• 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-2025-0285

低空经济信息系统与安全管控基础理论与关键技术*

吴启晖[1] 董培浩[1**] 周福辉[2]

1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院，南京 211106
2. 南京航空航天大学 人工智能学院，南京 211106

[摘 要] 低空经济是新质生产力的典型代表，是未来科技融合与经济增长的重要方向。高效信息系统和可靠安全管控是保障低空经济健康高质量发展的前提，亟待从基础理论与核心技术层面实现创新与突破。作为多功能融合与多应用覆盖的新兴网络形态，低空网联体系具有复杂环境下高密度大规模运行的特点，对现有的信息系统与安全管控理论技术提出极大挑战。随着应用场景与电磁频谱使用范围的扩展，低空网络呈现出多源多域信息融合与动态运转的发展趋势。本文针对空天地融合信息网络、低空飞行安全智能监视以及低空空域与飞行器管控三个重要方向，系统回顾梳理了相关前沿研究和关键技术进展，分析了其中所面临的难点挑战，具体涵盖空天地网络协同设计、低空频谱分配与共享、低空多模态通感一体、低空目标协同监视鲁棒基础模型、新型低空智能网安全体系、低空空域动态管理与资源优化配置、低空多模态感知与环境自适应、低空安全风险防范与应急响应等方面。基于国家自然科学基金委员会第407期“双清论坛”，本文围绕跨域协同与动态适变的核心思想，从语义认知决策环理论的角度总结了低空信息系统与安全管控领域亟待重点研究的方向和科学技术问题，给出了未来发展建议，以期启发对相关基础理论、关键技术及实际应用的深入研究与攻关。

[关键词] 低空信息与管控系统；低空智联网；认知决策环；跨域协同；动态适变

2024年以来，低空经济连续两年被写入政府工作报告，成为未来产业的新增长引擎。国家发展和改革委员会成立低空经济发展司，工业和信息化部成立低空产业发展领导小组，中国民用航空局设立专项工作组，各地方也陆续出台专项法规，加速推动低空经济政策体系的完善。目前，国内低空经济相关企业已达近9万家，2035年市场规模有望达到3.5万亿元，低空经济呈现出爆发式增长的发展趋势。在此背景下，如何从信息系统与安全管控两个核心方面解决低空经济所面临的痛点，保障其健康平稳发展，成为学术界、产业界等各方密切关注的问题。

低空信息与管控系统是支撑低空飞行活动安全高效运行的核心技术体系，主要由通信、导航、监视系统和空中交通管控系统构成。具体而言，通信系统通过专用网络、移动通信网络、卫星网络等方式实现地—空实时数据传输，导航系统借助卫星定位系统、惯性导航等手段提供精准的设备位置信息，监视系统利用频谱感知、雷达、红外、光学成像等技术搜索追踪空中与地面目标，三者共同构成了低空网联体系的信息技术底座。空中交通管控系统整合通信、导航与监视数据，进行空域交通管理、资源分配、流量控制和飞行服务，保障空域飞行安全，是低空网联体系的调度中枢。面对人造障碍密集、自然地形复杂、气象条件多变、电磁干扰频繁、通信导航监视支撑不足等低空复杂运行环境挑战，以及低空未来高密度大规模运行场景挑战，目前的低空信息系统与安全管控理论和技术难以支撑低空经济的安全健康高质量发展。本文将从空天地融合信息网络、低空飞行

收稿日期：2025-12-05；修回日期：2026-01-14
* 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：phdong@nuaa.edu.cn
本文受到国家自然科学基金项目(62471226，62231015，62101253)的资助。

引用格式： 吴启晖，董培浩，周福辉. 低空经济信息系统与安全管控基础理论与关键技术. 中国科学基金，2026，40(1)：2-18.
Wu QH，Dong PH，Zhou FH. Fundamental theory and key technologies for information system and security management of low-altitude economy. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，2026，40(1)：2-18.(in Chinese)

安全智能监视网和低空空域与飞行器管控三个方面深入探讨其发展研究现状与主要挑战,围绕跨域协同与动态适变的思想构建语义认知决策信息论框架,总结关键解决思路并给出未来重点研究方向,旨在通过先进的信息系统和可靠的管控技术,为低空经济健康发展提供安全、高效、永续的智慧低空生态底层支撑。

1　我国低空信息与管控系统现状与主要挑战

低空信息与管控系统主要包括空天地融合信息网络、低空飞行安全智能监视网和低空空域与飞行器管控三个方面。如图1所示,空天地融合信息网络是包含卫星、高空平台、低空飞行器和地面设备的异构网络体系。低空飞行器既可作为连接太空、高空设备与地面设备的中继,又能利用网络中其他设备进行高效通信,为低空经济体系提供信息传输保障。低空飞行安全智能监视网通过频谱感知、雷达、红外、光学成像等技术动态呈现低空网络实时状态,对低空的信号域、目标域和环境域进行全域精准监视。低空空域与飞行器管控则通过整合通信、导航与监视数据进行空域与频谱资源管控和飞行器飞行控制,避免低空事故的发生。以上三者协同工作,可有效保障低空网络安全,提高低空赋能行业效率。

1.1　发展现状

低空信息网络是涵盖通信、感知、导航、监视、信息服务等的多功能网络,其核心是高效的空天地融合协同覆盖,为动态捷变环境下的异构飞行器提供多类网络服务,支撑低空飞行器的业务流程。空天地网络作为构建低空经济信息系统的重要通信基础设施,在飞行器定位导航、远程控制、图像回传与通信保障等任务中发挥着核心作用。随着我国低空空域管理政策逐步放开,空天地网络正在由传统的静态、分层式架构向融合化、智能化演进。《面向6G的天地一体融合网络技术白皮书》[1]指出,空天地网络将实现从地面到空中的全方位融合连接,满足应急通信、产业备份、海洋组网等多样场景下的高可靠、高速率、低时延通信需求。以中国电信“天翼云网融合”平台为代表的产业实践,正推动空天地一体化网络从概念验证向实际部署迈进。通过融合低轨卫星、5G地面网络、边缘计算与高空平台通信能力,该平台在异构网络融合、应急通信保障以及低空智能体调度方面展现出良好应用前景,也为我国低空经济的高质量发展提供了关键通信支撑[2]。随着低空经济的发展,低空频谱资源正逐渐成为战略性稀缺要素。国际电信联盟(International Telecommunication Union,ITU)在世界无线电通信大会持续审议无人机频谱需求,初步划定C波段(5 030~5 091 MHz)、L波段部分频段为候选频段,探索授权与非授权共享模式。我国在《“十四五”国家信息化规划》等政策中明确要求构建空天地一体化网络并创新低空频谱管理模式[3]。作为低空业务安全高效运行的“信息生命线”,频谱资源的科学规划已成为核

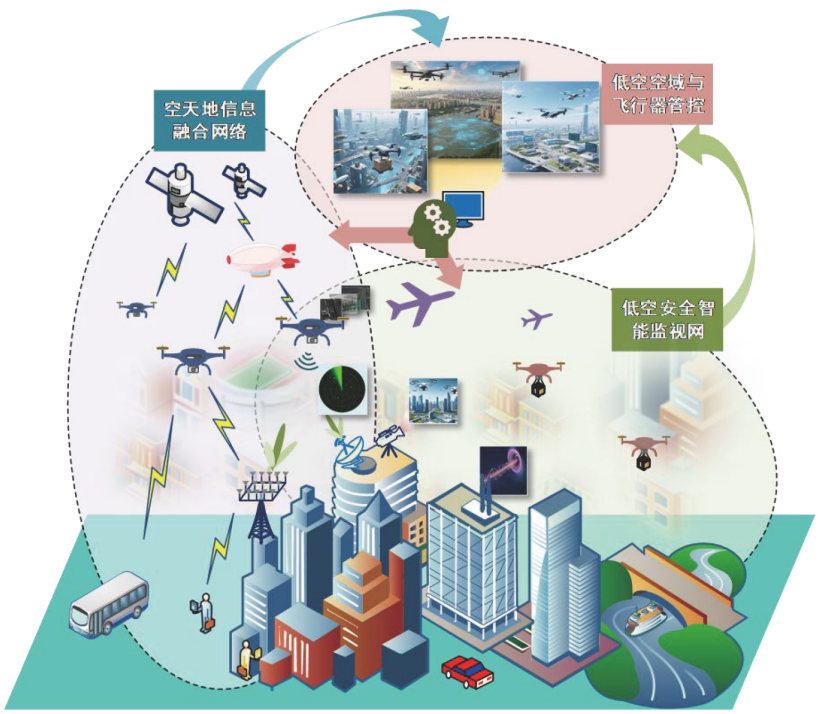


图1　低空信息与管控系统

Fig.1　Low-altitude Information and Control System

心使能要素。福建三明市向福建东南航空科技有限公司颁发的全省首张无人机通信频谱许可及电台执照，不仅标志着频谱赋能低空经济迈入规范化阶段，更有效推动了当地低空经济的健康发展[4]。以无人机、电动垂直起降飞行器、通用航空器为代表的低空移动平台在物流配送、城市安防、电力巡检等场景中展现出广阔应用前景。为实现其安全、高效运行，建设具备通信、感知、控制功能一体化的低空信息基础设施已成为广泛共识。国家高度重视低空通感融合体系的建设，工业和信息化部在2024年10月23日国新办新闻发布会上提出，将探索建立“通感一体”的低空经济网络设施，为构建安全可控、协同高效的低空运行体系奠定技术基础[5]。《国家综合立体交通网规划纲要》和《低空经济产业发展白皮书(2024年)》亦从顶层设计支持低空信息网络的融合部署，为通信感知一体化(Integrated Sensing and Communication，ISAC)发展提供了政策保障[6]。在技术层面，ISAC正成为新一代低空智能系统的关键支撑。ISAC通过软硬件资源共享，利用通信信号同时实现信息传输与目标探测，在频谱受限、功耗敏感的低空场景中展现出显著优势。目前，华为技术有限公司(以下简称“华为”)、中国电子科技集团有限公司(以下简称“中国电科”)等企业已陆续推出面向低空场景的感知与通信集成平台。这些平台融合了毫米波通信、MIMO雷达、红外成像、光学视觉等多种异构感知技术，具备较强的目标探测、识别、定位与数据传输能力，能够在复杂环境下实现多模态信息的协同获取与处理。

随着低空无人机的普及，未授权无人机的违规飞行给航空运输、国防机密保护和公共安全带来了极大的威胁和隐患[7]。低空飞行器安全智能监视是管控低空飞行器的基础，也是低空经济安全健康发展的重要保障。近年来，我国积极推动自动相关监视广播系统(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast，ADS-B)监视技术普及以完善低空飞行监视体系。ADS-B监视技术相较于传统监视技术，在监视的范围精度和降低成本方面均具有显著提升，是目前搭建低空监视系统最快速、最成熟、成本最低的手段。2019年，中国民用航空局发布了《全面推进实施广播式自动相关监视(ADS-B)空管运行工作总体方案》，利用ADS-B的卫星导航功能，提高空中交通管理的效率和安全性。同时为打破技术垄断，提升设备研发制造水平和自主化率，中国民用航空局于2017年印发《民用航空低空空域监视技术应用指导意见》[8]，组织构建以北斗定位信息为核心、兼容各种监视技术的低空空域监视技术服务保障体系，并建成了以北斗定位为基础、融合北斗短报文和广播式自动相关监视数据的通用航空北斗飞行动态信息服务平台，逐步实现低空管制空域、监视空域通用航空北斗飞行动态服务。在构建新型低空智能网安全体系方面，中国移动通信集团有限公司(以下简称“中国移动”)于2024年首创提出4.9 GHz通感一体化技术[9]，构建了“通、感、管、导”一体的5G-A低空智联网技术体系，该技术将通信与感知功能融合，改变了传统空域静态、单一的划分格局，实现了对无人机的实时监测与智能管控。2025年，中国移动通信集团北京有限公司(以下简称“北京移动”)进一步推出“双频通感立体网络”，创新性地结合4.9 GHz广覆盖频段与毫米波高频段，显著提升了低空目标的探测精度与覆盖范围，其中4.9 GHz频段使覆盖半径扩展至1千米以上，而毫米波频段则实现亚米级感知精度，每平方千米可同时追踪200个动态目标[10]。此外，华为推出的5G-A通感基站创新性地整合了通信、雷达感知和高精度定位三大功能，在深圳机场的试点中实现了无人机0.5米精度的实时轨迹跟踪和200毫秒级的快速响应拦截[11]。

