

引用格式: 吴启晖, 董超, 贾子晔, 等. 低空智能组网与控制理论方法[J]. 航空学报, 2024, 45(3): 028809. WU Q H, DONG C, JIA Z Y, et al. Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(3): 028809 (in Chinese). doi:10.7527/S1000-6893.2023.28809

# 低空智能组网与控制理论方法

吴启晖<sup>1</sup>, 董超<sup>1,\*</sup>, 贾子晔<sup>1</sup>, 崔灿<sup>1</sup>, 冯斯梦<sup>1</sup>, 周福辉<sup>1</sup>, 谢华<sup>2</sup>

1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院

电磁频谱空间认知动态系统工信部重点实验室, 南京 211106

2. 南京航空航天大学 通用航空与飞行学院, 南京 211106

封面  
文章

**摘要:** 低空智能网络(LAIN)作为一种新兴的智能网络,依托于空天地海基础设施构成数字智能网络体系,是空天地一体化网络的重要组成部分,可支撑实现第六代通信技术无缝泛在互联,推动智能网络服务由地面向低空空域的发展。然而,LAIN正处在技术突破阶段,仍面临以下关键挑战尚未解决,主要包括低空空域安全管控困难、频谱干扰严重、多维资源紧缺等问题。因此,面向LAIN体系架构与安全管控问题,综述了目前低空网络的发展现状,指出其对于产业技术变革的意义;然后,从频谱资源、网络资源以及空域资源管理的角度出发,分析了LAIN相关技术的国内外研究现状;进一步,剖析低空飞行器空地频谱共享、感传算一体化组网覆盖、低空空域智能监管等关键技术,为LAIN和低空空域的管理指明进一步的发展方向;最后,提出了LAIN的应用示范,旨在面向低空空域高效运行与安全的重大需求,为下一代空天地一体化网络的进一步发展提供理论依据和技术。

**关键词:** 低空智能网络; 空天地一体化网络; 低空飞行器; 资源管理; 低空空域

中图分类号: V219

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2024)03-028809-18

低空智能网络(Low-Altitude Aerial Intelligent Network, LAIN)是在低空空域内(通常海拔3 km以下)运营的实体网络,包括由地面移动用户和基础设施组成的地面网络、空中平台组成的近地空间以及低轨卫星网络,是实现“人-机-物”三元融合智能互联的重要基础设施,对解决地面基础设施部署困难、减轻移动网络拥塞负担、增强用户服务覆盖范围以及促进低空经济发展具有重要的意义,推动第五代通信系统(Fifth Generation of communication system, 5G)的万物互联网络向低空空间进行拓展和延伸<sup>[1]</sup>。2021年2月,中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》,首次提出要发展以低空空域为依

托,以通用航空和无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)产业为主导的“低空经济”,发展新一代空管系统,推进空中流量管理和空域管理智能化。2022年,国务院在印发的《“十四五”数字经济发展规划》中明确指出要“前瞻布局第六代移动通信系统(Sixth Generation of communication system, 6G)网络技术储备,加大6G技术研发支持力度”。以UAV产业为发展基石的LAIN依托空天地海基础设施,有望助力6G加速实现“一体化全覆盖”“万物互联”等美好愿景,实现低空网络与低空经济、数字经济的高度融合。

与此同时,工业界与学术界对低空智能网络的关注度亦在与日俱增。一方面,工业UAV面向

收稿日期: 2023-04-04; 退修日期: 2023-04-18; 录用日期: 2023-04-27; 网络出版时间: 2023-05-15 13:59

网络出版地址: <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2024/V45/I3/28809>

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3104502); 江苏省前沿引领项目(BK20222013)

\* 通信作者. E-mail: dch@nuaa.edu.cn

国民各领域和需求场景,广泛应用于农林植保、巡逻巡检、地理测绘、交通管制、应急救援等各个行业领域中,市场规模不断扩大。如图1所示,根据观研报告网《中国工业UAV行业发展现状研究与投资趋势预测报告(2022—2029年)》,2015—2021年我国工业UAV行业市场规模由30.03亿元增长至478.12亿元,在近年来保持持续稳健的上升趋势。另一方面,如图2所示,全球民用UAV市场规模增长迅速,交易规模大幅上升,全球民用UAV市场规模呈现指数型增长趋势,预计到2024年或将超过4000亿元。随着卫星技术和新一代通信技术体系的发展,以UAV集群网络为依托的低空智能网将会在未来进一步发展,推动移动通信体系向网络化、数字化、智能化方向变革,构建三维立体全覆盖的天地一体化信息网络,实现低空经济与数字经济的高度交汇。

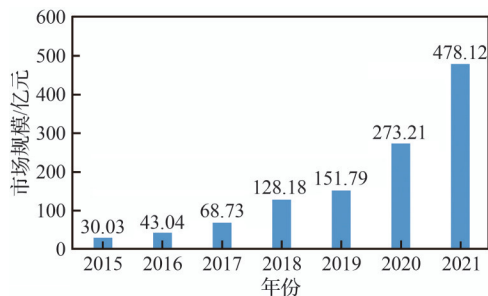


图1 中国工业UAV市场规模

Fig. 1 Industrial UAV market scale in China

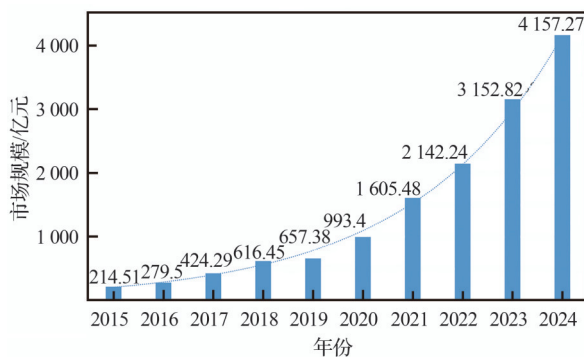


图2 全球民用UAV市场规模统计及预测

Fig. 2 Statistics and forecast of global civil UAV market scale

然而,作为一种新兴的通信网络,LAIN的发展过程中将面临低空空域高效运行与安全控制带来的挑战。本文针对LAIN在运行和管理过程

中的重大需求,面向频谱资源、网络资源、空域资源管控,分析LAIN的3大关键问题,为推动低空智能网建设、探索低空空域管理模式提供理论基础。首先,本文概述了LAIN的研究背景和发展现状;其次,从频谱资源、网络资源和空域资源的角度介绍了当前LAIN的研究现状;然后,总结了LAIN发展的问题和挑战;再次,从频谱、网络以及空域3个维度出发指明了低空网络未来发展的方向以及重大关键技术,并介绍了LAIN的应用示范平台;最后,总结了本文的主要内容。

## 1 概述

随着物联网技术的深入发展,5G技术的带宽、服务质量以及覆盖范围已无法满足通信产业的需求。相比之下,6G移动通信技术致力于提供更广阔的覆盖范围,实现全球范围内的全域无缝覆盖和“空天地海”全维度的泛在互联。然而,偏远地区缺少基础设施,且沙漠、海洋等区域无法实现地面无线网接入,这些地区为构建无缝覆盖的空天地海一体化信息网络带来了严峻的挑战<sup>[2]</sup>。LAIN依托地面基站和在低空空域内运营的近地设施以及低轨卫星的协同作用,具有高灵活性和高移动性,能够实现按需部署,为缺少基础设施的偏远地区提供更广的覆盖范围,并在三维立体空间内实现无缝覆盖,极大地提高视距链路的可能性,保障用户接入物联网的数据链路的可靠性,降低由用户数据传输带来的通信延迟。

UAV是LAIN中的重要组成部分,可以联合卫星网络和地面基础设施,实现复杂空域环境中的快速接入、通信中继以及安全连接<sup>[3]</sup>。UAV具有高灵活性、高动态性、按需部署和高度覆盖等优势,能够实现偏远地区的有效通信和任务卸载,为海洋监测、健康监管、农林植保、大数据分析等提供更可靠的通信支持和计算支持。此外,UAV能够实质性地减少物联网应用的延迟,提高能效,缓解核心网络的拥堵,为6G技术的进一步发展以及实现智能化、数字化、网络化融合发展提供技术支持。图3为LAIN架构示意图。

