLoS切换导致时延抖动>50 ms,致使控制指令失效。低空数智网不同于传统地面网络的稳定架构,当前尚缺乏面向“通信—感知—控制”闭环优化的信息论与控制论融合理论框架,难以刻画多节点协同下的通感控性能边界,无法满足三维动态拓扑下跨域资源协同及超高可靠低时延的大规模无人机互联性能需求。

1.3.2 多源感知融合不完善

通感一体化(Integrated Sensing and Communications, ISAC)与多模态感知技术正推动低空态势感知从单一模态向多源融合跃迁。通过融合视觉、激光雷达、红外等多源传感器数据,无人机在复杂环境下可实现高精度障碍识别与全局态势感知[10-11]。ISAC技术使无线电兼具通信与感知功能,通过波形测量实现LoS/NLoS条件下的目标定位,基于Device-to-Device(D2D)或 Device-to-Ground (D2G)链路的跨节点数据共享支撑多机协同感知[10]。典型应用如农林监测中遥感影像与环境传感器的融合建模,实现高精度灾害预警;城市管理中多无人机网络结合边缘智能完成实时动态巡检。

城市“密杂”地形导致严重遮蔽,无人机“快小隐”特性加剧感知难度。现有雷达与卫星定位面向高空设计,在低空盲区受物理限制导致服务性能劣化,难以满足高精度导航需求。复杂电磁环境中金属构件反射引发的多径效应进一步削弱感知稳定性。异构传感器存在数据格式不统一、采样频率差异、传输时延波动等问题,导致融合算法在动态环境中难以兼顾精度与实时性;缺乏统一时空基准阻碍多机感知共享与全局建模。当任务规模扩展至群体协作时,上行大容量感知数据使现有网络难以支撑实时需求。此外,ISAC在有限频段内存在通

信—感知资源博弈,电磁干扰导致感知链路信噪比剧烈波动;轻量化平台的功耗约束更制约长时运行能力。这些挑战暴露传统算法难以适应低空高动态异构环境,亟需构建融合“通信—感知—控制”的新型智能架构。

1.3.3 闭环控制机制欠缺

低空经济的快速兴起催生了对大规模无人机全生命周期动态管控、跨域协作及多智能体任务调度的迫切需求。边缘智能、计算机视觉与多智能体强化学习等技术的融合,为解决闭环信息流交互与网络化控制问题提供了新机遇[12]。然而,当前管控能力与实际需求仍存在显著差距。

传统集中式管控方法效率低,在灾害救援、城市巡检等高动态场景中,空域任务频繁变更与通信链路失稳导致感知—控制联动失效,难以实现毫秒级精确协同[13]。现有管控系统依旧采用通信、感知与控制功能“分模块”独立设计,缺乏对“感知—通信—控制”闭环信息流交互机理的系统优化。这种分离导致闭环信息流在跨层处理和跨系统交互中产生较大的时延与冗余开销,整体决策效率低下,难以满足无人机集群在高动态环境下的毫秒级环境响应与精确协同需求。非合作目标(如黑飞无人机)的感知与追踪常依赖被动雷达、视频监控等异构数据源融合,但在多源感知未对齐或链路中断时,管控平台难以及时形成有效控制策略,危及空域安全。

随着管控范式从单体控制向多智能体协同演进,网络化控制成为提升低空数智网闭环效能的关键技术,但仍面临以下挑战。通信可靠性不足,城市峡谷与高速机动场景中,链路切换与信道干扰引发控制信息丢失,严重削弱系统稳定性;感知同步性缺陷,异构传感器并发接入导致时延差异,阻碍环境状态融合与协同决策;任务适配性局限,应急响应需毫秒级重构能力,物流调度要求高并发处理,现有系统难以均衡多指标需求。亟需建立“通信—感知—控制”深度融合的弹性架构,保障高可靠、低时延的广域协同性能。

1.3.4 低空数智网潜在应用

低空数智网作为支撑低空经济的新型数字基座,凭借高时空分辨率感知、广域高效通信与精准协同控制能力,正深度赋能多行业场景。其在农业管理、应急救援、城市治理与物流配送领域展现显著价值。

在农业管理方面,通过融合遥感影像、多光谱视觉与环境传感器,实现作物长势与土壤参数的实时智能分析。例如,浙江大学农用无人机及多源信息融合技术,实现了亩均节水9%、节药20%、省工22% 的效益,间接经济效益累计11.4亿元。

在应急救援中,通过快速组网与弹性通信能力,部署通信中继无人机与边缘终端,增强受灾区域信息覆盖与态势感知。典型案例如湖州无人机数智平台,可在3分钟内传回现场图像;无人机在四川泸定地震中构建专网指挥链路,在广东韶关洪涝灾害救援中恢复公网信号,在四川雅江山火救援中持续监测火情,为救援决策提供了关键信息支撑。

在城市治理中,利用多智能体协同感知与AI视频分析,实现基础设施的无人化高频巡检,构建城市运行数字孪生体系。无锡市的“5G +无人机+AI”项目整合多部门无人机资源,处置工单超1.2万件,显著提升城市管理协同效率。

在物流配送方面,支持城区高密度区域的动态路径规划与毫秒级任务调度。依托边缘计算资源与局部通信,根据实时空域态势调整航线,满足分钟级配送需求,助力智慧物流升级。驼航科技的重载无人机实现在高原环境下百公斤级物资的百里运输;美团无人机则在多个城市实现规模化运营,累计完成商业订单超67万单,展现出良好的成本与效率优势。

低空数智网作为新型数字基础设施,通过高精度感知、广域通信与协同控制能力,正深刻改变着传统行业的生产与服务模式,实测数据与典型案例均证明了其应用价值与潜力。未来,随着传感器技术、人工智能算法与低空通信网络的进一步发展,低空数智网将在更多领域发挥重要作用。

2 低空数智网的主要研究进展

低空数智网作为支撑低空经济发展的核心数字基础设施,其性能评价体系正从传统以通信为中心的单一维度,向融合感知精度、控制实时性与智能决策能力的综合指标体系演进。在IMT-2030(6G)愿景的推动下,3GPP标准进程与行业实践共同构建了涵盖通信、感知与控制的多维性能框架。3GPP SA12023技术报告中定义了32个典型用例,并提出了一系列感知需求指标,如定位精度、速度估计准确度、感知分辨率、最大感知业务时延、刷新率、漏检率和虚警率等。表1系统梳理了低空数智网在时延、可靠性、定位精度、数据速率及感知能力等方面的关键目标、当前实现水平与面临的主要技术瓶颈。

为推动上述性能指标的落地,近年来开展了一系列外场验证。自2023年起,从厦门的多站连续组网测试,到2024年杭州钱塘江畔的复杂场景协同感知,再到2025年苏州密集城区的规模组网试验,通感一体技术稳步推进,在检测率、虚警率和定位精度上均展现出在真实场

表1 低空数智网关键性能目标、现状与主要技术瓶颈

Table 1 Key Performance Goals, Current Status, and Major Technical Bottlenecks of Low-altitude Intelligent Networks

性能维度	行业愿景	当前水平	主要技术瓶颈
时延	3GPP定义了无人机在不同操控模式的时延要求,例如高清视频传输时延200 ms,控制时延20 ms	中国移动在宁波舟山港试点中,通过部署MEC节点,将端到端时延从120 ms压缩至45 ms	空口传输、网络调度、计算处理等环节的累积延迟
通信可靠性	3GPP定义对于无人机命令与控制(C2)等关键指令传输,可靠性≥ 99.999%。3GPP R18及后续版本也致力于在网络侧增强服务质量(QoS)保障,以满足低空业务的高可靠性需求	5G网络在极端天气下,可靠性约可达99.95%	低空信道快速时变、干扰复杂
数据传输速率	为支持4K乃至8K超高清视频的实时直播回传,3GPP定义上行链路速率:> 100 Mbps	浙江移动通过通感一体基站优化波束,在600米高空边缘速率可达120 Mbps	频谱资源有限,空口链路在复杂环境下不够稳定
感知精度	IMT2030(6G)展望厘米级的障碍物识别能力;中国移动研究院提出通感基站针对低空场景感知指标需求,检测率> 95%,虚警率≤ 5%且位置精度≤ 10米;3GPP密集区域导航精度≤ 0.5米	4. 9 GHz 5G-Advanced 技术试验中,低空场景下感知精度仅约 10 ~ 20 m;检测率优于95%,虚警率低于5%	通感一体化理论不成熟,复杂环境下性能下降; 卫星定位误差、多径效应、传感器精度限制