在众多低空新兴业态蓬勃发展的形势下，低空空运与飞行器管控的重要性日益凸显，高效的管控体系是保障低空飞行安全、提升空域资源利用效率的前提。江西低空空域管理系统以“三维数字地图+智能决策+实时监控”三大核心技术，搭建起覆盖江西省低空空域全链条的数字化体系，为全国低空空域管理提供了“江西方案”[12]。该系统融合多源地理数据，具备空域立体化、可视化呈现及特殊空域动态划设等功能，实现了低空空域的有效管理和高效利用。不仅如此，该系统还具备机场标绘、航线标绘、选址评估、实时目标动态仿真以及大屏展示等功能，为空域划设、管制、仿真模拟、飞行评估和应急处置等提供能力中台，为江西低空经济的高质量发展注入了新动能。此外，一些科技企业也开始研发低空资源智能调度系统，通过大数据分析和人工智能算法，实现对低空飞行器的动态调度和管理，提升低空运行的安全性和效率。亿航智能与深圳市宝安区人民政府达成合作，推动EH216-S飞行汽车的商业运营[13]并计划在宝安区落地组装交付中心、研发测试中心及维修保障中心。高精度低空多模态感知与环境自适应技术为保障低空空域及飞行器安全高效运行提供了关键的认知与决策支撑。为应对低空复杂环境高精度认知与动态决策实时适配的挑战，深圳市大疆创新科技有限公司推出搭载先进多模态感知技术的无人机产品，配备了高分辨率摄像头、激光雷达和毫米波雷达等多种传感器，能够实现对低空环境的高精度感知与实时建模[14]。华为等企业部署的通感一体化基站构建起城市级低空监控网络，有效增强飞行器轨迹管控能力[15]。中国电信

集团有限公司(以下简称“中国电信”)在福州部署了华为毫米波通感一体基站,并引入核心网通感功能,为无人机飞行和管控提供目标检测、轨迹识别能力演示。天津大学机器学习与数据挖掘团队提出了低空复杂环境全天候感知技术、低空感知基础模型自主进化技术以及多机跨视角协同感知技术三大核心技术,构建了全方位精准监测的低空智能感知平台[16]。鹏城实验室发布的低空目标与环境多任务一体化感知硬件系统攻克了多模态融合感知的关键技术瓶颈,实现了“近、中、远”系列化气象探测、电磁环境感知、低空目标定位跟踪与识别等多任务一体化感知功能,为构建低空感知网络关键基础设施提供了坚实支撑[17]。这些技术突破与应用实践强化了低空飞行器在复杂环境中的适应性与决策能力。

低空飞行保障设施面临突发故障、潜在冲突及外部干扰等复杂挑战,以无人机非法侵扰为例,2024年9月,天津滨海国际机场在运行期间发现无人机活动,被迫采取临时运行限制措施,当日共造成29架次航班延误、8架次取消、32架次备降,直接影响旅客规模超过3 000人。类似事件并非个案,美国联邦航空管理局公开数据显示,其每月接收到的机场周边无人机目击报告数量长期保持在100起以上,表明低空外部侵扰已成为高频运行风险。同时,低空运行对卫星导航和数据链系统的高度依赖,使其对电磁干扰尤为敏感。基于ADS-B数据的行业监测结果显示,自2024年以来,全球多区域范围内的全球导航卫星系统干扰与欺骗事件呈现明显上升趋势,相关异常已对航空器定位连续性和运行可靠性构成现实威胁。因此,亟需构建融合主动与被动风险防控的综合型低空安全风险防范与应急响应体系。北京市房山区举办的低空新质救援力成果展示活动,成功演示了复杂条件下的低空应急救援效能,展现了高科技低空装备在极端环境响应、智能无人化作业、空地协同指挥等方面的应用成果[18]。此外,《北京市促进低空经济产业高质量发展行动方案(2024—2027年)》[19]聚焦低空安全管控,提出重点突破无人机侦测识别、光电对抗及数据链干扰等反制技术,构建人工智能(Artificial Intelligence,AI)驱动的风险预测与应急处置模型。通过部署软硬结合的反制系统,建立一体化指挥体系,实现复杂环境下异构飞行器的立体防御。最终形成可推广的城市级低空安防解决方案,在京示范后向全国辐射。上述措施将有效提升低空安全风险防范与应急响应效能,为低空经济健康发展提供坚实保障。

1.2　主要挑战

总体来说,我国低空信息与管控系统处于快速发展阶段,整体现状平稳,但仍面临多重关键挑战。

在空天地融合信息网络领域,现有异构网络在协议、频段与调度机制上高度分散,缺乏统一的融合标准与接口规范,导致信息协同效率低、动态资源分配与统一接入机制尚不成熟,难以支撑未来高密度、广覆盖、低延迟的低空飞行通信需求。同时,星—空—地弹性组网与智能调度机制尚未建立,系统在面对突发故障、环境干扰或恶意攻击时自适应重构能力不足。低空频谱管理亦面临多平台共存、业务需求极端异构及航空安全优先性要求的挑战,传统静态管理模式难以满足瞬息万变的干扰规避与隔离需求。此外,尽管通信感知一体化被视为未来核心支撑技术,但在架构协同、信号设计、资源调度与多模态算法融合上仍需突破,特别是在复杂电磁环境下,仍难以实现对目标的高精度感知与稳定通信保障。

在低空飞行安全智能监视领域,无人机“黑飞”行为频发,行业标准体系尚未统一,跨区域运营需面对多套标准,给监管和市场发展带来诸多制约。现有监视技术中,雷达成本高且对低空弱小目标识别虚警率高,红外探测在复杂背景下识别稳定性差,且二者在雨雾等恶劣天气下探测精度均显著下降,亟需引入跨模态补偿算法以提升系统的环境适应性和目标识别鲁棒性。此外,当前低空智能网安全体系尚缺乏具备自感知、自恢复能力的内生安全机制,亟需发展融合人工智能增强、分布式信任建模、异常检测与智能决策的安全体系,构建支撑飞行活动全域覆盖、全时在线与智能化管控的系统架构。

在低空空域与飞行器管控领域,复杂的运行环境带来了严峻挑战,包括人工障碍密集、地形复杂、气象多变、电磁干扰频繁,以及通信、导航、监视能力不足。目前,低空空域飞行缺乏统一的发展规划与标准规范,配套基础设施建设滞后。面对未来高密度、大规模运行需求,现有管控技术体系尚不完善,传统静态空域划设与固定资源分配机制难以满足动态运行模式,亟需智能化的资源管理与调控体系。此外,高精度感知与环境自适应技术仍面临复杂环境下稳定认知与实时决策的挑战,低空安全风险防范与应急响应体系也需进一步完善,以提升系统的抗干扰性与恢复能力,保障飞行活动的安全与高效。总体而言,低空经济各关键领域均面临体系化、复杂性与跨域性挑战,未来亟需在技术创新、标准制定与管理协同等方面形成系统解决方案,以推动低空经济安全、高效、可持续发展。

综上所述,我国低空信息与管控系统虽发展迅速,但在空天地融合标准、弹性组网与频谱动态管理方面仍显不足,通信感知一体化落地难度较高。同时,低空安全监视受制于多源感知可靠性与内生安全机制缺失,空域与飞行器管控在高密度运行下的智能调度、风险防控与应急响应能力亟待提升。

2 国内外主要研究进展

2.1 空天地一体化信息网络

随着空天地一体化网络逐步成为构建6G通信系统的重要组成部分,其多维融合、高动态通信能力和全球覆盖的能力受到了广泛关注。在架构设计与资源管理层面,研究者们通过提出原生智能切片机制[20]、基于多域动态加权的生存型虚拟网络嵌入算法[21]以及双阶段资源配置策略[22],实现了对高安全性、高速率、低时延场景的适应以及异构节点间的资源协同与虚拟统一,上述网络架构研究已初步实现对异构节点间的资源协同与虚拟统一。在智能调度与计算卸载层面,国内研究重点关注空天地融合网络中的能效优化与协同计算问题。学者们构建了基于深度Q网络的两跳能效混合路由策略[23]、分层深度学习卸载框架[24]以及卫星、无人机与地面协同计算平台[25],促进了卸载策略从单点优化向协同感知与分布式决策的发展。在通信机制与信道建模层面,研究者们设计了基于自组织时分多址的自组织组网协议[26],并深入分析了频偏对无人机协同波束成形性能的影响[27],涵盖了从链路接入机制到协同通信建模的多个关键层次,使空天地一体网络更好地适应高动态、高可靠的通信需求。

低空频谱面临空域动态性强、业务需求异构、频段资源紧张与干扰管理复杂等严峻挑战。针对低空环境复杂的信道条件,研究人员开发了一系列高效的频谱感知算法,如匹配滤波、能量检测、循环平稳特征检测及其融合方案[28]的探测精度与速度,确保频谱接入的准确性和及时性。同时,频谱数据库与地理空间数据库的结合成为趋势,通过构建包含实时或预测性频谱占用、地形地貌、空域限制等的综合数据库,为低空用户提供权威的频谱可用性信息[29]。鉴于低空环境的复杂性和动态性,深度强化学习被广泛应用于频谱分配策略的在线优化[30]。此外,博弈论模型被用来分析多个理性低空用户在频谱共享中的策略互动行为,为设计激励相容的共享机制提供理论基础[31]。先进无线传输与组网技术为高效频谱利用提供了物理层保障。大规模多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output,MIMO)技术和智能波束赋形[32]技术通过空间维度复用,显著提升了频谱效率,并有效抑制干扰,尤其适用于无人机基站或地面基站对低空空域的覆盖。