在社会经济效益方面,加快LAIN相关产业的研发进程,有望推动无线电监管产业、移动通信产业以及低空经济产业的进一步发展和技术

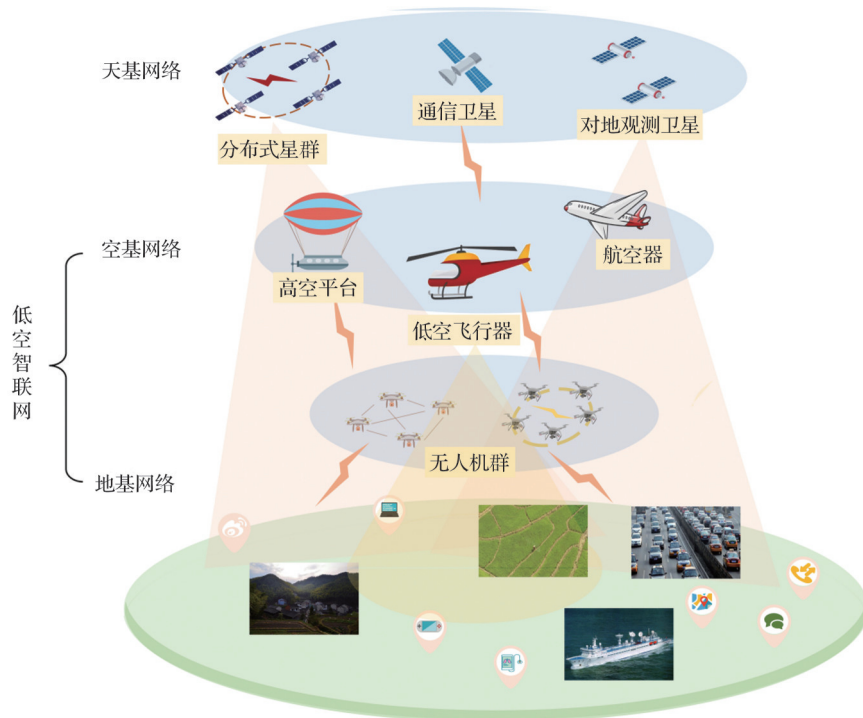


图3 LAIN示意图

Fig. 3 Schematic diagram of LAIN

变革。例如,LAIN技术的发展将推动频谱资源共享由静态向动态管控模式转型,推动频谱检测由平面向立体模式变革,加快空地用频标准演进、引领空中频谱监测设备研发,提升国家无线电秩序管理水平。对于移动通信产业,通信网络在低空空域内的架构推动移动网络由二维平面物联网向三维立体智联网发展,卫星网络、近地空间与地面设施的联合部署将进一步扩展移动通信产业服务用户由地面用户向三维空间用户发展,加速实现6G时代“全球网络无缝覆盖”“空天地海一体化”等愿景,提升移动通信覆盖水平。此外,LAIN产业的革新响应国家对低空经济的发展需求,颠覆传统空域静态单一划分方式,推动低空飞行器由“飞起来”向“飞得好”和“管得好”过渡,促进低空空域快速开放与优化使用,对提升我国低空经济开发水平具有重大意义。

然而,LAIN的发展尚处在起步阶段,技术研究还不成熟,很多基础问题尚未得到很好的解决。具体而言,低空空域管控面临3大挑战:空地频谱干扰严重、网络异构融合困难以及空域安全形势严峻。针对这些关键科学技术问题,本文从

频谱资源、网络资源、空域资源3个维度出发,分析当前LAIN面临的主要挑战和技术前景,为解决低空网络干扰严重、覆盖不全、管控困难等问题提供理论基础,并思考其未来进一步的发展方向。

## 2 研究现状

低空空域高效运行与安全控制是LAIN研究的核心目标。目前,现有的国内外研究中针对LAIN发展过程中存在的主要问题,面向频谱、网络与空域资源管理过程中的挑战,提出一系列资源分配策略和管控方法。

### 2.1 频谱资源管理

近年来,LAIN的频谱资源受到广泛的关注,相关研究总结如表1所示<sup>[4-10]</sup>。具体而言,作为一项基础资源,LAIN的部署和资源重构过程中必须合理分配频谱资源,满足包括UAV集群网络在内的低空网络的频谱资源的需求。例如,文献[4]基于博弈论的方法,提出一种分布式的协同频谱决策方法,降低UAV集群网络中外部恶

表 1 频谱资源管理研究现状

Table 1 Research status of spectrum resource management

文献	发表年份	研究重点	研究内容
[4]	2022	UAV 集群频谱决策	设计干扰环境下 UAV 频谱资源共享决策方法对抗可能收到的恶意干扰攻击
[5]	2022	星地网络频谱划分方法	基于图论模型求解频谱接入矩阵,从而实现认知用户的动态频谱划分
[6]	2019	异构网络三维频谱感知技术	制定三维频谱异构感知模型,提出三维时空感知框架和功率控制方案提高频谱利用率
[7]	2020	三维频谱共享技术	构建 UAV 与设备-设备的地面用户网络频谱共享模型
[8]	2021	UAV 频谱共享技术	构建 UAV 中继网络中频谱共享问题,实现吞吐量最大化
[9]	2019	协同频谱感知技术	对抗 UAV 网络高动态性,提出最大-最小距离聚类方法,提高 UAV 网络感知性能
[10]	2023	UAV 群频谱感知策略	设计基于聚类的协同频谱感知策略,提高簇头 UAV 的频谱监测性能

意干扰攻击和网络互扰对于组网的影响,实现高效动态的频谱决策。文献[5]构建了一种面向多用户的卫星认知通信场景,并基于图论的方法设计了一种动态频谱划分算法,利用地面用户的感知矩阵和信道参数,最大化用户的频谱收益。

相比传统的二维模型,在三维空间中探索和利用频谱机会具有更广阔的应用场景和更高的普适性。例如,文献[6]提出基于 UAV 频谱异构环境中机会检测的三维时空感知框架。文章基于 UAV 的频谱异构网络,联合时空感知方案构建了一种三维时空机会感知模型以更好地利用三维频谱机会,并设计了一种基于感知的功率控制方案,实现频谱资源利用率最大化。文献[7]研究 UAV 支持的蜂窝网络中三维空间光谱感知模型,提出 UAV 与地面用户通信的三维频谱共享网络,目的是最大化 UAV 网络的面积频谱效率。文献[8]考虑一种 UAV 认知中继网络的频谱共享场景,结合 UAV 的运动属性,基于路径离散化的方法联合优化其三维轨迹规划和功率,最大化 UAV 网络的吞吐量。

UAV 自组网的拓扑结构具有高度动态性,导致频谱资源的高效管理和分配策略难以实现。为了充分利用 UAV 集群的协同作用,应对未来通信系统多变的任务类型、动态的接入需求以及复杂的低空环境,文献[9]面向网络拓扑动态性,考虑 UAV 集群的移动性,根据簇头 UAV 的位置、速度和方向,提出一种基于聚类的分布式协同频谱感知策略,通过分层感知信息融合,提高认知 UAV 网络中的频谱检测性能。与此同时,文献[10]利用 K-Means 的聚类算法实现 UAV 分簇,并设计了一种两级分布式融合方案,减少信

息融合的时延并提高簇头 UAV 的频谱检测性能。

但是,现有的文献不足以实现低空网络快速用频决策和精确态势感知,低空空域飞行器集群在大规模异构环境中的协同认知和用频规划问题目前仍然缺少更好的解决方案。

## 2.2 网络资源优化配置

以 UAV 为代表的低空平台的发展引发了全球范围内对低空网络资源重构与部署策略的探索与开发。通过对网络资源的合理分配,实现低时延、高鲁棒、广覆盖的可靠通信,是当前和未来无线空域网的潜在研究方向。总的来说,目前 LAIN 中网络资源优化的相关研究可以分为以下 3 类:感知资源、通信资源与计算资源。为了直观对比各研究重点的不同,目前相关研究文献汇总于表 2<sup>[11-24]</sup>。

物联网设备的传感器或将达到“千万级”规模,仅靠地面传感设施无法实现对复杂环境和三维场景信息的准确收集。携带微型传感设备的 UAV 集群可以在危险区域中协同执行数据采集任务,获取多维度的低空感知资源,为决策方提供决策依据,空地协同的群智感知技术也将提高数据监测质量和信息采集效率。例如,文献[11-12]面向多 UAV 协同执行感知任务的场景,设计了 UAV 集群的异构资源高效分配策略。然而,传统的态势感知模型无法适应以 UAV 为感知主体的分布式集群感知模型,因此,高杨等<sup>[13]</sup>根据 UAV 集群类型,模拟 UAV 协同作战的特点,分别设计了 UAV 个体态势感知模型和同构、异构集群感知模型,为实现 UAV 集群的态势感知提