景下的适用性。

综上,当前低空数智网在通信、感知与控制各维度的性能虽取得显著进展,但仍面临诸多技术瓶颈亟待突破。下文将分别从通信功能、感知功能与控制功能三个层面,系统梳理国内外研究现状与核心能力进展,以揭示技术发展路径与未来演进方向。

2.1 通信功能

通信网络是构建低空数智网网联化能力的核心基础,主要包括空地通信与空空通信两类链路。其中,空地通信实现无人机与地面网络之间的双向数据传输:地面网络通过下行链路向无人机发送控制指令,无人机则通过上行链路回传采集的图像、视频等任务数据。空空通信则指无人机之间的直接通信,对实现无人机自主编队、协同感知与任务协作等功能至关重要。

目前,专用空地数传等直通通信方式难以支撑低空广域覆盖需求,而基于Wi-Fi与蓝牙的RemoteID广播通信在容量与可靠性方面亦无法满足未来无人机智能化、协同化发展的要求。因此,亟需构建覆盖广泛、频谱高效、能力融合的低空通信体系。具体而言,应在低空经济发展密集的空域推动统一通信网络覆盖,以降低频谱资源冲突;并融合通感一体化机制,提升带宽、降低时延、增强传输可靠性;结合通算一体化架构,支持智能任务在空地之间的灵活卸载,从而实现更快的响应速度与更高的数据压缩效率。更进一步,还可引入语义通信等新兴范式,在有限带宽条件下实现更高质量的内容回传与语义级协同交互。

2.1.1 空地通信

传统无人机点对点通信依赖非授权频谱,面临信道拥塞与窄带宽制约,难以支撑大规模集群接入。其典型缺陷体现为:窄带宽无法满足空地通信容量需求(4K图像传输需≥25 Mbps速率),且端到端时延难以保障< 100 ms[12]。蜂窝网络虽可借助非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Acess,NOMA)、多输入多输出(Multiple Input Multiple Output,MIMO)、毫米波等技术提供高可靠低时延服务,但复杂信号处理导致能耗激增,挑战机载供电极限。为此,3GPP引入RedCap技术,通过缩减天线数量(≤ 2根)、降低调制阶数(≤ 64QAM)等裁剪策略平衡终端性能与功耗[13]。

地面基站受限于部署不均衡,难以实现无缝覆盖;星基(卫星)与空基(高空平台)网络则保障偏远区域及跨域运输的广域连接。三者融合构建的空天地一体化架构,可赋能大规模无人机广域协同[14]。针对上行带宽压力,语义通信通过信源—信道联合编码提取核心语义信息,通过传输语义信息替代原始数据,显著提升低空网络效能,将图像传输数据量压缩80%以上,显著降低上行链路负载[15-17]。

2.1.2 空空通信

传统无人机间通信受限于协议与资源管理机制,仅支持小规模集群,数量激增将引发严重干扰;高速机动性更易导致链路中断[18]。为支撑大规模组网,可构建多跳Mesh架构:通过中继扩展覆盖降低单机发射功率,减轻互干扰[19];分布式特性减少中心依赖,分流数据负载以提升鲁棒性[20]。针对高速移动引发的信道非平稳问题,Ma等[21]基于3D Markov模型构建时频相关特性与多普勒功率谱,为信道预测与补偿提供理论支撑。

2.2 感知功能

低空数智网的感知功能是实现低空智能化管控的基础前提。面对城市低空环境中建筑布局异构、电磁信号交织、视距/非视距链路动态切换等复杂特性,传统单一维度的感知手段已难以满足无人机集群在协同避障、

轨迹规划与控制等方面对高精度、高实时性的感知需求。因此,需通过多源异构数据融合,实现对低空目标的可靠探测与干扰源精准定位。进一步地,依托多节点组网与协同感知机制,可提升系统在广域范围内的感知连续性、覆盖能力与整体鲁棒性。

在系统实现层面,无人机在低空数智网中具备双重角色:既可作为通感一体网络的感知目标(即"地对空感知"),也可作为增强通信与感知能力的空中锚点(即"无人机辅助感知")[22]。下文将分别从这两个维度展开,系统阐述低空数智网中的感知功能架构与技术路径。

2.2.1 地对空的感知

在城市复杂低空环境中,楼宇、隧道等结构对卫星信号的遮挡使得单一卫星定位难以满足连续精准定位需求。通信网络基于通感一体化技术进行低空探测提供了可行的替代路径,然而,单个基站的感知范围受限于其固定天线配置,覆盖能力有限。为适应低空经济对无人机精准定位与持续跟踪的需求,必须突破单点感知的局限,发展多站协同探测机制,通过融合多站间具有时空相关性的信号数据[23-26],实现信息互补与感知精度提升,并即时反馈给无人机以支持低时延的决策与控制。

根据无人机是否主动参与感知过程,其感知技术可分为两类:协作式主动感知[27]和非协作式被动感知[28,29]。前者用于管理和保障合法无人机,后者用于发现和应对非法无人机。表2展示了两类技术的对比。

2.2.2 无人机辅助的感知

与依赖固定基础设施的地面传感网络相比,无人机凭借其高机动性与灵活部署能力,突破了传统感知在空间覆盖与视角上的限制,为对空、对地目标探测引入了新的系统自由度。然而,这种空中感知平台也带来了独特的技术挑战。

在对空目标感知方面,无人机能够在集群内部实现分布式协同感知与实时态势共享,从而提升群体在无地面控制条件下的自主飞行与协同能力。同时,通过对非合作入侵目标(如其他无人机、鸟类等)进行距离、角度与相对运动状态的持续探测,可有效支撑碰撞规避与空域安防[30,31]。然而,该类任务对实时波束追踪提出极高要求,加之无人机平台易受低空湍流等扰动影响,进一步增加了感知链路保持与目标持续锁定的难度。

在对地目标感知场景中,多无人机可构建协同感知网络,通过共享异构观测数据实现广域覆盖与高精度参数联合估计[32-34]。借助机载搭载的多模态传感器(如视觉、激光雷达与毫米波雷达),系统能够获取目标的互补特征,并通过跨模态融合显著提升识别精度与环境重建质量。然而,该类任务主要依赖空对地视距链路,非视距分量通常被视为干扰,因此需通过波束成形、发射功率动态调整与轨迹协同规划等跨层优化手段,以提升感知信噪比与系统整体效能。

2.3 控制功能

在低空数智网体系中,控制功能作为融合感知与通信的核心枢纽,是实现无人机集群安全、高效、协同运行的关键支撑。从系统架构来看,低空控制功能主要涵盖两大维度:一是面向空域运行安全的低空空域智能管控,二是面向任务协同的多无人机自主协作控制。前者是当前制约低空经济规模化发展的瓶颈所在,后者则直接决定了无人机集群在复杂场景下的任务执行能力。

2.3.1 低空空域智能管控

当前,我国低空空域运行仍处于粗放式管理阶段,尚未形成"感知—通信—控制"的全链路闭环管控体系。具体表现为:对非合作无人机缺乏有效的探测与干预手段;对合作无人机仅能获取其滞后上报的位置信息,难以验证其真伪;同时也缺乏将管控指令实时、可靠下达至无人机或飞手的通信机制。为破解上述难题,业界提出构建独立于现有直通通信链路之外的专用低空飞行管控网络,通过将管控信道与运营服务网络在逻辑或物理层面进行分离,实现对空域内各类飞行目标的统一监管与干预。该机制将运行安全管理嵌入到无人机、飞手与运营方之间,形成覆盖全域的"飞行—监视—管控"数

表2 协作式主动感知与非协作式被动感知

Table 2 Cooperative Active Perception vs. Non-cooperative Passive Perception

	协作式主动感知	非协作式被动感知
目标对象	合法的、协作的无人机	非法的、非协作的无人机
工作模式	无人机响应基站的感知请求,并主动反馈信息(如传感器数据、信道状态);能够获取丰富且高质量的内部状态信息(如精确位置、姿态、传感器读数),便于全局管控和高效调度	基站单向地侦听、分析来自无人机的反射/散射信号(如雷达回波);无需目标配合,具备隐藏侦查能力,是应对"黑飞"等安全威胁的关键技术
主要挑战	无人机机载处理能力与电源有限,需优化信息反馈策略以降低其能耗	低空无人机雷达反射截面小,且其低速/悬停特性易与静态杂波、鸟类混淆,探测与识别难度大
关键技术	多模态信息融合、高效的信道估计与数据压缩、协同决策	雷达信号处理、微多普勒特征分析(用于区分飞行器旋翼与鸟类翅膀的独特运动特征)、动目标检测