低空环境具有高动态、多遮挡、高频传输等特点,通感系统在架构协同、信号设计、资源调度与算法融合等方面仍面临诸多挑战。针对这一复杂背景,研究人员正从系统建模、信道特性、多模态融合与硬件实现等多个层面探索通感融合的完整路径。在系统设计方面,研究人员提出了多任务协同的ISAC架构,将通信、感知、控制任务统一建模并联合优化,构建“感知、认知、决策、控制”的闭环系统。例如,空地一体化ISAC框架利用无人机作为通信与感知的中继节点,有效解决了其功耗与算力限制问题[33],也有研究关注地面基站与多架授权无人机的协同通信与空域监控,实现通信性能与感知精度的协同提升[34]。在信道建模方面,为理解通信与感知的协同机制,Liu等[35]构建了多维动态通感信道模型,考虑无人系统的三维运动特性与高频信道特征。Jin等[36]在ISAC场景提出了一种新颖的基于几何的随机多输入多输出通道模型,充分研究了有效散射体分布对通道的影响。在信号设计方面,兼容通信与感知任务的多任务导频结构、基于循环前缀的正交频分复用信号等被广泛研究。在联合通信与合成孔径雷达成像系统中,通过优化正交频分复用结构,可实现通信速率与成像精度的动态权衡[37]。在多模态融合算法层面,基于先进神经网络的多模态融合算法在特征提取与任务决策方面取得显著成效。如通过注意力机制与对比学习挖掘图像、雷达与通信数据中的共享与专属信息,实现通信辅助感知与感知驱动通信的功能互补[38]。Cheng等[39]系统梳理了多模态ISAC中的深度融合方法,重点探讨了基于深度学习的异构数据共享与专属特征提取技术。在系统实现层面,中国移动联合华为开展了基于5G-A的低空无人机探测与追踪系统的测试工作[40],中国电科14所试飞验证了装载轻小型毫米波成像雷达、可见光、红外多谱段传感器的无人机对地感知系统[41]。

在低空及高动态无线网络场景下,国外研究主要关注智能频谱管理与多链路通信机制。例如,针对Wi-Fi 7多链路操作场景,相关研究[42]提出基于多智能体强化学习与迁移学习的信道选择方法,以提升多链路条件下的频谱利用效率和系统性能。与此同时,蜂窝联网无人机的工程化落地需要标准化能力支撑,例如,3GPP TR 36.777总结了增强LTE对空中终端支持的关键问题(覆盖、干扰、参数优化等),可为低空业务连接性与管控信息交互提供基础参考[43]。该类研究为复杂无线环境中的智能决策与频谱协同提供了新的思路。

国内相关研究表明,低空空域通信与感知通常面临显著不同于传统高空场景的复杂传播环境,如城市峡谷效应、近距离多径效应以及由高速机动与集群协同带来的高动态网络拓扑变化等。在城市街道等典型“城市峡谷”环境中,无人机通信链路的视距传播条件会受到建筑物随机分布与高度差异的显著影响。Cheng等[44]基于三维几何随机建模方法,对无人机 MIMO 莱斯信道中的视距/非视距传播机理进行了系统刻画,揭示了建筑遮挡对低空信道统计特性的影响规律。在近距离飞行条

件下,由于通信链路进入近场区域,无人机空对地信道的多径传播特性相较于传统远场模型更加复杂。Qu等[45]针对近场ISAC场景开展了性能分析与波束成形设计研究,指出近场传播条件下多径结构与距离相关特性对通信与感知性能具有重要影响。同时,Jing等[46]从空中ISAC的角度出发,研究了无人机轨迹设计对联合通信与目标定位性能的影响,进一步表明在低空近距离场景中,多径传播与几何关系变化会显著作用于信号质量与感知精度。此外,由于无人机的高速机动性及多无人机协同作业需求,低空飞行自组网中的网络拓扑结构呈现出高度动态变化特征。国外也已有相关研究关注低空空域通信与感知所面临的复杂传播环境。Saboor等[47]提出了一种面向无人机通信场景的几何建模方法,给出了视距概率的闭式表达式,能够定量分析复杂城市场景中遮挡条件下的覆盖概率分布,为低空无人机部署与路径规划提供了理论依据。在低空多无人机通信场景中,无人机的高速机动性与协同作业特性使得网络拓扑呈现出显著的时变特征。Bayessa等[48]针对无人机辅助的ISAC网络,联合研究了无人机部署与预编码优化问题,系统分析了拓扑动态变化对多播通信性能与目标感知精度的影响,从而揭示了低空无人机网络在快速拓扑演化条件下面临的核心挑战。

国内外研究正经历从“静态规则优化”向“生成式智能决策”演进的范式转变。具体而言,国内学者Zhang等[22]的双阶段配置策略虽在静态场景下逼近理论最优,但其凸优化迭代过程难以适配低空毫秒级的拓扑剧变;为解决这一动态性难题,国外学者Pandey等[49]针对双无人机场景提出了鲁棒轨迹规划方案,虽然提升了安全性,但高昂的计算开销仍限制了其实时响应能力。相比之下,国内Li等[24]与Sun等[30]分别基于深度学习架构与强化学习算法构建了智能管控框架,显著提升了决策实时性,但在面对未见过的突发流量模式时,这类判别式模型的泛化能力往往受限;Bai等[26]提出的STDMA协议虽解决了基本的自组织组网问题,但在高并发场景下碰撞率激增,难以保障服务质量。为突破上述瓶颈,国外学者Betalo等[50]最新提出的生成式AI驱动的多智能体框架,不仅通过学习任务分布规律增强了策略的鲁棒性,更实现了网络协议参数的自适应生成,展现了比传统深度强化学习和固定协议更强的环境适应力。此外,针对信道建模,Jin等[36]构建的多维动态统计模型虽覆盖了三维运动特性,但国外学者Gürses等[51]基于软件定义无线电的最新实测数据表明,传统统计模型在刻画低空复杂散射环境(如乡村/城市交界)时仍存在较大误差。综上所述,空天地网络技术路线呈现出由“模型驱动的静态寻优”向“数据与知识协同驱动的生成式智能”跨越的趋势。未来研究亟需在保证理论性能边界的同时,突破高动态环境下的实时泛化瓶颈,并建立基于实测数据的信道数字孪生,以支撑低空业务的高可靠运行。

总体而言,国内在空天地一体化网络的架构、资源协同、智能调度与通感融合方面已形成较系统的研究积累,但仍需从准静态设定向适配动态低空环境转变,提升在未知场景下的泛化与鲁棒性不足。国外在标准化、智能频谱管理与生成式多智能体决策方面进行了深入探索,但部分方法计算开销较高导致实时工程化落地受限,现有统计或几何模型在复杂散射与近场传播条件下仍与实测存在偏差。因此,国内外研究面临的共同挑战在于高动态环境下如何兼顾实时决策、强泛化鲁棒与基于实测数据的信道数字孪生闭环。

2.2 低空多域监视网络

低空飞行器的高密度、异构性和自主性使现有监视手段面临机载设备限制、频谱资源紧张等挑战[52]。目前国际上推荐使用ADS-B与雷达探测、光电识别等手段融合,构建多源高可靠监视体系[53]。Kantharaj等[54]构建了航迹相似度量化模型,融合历史ADS-B与雷达数据识别爬升率异常等7类风险模式,以提升监管响应效率。在智能评估与异常检测方面,Avola等[55]利用生成对抗网络重构正常视频帧,通过像素级误差定位异常区域,实现了高性能的无监督检测;Young等[56]基于任务分层机制实时调整无人机路径,在高度自治的城市空中运行场景下有效降低了燃油消耗并提升运行安全性。在治理与管理体系层面,美国通过建立联邦、州和地方三级联动的动态法律体系,并引入市场化机制优化空域资源配置[57];葡萄牙在欧盟统一框架下结合本土地理特点,采用动态地理围栏与AI预警系统,并强制推行无人机远程身份以实现高效监管[58],两国虽同样面临技术对抗升级与法律滞后等问题,但其探索路径共同指向空域数字化管理与标准国际化的发展方向。目前,低空监视与安全治理正在从工程系统走向标准体系驱动的可监管系统。国际上,美国材料与试验协会F3411远程身份识别与跟踪标准用于增强可识别、可追责与合规监管能力[59];欧洲民用航空设备组织(European Organisation for Civil Aviation Equipment,EUROCAE)ED-269给出机载地理围栏能力的最低运行性能要求[60];EUROCAE ED-318则围绕地理区域和U-space数据建立数据提供与交换的技术规范,为动态空域限制、围栏服务与信息服务的标准化共享提供支撑[61]。

低空产业联盟发布《低空智能网联体系参考架构》(2024版)[62],从体系分层、能力组件到标准体系与安全体

系给出总体框架,可作为低空信息系统标准化建设与互联互通的顶层参照。基于文件确立的统一体系和技术框架,低空运行能力的核心落点进一步集中于对飞行器运行状态的持续感知与航迹行为的精准管控,其中低空飞行动态监视与轨迹管理成为支撑低空安全、有序与高效运行的关键环节。基于ADS-B与北斗融合的航迹动态监控平台能够通过最小二乘插值优化轨迹连续性,降低实测异常航迹识别误差,为空域冲突实时预警奠定了技术基础[63]。在低空复杂电磁环境与密集障碍物背景下,雷达与红外传感器对无人机、鸟类等微小目标的精细识别仍面临严峻挑战。针对低空弱小目标雷达虚警率高、红外对比度低等共性问题,Chen等[64]提取雷达回波速度谱熵值特征,并结合支持向量机分类器,实现了高精度无人机与鸟类目标区分。针对慢速目标信噪比低至−10 dB的场景,Wang等[65,66]通过Keystone变换、多维聚类和改进K均值算法有效提升检测率并降低虚警水平。在红外探测方面,Wang等[67]设计的全卷积回归网络与图匹配模块在OTB-IR数据集遮挡场景下实现了较高检测率;同时,基于时空显著性的目标检测方法通过局部对比度加权有效缓解了目标与背景低对比度问题[68]。而在针对低空空域运行安全向网络与系统安全延伸的趋势上,Xie等[69]提出了AI增强的通信、导航与监视架构,在抵御全球导航卫星系统欺骗攻击方面取得了较高成功率,为低空空管系统的网络安全防护提供了新的技术路径。

此外,多模态融合成为了国内研究应对复杂地形感知盲区的重要技术路径。Zhu等[70]在YOLOv5中嵌入自注意力模块,增强无人机多视角图像的跨尺度特征关联能力;Gong等[71]构建双模态无线传感网络,通过节点协同覆盖城市峡谷区域,有效降低了监视盲区比例。针对广域低空监视中单点感知单元覆盖范围有限、资源调度僵化等问题,研究者进一步探索分布式协同架构。一种雷达视觉节点分布式体系通过状态同步矩阵实现复杂遮挡条件下的持续跟踪,并有效降低位置误差[72]; Chi等[73]提出了一种基于深度相机与激光雷达融合的无人机自主导航方法,在复杂城市环境下有效提升了路径规划的精度与环境感知鲁棒性。Zhang等[74]提出感知、控制与执行三层平台结构,提高了系统任务覆盖率。

在控制与智能决策层面,Ling等[75]结合卡尔曼滤波与模糊控制方法实现多传感器动态加权,有效压缩多源协同时延。针对威胁评估与风险量化问题,Yu等[76]利用长短期记忆神经网络分析航迹偏移的时空特征,提高了低空目标威胁等级评估的准确性。

在低空安全体系与风险治理方面,国内研究更加关注制度构建与工程落地。王莉莉[77]围绕低空经济快速发展背景下的安全体系建设路径,强调通过政策统筹与场景驱动相结合构建高密度混合飞行的安全托底能力;王洪涛等[78]提出低空经济安全风险防范的标准化体系建设思路,通过跨领域协作应对无人机物流、城市空中交通等新兴业态风险。针对运行风险量化问题,Hu等[79]构建最佳—最差法与模糊综合评价相结合的风险评估体系,提升飞行计划审批效率;Wang等[80]扩展人、机、环、管多维指标体系,有效提高了高危风险因子的识别与预测能力。