表 2 低空网络资源优化配置研究现状

Table 2 Research status of optimal allocation of low-altitude network resources

文献	发表年份	研究重点	研究内容
[11]	2023	UAV感知任务分配	研究多UAV协同执行感知任务场景下网络资源联合优化问题
[12]	2023	UAV集群协同感知	提出多任务驱动下UAV资源的分布式异构资源智能协同分配策略
[13]	2018	UAV集群感知模型	优化态势感知模型,设计UAV同构和异构集群感知模型
[14]	2020	UAV感知通信一体化模型	提出联合感知通信一体化框架,设计新型UAV天线阵列
[15]	2022	UAV通感一体化机制	实现通信感知集成系统中频谱资源的权衡
[16]	2020	UAV通信资源部署	考虑UAV能量受限,联合优化集群通信系统轨迹和资源分配
[17]	2022	高空平台与低轨卫星通信联合优化	研究空天地一体化通信网络的数据采集和传输问题实现传输数据量最大化
[18]	2023	UAV通信资源动态分配	研究UAV网络资源分配问题,最大化UAV通信的传输速率
[19]	2023	UAV用户匹配与通信资源联合优化	研究多UAV通信网络资源分配问题,实现用户匹配,最大化通信传输速率
[20]	2022	多UAV计算资源分配	提出多UAV协同计算和任务的部分卸载模型,最小化任务处理时延
[21]	2020	多UAV计算卸载资源管理	提出多UAV辅助的移动边缘计算系统的功率、频谱、轨迹调度联合优化
[22]	2021	车联网计算资源管理	研究UAV辅助的车载网络中多维计算资源分配策略
[23]	2023	移动边缘网络计算与缓存资源分配	联合优化UAV辅助的移动边缘计算网络的存储、计算与调度决策
[24]	2023	空中移动边缘计算系统的卸载决策	研究UAV与高空平台组成的分层移动边缘计算系统的计算卸载算法,最大化数据总量

供了理论基础。此外,通信与感知融合集成的通感一体化技术在未来将面向更广阔的应用领域,并被赋予更丰富的技术内涵。为了解决通感资源配置的权衡问题,实现频谱的协同利用,一些研究<sup>[14-15]</sup>提出了通感一体化框架,以充分利用协同传感UAV网络的频谱共享能力,增强UAV协同感知能力,实现集成传感和通信系统之间频谱资源的权衡。

实现空天地范围内无缝通信的覆盖是LAIN的一项基础功能。运用多种通信手段,联合部署低空飞行器和地面通信设施,能够基本实现范围内消除通信盲点,提高通信质量,构建全球范围内的三维立体广域覆盖网络。目前,国内外对LAIN的通信服务展开了详细的研究。例如,文献[16]考虑到UAV机载电池的能量存储有限,设计一种UAV通信系统的通信资源分配方案,最大化能源利用率。文献[17]中面向空天地一体化的数据收集和传输问题,考虑高空平台与低轨卫星联合为偏远地区的用户提供全面覆盖和服务的场景,并基于低轨卫星的周期性运动提出多种资源约束和流量限制下的接收数据最大化问题。此外,通信的传输速率同样是UAV网络资源分配的要素之一。文献[18-19]都研究了

UAV作为空中移动通信中继为地面用户提供辅助通信服务的场景,联合优化信道带宽分配、功率分配,最大化用户的通信可达传输速率。

为了满足计算密集型任务对通信延迟的要求,欧洲电信标准化协会提出移动边缘计算技术<sup>[25-26]</sup>。如图4所示,除了满足用户对低时延高质量的要求,低空飞行器作为移动基站辅助的“云-边-端”的三层网络架构为解决边缘地区覆盖难、设施少等关键问题以及实现更广阔的计算覆

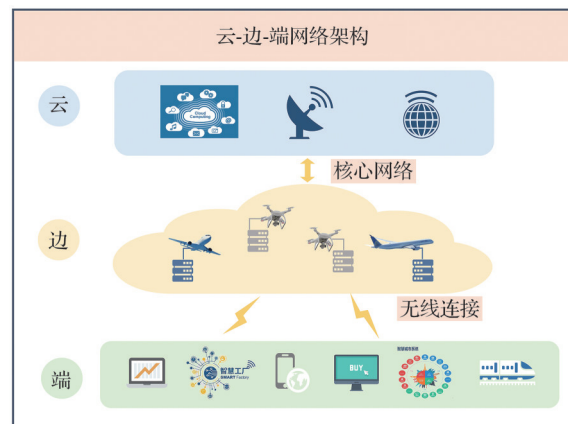


图 4 基于低空飞行器的云-边-端网络架构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of low-altitude aircraft-based "cloud-edge-end" network architecture

盖提供了更多的可能性。然而,有限的网络资源与智能设备的高能耗之间始终存在矛盾,时变网络中不合理的分配策略可能会导致计算或卸载资源被浪费。为了解决这一问题,文献[20-21]面向复杂任务场景,提出多UAV协同完成计算任务的模型,提高用户的服务质量。此外,在空中移动边缘计算系统中,缓存资源同样是网络资源的重要组成部分之一。文献[22]中研究了车联网中的多维资源管理策略,UAV作为边缘计算节点为车辆提供计算支持,以满足异构的服务质量和多种资源需求。文献[23]为UAV辅助的移动边缘计算网络提出了一种新颖的云边框架,其中边缘UAV与云端一起为地面用户提供缓存和计算服务。文献[24]研

究了高空平台与UAV组成的分层空中移动边缘计算平台,针对物联网设备的计算卸载服务,提出基于匹配博弈论的方法制定启发式的卸载算法,最大化移动边缘计算平台的数据总量。

### 2.3 空域资源管理

LAIN的空域环境在异构的高频电磁环境中呈现复杂多变的特点,多类型飞行器混合运行,安全威胁频发。近年来,针对低空环境中存在的空域管制难、安全风险高问题,国内外相关学者对空域监管划分以及飞行器监测避障等技术展开了深入的研究,其中具有代表性的文献研究及其内容重点对比如表3所示<sup>[27-34]</sup>。

表3 空域资源管理研究现状

Table 3 Research status of airspace resource management and allocation

文献	发表年份	研究重点	研究内容
[27]	2022	网格划分方法	对全球空域进行网格划分,并提出一种冲突检测方法
[28]	2022	任务聚类与网格生成	提出空域任务预聚类方法,采用网格生成等技术实现路径规划
[29]	2023	UAV冲突管理	实现空域内UAV飞行的冲突精细探测技术和安全管理方法
[30]	2023	网格化空域的轨迹规划方法	基于空域网格化的方法提出UAV航迹规划方法
[31]	2019	低空飞行监测与预警	根据UAV感知的数据估算安全指标,实现轨迹实时预测
[32]	2023	UAV轨迹预测	提出不确定性传播方法,对安全指标进行灵敏度分析,预测UAV的交通轨迹
[33]	2022	UAV安全预警	构建空地一体化预警系统,对空域内目标进行检测和跟踪
[34]	2020	UAV安全态势预警	提出三维空间的UAV动态避障区建模方法,划定避障区,避免飞行器相撞

低空空域的网格划分是实现空域资源管理的基础。文献[27]基于网格划分方法,设计了一种针对传统空域表示和冲突检测方法。首先,对全球空域进行划分和网格化,并对划分的网格进行编码;然后结合地理经纬度和高度信息建立网格编码多路树;最后构建基于网格的空域冲突检测方法,提高冲突检测率。文献[28]设计了一种基于空域位置相关性的任务空域预聚类方法,将三维立体空间投影简化为二维平面,并采用多A\*算法生成任务空域周围的空域聚类线,将空域关联聚类问题转化为具有自主优化的多个“起点-终点”路径规划问题,借助空域参考网格生成系统、图像处理和路径规划算法等技术工具,实现未来大规模空域联合作战条件下基于位置相关性的空域预聚类。文献[29]面向复杂的空域环境,基于空间栅格化的编码理论设计了一种冲突检测算法,提高UAV冲突检测的识别

率,实现低空空域环境中飞行器的安全管理。

UAV轨迹的预测与自主避障是实现空域资源规划的核心问题。文献[30]基于空域网格化划分的方法提出改进的蚁群算法,并赋予网格时间属性,实现与时间关联的UAV航迹规划。文献[31]提出了一种通用的UAV监测和预测方法,利用UAV的自主测量数据生成预测路径,量化状态变量的不确定性,估算安全关键指标,避免突发事件的影响,实现UAV轨迹的实时预测,保障飞行的安全。文献[32]提出一种计算高效的不确定性传播方法,用于预测UAV的交通轨迹。该方法不仅可以处理不同概率分布类型的不确定性因素,还可以对UAV流量中的安全指标进行全局灵敏度分析,从而预测不确定因素对空域整体安全的相对重要性。