字纽带,一方面降低对单一制造商或运营商的依赖,另一方面大幅压缩从异常识别到指令执行的整体响应时间,从而显著提升空域运行的安全冗余。

在技术演进层面,低空飞行管控正经历从传统通航模式向“感知—通信—控制”一体化闭环管控的范式跃迁[35]。该闭环以多源感知实时采集空域状态,通过高可靠通信网络传输融合数据,由智能管控平台生成决策指令,并借助执行反馈触发新一轮感知循环[36,37],从而实现对合作无人机精细化控制(如悬停、返航、改航等指令的秒级响应)以及对非合作目标的快速定位与软性干预(如电磁压制、导航诱骗)。在此过程中,基于北斗网格位置码、城市信息模型与网格地图构建的数字空域底座[38]为空域资源的精细化划分、动态流量调度与全周期管理提供了基础支撑,结合气象评估、航路监测、计划审批与航迹跟踪等功能模块,形成了从飞行前审批到飞行中监控的全流程可编程空域管理能力。

2.3.2　多无人机自主协作控制

在无人机协同任务控制中,由于无人机平台在体积、载重与成本方面的严格限制,其控制系统需在有限资源下实现协同轨迹规划、目标定位、编队飞行与实时避障等完整功能,这对控制算法的轻量化与计算经济性提出了极高要求。在此背景下,多智能体强化学习已成为提升集群智能的关键路径。代表性算法如MADDPG[39]与MAPPO[40]通过多机之间的环境交互与策略协同,在不依赖预设规则的情况下实现复杂环境下的自主决策与协同控制,逐步成为支撑大规模无人机集群闭环智能的核心使能技术。

进一步地,网络化控制作为协同控制的高级形态,将传统“感知—通信—控制”闭环从单机或局部系统扩展至全域多节点协同体系。其核心在于通过可靠的通信网络将分布式的无人机节点连接为一个整体控制系统,实现集群状态的实时交互与统一调度[41-43]。相较于单机控制,网络化控制面向跨空域、多任务的协同场景,对感知的时效性、通信的可靠性及控制的稳定性提出了更严苛的要求。面向多样化的应用场景,网络化控制也需适配差异化的性能需求:应急救援强调毫秒级响应与网络快速重构,物流/巡检侧重高并发接入与吞吐优化,农林监测则聚焦广域覆盖与能效平衡[44-46]。因此,当前研究致力于构建可重构的网络化控制架构,深度融合异构资源管理、服务质量保障与智能调度机制,赋能大规模无人机的全时空智能管控。

2.3.3　信息与控制融合的理论难题

随着无人机从单机运行向大规模集群协同演进,传统控制方法在系统建模、信息交互和稳定性保障等方面面临深刻的理论挑战。这些挑战的核心在于如何实现通信、感知与控制三大功能的深度融合,以应对低空复杂动态环境下的协同控制需求。

三维动态环境下的闭环控制建模挑战:无人机在低空飞行时,其空间位置、通信连接与感知范围始终处于实时变化中,形成了动态演化的三维拓扑结构。传统基于固定拓扑或理想化信道的控制模型难以有效刻画该类系统的行为特征。为此,需构建融合空间运动、通信质量与感知状态为一体的联合动力学模型,将无人机运动学、无线信道特性与多模态感知数据统一描述为随时间演化的三维随机过程,以实现对系统动态行为的精确建模与闭环控制。

信息—控制耦合关系的建模难题:在无人机集群系统中,各节点的控制决策高度依赖于来自其他无人机与地面网络的信息,形成“信息—控制耦合”机制。该机制中,信息传输的时延、误差与丢失将直接影响控制系统的稳定性和安全性,甚至引发连锁性失控风险。信息新鲜度作为衡量信息时效的关键指标,其与控制系统的收敛性能密切相关—信息的时效性直接制约着控制回路的收敛性能。在多智能体强化学习等分布式决策框架中,非理想信道条件下智能体间的策略信息交互可能引入偏差,影响群体协作策略的收敛性与均衡质量。

通信约束下的系统稳定性理论:实际低空环境中存在的信号干扰、数据丢包与随机时延等问题,严重影响控制系统的精确性与稳定性。为此,需发展融合通信约束的控制系统稳定性理论,建立时延、丢包等通信参数与系统稳定域之间的量化关系。同时,语义通信等新兴传输范式以“语义”为单位进行信息交互,需重新界定语义保真度与系统控制性能之间的理论关系,探索语义层面不失真条件下的控制性能极限。

3　关键使能技术及验证平台

为应对低空复杂环境中高维资源分配、动态感知与确定性控制等挑战,通感一体化、语义通信、多模态信息融合等使能技术成为关键支撑。通感一体化通过资源共享提升频谱效率与感知能力;语义通信从传输比特转向传输语义,增强通信的任务适配性与抗干扰能力;多模态信息融合则通过异构数据协同提升环境理解的完整性与鲁棒性。这些技术共同推动低空系统向智能化、网联化与协同化方向发展,构建起通信、探测、定位与管控一体化的低空经济运行支撑体系。

3.1　通感一体化技术

作为5G-A与6G的核心方向,ISAC通过统一硬件与共享波形,实现通信与感知的本质性融合。系统基于

OFDM等波形解析回波信号,在实现厘米级定位、环境测绘等功能的同时,显著提升通信性能:波束赋形更精准、信令开销降低30%以上,并构建“感知—通信—控制”闭环增强机制。通过硬件层融合,系统有效降低异构设备交互开销,将关键控制时延压缩至毫秒级,支持无人机实时避障与敏捷机动。当无人机作为待感知目标时,通感一体化基站成为实现低空目标探测、识别、轨迹跟踪及辅助避障等应用的关键技术支撑。而当无人机作为空中锚点时,其视距传输优势、三维机动性与可重构组网能力,使其成为理想的通感一体平台[47]。典型应用包括实时信道知识图谱构建、低空安防与无人机监管、广域地面目标探测识别、立体化协同定位与应急组网等。表3总结了低空智联网中通感一体化技术研究现状。

通感一体化技术的性能边界受限于频谱资源、硬件能力与环境复杂性。在频谱资源方面,虽然共享频谱提高了效率,但也带来了通信与感知之间的干扰管理难题。在感知精度方面,城市复杂环境的多径效应和遮挡会显著降低定位精度。此外,通感一体化还面临广域立体覆盖不足、感知可信性不足以及系统性技术指标缺乏等挑战。

3.2 语义通信技术

语义通信作为一种以“达意”为核心的新型通信范式,突破了传统香农框架下“可靠传输比特”的局限,将通信重点从比特级的无差错还原转向对信息语义的准确理解与任务导向的重建[57]。其核心在于通过增强通信终端对传输信息的语义理解与推理能力,即使在数据传输存在部分误差的情况下,仍能实现信息含义的准确传达,从而显著提升在强对抗、恶劣通信环境中的传输效率与可靠性。面向大规模无人机集群的低空数智网,语义通信通过提取关键语义信息、实现意图驱动的智能传输,为应对海量数据与动态环境挑战提供了创新解决方案。

在协同作业过程中,无人机集群产生的感知数据量巨大,但其中有价值的信息密度有限。语义通信通过理解任务意图与环境语义,对多源数据进行特征提取与重要性筛选,仅传输与决策相关的关键信息,从而实现从“全量传输”到“价值驱动”的根本转变,显著降低数据传输负荷。同时,面对低空无线环境与无人机轨迹的动态变化,语义通信通过融合环境感知与语义理解机制,能够辨识场景态势并对信道条件做出自适应响应。借助语义编码与鲁棒传输技术的结合,系统在信道波动时仍能保障关键语义内容的可靠可达,维持任务级通信的连续性与有效性,显著增强在复杂场景下的整体鲁棒性。

鹏城实验室在此方向开展了示范性探索,提出基于语义模型增量更新与自适应传输的技术路径,并研制出

表3 低空数智网中通感一体化技术研究现状

Table 3 Current Research Status of Integrated Sensing and Communication Technology in Low-altitude Digital Intelligence Networks