低空监视技术正从单传感器探测向多模态融合感知演进:在感知体制方面,国外Kantharaj等[54]构建的航迹相似度模型虽能融合广播式自动相关监视与雷达数据提升监管效率,但仍受限于雷达在低慢小目标上的虚警问题;而国外学者Avola等[55]利用生成对抗网络重构视频帧进行异常检测,虽语义表征能力强,但在低能见度场景下效能显著衰退。针对单模态的局限,国内学者Wang等[81]提出了一种基于雷达与相机多阶段融合的深度学习架构,通过高斯加权融合显著图与雷达反射点,在复杂场景下显著提升了障碍物检测的平均精度。在系统管理层面,国内Wang等[63]开发的动态监控平台侧重于对合作目标的主动实时调度,而国外EUROCAE[60]发布的电子围栏标准则致力于通过地理边界限制进行被动隔离防御;两者虽分别从系统与标准层面确立了秩序,但均依赖飞行器的配合,面对非合作“黑飞”目标时存在本质的感知盲区。在算法演进方面,Young等[56]采用的任务分层机制虽有效降低了燃油消耗,但在非线性强机动目标的轨迹预测上精度有限;为解决这一难题,国内Liang等[82]设计了改进的Swin Transformer网络,利用局部上下文增强模块与多尺度特征融合,有效克服了卷积神经网络在提取无人机图像微小特征时的瓶颈,大幅提升了小目标检测的鲁棒性,但复杂的注意力机制带来了高昂的算力负担。对此,不同于上述两者在模型复杂度与精度之间的博弈,国外Tung等[83]另辟蹊径,提出了一种并行的剪枝与量化压缩策略,在保留深度网络高维特征提取能力的同时显著降低了计算开销,为解决高精度模型在边缘端的部署瓶颈提供了比单纯简化任务更具潜力的技术路径。未来研究亟需在保证高精度感知的同时,进一步突破边缘端轻量化部署的算力瓶颈。

总体来看,国内研究注重工程落地与多模态融合,但需考虑对“黑飞”等非合作目标存在感知盲区和高精度模型边缘部署的问题。国外研究的关注则在标准体系与智能检测上,但在强遮挡、低能见度与低慢小目标条件下性能易退化,且方法复杂度与工程可实现性仍有差距。因此,国内外研究面临的共同挑战是在复杂低空环境下如何兼顾非合作目标可监视性、实时性与可部署性。

2.3 低空智能管控系统

在低空运行与管控领域,国外研究主要围绕多资源协同管理、智能路径规划与风险评估展开。Mozaffari等[84]在对无人机无线网络的系统综述中指出,低空运行管理系统需要通过空—地一体化架构,对飞行路径、通信链路与计算资源进行联合优化配置,以实现资源的智能分配。Fotouhi等[85]进一步从蜂窝通信实践角度总结了低空移动平台在频谱接入、标准化与安全方面面临的挑战,并提出应构建分布式频谱动态分配机制,以适应高动态空域环境。

在多无人机运行与资源调度方面,Kawamoto等[86]通过实地实验验证了多无人机场景下的联合资源管理策略,结果表明同时考虑通信、路径与能源因素的综合调度机制在运行效率上优于传统单一策略。在低空环境感知与路径规划方面,Nobis等[87]构建了雷达与视觉深度融合的端到端目标检测架构,提升了复杂环境下的检测精度与鲁棒性。Theile等[88]将深度强化学习用于无人机全局—局部路径规划,在未知障碍和动态干扰条件下实现了高鲁棒性飞行策略学习。Ryll等[89]进一步引入语义推理机制,使无人机能够基于环境语义执行长距离轨迹规划,提高了在城市场景中的环境适应能力。

在多无人机协同与避碰安全方面,Bayerlein等[90]针对无线数据采集任务提出多无人机协同路径规划方法,实现了任务分配与飞行约束之间的有效平衡。Yasin等[91]系统梳理了无人机碰撞规避技术,指出当前方法多仍依赖规则或静态优化策略,难以适应高度动态的城市低空环境。在风险评估与应急控制上,Baidya等[92]通过多传感器融合与扩展卡尔曼滤波实现复杂场景下的精确航迹跟踪,为突发状态下的应急控制提供数据支撑;Lim等[93]提出基于传感器数据的运行时风险评估机制,根据风险等级动态调整任务执行策略,在保障安全性的同时维持任务连续性。

针对传统静态空域划设与固定资源分配机制难以适应新型低空运行模式的问题,国内学者围绕动态空域管理与智能调度开展了大量研究。Zeng等[94]指出,未来低空运行管理系统必须融合通信调度机制,以应对高密度飞行环境中频谱竞争加剧的问题。Zeng等[95]也提出了空中通信接入架构,支持多无人机在复杂地理环境中动态获取通信与导航资源,为动态调度策略提供了支撑。Du等[96]设计了融合动态人工势场的实时冲突规避策略,使无人机在动态空域中具备自主避障能力,有效缓解多飞行器运行冲突。

在低空智能管控所涉及的多维异构资源管理方面,Zeng等[97]指出未来低空运行管理系统需融合通信调度机制,以应对高密度飞行环境中的频谱竞争问题。Cheng等[98]提出的空地一体化边缘网络架构,为飞行器提供实时路径优化、计算任务卸载与状态同步能力,从系统层面提升了资源利用率。Li等[99]进一步提出基于深度强化学习的资源分配方法,通过联合分配子信道和功率实现通信资源的自适应调控。Han等[100]将深度强化学习引入城市空域频谱调度,结合城市结构、飞行计划与用户需求实现空中资源供需的动态匹配。

在感知与协同决策方面,国内研究强调多模态融合与多无人机协同能力。在低空空域中,传统的雷达感知方式难以稳定应对复杂天气和结构环境。因此,研究普遍采用雷达视觉融合方式进行环境建模与目标检测。Yao等[101]综述指出,雷达和摄像头在目标检测和语义分割中具备高度互补性,雷达提供稳定深度与速度信息,而视觉提供丰富的语义。在多飞行器协同任务(如目标搜索、空域巡查)中,个体无人机感知范围有限,需借助分布式信息共享实现任务全局性。Zhou等[102]提出基于图神经网络的多机器人协同感知模型,实现局部信息的全局编码与融合。Zhao等[103]面向多无人机群体任务提出两阶段强化学习架构,结合局部协同与全局调度提升多目标检测任务的实时性与效率。Liu等[104]围绕城市环境下低空感知难题,提出基于5G-A通感一体基站组网的关键技术方案,为低空智能管控提供感知与通信支撑。随着大语言模型(Large Language Model,LLM)在知识抽取、任务分解、规则生成与语义决策方面展示出越来越多的潜力,其也逐渐应用到低空感知与决策领域。但需要指出的是,低空平台受限于机载算力、能耗与通信可用性,云端单点依赖并不可靠,因而云、边、端协同是必然趋势:边缘侧承担低时延推理与任务卸载,云侧负责模型训练与知识库构建,端侧通过轻量化模型或压缩推理实现关键闭环控制与安全保障。面向移动边缘的LLM部署与服务编排已有系统性综述,讨论切分推理、边缘协同与隐私/时延权衡等关键问题[105],同时,Cai等[106]提出自适应双范围量化与硬件协同设计方法,有效加速大型语言模型推理并降低部署开销,为边缘设备上的大模型应用提供可行路径。也有工作探索在边缘侧部署量化LLM执行移动机器人控制,验证弱网与离线条件下的可用性边界[107]。

在自主控制、路径优化与安全保障方面,Hu等[108]提出异步课程经验回放方法,提升无人机在未知动态环境中的自主运动控制能力。Huang等[109]利用大规模MIMO与深度强化学习实现导航与通信协同优化。Yang等[110]提出基于大语言模型的无人系统安全增强路径,通过语义先验实现异常状态预测与策略优化。

Liang等[111]提出基于近端策略优化的多无人机避障算法,在高速交汇场景中显著降低碰撞概率。针对频谱与空域资源耦合问题,Ding等[112]提出融合图神经网络与深度强化学习的内部推理架构,实现频谱分配与飞行轨迹的协同优化。在运行风险评估与系统韧性方面,Zheng等[113]构建多维风险量化体系,用于指导无人机任务调度与航线设计。Hu等[114]将风险因素引入路径优化模型,实现安全性与能耗的双目标权衡。为增强系统在异常条件下的可恢复能力,Yu等[115]提出分布式容错控制方法,应对执行器故障与输入饱和问题;Yang等[116]进一步提出多无人机分布式容错避碰机制,支持节点失效后的系统快速重构与任务续航。

在低空安全管控的系统工程化中需要兼顾算法能力与信息系统互联互通且安全合规。一方面,无人机交通管理与运行管理相关的信息系统需要统一的数据接口与信息交换规则,MH/T 4053-2022为无人机交通管理信息服务系统数据接口给出规范,可为多源监视数据、飞行计划、空域限制、告警与处置等信息的标准化交换提供工程基础[117]。另一方面,系统安全需要可验证、可审计的底线要求,GB 42590-2023作为民用无人驾驶航空器系统安全要求的强制性国家标准,可为管控系统的风险评估、应急处置与韧性设计提供安全基线约束[118]。

在低空安全管控场景中,针对“黑飞”等非合作无人机目标的发现、识别与处置是当前研究与工程实践中的关键问题。国内相关工作通常围绕无人机探测、识别与分类以及反制与处置三个层面展开。在非合作无人机探测方面,多源异构传感器协同已成为应对复杂低空环境的重要手段。Wan等[119]通过融合视觉与雷达信息,实现了在动态背景下对非合作无人机目标的稳定检测,验证了多模态融合在复杂场景中的有效性。与此同时,Wang等[120]针对脉冲多普勒雷达场景,提出基于深度学习的无人机检测方法,在低信噪比条件下显著提升了目标探测性能。在非合作无人机识别与分类方面,视觉与雷达信号各自发挥重要作用。Wang等[121]系统总结了基于视觉的反无人机检测与识别方法,指出在复杂城市场景和远距离观测条件下,小目标与遮挡问题仍然制约识别精度。在完成探测与识别之后,反制与处置成为低空安全管控的最终目标。 Wei等[122]对无人机系统的安全性进行了全面综述,涵盖攻击类型与防御对策,并指出在系统防护和实用部署方面仍存在挑战。此外,Liang等[123]从集成感知与通信的角度研究了抗干扰反制机制,为构建智能化、协同化的低空安全防护体系提供了新的技术思路。

低空管控策略正处于由“集中式预规划”向“分布式自主协同”转型的过渡期。在架构演进上,Gong等[71]与Zhang等[74]提出的集中式监视调度架构,配合Liu等[73]的飞行安全风险评估模型,虽便于实现全局资源的宏观统筹与统一调度,但Hamissi等[124]在最新综述中指出,集中式架构在高密度集群场景下面临指数级增长的通信开销与决策延迟,且存在单点故障风险;相比之下,Du等[72]构建的分布式传感网络与Yao等[101]提出的自主融合感知算法,赋予了无人机边缘端的独立决策能力,Zhou等[102]进一步验证了多机协同感知在复杂环境下的有效性。 Chen等[125]提出的基于对抗域随机化的鲁棒多智能体强化学习方法能够有效消除单点故障,并显著提升双无人机协作系统在复杂环境下的稳定性与抗扰性。然而,分布式协同往往受困于局部最优解与非合作博弈下的策略震荡难题,未来亟需构建“云端宏观调度与边缘微观协同”的混合管控体系。