空域安全威胁预警告警机制是低空飞行器航迹规划和空域资源部署的关键技术。文献[33]构

建了空天地一体化预警探测系统,通过配合陆、海、天、空全范围的预警探测子系统,实现对低空中的超声速目标的发射报警、探测识别和连续跟踪。为最大限度地满足 UAV 飞行安全预警要求,提高混合空域运行的 UAV 安全可靠性能,文献[34]提出一种三维空间中 UAV 紧急防撞轨迹的动态避撞区建模方法,用于划定动态避撞区,检测 2 架飞机的碰撞趋势。

### 3 存在的问题与潜在的方向

尽管 LAIN 领域的研究成果层出不穷,目前的技术仍无法支持低空空域高效运行与安全控制。具体而言,复杂的低空空域环境导致频谱资源共享难,动态的三维立体环境导致网络资源配置难,异构的多源网络体系导致空域资源管控难。此外,频谱、网络、空域资源之间还存在耦合关系,制约着 LAIN 的高效运行与安全控制。

#### 3.1 频谱资源管理难

相比地面网络,LAIN 中空地频谱资源管理还存在以下问题:

1) 环境的复杂性:除地面基础设施和移动用户外,低空空域中还包含了多种空中用频设备,导致电磁频谱环境日益复杂。用户和应用爆炸式增长而产生的各类业务带来了大量空-地与空-空通信,导致低空电磁频谱环境更为复杂、频谱资源更为短缺。

2) 飞行器的移动性:低空飞行器具有高速移动性,并要求在极短时间内完成频谱共享,这对频谱高效安全共享技术提出了更高的要求。此外,低空飞行器的快速移动、LAIN 拓扑的快速变化、低空飞行器任务的随时变化,导致 LAIN 与多种无线通信技术共享频谱资源,难以实现频谱最优化使用。

3) 空域的开放性:电磁频谱空间的开放性导致空地用频交叠,非法用频行为频繁发生,电磁干扰呈现立体交叠的状态,使得低空用频安全面临严峻挑战;同时,低空飞行器通信、导航等与地面通信、雷达、导航等系统用频相互交叠,干扰严重,致使低空飞行器的安全稳定运营极具挑战。

综上,复杂电磁频谱环境下空地频谱资源管

理还没有一个很好的解决方案。面向低空环境复杂性、低空飞行器移动性和低空空域开放性等主要困难和挑战,亟需探索和研究 LAIN 中空地频谱资源高效安全共享机理和方法。

#### 3.2 网络资源配置难

对于三维高动态网络,要实现空域组网覆盖的网络资源优化配置,还需解决以下问题:

1) 拓扑的高动态性:相比地面网络,低空网络是三维立体的组网空间,各类低空飞行器的飞行高度、速度、航迹不同,导致 LAIN 网络拓扑具有高动态性,难以提供高效安全的组网通信和计算覆盖。

2) 节点的疏密性:广阔的空域范围内,低空飞行器面临分布不均的挑战,空间通信信号难以实现在全球范围内的无缝覆盖,低空动态网络的通信资源分配策略问题尚未得到解决。

3) 组网的稳定性:复杂的空地融合组网加剧了网络的不稳定性,且异构的低空飞行器通信、计算、存储等能力差异化大,使得空地网络资源融合共享困难,低空飞行器组网的高效安全运行和三维立体连续覆盖难以保障。

因此,针对以上 LAIN 网络资源优化配置过程中存在的问题,需要面向任务感知、信息传输和终端计算,设计空地融合网络的综合布局,实现网络感传算一体化,支撑高动态低空飞行器的高效安全运行。

#### 3.3 空域资源监管难

低空飞行活动涉及通用航空和 UAV 等多元用户,涵盖多种机型,服务多样任务,对所需空域性能和监管能力的要求存在明显差异。

1) 空域的混合性:UAV 与有人机同时运行,各类飞行器混合异构,导致低空空域中环境复杂多变。然而,当前低空运行监管尚未建立标准统一的数字化精细化空域系统,多类型空域、多元化用户、多任务场景交织作用下的协同运行监管理论、技术与机制还存在空白,难以保障低空空域资源的最大化效益。

2) 运行的安全性:日益增长的低空航空器终端监测数据呈现多源、异构、低耦合等特点,难以

基于监测数据发现安全威胁并实施针对性防控。面向 LAIN 数据多源异构的挑战,现有的技术还无法实现飞行器运行轨迹无冲突融合,低空飞行器的安全威胁逐渐显露并蔓延,成为制约低空网络发展的瓶颈之一。

3) 监管的高效性:低空网络监管体系不仅需要监测低空飞行器之间的碰撞态势,还需对飞行群体的安全态势和运动态势实时推演监测,智能识别飞行器异常行为。但是,现有的低空运行监管技术与平台尚未实现“飞得好”和“管得好”,极易引发异质飞行器运行冲突与安全风险问题,严重制约了低空飞行活动效率,隔离运行监管已成为制约低空飞行安全效率的瓶颈。

#### 4 LAIN 高效运行的关键技术

空地用户用频决策制约传感与通信资源的分配,影响空-地、空-空链路质量;同时,基于感知、传输与计算的网路资源配置将进一步影响空域范围内低空飞行器的运行决策与轨迹规划。综上,频谱、网络、空域资源之间相互耦合,致使 LAIN 高效运营的目标与愿景难以实现。因此,面向频谱、网络以及空域资源的复杂耦合关系,解决空地频谱资源高效共享与干扰管控难题,实现高动态、广连接、高鲁棒低空飞行器组网与通信,达成低空混合运行环境下飞行器协同运行和安全控制,是当前 LAIN 安全运行和管控的关键问题与重大需求。总的来说,频谱资源的态势感知技术为网络资源的分配与空域资源的规划提供态势支撑;而感传算一体化的体系架构将为低

空空域内飞行器的资源规划提供预测支撑,具体关系如图 5 所示。

#### 4.1 空地频谱资源高效安全共享

频谱资源是 LAIN 的首要资源。若频谱资源无法高效共享与安全控制,网络将处于瘫痪状态。然而,随着无线电设备和产业突飞猛进地发展,有限的频谱资源愈发拥挤,无法满足各种各样的用频需求。因此,低空复杂电磁环境下频谱资源高效共享机理与方法是 LAIN 发展中必须解决的基础科学技术问题。

针对低空环境复杂性、低空飞行器移动性以及低空空域开放性等挑战,空地频谱态势补全和预测将以频谱语义为基础,补全、预测频谱语义态势,并采用多目标大规模分层动态用频决策方法,通过知识图谱支持策略预学习、频谱临机决策构建多智能体分层协同决策框架,解决空地频谱资源难以高效共享和干扰难以管控的难题,实现低空复杂环境下空地共享用频安全快速决策,如图 6 所示,主要包括以下关键技术。

##### 4.1.1 频谱态势认知

频谱态势定义为复杂电磁环境的当前状态与未来趋势。频谱态势认知技术突破传统态势感知的局限性,以三维频谱态势精确感知为支撑,通过数据知识双驱动引擎语义-知识<sup>[35]</sup>的空地频谱精准认知技术,从实际电磁频谱环境中清洗频谱数据,提取频谱结构化、半结构化、非结构化数据和关键因素,建立映射关系;然后基于频

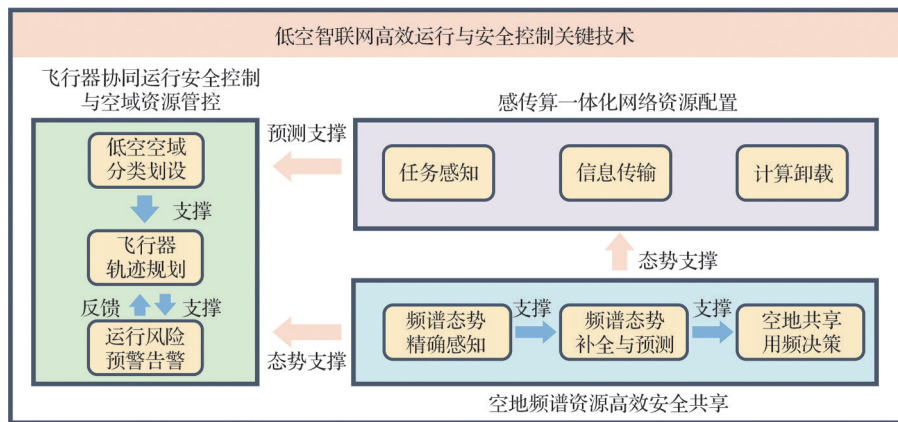


图 5 LAIN 高效运行与安全控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of efficient operation and safety control of LAIN