文献	研究重点	研究内容
[48]	提出基于通感一体化的车—无人机协同感知架构	在无人机辅助的V2X网络中实现高效的多传感器数据融合,最终达到降低能耗和处理时延的目的
[49]	5G-A通感一体基站组网低空感知	探讨如何利用5G-A通感一体基站组网,解决城市环境下对低空无人机的检测、追踪与识别难题,分析组网架构和协同处理等核心技术
[50]	面向蜂窝联网无人机网络的感知、通信与控制的集成调度。	将感知—通信—控制进行一体化联合设计与调度,从而在保证无人机控制性能的同时,满足毫米波/太赫兹通信的高数据速率需求。
[51]	无人机使能的ISAC系统多目标跟踪	提出基于网络孪生的分布式跟踪算法,通过实时更新优化训练数字模型实现多目标跟踪,整合感知与通信资源,率先实现了低通信能耗的分布式协同跟踪模式
[52]	无人机使能的ISAC系统轨迹规划与资源分配	针对无人机使能的通感一体化系统,研究协同轨迹规划与资源分配,以提升通信与感知的整体性能
[53]	无人机辅助物联网综合感知与通信,三维轨迹优化与资源分配	提出面向物联网的无人机辅助综合ISAC系统,该系统同时感知物联网周围的状态信息,并将感知信息发送到物联网节点和数据采集中心,从而提高感知性能
[54]	低空经济网络化ISAC中的发射波束成形与无人机轨迹设计	研究面向低空经济场景,通过联合优化网络化通感一体化系统中的协同波束成形与无人机轨迹,旨在保障空域感知性能的同时最大化授权无人机的通信速率
[55]	多基站协同感知低空 UAV 目标	提出一种两阶段协作式通感方案,通过结合基于张量分解的单站参数估计与跨多站的数据融合技术,旨在提升对低空无人机的感知性能
[56]	单站 ISAC 基站对低空 UAV 目标进行 3D 轨迹跟踪	提出一种面向低空无人机监管的6G通感一体化跟踪方法,该方法在无迹卡尔曼滤波(UKF)框架下,通过融合插值与匀速模型来预测和补偿由视线遮挡造成的轨迹丢失,以实现对目标的持续跟踪

“智简”语义通信样机。该系统的算力需求仅为传统方法的15%,使无人机监控数据的机载实时处理成为可能;同时,传输数据量较传统方式减少70%,有效缓解了低空通信网络的带宽压力。表4总结了低空数智网中语义通信技术研究现状。

语义通信在低空智联中的发展仍面临两大核心挑战。首先,语义理解模型通常基于复杂神经网络,在无人机等资源受限终端上部署时,受到算力、存储与功耗的严重限制,模型轻量化与嵌入式优化成为规模化应用的关键。其次,低空环境动态多变,语义模型需具备对未知场景、任务及干扰的强泛化能力。当前模型多在限定场景下训练,面对真实环境中多变的物体、背景与信道条件时,其语义表征与推理稳定性面临严峻考验。提升模型的跨场景适应与持续学习能力,是推动语义通信走向工程实用的重要方向。

3.3　多模态信息融合技术

低空数智网所采集的数据类型丰富,涵盖频谱感知数据、定位信息、气象与环境参数,以及图像、视频与点云等,共同构成低空飞行智能决策与协同控制的信息基础[63-65]。在传感设备层面,无人机依赖机载多模态传感器实现环境感知与状态估计,典型配置及其特性如下:视觉传感器成本低、功耗小,提供丰富纹理与语义信息,但在弱光与恶劣气象下性能受限[66,67];激光雷达(LiDAR)可获取高精度三维点云,实现精确测距与高保真建图,但成本高且易受大气颗粒物影响[68,69];毫米波雷达具备全天候工作能力,穿透性强,可测距测速,但角分辨率较低。惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,IMU)提供高频自运动状态估计,适用于短时定位,但存在累积漂移,需多传感器融合以提升长期稳定性。多种传感器所采集的数据在格式、维度、物理属性及语义层次上存在显著差异,构成高度异构的多模态数据生态,导致原始数据可解释性差、信息孤岛问题突出。因此,构建统一的多模态数据表征与融合机制,成为释放感知系统整体效能的关键。

多模态融合旨在通过信息互补与协同推理,构建对低空环境与飞行状态的一致、全面、实时认知,有效弥补单一模态的物理局限,在复杂环境下维持鲁棒的环境建模与目标识别能力。该机制支撑构建统一的时空语义地图,为无人机密集编队、动态避障与协同搜索等群体智能应用提供跨平台、可互操作的数据基础。当前,传统方法(如卡尔曼滤波、图优化)与深度学习融合技术并行发展[70];未来,跨节点分布式智能模型将推动在无人机集群及空地节点间实现高效感知共享与参数融合,从而突破单节点感知视界,构建全局协同的态势认知基座。表5展示了低空数智网中多模态融合技术发展现状。

多模态融合感知在低空数智网中的部署仍面临多重技术挑战。首先,异构数据的时空对齐难度显著:不同传感器在采集频率、坐标系和观测视角上存在差异,无人机高速运动下如何实现LiDAR点云、图像帧与雷达数据的精准时空同步与坐标统一,成为融合有效性的首要瓶颈。其次,跨模态语义统一与关联建模复杂:需将不同粒度的语义信息映射至统一语义空间,并建立其间的物理与逻辑关联,依赖复杂的跨模态表征学习,模型构建与训练难度高。第三,计算复杂度与资源约束之间存在矛盾:多模态融合属计算密集型任务,而低空应用对时延极为敏感,在机载算力受限条件下,如何设计轻量化、低功耗的融合推理模型,并实现边缘与云端的高效任务协同,是工程落地的关键挑战。

3.4　通感一体验证平台

尽管通感一体关键技术研究进展显著,高昂的大规

表4 低空数智网中语义通信技术研究现状

Table 4 Research Status of Semantic Communications Technology in Low-altitude Digital Intelligence Networks

文献	研究重点	研究内容
[58]	联邦学习驱动的无人机群语义增强协同通信	提出一种由联邦学习驱动的语义通信框架,让分布式 UAV 群通过共享语义特征而非原始数据实现高效、可靠、低开销的协同决策,在动态环境下提升群体任务执行能力
[59]	基于图注意力交换的多智能体强化学习,实现 UAV 语义通信下的实时 URLLC 控制	提出图注意力交换网络让多架无人机在交换注意力权重的同时进行协同轨迹与功率控制,从而在避免碰撞的前提下显著降低时延并提升语义通信可靠性
[60]	多无人机协同网络中的多模态语义感知资源智能分配	构建多模态语义通信 + 多UAV中继协作框架,将轨迹、带宽、功率和语义符号数的联合优化建模为资源分配问题,并通过多UAV混合动作深度强化学习实现兼顾语义体验与传输开销的智能资源调度
[61]	混合动作强化学习驱动的无人机辅助语义通信资源协同优化	引入一架 UAV 作为语义通信中继,构建离散+连续混合动作的深度强化学习框架,联合决策语义模型规模、信道分配、发射功率和 UAV 轨迹,以在保证重构质量的前提下最小化采集时延并兼顾能耗
[62]	抗干扰下 UAV 语义通信与边缘计算一体化的智能资源管理	通过深度强化学习联合优化无人机轨迹、用户关联和信道选择,自适应对抗干扰、提升语义任务卸载与传输效率

表5 低空数智网中多模态信息融合技术发展现状

Table 5 Research Status of Multimodal Fusion Technology in Low-altitude Digital Intelligence Networks

文献	研究重点	研究内容
[71]	融合历史轨迹、雷达点云、环境图像,生成统一环境状态表征	利用一种基于Transformer的多模态感知融合网络,提前预测未来的最优波束,以解决低空无人机通信中因高速移动和复杂环境导致的波束失准难题
[72]	射频+雷达+光电+多传感器融合的低空安防一体化管控系统	提出一种融合射频、雷达与光电信息的多模态 UAV 感知与反制方法,实现了对低空无人机的精准识别定位并构建端到端安防处置闭环
[73]	声光融合的城市低空无人机目标检测框架	提出基于声学阵列 DOA 与视觉检测结果联合决策的声光融合方法,实现了在弱光和遮挡场景下对低空无人机目标的高鲁棒检测
[74]	面向低空场景的多模态通感一体数据集构建与联动建模	提出一套对齐 RGB、深度、LiDAR 与无线信道信息的低空多模态数据构建方法,实现了为通感一体与信道预测算法提供统一训练与评测基准的数据支撑

模硬件实验成本仍阻碍复杂场景下的宏观性能验证。现有成果多聚焦碎片化创新(如独立波形设计),缺乏跨场景通信性能评估与节点级统计,亟需统一系统验证平台。为此,本文提出多节点蜂窝—雷达深度集成仿真框架,如图2所示,其创新架构包含四维协同模块。异构环境生成层:融合道路网络、城市区块与目标行为建模,构建轨迹驱动的动态场景;资源紧耦合层:基于时频资源动态调度与帧结构优化,实现通信—感知功能协同;可扩展处理层:支持定制化感知链路与雷达处理单元,兼容多信道模型与信号算法;双域评估层:采用标准化KPI体系并行分析通信性能(包延迟/吞吐量/误块率)与感知精度(检测概率/状态估计误差)。该框架通过参数化虚拟测试环境与蜂窝仿真内核,高效生成目标轨迹及网络拓扑,其扩展接口增强主动感知与跨平台协同能力。研究证实,此结构化范式为硬件设计提供优化导向[75]。