总体而言,国内研究在低空智能管控中更强调工程体系构建与多模态协同,在动态空域管理、资源调度与非合作目标处置方面形成了较完整方案,但存在对算力与通信资源依赖较高和云—边—端协同机制尚不成熟的问题。国外研究侧重智能路径规划、分布式自主协同与风险评估方法,但部分策略计算复杂度高、大规模工程部署受限,集中式方案鲁棒性差。因此,国内外研究面临的共同挑战在于在高动态低空环境中如何实现安全、实时且可扩展的云—边—端协同智能管控。

3 重点研究方向和科学技术问题

前文所述的空天地融合信息网络、低空飞行安全智能监视网和低空空域与飞行器管控系统以监视、通信、导航和管控为关键环节。从宏观系统的角度,监视对应感知,通信对应认知,导航对应决策,管控对应控制;同时,监视、通信、导航和管控又都可以作为独立的闭环系统运行。因此,可将未来低空信息系统映射为“感知—认知—决策—控制”一体化框架。本文围绕跨域协同与动态适变的核心思想,提出如图2所示的语义认知决策环信息论。跨域协同的内涵在于,将频谱认知从认知频谱信号拓展到利用频谱信号认知目标与环境,形成频谱信号域、目标域、环境域的多域认知体系,提升认知精度。动态适变则面向低空复杂快变的环境,通过模型适变、个体适变、网络适变和管控适变等手段,保障低空飞行系统的安全、鲁棒运行。语义认知决策环信息论以语义为核心,将信息系统的物理空间、数字空间、语义空间、语用空间和动作空间串联起来并纳入统一的解释框架;扩展认知决策的闭环交互机制,构建OODA(Observation-Orientation-Decision-Action)环、信息环和知识环三环嵌套的映射理论体系。在低空复杂环境中,

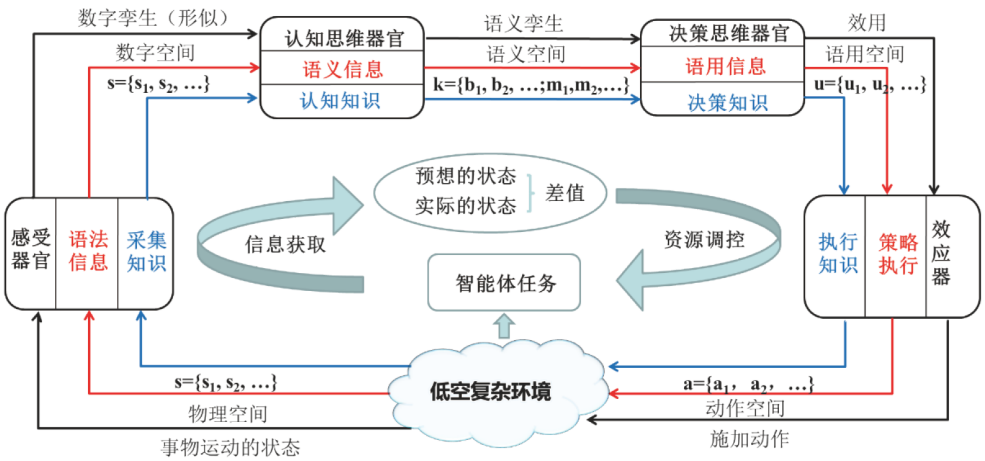


图2　语义认知决策环信息论框架

Fig.2　Information Theory Framework of Semantic Cognitive Decision-making Loop

智能体通过感知功能从物理空间获取原始数据$s=\{s_1,s_2,\ldots\}$,其对应了信息环中的语法信息和知识环中的采集知识。通过数字孪生的手段,信息进入数字空间,形式仍为$s=\{s_1,s_2,\ldots\}$。而后,通过智能体的认知功能,信息以语境和语义信息$k=\{b_1,b_2,\ldots;m_1,m_2,\ldots\}$的形式进入语义空间,对应了知识环中的认知知识。智能体在做出决策之前,会从语境和语义信息进一步提炼对决策真正有用的语用信息,即知识环中的决策知识,使得信息以$u=\{u_1,u_2,\ldots\}$的形式进入语用空间。基于语用信息,智能体的效应器做出决策,信息以$a=\{a_1,a_2,\ldots\}$的形式进入动作空间,对应了知识环中的执行知识。最终,动作作用回低空复杂环境,形成闭环系统。下面将从空天地融合信息网络、低空飞行安全智能监视和低空空域与飞行器管控等方面进行论述。

3.1　空天地融合信息网络

构建高带宽、低时延的通信网络是实现低空飞行器精准定位、数据实时回传及有效管控的关键基础设施。由于地面通信网络在偏远地区部署成本较高,需依托天基卫星网络弥补覆盖盲区,确保动态定位的实时精度。为此,亟需研究地面移动通信、卫星通信与导航网络的多网融合技术,重点突破空天地一体化组网协议、广域无人集群组网架构及智能接入管理等核心技术,实现异构网络的无缝协同,为低空飞行提供高精度导航定位服务,并显著降低跨网切换延迟。需重点研究解决的问题包括:(1)在空地协同覆盖体系下,如何构建异构网络协同机制,有效融合5G-A网络、专网、卫星通信和自组网等多种形式,打造综合立体、多层次的网络架构;(2)针对分布式空天地融合网络易遭恶意攻击的问题,如何构建星—空—地弹性组网和可信管控机制,通过实时网络态势感知与可信认证方法,保障卫星系统、低空飞行器等开放节点免受恶意攻击。

低空飞行器与空天地网络的异构特性导致中低空无人机与地面通信系统存在显著的频谱干扰挑战。在6G通信和星地一体化网络快速发展的背景下,低空频谱资源供需矛盾将日益突出。传统的固定分配、先占先得的频谱管理模式已无法适应未来高密度、大流量、多类型低空飞行的需求。亟需探索面向异构低空系统的动态频谱分配与共享机制,通过优化频谱资源利用效率,确保低空通信网络的稳定性和可靠性。需重点研究解决的问题包括:(1)空天地异构系统共存的环境下,如何构建有效的低空频谱高效动态共享机制,实现星地频谱的动态分配与高效共享;(2)针对低空电磁环境下的频谱干扰复杂、传统加密与路由机制失效的问题,如何构建频谱态势认知与预测模型,指导高动态抗干扰技术的设计,保障低空网络的通信、感知、控制可靠性。

低空信息网络建设面临低时延通信、高精度定位与实时空域感知的多重需求,这使得多模态感知融合与ISAC技术成为关键突破口。该技术通过资源协同配置、功能深度耦合及智能算法优化,能够有效应对频谱资源紧张、实时环境感知、动态网络重构和飞行控制可靠性等核心问题。但当前ISAC技术在通信感知协同、精准环境感知和智能控制等环节仍存在技术短板,亟待深化低空多模态通感融合研究,以全面提升系统资源利用率和整体性能表现。需重点研究解决的问题包括:(1)针对低空多模态通、感、传、算、控一体需求,如何发展认知决策环信息论,推动多模态融合、认知推理与传统信息论的结合,实现“感知—认知—决策—控制”闭环适变机理;(2)面向低空复杂环境的智能决策,如何构建通信感知融合与跨模态协同机理,支撑多模态感知信息赋能复杂环境智能决策,推动通信技术从连接到认知的范式跃迁。

低空网络面临拓扑高动态变化、频谱与能量资源受限以及异构协议共存等严峻挑战，传统的基于规则或数学规划的管控方法在面对海量状态空间时，难以满足实时泛化调控的需求。亟需引入大模型的强语义理解与自适应推理能力，重构低空网络管控架构。需重点研究解决的问题包括：(1)在空地协同覆盖体系下，如何构建异构网络协同机制，有效融合5G-A网络、专网、卫星通信和自组网等多种形式，打造综合立体、多层次的网络架构；(2)针对分布式空天地融合网络易遭恶意攻击的问题，如何构建星—空—地弹性组网和可信管控机制，通过实时网络态势感知与可信认证方法，保障卫星系统、低空飞行器等开放节点免受恶意攻击；(3)针对低空网络资源受限与拓扑高动态特性，如何构建大模型驱动的泛化网络管控架构，突破语义通信与大模型深度融合技术，实现低空信息的语义压缩与意图传输；如何利用生成式网络编排与智能体调度，解决异构网络对突发流量与故障的自适应重构及快速响应难题。

从系统演进的视角看，低空空天地融合信息网络已不再仅承担链路连接功能，而是逐步走向“连接、感知、计算、决策一体化”的综合能力形态。由于低空飞行任务具有强实时、强动态、强不确定与资源受限等特征，仅依赖云端集中式智能难以满足毫秒级闭环控制与弱网/断网条件下的连续运行需求，因而云—边—端协同将成为未来低空信息系统的基本形态：云端侧重全局知识与模型迭代，边缘侧承担多源数据汇聚融合与低时延推理，端侧以轻量化模型完成关键安全策略执行与控制保障。围绕这一趋势，需重点研究解决的问题包括：(1)如何构建可泛化、可迁移的轻量化大模型能力，使其在不同区域、不同任务与不同电磁环境下仍具备稳定的语义理解与策略生成能力；(2)如何在云边端多级算力与链路波动条件下实现协同推理与任务卸载的自适应调度，在保证时延与能耗约束的同时维持决策可靠性；(3)如何将模型输出与安全规程、运行规则、空域约束形成可验证的“安全护栏”，确保在异常状态与对抗干扰下仍可解释、可审计、可控。

3.2 低空飞行安全智能监视

低空飞行器的精确探测与识别是保障低空飞行安全监控的关键环节。针对“低慢小”目标探测中单一传感器精度不足的挑战，需综合运用光学成像、无线电频谱监测、雷达探测等多源感知手段。通过构建异构数据实时融合框架、目标探测博弈优化模型、多模态特征增强识别算法以及知识驱动的智能追踪技术，打造新一代多模态低空目标探测追踪体系。这将促进感知融合、跨域知识迁移等前沿技术在低空安防领域的创新实践，最终实现多源传感数据智能融合、飞行环境动态重构、目标精准识别定位三大核心能力，为低空经济安全有序发展构筑坚实的技术屏障。需重点研究解决的问题包括：(1)如何通过跨模态数据配准与校准、多源信息互补性挖掘、轻量化实时融合框架，突破多模态数据的高精度时空配准、特征级/决策级融合及鲁棒性提升，实现低空目标的高精度抗干扰探测；(2)如何通过多模态融合增强、知识融合增强等机理，实现集群目标精确探测和追踪。

低空安防系统需要同时完成目标检测识别、运动追踪、航迹预测等复杂任务，但边缘设备的计算能力、存储空间和通信带宽等资源约束严重制约了智能算法的性能表现。为解决这一难题，亟需构建“物理分布式、逻辑集中式”的新型基础模型架构，重点突破动态资源环境下的高精度推理与高效协同等关键技术。具体而言，应着力研发云端协同的分布式模型框架、基于行为规则的多智能体协作机制以及云边端一体化推理引擎等核心技术，从而构建具有鲁棒性的低空目标协同监控基础模型体系，开创智能感知新方法，全面提升低空密集目标监控的准确性和实时性。需重点研究解决的问题包括：(1)如何在非稳态、多主体系统中构建一致表示、鲁棒更新的模型，实现动态资源下模型高保真推理、高效交互；(2)如何通过云边端联合推理机制和交互理论，构建鲁棒基础模型，协同提升目标监视效率和精度。