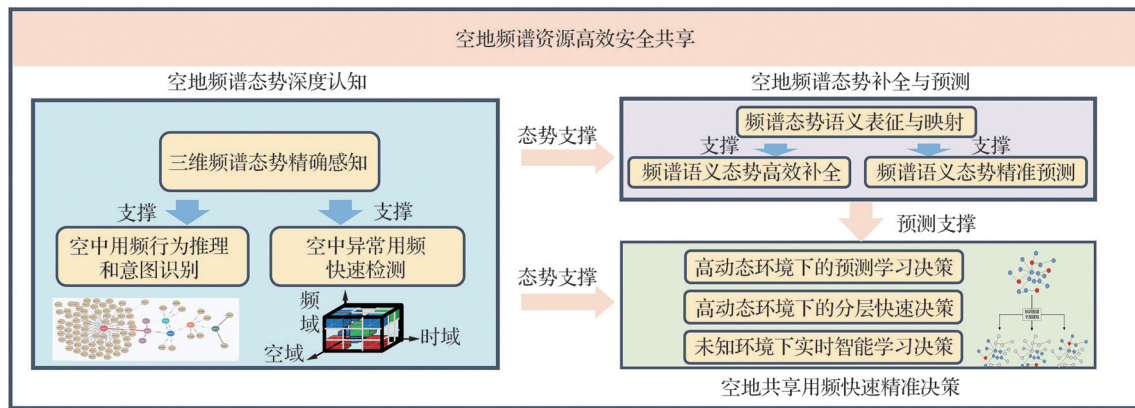


图 6 空地频谱资源高效安全共享机理

Fig. 6 Efficient and safe sharing mechanism of air-ground spectrum resources

谱知识提取理论对数据从时域、频域、空域以及能量域的角度进行融合、加工和处理,获取频谱决策知识,基于卷积神经网络和知识图谱的模型提取特征向量;最后,应用空中用频行为推理和意图识别技术,获取频谱语义,构建频谱知识图谱,设计智能算法,利用电磁态势知识图谱中的知识和实时电磁态势数据,完成频谱态势深度认知,生成并更新频谱决策知识图谱,实现空中用频行为推理和意图识别以及空地异常用频快速检测,如图 7 所示。

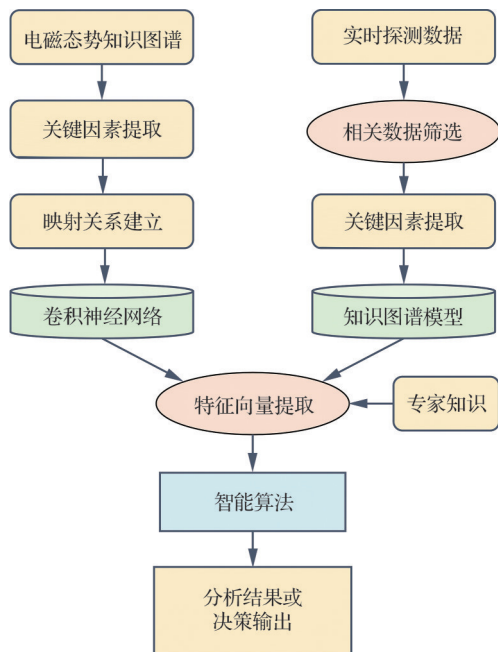


图 7 基于知识图谱的电磁态势感知技术

Fig. 7 Electromagnetic situation awareness technology based on knowledge graph

#### 4.1.2 频谱态势补全和预测

态势补全与预测技术是实现空地快速精准用频决策的基础。传统的特征分类模型依赖于统计特性,然而,由于无线网络传输容量的限制,云端基站往往难以获得复杂环境下多维多域频谱统计数据。以频谱态势语义表征与映射为支撑,基于信号波形表示和基本特征的分类方法,挖掘多维频谱态势电磁特征,根据电磁特征内在规律构建训练模型,捕捉多维特征参数内在演化规律,并基于长短期记忆等进行态势预测,将自回归模型的迭代过程展开为深度神经网络,可实现对大范围未知信号的自动、完整的表示,从而构建更加完备的特征空间,准确认知空地三维频谱语义态势,提升态势补全效果,实现频谱语义态势高效补全和频谱语义态势精确预测。

#### 4.1.3 空地共享用频决策

电磁环境复杂程度急剧增大,UAV 载荷及处理能力有限,为实现用频快速精准决策,必须研究空地动态区域频谱协同决策。如图 8 所示,针对任务多变、结构动态等快速用频需求,可以以频谱态势深度认知为态势支撑,以频谱态势补全预测技术为预测支撑,通过频谱决策知识图谱实现用频策略预学习,通过分层协同决策框架降低大规模协同决策复杂度,通过频谱临机决策快速学习频谱动态变化规律,最终在日益复杂的电磁场环境中实现高动态环境下预测学习决策、高动态环境下分层快速决策以及未知环境下实时智能学习决策。图 9 为基于频谱监测网和频谱云

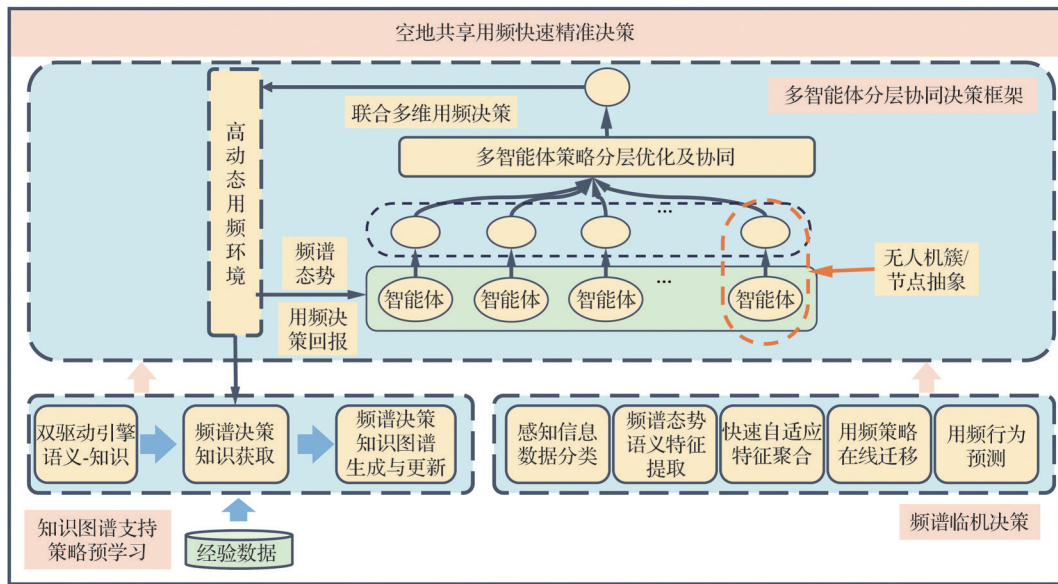


图 8 空地共享用频快速精准决策

Fig. 8 Fast and accurate decision-making of air-ground sharing frequency

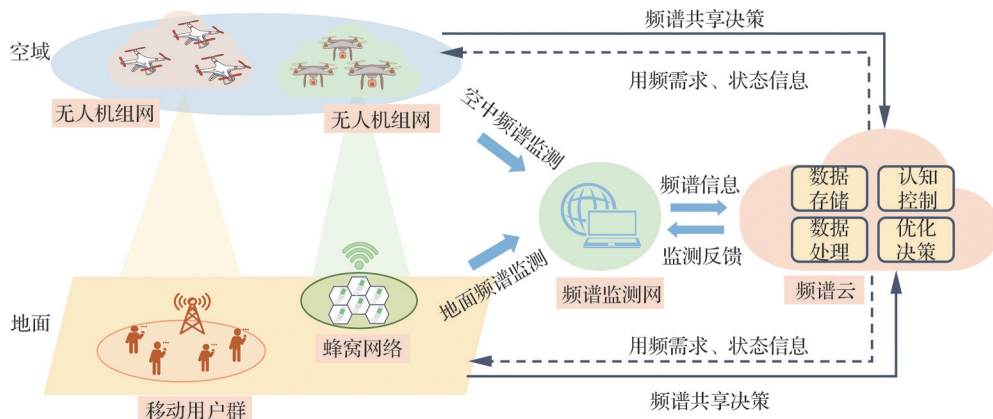


图 9 空地频谱监测与共享决策机理

Fig. 9 Air-ground spectrum monitoring and sharing decision-making mechanism

的空地频谱监测与共享决策机理。

#### 4.2 面向感传算的网络资源管控机理

网络资源是 LAIN 的重要资源,分为通信资源、感知资源与计算资源,如图 10 所示。不同于传统地面移动网络,低空网络包含大量异构飞行器,其具备的计算能力、存储能力不同,不同飞行器执飞任务多样,飞行要求迥异。为实现超远距离和低时延通信,低空异构飞行器组网需联合地面基站设计。因此,基于通信、感知与计算的网路资源一体化管理与重构策略是实现低空空域管理必须解决的重要科学技术问题之一<sup>[36-37]</sup>。