5G/6G向通信—感知融合演进驱动毫米波频段成为高精度感知的核心载体。本文基于5G新空口(New Radio Air Interface,NR)帧结构构建时分复用ISAC架构,通过共享基带处理、射频组件及天线阵列实现信号级深度集成,如图3所示。面向低空安防场景,系统支持实时无人机轨迹追踪与非合作目标检测,为空域智能管控提供紧耦合解决方案[76]。系统架构涵盖上行/下行基带信号处理单元、中频调制模块及26 GHz射频前端与天线子系统。ISAC功能通过共享波形结构与时频资源实现:通信协议严格遵循商用5G标准,采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)波形;感知功能则基于定制化OFDM波形设计,将特定频域感知样本嵌入OFDM资源格的子载波中。该方案可在保障通信性能前提下实现感知符号的灵活调制,并通过动态调整资源格内感知符号的时域分布与密度,达成通信性能与感知精度的弹性权衡。接收端基带处理模块将目标反射信号解调至资源格实施感知符号提取,经二维快速傅里叶变换(2D-FFT)解析目标距离—速度参数,并完成目标成像与微多普勒特征解析。

针对典型低空无人机探测,如图4所示,现场测试部署2个ISAC 基站(Base Station,BS)。sub-6 GHz基站用

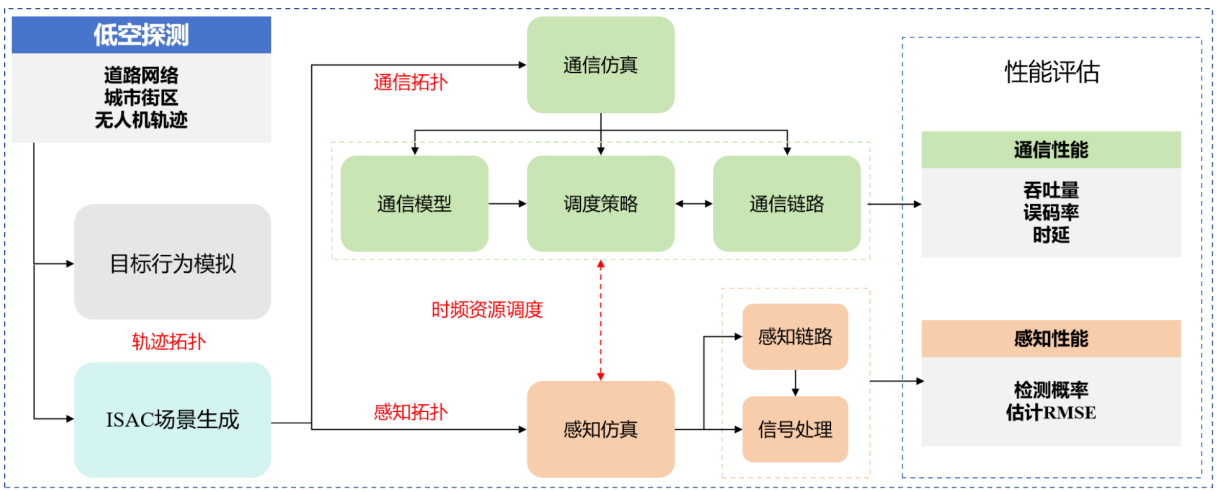


图2 通感一体验证平台

Fig.2 Integrated Sensing and Communication Verification Platform

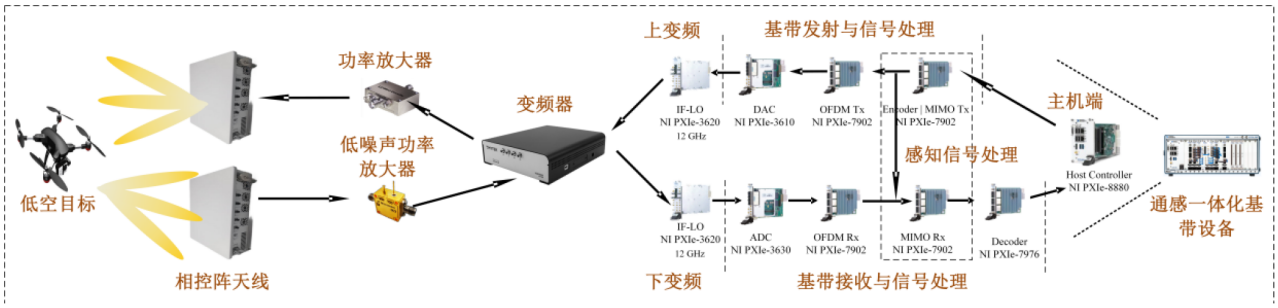


图3 多节点蜂窝通信与基站赋能的雷达感知深度集成系统级仿真框架

Fig.3 System-level Simulation Framework for Deeply Integrated Multi-node Cellular Communication and Base Station-empowered Radar Sensing

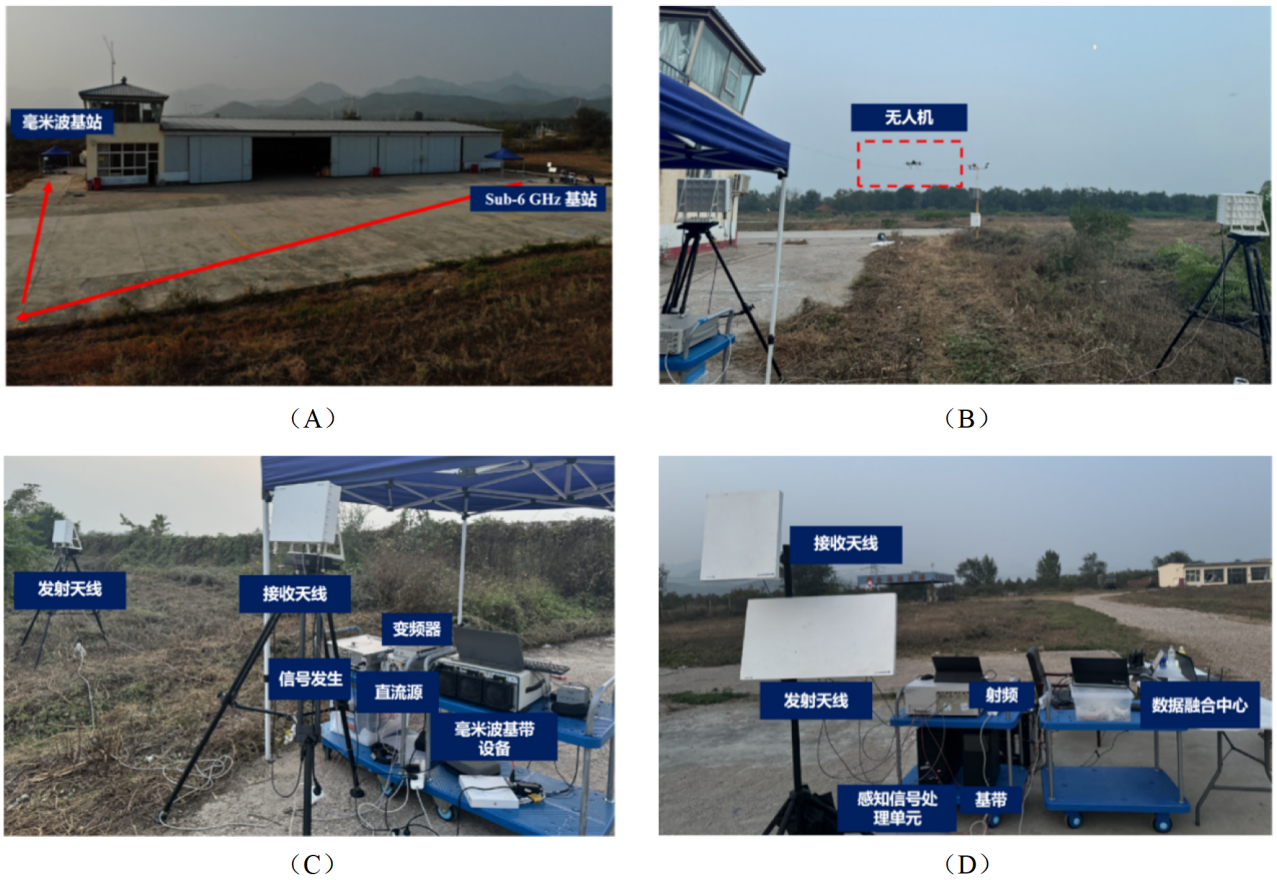
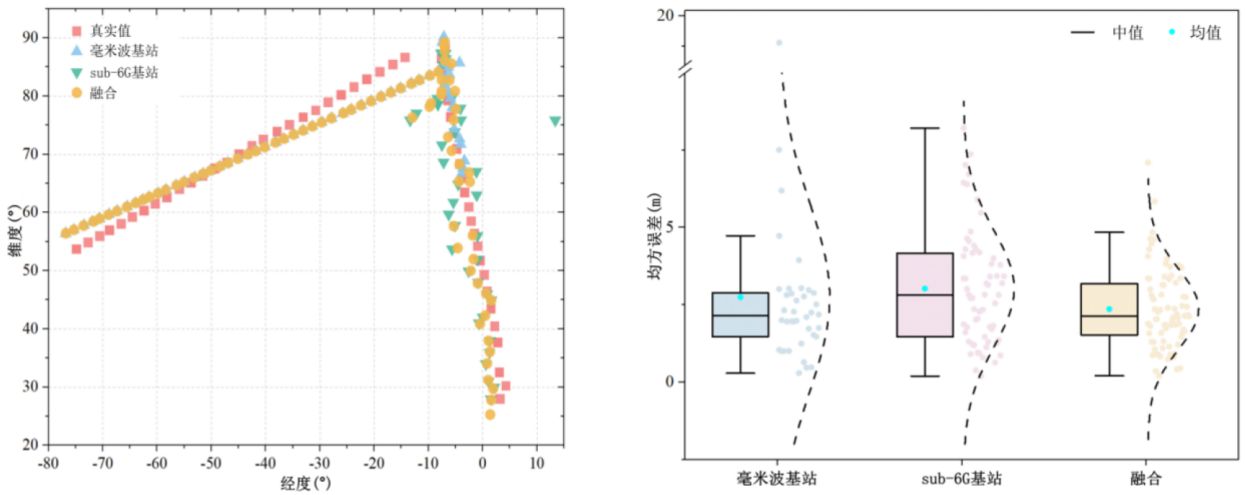