低空智能网联系统是确保飞行器安全运行的关键基础设施，其核心在于构建“运行安全为根本、网络安全为保障”的双重防护体系。针对复杂多变的低空环境，需要建立覆盖风险监测、态势评估和威胁处置的全流程动态管控机制，以应对异构数据融合带来的新型安全挑战。在空天地一体化网络架构下，系统安全面临网络攻击与电磁干扰的双重威胁，必须通过构建智能化的内生安全防护体系，强化低空经济场景下的实时态势感知与主动防御能力。需重点研究解决的问题包括：(1)面对多约束耦合的低空风险，如何兼顾安全性、实时性与二次冲突抑制，构建动态调配、协同解脱与自主智能冲撞的多层级风险协同缓解决策理论；(2)在高动态低空异构网络环境下，如何构建具备自愈、感知与智能决策能力的内生安全体系，实现跨空间、跨安全、跨层级的全域智能协同防护。

低空监视面临目标类型多样、背景环境干扰复杂以及目标特征微弱等现实困境，现有的单模态算法与小样本学习模型在开放世界场景下缺乏足够的鲁棒性与泛化能力。亟需利用多模态大模型的跨模态语义对齐与逻辑推理能力，构建具备通用认知的监视基础模型。需重点研究解决的问题包括：(1)面向异构探测信息在时空维度的精准配准需求，如何通过跨模态数据配准与校准、多源信息互补性挖掘、轻量化实时融合框架，突破多

模态数据的高精度时空配准、特征级/决策级融合及鲁棒性提升，实现低空目标的高精度抗干扰探测；(2)如何通过多模态融合增强、知识融合增强等机理，实现集群目标精确探测和追踪；(3)面对低空非合作目标多样化及环境干扰复杂的挑战，如何构建低空监视通用基础模型，突破跨模态语义对齐与知识迁移机制，实现雷达、视觉与文本信息的高精度特征融合；如何利用大模型的长时序推理能力，解决开放世界场景下新型或未知威胁目标的轨迹意图预测与冷启动识别难题。

3.3 低空空域与飞行器管控

低空资源的高效动态配置是保障空域安全和飞行器运行效能的关键所在。当前低空领域面临资源配置失衡、供需矛盾突出等问题，迫切需要建立智能化资源调度体系。通过引入动态分配算法和智能优化技术，创新低空协同管理理论，可显著提升空域资源利用率，实现安全性与运行效率的最佳平衡。这一技术体系为空域规划、智能调度及能耗管理提供理论支撑，为构建安全高效的低空运行环境奠定基础。需重点研究解决的问题包括：(1)如何在时空不确定性、多用户冲突、安全效率博弈等多维约束下，建立低空空域需求与资源供给的动态耦合模型，实现低空空域资源的动态智能管理；(2)如何在低空复杂场景下，突破多智能体协同决策的实时性与鲁棒性瓶颈，实现低空空域资源、物理保障资源(起降场、能源及补给设施)与信息智能控制资源(通信、导航、监视、算力、存储等)的低空多资源高效协同配置。

低空飞行器的自主控制与智能避障技术是保障空域安全和运行效率的关键支撑。针对动态环境中“感知—决策—控制”闭环协同的技术瓶颈，需要重点突破高动态环境下的避障预测与决策建模技术，解决飞行器机动性、安全性和能效性的多目标协同优化问题。通过实时路径规划与鲁棒控制技术，确保飞行器在复杂环境中的自主避障能力和任务执行效率，最终实现多智能体的安全协同飞行，为低空规模化运行和低空经济发展提供技术保障。需重点研究解决的问题包括：(1)如何设计自适应控制架构，在强扰动等极端情况下，仍能保障飞行器轨迹跟踪精度与稳定性，实现“感知—决策—执行”全链条的鲁棒性闭环；(2)如何通过提升“动态感知—实时决策—鲁棒控制”闭环效率，突破高动态障碍物避让、交互博弈、能耗优化与避障路径生成协同机理，建立消解冲突的分布式协同机制，实现在高动态、强干扰的低空复杂环境中飞行器个体飞行安全高效自主避障以及多智能体安全高效协同飞行。

低空安全风险防控与应急响应体系的敏捷化建设是保障空域安全运行的重要支撑。针对飞行保障设施故障、运行冲突等突发风险，需要构建“主动预防+被动响应”的双重防护机制，形成“态势感知—风险评估—实时预警—快速处置”的闭环管理流程。通过创新动态风险管控方法，突破传统静态安全模式局限，建立基于韧性理论的安全防护体系，显著提升低空系统的抗干扰能力和故障恢复速度，为城市空中交通、无人机物流等规模化应用提供可靠的安全保障。需重点研究解决的问题包括：(1)如何通过建立动态风险识别—快速态势评估—多主体协同响应体系，突破自主避险决策优化机理，实现复杂低空环境下安全风险的实时感知、快速识别、精准预测与智能协同控制，提升低空安全韧性；(2)如何设计分布式容错架构与恢复机制，实现在通信中断、设备故障等极端扰动下的低空复杂系统韧性保持与快速协同恢复。

4 未来发展建议

经过论坛讨论，在重大研究计划布局、低空科技研究生态与产学研协作等方面提出重要建议，本文总结如下：

(1)聚焦当前国家低空经济发展所面临的安全、高效与可持续性紧迫需求，启动低空经济信息系统与安全管控专项研究计划。整合多学科力量，贯通基础理论研究、核心技术攻关和产业应用落地的创新链条，重点突破保障低空经济高质量发展的信息系统构建与安全管控技术体系，为我国低空经济的安全稳定与高质量发展提供系统性技术支撑。

(2)打造开放协同的低空科技研发生态体系，建立数据与算法共享机制。通过持续构建高质量标注数据集，开放标准化的数据资源、模型参数及优化方法，促进产学研用深度融合，加速低空领域基础研究突破与核心技术迭代升级。

(3)立足低空经济重点应用领域，针对产业发展中的核心技术瓶颈，坚持自主创新与国际前沿并重。通过深化产学研协同创新机制，加速推进高端低空装备与系统的自主研发，强化关键技术标准体系建设，促进创新成果产业化落地，全面提升我国在低空科技领域的国际话语权和产业竞争力。

参 考 文 献

[1] 中国移动通信研究院. 面向6G的天地一体融合网络技术白皮书. 北京：中移智库，2024.

[2] 中国电信集团有限公司. 天翼云网融合平台白皮书. 北京：天翼云科技有限公司，2025.

[3] 中共中央办公厅，国务院办公厅. “十四五”国家信息化规划. 北京：中共中央办公厅，2021.

[4] 东南网. 我省颁发首张无人机通信系统无线电频率使用许可证和

电台执照.（2024-09-06）/[2025-07-12]. https://sm.fjsen.com/wap/2024-09/06/content_31731421.html.

[5] 国务院办公厅. 我国将探索建立通感一体的低空经济网络设施.（2024-10-23）/[2025-07-12]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202410/content_6982364.htm.

[6] 中共中央 国务院. 国家综合立体交通网规划纲要.（2021-02-24）/[2025-07-12]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.html.

[7] 国泰君安证券. 2025年低空经济专题分析:监视体系的发展趋势和产业机会.（2025-02-24）/[2025-07-12]. https://www.vzkoo.com/read/2025022429af994523d4c07370cc4ad5.html.

[8] 张雅雯,胡士强. 低空目标的雷达/可见光协同监视跟踪方法研究.（2018-03-19）/[2025-07-12]. https://www.fx361.cc/page/2018/0319/17606591.html.

[9] 中国移动(成都)产业研究院. 低空智能网联网络与数据安全体系白皮书(2025).（2025-05-06）/[2025-07-12]. https://www.sohu.com/a/892308376_121752158.

[10] CCTIME飞象网. 6G技术标准化与商用化迈出关键一步——北京移动首发“双频通感立体网络”创新成果.（2025-04-09）/[2025-07-12]. https://finance.sina.cn/tech/2025-04-09/detail-inesqeru6686694.d.html.

[11] 福建日报. 全球首个“5G-A通感一体低空协同组网”于厦门成功试点.（2023-12-28）/[2025-07-12]. https://local.cctv.com/2023/12/28/ARTIUyi6FcGDJd5ldlgDNUFp231228.html.

[12] 中国教育网. 南昌航空大学研发的“江西省低空空域管理系统”启动运行.（2025-07-01）/[2025-07-12]. http://edu.china.com.cn/2025-07/01/content_117956897.html.

[13] 中国证券网. 亿航智能与深圳市宝安区政府建立战略合作 打造城市空中交通运营示范中心.（2023-07-14）/[2025-07-12]. https://company.cnstock.com/company/scp_gsxw/202307/5090896.html.

[14] 中国工业新闻网. 大疆发布全新旗舰飞行平台DJI Matrice 400,重构行业无人机智能新标准.（2025-06-16）/[2025-07-12]. https://wap.cinn.cn/p/416334.html.

[15] C114通信网. 中国移动联合华为在浙江完成全球首个城市复杂场景5G-A通感低空连片组网验证.（2023-12-26）/[2025-07-12]. https://www.c114.com.cn/news/126/a1251891.html.

[16] 中国新闻网. 天津大学“低空智能感知关键技术与应用”摘吴文俊人工智能科技进步一等奖.（2025-02-24）/[2025-07-12]. https://www.chinanews.com/edu/2025/02-24/10373451.shtml.

[17] 鹏城实验室. 鹏城实验室发布低空多任务一体化感知硬件系统 落实深圳低空经济发展战略.（2025-05-30）/[2025-07-12]. https://www.pcl.ac.cn/html/943/2025-05-30/content-4594.html.

[18] 亿航智能. 亿航智能携手北京房山推动低空新质救援力,依托创新技术建设低空安全应急生态.（2025-06-27）/[2025-07-12]. https://www.feiauto.com/xx/1511.html.

[19] 北京市经济和信息化局. 北京市经济和信息化局等4部门关于印发《北京市促进低空经济产业高质量发展行动方案(2024-2027年)》的通知.(2024-09-30)/[2025-07-12]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202409/t20240930_3910685.html.

[20] Hu YS,Shi NX,Lu L,et al. Space-air-ground integrated heterogeneous network slicing with native intelligence// 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). Dalian,China. IEEE,2023:1—6.

[21] Qu H,Ma N,Yuan XD,et al. Survivable virtual network embedding based on multi-domain dynamic weighting in space-air-ground integrated network// 2022 7th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS). Wuhan,China. IEEE,2022:610—615.

[22] Zhang PY,Zhang Y,Kumar N,et al. Dynamic SFC embedding algorithm assisted by federated learning in space–air–ground-integrated network resource allocation scenario. IEEE Internet of Things Journal,2023,10(11):9308—9318.

[23] Guo Q,Kato N,Tang FX. Energy efficient routing for fso-Rf space-air-ground integrated network:A deep reinforcement learning approach// 2023 8th IEEE International Conference on Network Intelligence and Digital Content (IC-NIDC). Beijing,China. IEEE,2024:254—258.

[24] Li H,Ota K,Dong MX. AI in SAGIN:Building deep learning service-oriented space-air-ground integrated networks. IEEE Network,2023,37(2):154—159.

[25] Lu H,Duan XF. Collaborative computing for space-air-ground integrated vehicular networks. 2021 International Conference on Space-Air-Ground Computing (SAGC). Huizhou,China. IEEE,2022:175—177.

[26] Bai JK,Zhan J,Ma JX. STDMA access protocol in LEO space-air-ground integrated network. 2024 IEEE International Conference on Sensing,Diagnostics,Prognostics,and Control (SDPC). Shijiazhuang,China. IEEE,2024:241—245.