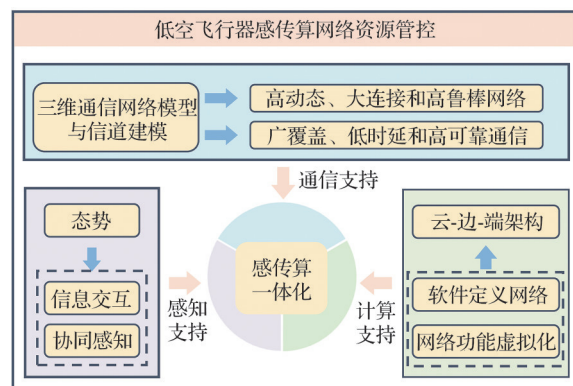


图 10 低空飞行器感传算网络资源管控机理

Fig. 10 Sensing and computing resource control mechanism of low-altitude aircraft network

4.2.1 任务感知

信息交互和传感是实现网络“互联”与“智联”的基石,用户大数据的全方位信息感知是LAIN系统进行通信和计算卸载的前提。但是,单UAV设备的传感能力有限,在复杂的电磁场环境中极易引发较大的误差,无法满足大数据时代信息的传感需求,从而为决策方提供精确的信息和数据源。此外,由于智能设备的进一步普及与发展,数据信息呈现异构冗余的特点,多UAV网络在实现协同感知时信息数据可能会被重复获取,导致更大的时延和浪费。针对低空网络环境复杂多变的特点,亟需提高传感器对任务感知的灵敏度和精确度,优化三维动态网络布局,实现全覆盖、高鲁棒的协同数据感知技术。

4.2.2 信息传输

低时延、全覆盖的通信服务是未来通信网络发展的首要任务,然而,在一些边远或灾后地区,地面基础设施并不足以实现通信的范围内全覆盖。在低空空域内部署通信网络可有效解决覆盖难的问题,为实现全球范围内空天地一体化的无缝覆盖的通信组网提供了临时的解决方案。图11为一个典型的空-天-地一体化网络架构模型,UAV、航空器、民用飞机组成的空基网络以及低轨卫星组成的天基网络作为地面通信网络的补充,推动通信网络向空、天、地、海全球范围内拓展。

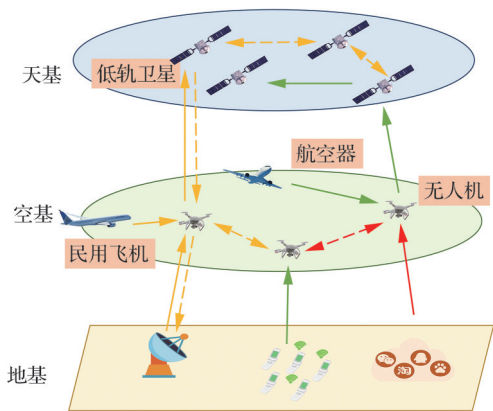


图 11 空-天-地一体化网络架构

Fig. 11 Space-air-round integrated network architecture

但是,受视距链路连通性和高频信号通信的影响,现有的通信模型不足以精确刻画 UAV 通信信道的状态信息。此外,飞行器的飞行速度、飞行环境与飞行状态等对信道特性的影响同样不可忽略。因此,如图 12 所示,与二维地面通信模型相比,实现空地融合的大连接、高鲁棒组网通信首先需结合环境状态与视距链路的连通性,建立涵盖“空-地”和“空-空”链路通信的三维立体覆盖模型,揭示网络覆盖率、可靠性与设备密度、分布特性、天线配置、飞行器路径的内在关系。其次,如图 13 所示,基于三维立体模型,通过部署于飞行器上的传感器网络精确感知预测网络环境和状态,自适应地快速接入信道,并以飞行器位置和轨迹进行关联和接入路由,预测网络状态,优化接入路由,保障连接的稳定性,实现稳定的组网接入和资源的优化配置。最后,通过多层次和多维度的网络资源优化配置,降低空地端到端的通信时延,建立空天地海无缝覆盖的鲁棒组网,实现低时延、高可靠的通信网络。

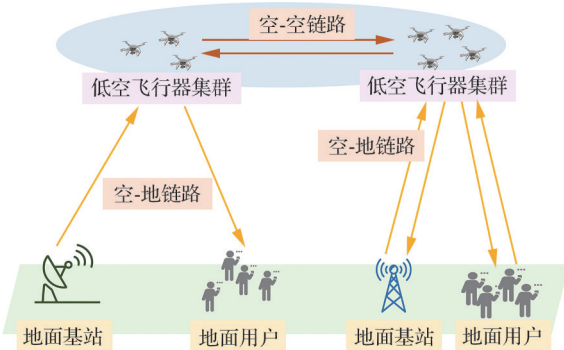


图 12 低空信息传输网络模型

Fig. 12 Information transmission model in low-altitude network

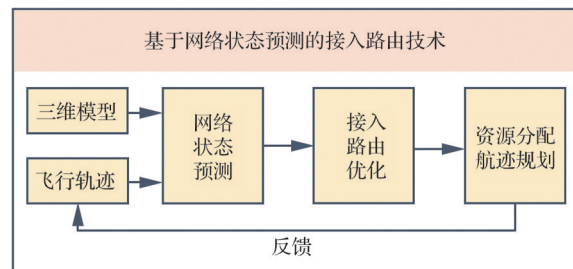


图 13 基于网络状态预测的接入路由技术

Fig. 13 Routing-access technology based on network status prediction

#### 4.2.3 任务卸载

在“云-边-端”的网络架构中,既可以将UAV作为通信节点,把用户的计算任务卸载到地面基站或近地卫星网络中,也可以将机载计算服务器作为地面基础设施的补充,为地面用户提供无处不在的泛在计算服务<sup>[38]</sup>。由于UAV的计算能力和电池能量受到限制,缓存和卸载决策优化是网络资源管理的关键设计问题之一。随着计算资源异构化、网络结构复杂化、服务质量严格化、作业任务多样化,计算资源的部署逐渐呈现耦合趋势,传统的启发式算法在求解网络环境中的多目标优化问题存在局限性。为了实现智能边缘计算中网络资源的优化与配置,提高资源利用率,降低冗余率,可以采用深度强化学习的方法对多智能体进行训练,通过不断试错的机制得到网络计算资源配置与部署问题的最优解。此外,在对星地网络的云计算资源进行部署时,可以结合软件定义网络和网络功能虚拟化技术,对空天地一体化信息网络重新架构,实现网络功能和计算资源的快速配置和动态调整<sup>[39-40]</sup>。

#### 4.2.4 感传算一体化体系架构

考虑低空飞行器高移动性、智能性、异构性

以及网络体系架构的高动态性和数据的多源性,实现LAIN系统的网络资源泛在覆盖,必须将感知、通信、计算资源结合,以协同认知动态系统为基础,结合场景认知智能与智慧内生,构建异构群体智能的可重构网络。同时,结合机器学习的方法,增强低空飞行器个体智能,实现LAIN节点协同,提高LAIN的高效性和安全性,协调网络感知、计算、控制功能与资源部署,最终实现感传算一体化的网络体系架构。

#### 4.3 飞行器协同运行安全控制与空域资源配置

空域资源是LAIN的核心资源,低空飞行活动由“隔离空域、单一用户”向“混合空域、多元用户”转变已成为必然发展趋势。然而,低空飞行活动涉及通用航空和UAV等多元用户,涵盖多种机型,服务多样任务,对所需空域性能和监管能力的要求存在明显差异。同时,需理清混合空域内异质飞行器协同运行安全控制机制,实现安全高效监管。此外,可以基于多任务规划和综合化监测的低空运行监管方法,实现对低空飞行活动的无冲突最优规划和风险智能预警告警,从而构建更加精细、精准的监管方法体系。具体而言,实现LAIN空域资源的管控与规划,包含以下关键技术,关系如图14所示。

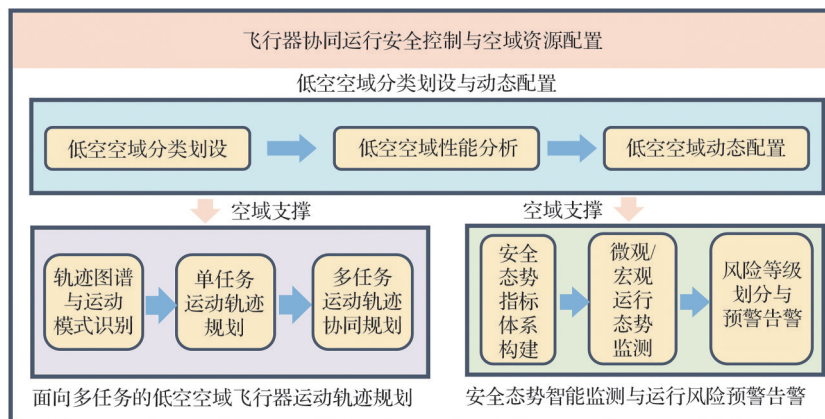


图 14 低空飞行器协同运行安全控制与空域资源配置示意图

Fig. 14 Schematic diagram of safety control and airspace resource allocation for cooperative operation of low-altitude aircraft