图4 低空无人机探测

Fig.4 Low-altitude UAV Detection

于广域感知,工作在3.75 GHz,带宽为100 MHz,有效各向同性辐射功率(EIRP)为46 dBm;mWave BS用于近距高分辨率探测,工作频率为26 GHz,带宽为800 MHz,EIRP为55 dBm。两种系统都使用嵌入子载波雷达采样的OFDM波形进行感知—通信集成。将两个ISAC平台的感知结果进行融合,形成目标无人机的观测轨迹。实验采用RCS特性小于0.1 m^2的大疆M300无人机目标进行验证。无人机在500米范围内以1~5米/秒的速度运行。

当目标最初向北移动时,只有sub-6 GHz的基站才能检测到它。当进入重叠覆盖区域时,基站参与协作感知。当无人机向东移动时,由于城市障碍物对sub-6 GHz基站的影响,毫米波基站成为主要检测器。集中式处理器融合多站数据,生成统一的无人机航迹。利用地面真实GPS轨迹对系统性能进行了评估。根据3GPP TR22.837标准,误差小于10米的位置为有效位置。如图5A所示,采样的80个轨迹点均满足此条件。图5B表明,Sub-6 GHz BS的平均误差为2.5 m,毫米波BS为3.5 m,融合估计仅为2.0 m。实验结果表明,毫米波基站与Sub-6 GHz基站的融合增强了部分干扰下的跟踪鲁棒性和连续性。该案例研究证实了密集城市环境下基于ISAC的



（A）无人机航机 （B）不同频段感知精度

图5 多频段协同感知硬件测试结果

Fig.5 Multi-band Collaborative Sensing Hardware Test Results

多频率协同感知的可行性和优越的精度。该系统可应用于低空交通管理、城市安全、军事侦察、灾害响应等领域。

4 未来多学科交叉发展目标

低空数智网作为“通信—感知—控制”多域深度耦合的信息物理系统，其构建与演进具有本质的多学科交叉属性。为支撑国家空域安全、低空经济与智慧城市战略需求，其发展亟需突破单一学科局限，深度融合“信息论—系统论—控制论”基础理论体系。这种理论层的创新融合是催生低空智能新范式、构建完整技术生态的前提，最终形成从前沿理论突破到规模应用的闭环演进链路。

4.1 交叉学科导向：构建“信息—系统—控制”融合的研究范式

低空数智网的发展，其理论瓶颈在于传统单一学科范式的局限性，亟需构建一个以“信息—系统—控制”为核心的融合研究范式。此范式旨在从系统论的宏观整体性视角，审视大规模无人机网络的群体行为与涌现规律，并指导网络在不同粒度下的有效抽象与建模。在此基础上，运用控制论的原理，定义任务驱动下的网络化闭环运行目标与稳定性条件，并探究动态环境下资源受限系统的最优控制策略。最终，借助信息论的数学工具，对维系该闭环系统所需的、通感控高度耦合的信息流进行精确量化与表征。该融合范式的核心目标是构建一种面向智能机器网络的系统级信息理论，以揭示信息物理世界深度交互过程中的内在耦合机理，为构建下一代智能通信网络架构提供根本性的理论指导。这一研究方向的确立，必然要求建立跨学科的协同攻关机制，并推动科教融合与产教协同的人才培养模式的深层变革。

4.2 行业大模型：构建面向低空任务的多模态智能基础模型

人工智能基础模型在低空领域面临实时高动态环境的独特挑战，需满足毫秒级响应、计算轻量化及强环境适应性等严苛要求，这驱动了“云—边—端”协同分布式智能架构的发展。其技术路径聚焦三方面：领域专用模型开发：超大规模多模态基础模型（Large Language Model，LLM）在云端完成训练与全局推理，经模型蒸馏与量化压缩后部署至边缘端及无人机终端，实现飞行行为理解、多模态感知融合等任务定向优化；结构化知识注入：通过知识图谱技术[77]将空域法规、地理气象等先验知识嵌入模型训练与推理流程，提升决策合规性与可靠性；评估体系构建：建立涵盖安全性（对抗攻击鲁棒性）、可解释性（决策溯源）及泛化能力（跨场景迁移）的评测基准，亟需开发反映低空复杂性的权威数据集。

4.3 产学研用：推动低空技术从理论验证走向规模应用

低空数智网的规模化价值实现遵循“标准—示范—推广”三阶路径。首先标准体系筑基，主导国际国内标准制定（如3GPP通感控一体化协议），规范空口接口、信令流程及安全认证框架，构建产业互联互通的技术共识，规避碎片化风险；接着示范场景验证，在国家级示范区开展高价值场景验证，城市物流聚焦无人机集群峡谷环境协同导航，基础设施巡检验证多模态感知微小缺陷识别，应急通信检验网络自组织与灾毁环境鲁棒性，积累技术迭代与商业推广实证[78]；最后生态化规模部署，

当专用芯片成本下降至商用阈值、空域法规体系完善后,低空数智网将作为新型基础设施融入城市体系,实现物流效率提升、社会治理成本降低的经济社会双维价值转化。

5 结 语

低空数智网作为支撑低空经济战略性发展的新型数字基座,其构建标志着空域治理范式从传统通航管理向智能化、网络化、全域化的历史性跃迁。本文系统论证了低空大规模无人机网络化管控的理论挑战与技术路径:在理论层面,突破传统信息论的局限,构建通感导控内生耦合的信息—控制融合框架,为高密度动态拓扑下的群体协同奠定数理基础;在架构层面,提出“通信—感知—控制”深度集成的闭环体系,以通感控一体化为核心引擎,显著压缩闭环时延,赋能毫秒级精准协同;在技术层面,通过空空/空地通信、多源感知融合、网络化智能控制等使能技术,攻克“难感知、难协同、难管控”的瓶颈。未来发展的核心在于多学科深度交叉融合—需进一步打通信息论、系统论与控制论的理论壁垒,构建面向智能机器网络的广义信息模型。

参 考 文 献

[1] Ma L,Lin B,Zhang W,et al. A survey of research on the distributed cooperation method of the UAV swarm based on swarm intelligence// 2022 IEEE 13th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). Beijing,China. IEEE,2022:305—309.

[2] 沈惠章,张元. 无人机入侵机场及其警方管控. 西部公安论坛,2018,16(3):56—62.
Shen HZ,Zhang Y. UAV Invasion of the airport and its police control. Journal of Western Public Security. 2018,16(3):56—62. (in Chinese)

[3] Hossein Motlagh N,Taleb T,Arouk O. Low-altitude unmanned aerial vehicles-based Internet of Things services:Comprehensive survey and future perspectives. IEEE Internet of Things Journal,2016,3(6):899—922.