[27] Du JX,Guo WB,Yan M,et al. Effect of frequency offset on collaborative beamforming of UAV swarm in space-air-ground integrated networks// 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Milan,Italy. IEEE,2025:1—6.

[28] Duan TX,Yan HN,Zhang F,et al. A high-efficiency Doherty power amplifier with filtering matching and harmonic suppression. 2024 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Beijing,China. IEEE,2024:1—3.

[29] Kong DQ,Yang BP,Li F. Research on prototype system for electromagnetic spectrum management and control based on GIS. 2022 8th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC). Hangzhou,China. IEEE,2023:778—782.

[30] Sun YZ,Ye XR,Tan HC,et al. A large-scale energy efficient time-domain pilot muting mechanism for non-stationary channels:A deep reinforcement learning approach. IEEE Wireless Communications Letters,2024,13(1):93—97.

[31] Chen YH,Yang HL,Xu CY,et al. Joint channel selection and power control for multi-UAV-enabled anti-jamming communications based on game guided reinforcement learning. GLOBECOM 2024 - 2024 IEEE Global Communications Conference. Cape Town,South Africa. IEEE,2025:1485—1490.

[32] Huang QX,Hu J,Yue QD,et al. Beamforming design in intelligent reflecting surface aided multicast system in ultra-high frequency bands with large-scale antenna array. IEEE Wireless Communications Letters,2024,13(5):1429—1433.

[33] Fei ZS,Wang XY,Wu N,et al. Air-ground integrated sensing and communications:Opportunities and challenges. IEEE Communications Magazine,2023,61(5):55—61.

[34] 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.

[35] Liu F,Cui YH,Masouros C,et al. Integrated sensing and communications:Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2022,40(6):1728—1767.

[36] Jin YW,He RS,Ai B,et al. A novel geometry-based stochastic channel model in integrated sensing and communication scenarios. IEEE Wireless Communications Letters,2024,13(7):2018—2022.

[37] Zheng BW,Liu F. Random signal design for joint communication and SAR imaging towards low-altitude economy. IEEE Wireless Communications Letters,2024,13(10):2662—2666.

[38] Lu Y,Mao WH,Du HY,et al. Semantic-aware vision-assisted integrated sensing and communication:Architecture and resource allocation. IEEE Wireless Communications,2024,31(3):302—308.

[39] Cheng X,Zhang HT,Zhang JN,et al. Intelligent multi-modal sensing-communication integration:Synesthesia of machines. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2024,26(1):258—301.

[40] 每日经济新闻. 中国移动联合华为首次实现5G-A低空无人机感知技术:无人机入侵探测识别率达100%. (2023-05-27)/[2025-07-12]. https://www.nbd.com.cn/articles/2023-05-27/2844761.html.

[41] 中国电科第十四研究所. 成功试飞,创新研制国内最轻最小雷达光电一体化对地感知系统. (2024-05-20)/[2025-07-12]. https://www.sastind.gov.cn/n10086200/n10086331/c10615320/content.html.

[42] Iturria-Rivera PE,Chenier M,Herscovici B,et al. Channel selection for Wi-Fi 7 multi-link operation *via* optimistic-weighted VDN and parallel transfer reinforcement learning. 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal,Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Toronto,ON,Canada. IEEE,2023:1—6.

[43] 3GPP. 3GPP TR 36.777 Enhanced LTE support for aerial vehicles. Sophia Antipolis:3GPP. 2017.

[44] Cheng X,Li YR,Wang CX,et al. A 3-D geometry-based stochastic model for unmanned aerial vehicle MIMO ricean fading channels. IEEE Internet of Things Journal,2020,7(9):8674—8687.

[45] Qu KQ,Guo SS,Saeed N,et al. Near-field integrated sensing and communication:Performance analysis and beamforming design. IEEE Open Journal of the Communications Society,2024,5:6353—6366.

[46] Jing XY,Liu F,Masouros C,et al. ISAC from the sky:UAV trajectory design for joint communication and target localization. IEEE Transactions on Wireless Communications,2024,23(10):12857—12872.

[47] Saboor A,Vinogradov E,Cui ZZ,et al. A geometry-based modelling approach for the line-of-sight probability in UAV communications. IEEE Open Journal of the Communications Society,2024,5:364—378.

[48] Abdissa Bayessa G,Chai R,Liang CC,et al. Joint UAV deployment and precoder optimization for multicasting and target sensing in UAV-assisted ISAC networks. IEEE Internet of Things Journal,2024,11(20):33392—33405.

[49] Pandey GK,Gurjar DS,Yadav S,et al. Resource allocation and robust trajectory design for dual UAV-assisted secure communications. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2025. DOI:10.1109/TVT.2025.3608080.

[50] Leranso Betalo M,Ullah I,Berhanu Tesema F,et al. Generative AI-driven multiagent DRL for task allocation in UAV-assisted EMPD within 6G-enabled SAGIN networks. IEEE Internet of Things Journal,2025,12(17):35890—35907.

[51] Gürses A,Sichitiu ML. Air-to-ground channel modeling for UAVs in rural areas// 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall). Washington,DC,USA. IEEE,2024:1—6.

[52] 汤新民,顾俊伟,刘冰,等. 低空监视技术及其发展趋势综述. 南京航空航天大学学报,2024,56(6):973—993.
Tang XM,Gu JW,Liu B,et al. Review of low-altitude surveillance technologies and their development trends. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2024,56(6):973—993. (in Chinese)

[53] 杨荣盛. 低空空域监视对策研究. 广汉:中国民用航空飞行学院,2011.

[54] Kantharaj A,Abdoli A. Improving aviation and flight safety by analyzing surveillance data// 2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). Orlando,FL,USA. IEEE,2021:5926—5928.

[55] Avola D,Cannistraci I,Cascio M,et al. A novel GAN-based anomaly detection and localization method for aerial video surveillance at low altitude. Remote Sensing,2022,14(16):4110.

[56] Young S,Ancel E,Moore A,et al. Architecture and information requirements to assess and predict flight safety risks during highly autonomous urban flight operations,NASA/CR—2020-220549. Moffett Field:NASA Ames Research Center,2020.

[57] 袁晨钧,李健. 美国低空安全管理体系重构与执法创新. 现代世界警察,2025(5):32—39.
Yuan CJ,Li J. Reconstruction of US low-altitude safety management system and law enforcement innovation. Modern World Police,2025(5):32—39. (in Chinese)

[58] 赵钰洋. 葡萄牙低空安全管理体系. 现代世界警察,2025(5):48—53.
Zhao YY. Portugal low-altitude safety management system. Modern World Police,2025(5):48—53. (in Chinese)

[59] ASTM International. ASTM F3411-22a Standard Specification for Remote ID and Tracking. West Conshohocken:ASTM International. (2022-06-13)/[2025-07-12]. https://www.astm.org/f3411-22a.html.

[60] EUROCAE. EUROCAE ED-269 Minimum Operational Performance Standard for UAS Geo-Fencing. Saint-Denis:EUROCAE. (2020-06-01)/[2025-07-12]. https://www.eurocae.net/product/ed-269-minimum-operational-performance-standard-for-uas-geo-fencing/.

[61] EUROCAE. EUROCAE ED-318 Technical Specification for Geographical Zones and U-Space Data Provision and Exchange. Saint-Denis:EUROCAE. (2024-06-09)/[2025-07-12]. https://www.eurocae.net/product/ed-318-technical-specification-for-geographical-zones-and-u-space-data-provision-and-exchange/.

[62] 低空产业联盟. 低空智能网联体系参考架构(2024版). 北京:低空产业联盟,2024.

[63] Wang WW,Zheng J,Lu XG. Design and implementation of low-altitude flight dynamic monitoring and management platform// 2025 4th International Symposium on Computer Applications and Information Technology (ISCAIT). Xi'an,China. IEEE,2025:1018—1022.

[64] Chen WS,Liu J,Li J. Classification of UAV and bird target in low-altitude airspace with surveillance radar data. The Aeronautical

Journal,2019,123(1260):191—211.

[65] Wang ZY,Zhang HH,Hu MH,et al. Analysis of safety characteristics of flight situation in complex low-altitude airspace. Advances in Mechanical Engineering,2018,10(5):1687814018774656.

[66] Wang YS,Cai J,Wang R,et al. Low false alarm radar detection for low altitude weak target based on multi-dimensional clustering extended features// 2024 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). Zhuhai,China. IEEE, 2025:1—6.

[67] Wang HC,Li HF,Zhou H,et al. Low-altitude infrared small target detection based on fully convolutional regression network and graph matching. Infrared Physics & Technology,2021,115:103738.

[68] Pang DD,Shan T,Ma PG,et al. A novel spatiotemporal saliency method for low-altitude slow small infrared target detection. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2022,19:7000705.

[69] Xie YB,Gardi A,Sabatini R. Cybersecurity trends in low-altitude air traffic management// 2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC). Portsmouth,VA,USA. IEEE,2022:1—9.

[70] Zhu NN,Zhong FL,Lei XY,et al. Situation awareness and tracking algorithm for countering low-altitude swarm target threats. Remote Sensing,2025,17(7):1172.

[71] Gong SL,Yan XL. Design of dual-mode low altitude surveillance system based on wireless sensor network// 2019 IEEE 10th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). Beijing,China. IEEE,2020:362—365.

[72] Du X,Shang HT,Wang L,et al. Low-altitude target detection method based on distributed sensor networks. IEEE Access,2022,10:56458—56468.

[73] C. Chi,B. Li,H. Deng,and S. Zhao. Depth camera–LiDAR fusion based UAV autonomous navigation for parcel delivery in complex urban environment// 2024 IEEE International Conference on Systems, Man,and Cybernetics (SMC). Kuching,Malaysia. IEEE,2024: 4801–4806.

[74] Zhang YP,Xu GG,Shan GL. Sensor cooperative scheduling method for low-altitude maneuvering target tracking in complex environment. Sensor Review,2022,42(1):133—144.

[75] Ling Y,Wang PY,Mao SL. Intelligent control algorithm for low-altitude target based on multi-sensor data fusion// 2024 IEEE 7th International Conference on Automation,Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE). Shenyang,China. IEEE,2025:797—802.

[76] Yu XJ,Wei S,Fang YY,et al. Low-altitude slow small target threat assessment algorithm by exploiting sequential multifeature with long short-term memory. IEEE Sensors Journal,2023,23(18):21524—21533.

[77] 王莉莉. 低空安全体系建设思考与探索. 机器人产业,2025(3):52—56.
Wang LL. Thoughts and exploration on the construction of low-altitude safety system. Robot Industry,2025(3):52—56. (in Chinese)

[78] 王洪涛,李宇凡,徐茜,等. 低空经济安全风险防范标准化体系建设探讨. 质量安全与检验检测,2025,35(2):37—40,48.
Wang HT,Li YF,Xu Q,et al. Discussion on the construction of standardization system for security risk prevention in low-altitude economy. Quality Safety & Inspection and Testing,2025,35(2):37—40,48. (in Chinese)

[79] 黄静洋,潘璇,付小蓉,等. 中低空通用航空飞行计划安全风险评估. 中国安全科学学报,2023,33(12):23—30.
Hu JY,Pan X,Fu XR,et al. Safety risk assessment for low and medium altitude general aviation flight plans. China Safety Science Journal,2023,33(12):23—30. (in Chinese)

[80] Wang Z,Xing YZ,Guo JX,et al. A comprehensive safety risk evaluation method for low-altitude flights. Journal of Engineering Science and Technology Review,2024,17(6):199—207.