#### 4.3.1 低空空域分类划设与动态配置

在多类型空域、多元化用户和多任务场景交

织形成的混合运行环境内,传统低空空域设计在实现异构空域系统的统一表征存在局限性,无法应对空域飞行器数量激增、管制对象复杂异构等

问题。为了实现低空飞行器的协同运行,首先,必须设计精细化的低空空域最优网格剖分和编码规则,建立基于数字栅格化的低空空域分类划设标准,将物理空间映射到虚拟空间中,并根据低空飞行器的特性将管制区域划分为基本空域单元,形成标准统一的异构空域系统数字表征体系,以满足不同低空飞行器的差异化用空需求;然后制定低空空域性能分析框架,建立面向多飞行器协同和需求适配的低空空域动态配置方法,构建空域四维时空框架虚拟结构,使之能够根据空域环境与交通状况实现动态性精细化、自治化,最终实现低空空域资源的安全高效利用。通过低空空域数字剖分与分类划设、性能分析以及动态配置,基于数字栅格的低空空域规划将对空域内安全与效率水平进行综合评价,从而释放低空空域资源使用的最大效益<sup>[41]</sup>。

#### 4.3.2 面向多任务的低空空域飞行器运动轨迹规划

低空空域飞行器的运动轨迹具有高动态性,要实现对低空空域资源的高效安全利用,就必须结合低空飞行器的轨迹历史信息、空域信息以及环境状态,构建多任务场景下低空飞行器的轨迹图谱和预测模型,建立健全面向多任务飞行器的轨迹规划理论,实现低空飞行器运动轨迹和路径无冲突、自主避障的最优规划。然而,低空飞行器的高动态性加剧了轨迹预测的复杂性,为了解决这一问题,可以应用广播式自动相关监视技术(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)实现轨迹预测。

ADS-B是指运动目标周期性的发送或接收目标的状态信息和其他飞行所需的附加信息的一种功能,集通信和监视技术为一体,具有高精度、低成本、抗干扰等优点,能够在空域范围内对复杂异构的飞行器进行全天时全天候的监视和管理。通过机载设备周期性地广播发送低空飞行器的各种相关飞行信息,地面可以连续监视飞行器的状态<sup>[42]</sup>。机载ADS-B为解决飞行器空域航行的冲突检测与安全隐提供了一种双赢的解决方案。基于ADS-B的预测信息能够实现低空飞行器实时调度和重新分配以及高精度轨迹

预测,实现路径自主规划和风险自主评估,为飞行器的安全航行提供可靠的轨迹预测方案<sup>[43]</sup>。

如图15所示,根据获取的空域信息,基于态势感知技术和通信传感技术对监测和收集到的多源异构数据进行实时融合并构建场景集,可以实现微观碰撞态势和宏观运行态势的综合监测,提高输入到轨迹预测模型的数据质量,增强轨迹预测模型的适用性,实现飞行航迹规划,生成轨迹信息,进而为低空飞行器异常行为的定义和识别、实现风险预警告警奠定基础。

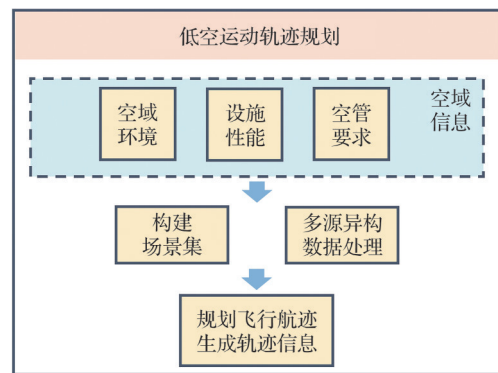


图 15 低空飞行器运动轨迹规划示意图

Fig. 15 Schematic diagram of trajectory planning for low-altitude aircraft

#### 4.3.3 安全态势智能监测与运行风险预警告警

低空空域内风险行为识别与预警告警技术是基于态势感知技术对低空空域中存在的风险行为的自主识别,对保障LAIN的安全运营有着决定性意义。如图16所示,针对飞行器在低空空域内存在的安全隐患,首先应基于飞行轨迹规划和预测的结果,结合频谱态势感知信息,分析其

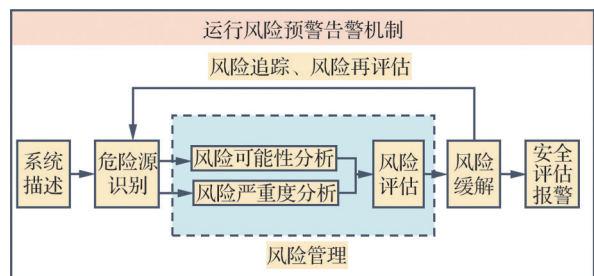


图 16 低空飞行器运行风险预警告警机制

Fig. 16 Warning mechanism for operational risk of low-altitude aircraft

历史轨迹数据和环境检测结果,从系统描述中提取飞行器异常飞行状态的行为特征,定义异常行为。其次,基于飞行器的异常行为特征,识别飞行过程中的危险源,并根据预测轨迹位置下发生风险的时间、可能性和严重程度等指标划分预警告警类型,界定预警告警的阈值,量化异常行为潜在的风险,分析并评估风险可能性和严重度,实现微观层面低空飞行器碰撞态势监测与宏观层面飞行群体安全态势实时监测。最后,将风险等级精细化划分,构建低空飞行器异常行为智能辨别机制,实现低空飞行器在复杂空域中根据态势感知信息运行安全风险评估,自主决策,实现自主避障,自主报警,并对风险进行追踪和再评估。

ADS-B技术可以实现各种异构飞行器之间的信息交互,辅助构建空中交通状态和态势信息,缓解空中交通管理的压力。ADS-B可以自动地广播多维信息,并接收飞机的位置、轨迹、速度和方向以及高度等信息。相比于传统的监视技术,ADS-B受环境因素影响更小,数据更新速度更快,更适用于LAIN的场景。通过引入ADS-B技术,UAV可以自主感知和监视环境信息,评估空域内的交通态势。基于ADS-B信息对空域内多维信息进行精准的感知与预测,能够辅助飞行器把握空域状态,掌控频谱环境,实现态势感知,提高空中交通管制的决策质量和态势感知能力<sup>[44]</sup>。

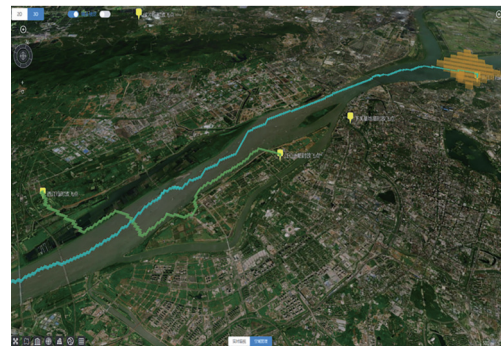
## 5 应用示范

目前已有研究在长江南京段的独立UAV飞行空域内开展LAIN组网与控制演示验证,如图17所示,支持包括垂直起降固定翼、四旋翼、六旋翼等不少于3种异构飞行器,验证实现300 m以下的网络覆盖高度。该研究已成功搭建LAIN演示验证平台,并开展了长江海事巡检、长江江面物流、长江禁捕巡查等活动,服务于“长江经济带”和“长江大保护”2大主题,用于保障长江航行安全、应急救援等。

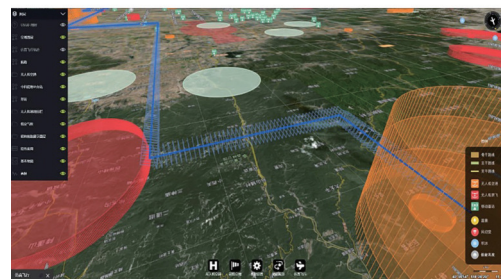
LAIN演示验证平台可服务于长江UAV监管与无线电监管,获取长江及其沿岸区域的频谱资源测绘图,科学地展示长江沿岸经济活跃度,