[4] ITU D. Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace: Tech. Rep. M. 2171,Geneva,2009.

[5] Yin SX,Yu FR. Resource allocation and trajectory design in UAV-aided cellular networks based on multiagent reinforcement learning. IEEE Internet of Things Journal,2022,9(4):2933—2943.

[6] 吴启晖,董超,贾子晔,等.低空智联网组网与控制理论方法.航空学报,2024,45(3):6—23.
Wu QH,Dong C,Jia ZY,et al. Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2024,45(3):6—23.(in Chinese)

[7] Hu B,Wang L,Chen SZ,et al. An uplink throughput optimization scheme for UAV-enabled urban emergency communications. IEEE Internet of Things Journal,2022,9(6):4291—4302.

[8] Fei SP,Hassan MA,Xiao YG,et al. UAV-based multi-sensor data fusion and machine learning algorithm for yield prediction in wheat. Precision Agriculture,2023,24(1):187—212.

[9] Mokhtari A,Ahmadi A,Daccache A,et al. Actual evapotranspiration from UAV images:A multi-sensor data fusion approach. Remote Sensing,2021,13(12):2315.

[10] Veedu SNK,Mozaffari M,Höglund A,et al. Toward smaller and lower-cost 5G devices with longer battery life:An overview of 3GPP release 17 RedCap. IEEE Communications Standards Magazine,2022,6(3):84—90.

[11] He DX,Yuan WJ,Wu J,et al. Ubiquitous UAV communication enabled low-altitude economy:Applications,techniques,and 3GPP's efforts. IEEE Network,2026,40(1):115—122.

[12] Song MS,Lin YJ,Wang JC,et al. Trustworthy intelligent networks for low-altitude economy. IEEE Communications Magazine,2025,63(7):72—79.

[13] Wang Y,Sun G,Sun Z,et al. Toward realization of low-altitude economy networks:Core architecture,integrated technologies,and future directions. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking,2025.

[14] Qin SH,Peng LX,Xu RH,et al. Performance analysis of multi-hop flying mesh network using directional antenna based on β-GPP. Drones,2023,7(5):335.

[15] Sharma A,Vanjani P,Paliwal N,et al. Communication and networking technologies for UAVs:A survey. Journal of Network and Computer Applications,2020,168:102739.

[16] Opromolla R,Fasano G,Accardo D. A vision-based approach to UAV detection and tracking in cooperative applications. Sensors,2018,18(10):3391.

[17] Walker M,Dahle GA. Literature review of unmanned aerial systems and LIDAR with application to distribution utility vegetation management. Arboriculture & Urban Forestry,2023,49(3):144—156.

[18] Ma ZF,Ai B,He RS,et al. A wideband non-stationary air-to-air channel model for UAV communications. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2020,69(2):1214—1226.

[19] Luo G,Li J,Zhang Q,et al. Toward low-altitude airspace management and UAV operations:Requirements,architecture and enabling technologies. IEEE Wireless Communications,2025.

[20] Tian YL,Lin F,Li YD,et al. UAVs meet LLMs:Overviews and perspectives towards agentic low-altitude mobility. Information Fusion,2025,122:103158.

[21] Qin P,Wu X,Ding R,et al. Joint resource allocation and UAV trajectory design for D2D-assisted energy-efficient air–ground integrated caching network. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2024,73(11):17558—17571.

[22] Jiang YH,Li XY,Zhu GX,et al. Integrated sensing and communication for low altitude economy:Opportunities and challenges. IEEE Communications Magazine,2025,63(12):72—78.

[23] Meng KT,Wu QQ,Xu J,et al. UAV-enabled integrated sensing and communication:Opportunities and challenges. IEEE Wireless Communications,2024,31(2):97—104.

[24] Wu J,Yuan WJ,Tao Q,et al. Aerial-networked ISAC-empowered collaborative energy-efficient covert communications. Chinese Journal of Aeronautics,2025,38(10):103451.

[25] Zhang JF,Lu WD,Xing CW,et al. Intelligent integrated sensing and communication:A survey. Science China Information Sciences,2024,68(3):131301.

[26] Zhang D,Cui Y,Cao X,et al. Integrated sensing and communications over the years:An evolution perspective. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2026.

[27] Sinha P,Guvenc I. Impact of antenna pattern on TOA based 3D UAV localization using a terrestrial sensor network. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2022,71(7):7703—7718.

[28] 陈小龙,陈唯实,饶云华,等. 飞鸟与无人机目标雷达探测与识别技术进展与展望. 雷达学报,2020,9(5):803—827.
Chen XL,Chen WS,Rao YH,et al. Progress and prospects of radar target detection and recognition technology for flying birds and unmanned aerial vehicles. Journal of Radars,2020,9(5):803—827. (in Chinese)

[29] Musa SA,Rsa RA,Sali A,et al. DVBS based forward scattering radar for drone detection. 2019 20th International Radar Symposium (IRS). Ulm,Germany. IEEE,2019:1—8.

[30] McGuire K,De Croon G,De Wagter C,et al. Efficient optical flow and stereo vision for velocity estimation and obstacle avoidance on an autonomous pocket drone. IEEE Robotics and Automation Letters,2017,2(2):1070—1076.

[31] Yang X,Chen JY,Dang YJ,et al. Fast depth prediction and obstacle avoidance on a monocular drone using probabilistic convolutional neural network. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2021,22(1):156—167.

[32] Chen MX,Cheng PR,Li XM,et al. Drones help drones:A collaborative framework for multi-drone object trajectory prediction and beyond. Advances in Neural Information Processing Systems 37. Vancouver,BC,Canada. Neural Information Processing Systems Foundation,Inc. (NeurIPS),2024:64604—64628.

[33] Wang SJ,Jiang F,Zhang B,et al. Development of UAV-based target tracking and recognition systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2020,21(8):3409—3422.

[34] Adoni WYH,Lorenz S,Fareedh JS,et al. Investigation of autonomous multi-UAV systems for target detection in distributed environment:current developments and open challenges. Drones,2023,7(4):263.

[35] Pongsakornsathien N,Safwat NED,Xie Y,et al. Advances in low-altitude airspace management for uncrewed aircraft and advanced air mobility. Progress in Aerospace Sciences,2025,154:101085.

[36] Guan XM,Shi HX,Xu DS,et al. The exploration and practice of low-altitude airspace flight service and traffic management in China. Green Energy and Intelligent Transportation,2024,3(2):100149.

[37] Feng OG,Zhang HH,Tang WB,et al. Digital low-altitude airspace unmanned aerial vehicle path planning and operational capacity assessment in urban risk environments. Drones,2025,9(5):320.

[38] Wu J,Luo CB,Luo Y,et al. Distributed UAV swarm formation and collision avoidance strategies over fixed and switching topologies. IEEE Transactions on Cybernetics,2022,52(10):10969—10979.

[39] Santos Rabelo MF,Santos Brandão A,Sarcinelli-Filho M. Landing a UAV on static or moving platforms using a formation controller. IEEE Systems Journal,2021,15(1):37—45.

[40] Kumar Ranjan P,Sinha A,Cao YC,et al. Relational maneuvering of leader-follower unmanned aerial vehicles for flexible formation. IEEE Transactions on Cybernetics,2024,54(10):5598—5609.

[41] Wu JH,Li DY,Yu YZ,et al. An attention mechanism and adaptive accuracy triple-dependent MADDPG formation control method for hybrid UAVs. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2024,25(9):11648—11663.

[42] Wei DX,Zhang L,Liu Q,et al. UAV swarm cooperative dynamic target search:A MAPPO-based discrete optimal control method. Drones,2024,8(6):214.

[43] Lee MY,Chen BS,Tsai CY,et al. Stochastic H_∞ robust decentralized tracking control of large-scale team formation UAV network system with time-varying delay and packet dropout under interconnected couplings and Wiener fluctuations. IEEE Access,2021,9:41976—41997.

[44] Liu YQ,Xie J,Xing CY,et al. Access control and deployment design for multi-UAV assisted wireless networks. IEEE Wireless Communications Letters,2022,11(11):2380—2384.

[45] Zhang MK,Wu SH,Jiao J,et al. Energy- and cost-efficient transmission strategy for UAV trajectory tracking control:A deep reinforcement learning approach. IEEE Internet of Things Journal,2023,10(10):8958—8970.

[46] Li J,He Q,Wang XW,et al. UAV-assisted microservice mobile edge computing architecture:Addressing post-disaster emergency medical rescue. IEEE Transactions on Computers,2025,74(8):2635—2648.

[47] Song YX,Zeng Y,Yang YH,et al. An overview of cellular ISAC for low-altitude UAV:New opportunities and challenges. IEEE Communications Magazine,2025,63(12):88—95.