[81] Wang XY,Wang XS,Zhou ZQ,et al. A deep-learning method based on the multistage fusion of radar and camera in UAV obstacle avoidance. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024,60(5):6734—6751.

[82] Liang WD,Tan JT,He HJ,et al. Detection of small objects from UAV imagery *via* an improved swin transformer. IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens, Greece. IEEE,2024:9134—9138.

[83] Tung F,Mori G. Deep neural network compression by in-parallel pruning-quantization. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2020,42(3):568—579.

[84] Mozaffari M,Saad W,Bennis M,et al. A tutorial on UAVs for wireless networks:applications,challenges,and open problems. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2019,21(3):2334—2360.

[85] Fotouhi A,Ding M,Hassan M,et al. Survey on UAV cellular communications:Practical aspects,standardization advancements, regulation,and security challenges. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2019,21(4):3417—3442.

[86] Kawamoto Y,Nishiyama H,Kato N,et al. Toward future unmanned aerial vehicle networks:architecture,resource allocation and field experiments. IEEE Wireless Communications,2019,26(1):94—99.

[87] Nobis F,Geisslinger M,Weber M,et al. A deep learning-based radar and camera sensor fusion architecture for object detection// 2019 Sensor Data Fusion:Trends,Solutions,Applications (SDF). Bonn,Germany. IEEE,2019:1—7.

[88] Theile M,Bayerlein H,Nai R,et al. UAV path planning using global and local map information with deep reinforcement learning// 2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). Ljubljana,Slovenia. IEEE,2021:539—546.

[89] Ryll M,Ware J,Carter J,et al. Semantic trajectory planning for long-distant unmanned aerial vehicle navigation in urban environments// 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Las Vegas,NV,USA. IEEE,2020:1551—1558.

[90] Bayerlein H,Theile M,Caccamo M,et al. Multi-UAV path planning for wireless data harvesting with deep reinforcement learning. IEEE Open Journal of the Communications Society,2021,2:1171—1187.

[91] Yasin JN,Mohamed SAS,Haghbayan MH,et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs):Collision avoidance systems and approaches. IEEE Access,2020,8:105139—105155.

[92] Baidya B,Mondal A,Manna S,et al. Enhanced UAV tracking through multi-sensor fusion and extended Kalman filtering. Doctoral Symposium on Intelligence Enabled Research,2024.

[93] Lim YZ,Xin X,Khoo TP. Enhancing UAV flight safety through sensor-based runtime risk assessment// 2022 IEEE 8th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). Yokohama,Japan. IEEE,2023:1—

5.

[94] Zeng WL,Quan ZB,Zhao ZY,et al. A deep learning approach for aircraft trajectory prediction in terminal airspace. IEEE Access,2020,8:151250—151266.

[95] Du YS,Zhang XJ,Nie ZL. A real-time collision avoidance strategy in dynamic airspace based on dynamic artificial potential field algorithm. IEEE Access,2019,7:169469—169479.

[96] Zeng Y,Zhang R,Lim TJ. Wireless communications with unmanned aerial vehicles:Opportunities and challenges. IEEE Communications Magazine,2016,54(5):36—42.

[97] Zeng Y,Wu QQ,Zhang R. Accessing from the sky:A tutorial on UAV communications for 5G and beyond. Proceedings of the IEEE,2019,107(12):2327—2375.

[98] Cheng N,Xu WC,Shi WS,et al. Air-ground integrated mobile edge networks:Architecture,challenges,and opportunities. IEEE Communications Magazine,2018,56(8):26—32.

[99] Li JD,Zhou CY,Liu JY,et al. Reinforcement learning-based resource allocation for coverage continuity in high dynamic UAV communication networks. IEEE Transactions on Wireless Communications,2024,23(2):848—860.

[100] Han RX,Li HX,Knoblock EJ,et al. Dynamic spectrum allocation in urban air transportation system *via* deep reinforcement learning// 2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC). San Antonio,TX,USA. IEEE,2021:1—10.

[101] Yao SL,Guan RW,Huang XY,et al. Radar-camera fusion for object detection and semantic segmentation in autonomous driving:A comprehensive review. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles,2024,9(1):2094—2128.

[102] Zhou Y,Xiao JH,Zhou Y,et al. Multi-robot collaborative perception with graph neural networks. IEEE Robotics and Automation Letters,2022,7(2):2289—2296.

[103] Zhao YJ,Lu SQ,Wang C,et al. Integrated reinforcement learning framework for UAV swarm two-stage cooperative multitarget detection tasks. IEEE Internet of Things Journal,2025,12(8):9435—9448.

[104] 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)

[105] Zheng Y,Chen YH,Qian B,et al. A review on edge large language models:Design,execution,and applications. ACM Computing Surveys,2025,57(8):1—35.

[106] Cai S,Wang G,Li W,Lyu D,He G. Adaptive two-range quantization and hardware co-design for large language model acceleration. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,2025,15(2):272—284.

[107] Xue D,Zhou XJ,Wang M,et al. Formation control and path planning of multi-robot systems *via* large language models. Science China Information Sciences,2025,68(5):150205.

[108] Hu ZJ,Gao XG,Wan KF,et al. Asynchronous curriculum experience replay:A deep reinforcement learning approach for UAV autonomous motion control in unknown dynamic environments. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2023,72(11):13985—14001.

[109] Huang HJ,Yang YC,Wang H,et al. Deep reinforcement learning for UAV navigation through massive MIMO technique. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2020,69(1):1117—1121.

[110] Yang Z,Zhang YT,Zeng J,et al. AI-driven safety and security for UAVs:From machine learning to large language models. Drones,2025,9(6):392.

[111] Liang CQ,Liu L,Liu C. Multi-UAV autonomous collision avoidance based on PPO-GIC algorithm with CNN–LSTM fusion network. Neural Networks,2023,162:21—33.

[112] Ding R,Zhou FH,Wu QH,et al. From external interaction to internal inference:An intelligent learning framework for spectrum sharing and UAV trajectory optimization. IEEE Transactions on Wireless Communications,2024,23(9):12099—12114.

[113] Zheng B,Zhou WJ,Ma X. Quantitative study on UAV operational risk based on specific operation risk assessment model. Quality and Reliability Engineering International,2025,41(5):1689—1713.

[114] Hu XT,Pang BZ,Dai FQ,et al. Risk assessment model for UAV cost-effective path planning in urban environments. IEEE Access,2020,8:150162—150173.

[115] Yu ZQ,Qu YH,Zhang YM. Distributed fault-tolerant cooperative control for multi-UAVs under actuator fault and input saturation. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2019,27(6):2417—2429.

[116] Yang K,Qian MS,Gao ZF,et al. Distributed fault-tolerant collision avoidance control of multiple UAVs// 2024 7th International Symposium on Autonomous Systems (ISAS). Chongqing,China. IEEE,2024:1—6.

[117] 中国民用航空局. MH/T 4053-2022 UTM信息服务系统数据接口规范. 北京:中国标准出版社,2022.

[118] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB 42590-2023 民用无人驾驶航空器系统安全要求. 北京:中国标准出版社,2023.

[119] Wan YY,Ji JH,Zhou FH,et al. From static dense to dynamic sparse:Vision-radar fusion-based UAV detection. IEEE Transactions on Information Forensics and Security,2025,20:4454—4468.

[120] Wang CX,Tian JM,Cao JW,et al. Deep learning-based UAV detection in pulse-Doppler radar. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2022,60:5105612.

[121] Wang BS,Li Q,Mao QC,et al. A survey on vision-based anti unmanned aerial vehicles methods. Drones,2024,8(9):518.

[122] Wei X,Ma J,Sun C. A survey on security of unmanned aerial vehicle systems:attacks and countermeasures. IEEE Internet of Things Journal,2024,11(21):34826—34847.

[123] Liang LP,Cheng WC,Zhang W,et al. Integrated sensing and communication for anti-jamming with OAM. IEEE Transactions on Wireless Communications,2026,25:429—444.

[124] Hamissi A,Dhraief A,Sliman L. A comprehensive survey on conflict detection and resolution in unmanned aircraft system traffic management. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2025,26(2):1395—1418.

[125] Chen S,Liu G,Zhou Z,Zhang K,Wang J. Robust multi-agent reinforcement learning method based on adversarial domain randomization for real-world dual-UAV cooperation. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles,2024,9(1):1615—1627.

Fundamental Theory and Key Technologies for Information System and Security Management of Low-altitude Economy

Qihui Wu[1] Peihao Dong[1*] Fuhui Zhou[2]

1. *School of Electronic Information Engineering*, *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, *Nanjing 211106*, *China*
2. *School of Artificial Intelligence*, *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, *Nanjing 211106*, *China*

Abstract The low-altitude economy represents new quality productive forces and serves as a vital direction for future technological convergence and economic growth. The efficient information system and reliable safety control are prerequisites for its healthy and high-quality development, necessitating urgent innovations and breakthroughs in basic theories and core technologies. As an emerging network form characterized by multi-functional integration and multi-application coverage, the low-altitude networking system operates in the high-density and large-scale manner under complex environments, posing significant challenges to existing theories and techniques of the information system and safety control. With the expansion of application scenarios and electromagnetic spectrum usage, low-altitude networks are trending toward multi-source, multi-domain information fusion and dynamic operation. This paper systematically reviews frontier research and key technical progress in three major directions: space-air-ground integrated information networks, intelligent surveillance for low-altitude flight safety, and low-altitude airspace and aircraft control. It discusses critical challenges, specifically covering space-air-ground network collaborative design, low-altitude spectrum allocation and sharing, low-altitude multi-modal integrated sensing and communications, robust foundation models for cooperative surveillance of low-altitude targets, novel security systems for low-altitude intelligent networks, dynamic management and optimized resource allocation of low-altitude airspace, low-altitude multi-modal perception and environmental adaptability, and safety risk prevention and emergency response. Based on the 407th "Shuangqing Forum", focusing on the philosophy of cross-domain collaboration and dynamic adaptation, this paper summarizes key research directions and urgent scientific problems for the low-altitude information system and safety control centered on the theory of the semantic cognitive decision-making loop. Future development suggestions are proposed to inspire in-depth research and breakthroughs in relevant basic theories, critical technologies, and practical applications.

Keywords low-altitude information and control system; low-altitude intelligent network; cognitive decision-making loop; cross-domain collaboration; dynamic adaptation

吴启晖 南京航空航天大学副校长，教育部长江学者特聘教授、国家频谱战略规划专家咨询委员会政策研究组组长，国家自然科学基金委员会信息科学部第九届专家咨询委员会委员、工业和信息化部通信科技委常务委员、国家级电磁频谱研究院院长。主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目、"173"重点项目等10余项。入选ESI工程学与计算机科学领域科学家世界前1%。获国家科技进步奖二等奖1项、省部级科技进步奖一等奖5项。

董培浩 南京航空航天大学副教授，硕士生导师，江苏省青年科技人才。研究方向包括低空智联网、频谱语义认知、智能通信、超大规模MIMO、通感一体化。主持国家自然科学基金面上项目、青年科学基金项目(C类)等科研项目。在国内外学术期刊和会议发表论文30余篇，其中1篇先后入选ESI热点和高被引论文。

(责任编辑 王 磊 张 强)

* Corresponding Author, Email: phdong@nuaa.edu.cn