[48] Liu Q,Liang HR,Luo R,et al. Energy-efficiency computation offloading strategy in UAV aided V2X network with integrated sensing and communication. IEEE Open Journal of the Communications Society,2022,3:1337—1346.

[49] 刘斌越,杨建强,徐波,等. 5G-A通感一体基站组网低空感知关键技术. 信号处理,2025,41(5):787—806.
Liu BY,Yang JQ,Xu B,et al. Key technologies for low-altitude sensing in 5G-A integrated communication and sensing networks. Journal of Signal Processing,2025,41(5):787—806. (in Chinese)

[50] Chang B,Tang W,Yan XY,et al. Integrated scheduling of sensing,communication,and control for mmWave/THz communications in cellular connected UAV networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2022,40(7):2103—2113.

[51] Zhou LY,Leng SP,Wang Q,et al. Integrated sensing and communication in UAV swarms for cooperative multiple targets tracking. IEEE Transactions on Mobile Computing,2023,22(11):6526—6542.

[52] Pan Y,Li RG,Da XY,et al. Cooperative trajectory planning and resource allocation for UAV-enabled integrated sensing and communication systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2024,73(5):6502—6516.

[53] Liu ZC,Liu X,Liu YM,et al. UAV assisted integrated sensing and communications for Internet of Things:3D trajectory optimization and resource allocation. IEEE Transactions on Wireless Communications,2024,23(8):8654—8667.

[54] Cheng GY,Song XX,Lyu ZH,et al. Networked ISAC for low-altitude economy:Transmit beamforming and UAV trajectory design//2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Hangzhou,China. IEEE,2024:78—83.

[55] Tang J,Yu YM,Pan CH,et al. Cooperative ISAC-empowered low-altitude economy. IEEE Transactions on Wireless Communications,2025,24(5):3837—3853.
[56] Cui K,Zhao JW,He F,et al. Research on low-altitude UAV target tracking method based on ISAC. Electronics,2025,14(19):3902.
[57] Shi GM,Xiao Y,Li YY,et al. From semantic communication to semantic-aware networking:Model,architecture,and open problems. IEEE Communications Magazine,2021,59(8):44—50.
[58] Xu JQ,Yao HP,Zhang R,et al. Federated learning powered semantic communication for UAV swarm cooperation. IEEE Wireless Communications,2024,31(4):140—146.
[59] Yun WJ,Lim B,Jung S,et al. Attention-based reinforcement learning for real-time UAV semantic communication//2021 17th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Berlin,Germany. IEEE,2021:1—6.
[60] Hu H,Zhu XW,Zhou FH,et al. Resource allocation for multi-modal semantic communication in UAV collaborative networks. IEEE Transactions on Communications,2025,73(9):7599—7616.
[61] Si PY,Zhao J,Lam KY,et al. UAV-assisted semantic communication with hybrid action reinforcement learning. GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference. Kuala Lumpur,Malaysia. IEEE,2024:3801—3806.
[62] Liu S,Yang HL,Zheng MT,et al. UAV-enabled semantic communication in mobile edge computing under jamming attacks:an intelligent resource management approach. IEEE Transactions on Wireless Communications,2024,23(11):17493—17507.
[63] 董超,崔灿,贾子晔,等. 面向低空智联网的多维信息统一表征技术综述. 电子与信息学报,2025,47(5):1215—1229.
Dong C,Cui C,Jia ZY,et al. Survey of unified representation technology of multi-dimensional information for low altitude intelligent network. Journal of Electronics & Information Technology,2025,47(5):1215—1229. (in Chinese)
[64] Fonder M,Van Droogenbroeck M. Mid-air:a multi-modal dataset for extremely low altitude drone flights//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Long Beach,CA,USA. IEEE,2020:553—562.
[65] Bozcan I,Kayacan E. AU-AIR:A multi-modal unmanned aerial vehicle dataset for low altitude traffic surveillance//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Paris,France. IEEE,2020:8504—8510.
[66] Kovanič Ľ,Topitzer B,Peťovský P,et al. Review of photogrammetric and lidar applications of UAV. Applied Sciences,2023,13(11):6732.
[67] Larrat M,Sales C. Classification of flying drones using millimeter-wave radar:Comparative analysis of algorithms under noisy conditions. Sensors,2025,25(3):721.
[68] Ahmad N,Ghazilla RAR,Khairi NM,et al. Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications. International Journal of Signal Processing Systems,2013:256—262.
[69] Zhai WX,Han B,Li D,et al. A low-altitude public air route network for UAV management constructed by global subdivision grids. PLoS One,2021,16(4):e0249680.
[70] Lei C,Fang XR,Feng W,et al. Satellite-UAV networks for 6G control:A sensing-communication-computing-control closed loop perspective. IEEE Network,2025,39(4):62—69.
[71] Xie YX,Gong Y,Zhao YY,et al. MPFusionNet:Transformer-based multi-modal perception fusion for predictive beamforming in low-altitude UAV communication networks. IEEE Internet of Things Journal,2026,13(4):5517—5530.
[72] Tao Y,Gao Z,Ye FQ,et al. Intelligent multimodal multi-sensor fusion-based UAV identification,localization,and countermeasures for safe-guarding low-altitude economy. (2025-10-27)/[2025-11-15]. https://arxiv.org/abs/2510.22947.
[73] He TL,Hou JY,Chen D. Multimodal UAV target detection method based on acousto-optical hybridization. Drones,2025,9(9):627.
[74] Bai L,Sun MR,Huang ZW,et al. A new dataset for intelligent multi-modal sensing-communication integration in low-altitude scenarios. Proceedings of the ACM Turing Award Celebration Conference - China 2024. Changsha,China. ACM,2024:216—217.
[75] Du PF,Shi YQ,Cao HT,et al. AI-enabled trajectory optimization of logistics UAVs with wind impacts in smart cities. IEEE Transactions on Consumer Electronics,2024,70(1):3885—3897.
[76] Xu J,Liu X,Neiat AG,et al. A holistic and hybrid service selection strategy for MEC-based UAV last-mile delivery systems. IEEE Transactions on Services Computing,2024,17(6):3022—3036.
[77] Xiao A,Yan W,Zhang XM,et al. Multi-domain fusion for cargo UAV fault diagnosis knowledge graph construction. Autonomous Intelligent Systems,2024,4(1):10.
[78] Sun XQ,Wang S,Zhang XJ,et al. LAERACE:Taking the policy fast-track towards low-altitude economy. Journal of the Air Transport Research Society,2025,4:100058.

Theory and Key Technologies for Large-scale Unmanned Aerial Vehicle Networked Control in Low-altitude Digital Intelligence Networks

Zhiyong Feng Ying Zhou Lin Wang Danlan Huang*
Zhiqing Wei Xiyang Wang Jiapeng Li Qixun Zhang

School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract The networked control of large-scale unmanned aerial vehicles (UAVs) in low-altitude airspace is a prerequisite for the safe,efficient,and high-performance development of low-altitude information networks. However,the control

* Corresponding Author,Email:huangdl@bupt.edu.cn

efficiency and scale of traditional aviation management systems cannot meet the demands of large-scale UAV open services in the low-altitude economy. Additionally, traditional wireless communication networks based on information theory cannot achieve closed-loop control of large-scale UAVs. It is imperative to overcome theoretical and technological challenges to establish a new, safe, and efficient low-altitude digital intelligence network tailored for large-scale UAVs in low-altitude airspace. This paper will explore the theoretical challenges of integrating information theory and control theory in the construction of a low-altitude digital intelligence network, as well as key technologies such as closed-loop information flow interaction and networked control for large-scale UAV management. It will also propose a new approach for constructing a ubiquitous low-altitude digital intelligence network and introduce a cross-domain collaborative low-altitude flight management method to support real-time information interaction and efficient intelligent control of large-scale low-altitude UAVs.

Keywords low-altitude digital intelligence network; large-scale UAVs; networked control and management; closed-loop information exchange; low-altitude economy

冯志勇 教授、博士生导师，北京学者，北京邮电大学信息与通信工程学院院长，泛网无线通信教育部重点实验室主任。主持国家自然科学基金青年科学基金项目(A类)等。获国家技术发明奖二等奖、教育部科技发明奖一等奖、北京市科技进步奖一等奖、中国通信学会技术发明奖一等奖等奖项。

黄丹蓝 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授，主持国家自然科学基金青年科学基金项目(C类)、国家重点研发计划课题、北京市自然科学基金项目、博士后创新人才支持计划等。主要从事智能机器通信、语义通信等研究。

(责任编辑 王 磊 张 强)