(a) 长江南京段UAV飞行空域示意图



(b) 长江演示平台飞行路径规划示意图



(c) 无人机频谱感知路径规划示意图

图17 长江演示验证平台

Fig. 17 Changjiang demonstration and verification platform

并对长江及其沿岸区域进行干扰源的测向与定位,作为全球定位系统、北斗定位的补充,支撑实现无线电反定位。此外,团队在长江及其沿岸区域进行UAV组网,面向长江不同应用实现业务与控制的分离,可对长江及其沿岸的空域进行监管,实时展示飞行流量、智能规划飞行轨迹等。

该研究面向LAIN系统搭建的演示平台具有重大的经济效益。首先,在长江海事巡检方面,可显著节省船舶的燃油及人力成本。其次,在长江环境保护方面,可提高长江全流域保护成效,节省巡检人力成本,协助水上公安排查偷钓等违法行为。在长江航补给方面,可有效减少碳排

放,提升固体垃圾回收量。最后,在长江航运综合服务方面,该平台可减少仓储工作人员数量,为物流企业节约人工成本。

## 6 总 结

通信技术的发展推动传统地面网络向低空空域内拓展延伸,并向空天地一体化的网络架构提出了新的要求。以UAV为代表的低空飞行器作为低空网络的基石引起了全世界范围内的关注,空域范围内实现资源的高效管理和飞行器的安全运行是目前LAIN发展亟待解决的问题。本文面向低空网络共享难、覆盖难、管制难3大主要问题,从频谱资源、网络资源以及空域资源3个维度出发,阐述了当前的国内外研究现状,并重点展望了未来低空物联网进一步的关键技术和方向。本文首先提出基于知识图谱的频谱感知技术和基于频谱感知与语义的态势补全与预测技术;其次,面向协同认知动态系统提出构建协同智能的感传算一体化体系架构,达成自然空间范围内组网的空地无缝泛在覆盖;最后,提出基于网格划分方法和预警告警机制,从而实现轨迹规划与安全协同运行。此外,本文介绍了LAIN的应用演示验证平台,为长江及其沿岸区域的空域监管和经济发展提供技术支撑。未来网络感知、覆盖和管控技术的进步与革新,必将推动空天地一体化信息网络朝着数字化、智能化和规模化的方向发展,为实现6G时代万物互联、无缝覆盖的美好愿景提供坚实的理论基础。

## 参 考 文 献

- [1] 樊邦奎,李云,张瑞雨. 浅析低空物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 vehicle industry[J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1441-1450 (in Chinese).
- [2] 张海君,陈安琪,李亚博,等. 6G移动网络关键技术[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 189-202.  
ZHANG H J, CHEN A Q, LI Y B, et al. Key technologies of 6G mobile network[J]. Journal on Communications, 2022, 43(7): 189-202 (in Chinese).
- [3] 陈新颖,盛敏,李博,等. 面向6G的无人机通信综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781-789.  
CHEN X Y, SHENG M, LI B, et al. Survey on un-
- manned aerial vehicle communications for 6G[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 781-789 (in Chinese).
- [4] 邱文静,韩晨,刘爱军. 干扰环境下无人机群动态频谱决策方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(12): 326-331.  
QIU W J, HAN C, LIU A J. Dynamic spectrum decision-making method for UAV swarms in jamming environment[J]. Computer Science, 2022, 49(12): 326-331 (in Chinese).
- [5] 朱圣铭,杨霄鹏,肖楠,等. 星地认知网络中基于图论的动态频谱划分算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2022, 23(3): 41-46.  
ZHU S M, YANG X P, XIAO N, et al. A dynamic spectrum division algorithm based on graph theory in terrestrial-satellite cognitive network[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 41-46 (in Chinese).
- [6] SHEN F, DING G R, WANG Z, et al. UAV-based 3D spectrum sensing in spectrum-heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5711-5722.
- [7] SHANG B D, LIU L J, RAO R M, et al. 3D spectrum sharing for hybrid D2D and UAV networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(9): 5375-5389.
- [8] WANG Z, ZHOU F H, WANG Y H, et al. Joint 3D trajectory and resource optimization for a UAV relay-assisted cognitive radio network [J]. China Communications, 2021, 18(6): 184-200.
- [9] NIE R L, XU W J, ZHANG Z, et al. Max-Min distance clustering based distributed cooperative spectrum sensing in cognitive UAV networks [C]//ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [10] 余琪琦,王中豪,张福来,等. 分级分布式无人机协作频谱感知方法[J]. 电讯技术, 2023, 63(11): 1750-1756.  
YU Q Q, WANG Z H, ZHANG F L, et al. A hierarchical distributed UAV cooperative spectrum sensing method [J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(11): 1750-1756 (in Chinese).
- [11] 廖乃稳,钱鹏智,陈勇,等. 面向感知任务的无人机数量编配与频谱资源联合规划方法[J]. 电波科学学报, 2023, 38(5): 764-772.  
LIAO N W, QIAN P Z, CHEN Y, et al. A joint planning method for the number of UAVs and spectrum resource in perceptual missions [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2023, 38(5): 764-772 (in Chinese).
- [12] 王志宏,冷甦鹏,熊凯. 面向无人机集群协同感知的多智能体资源分配策略[J]. 物联网学报, 2023, 7(1): 18-26.

- WANG Z H, LENG S P, XIONG K. Multi-agent resource allocation strategy for UAV swarm-based cooperative sensing [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2023, 7(1): 18-26 (in Chinese).
- [13] 高杨, 李东生, 程泽新. 无人机分布式集群态势感知模型研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(6): 1271-1278.
- GAO Y, LI D S, CHENG Z X. UAV distributed swarm situation awareness model [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(6): 1271-1278 (in Chinese).
- [14] CHEN X, FENG Z Y, WEI Z Q, et al. Performance of joint sensing-communication cooperative sensing UAV network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15545-15556.
- [15] MENG K T, WU Q Q, MA S D, et al. UAV trajectory and beamforming optimization for integrated periodic sensing and communication [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(6): 1211-1215.
- [16] CAI Y X, WEI Z Q, LI R D, et al. Joint trajectory and resource allocation design for energy-efficient secure UAV communication systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(7): 4536-4553.
- [17] JIA Z Y, SHENG M, LI J D, et al. Toward data collection and transmission in 6G space-air-ground integrated networks: Cooperative HAP and LEO satellite schemes [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(13): 10516-10528.
- [18] 廖乃稳, 何攀峰, 张余, 等. 无人机中继通信的轨迹与资源分配优化方法 [J]. 移动通信, 2023, 47(2): 92-98.
- LIAO N W, HE P F, ZHANG Y, et al. Trajectory and resource allocation optimization method for UAV-relaying communication [J]. Mobile Communications, 2023, 47(2): 92-98 (in Chinese).
- [19] 吴迪, 钱鹏智, 陈勇. 多无人机辅助通信中用户匹配与频谱资源联合优化方法 [J]. 电讯技术, 2023, 63(11): 1742-1749.
- WU D, QIAN P Z, CHEN Y. Joint user matching and spectrum resource optimization in multi-UAV auxiliary communications [J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63(11): 1742-1749 (in Chinese).
- [20] 郭鸿志, 王宇涛, 王佳黛, 等. 面向复杂任务的多无人机协同计算资源分配与优化 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(6): 1012-1018.
- GUO H Z, WANG Y T, WANG J D, et al. Multi-UAV cooperative computing resource allocation and optimization for complex tasks [J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(6): 1012-1018 (in Chinese).
- [21] ZHANG J, ZHOU L, ZHOU F H, et al. Computation-efficient offloading and trajectory scheduling for multi-UAV assisted mobile edge computing [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 2114-2125.
- [22] PENG H X, SHEN X M. Multi-agent reinforcement learning based resource management in MEC- and UAV-assisted vehicular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(1): 131-141.
- [23] LIU B H, LIU C X, PENG M G. Computation offloading and resource allocation in unmanned aerial vehicle networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(4): 4981-4995.
- [24] JIA Z Y, WU Q H, DONG C, et al. Hierarchical aerial computing for Internet of Things via cooperation of HAPs and UAVs [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(7): 5676-5688.
- [25] 李子姝, 谢人超, 孙礼, 等. 移动边缘计算综述 [J]. 电信科学, 2018, 34(1): 87-101.
- LI Z S, XIE R C, SUN L, et al. A survey of mobile edge computing [J]. Telecommunications Science, 2018, 34(1): 87-101 (in Chinese).
- [26] 张焕然, 申凌峰, 任资卓, 等. 无人机辅助智能边缘网络技术综述 [J/OL]. 电讯技术, (2023-02-09)[2023-04-22]. <https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.221102006>.
- ZHANG H R, SHEN L F, REN Z Z, et al. A comprehensive survey on unmanned aerial vehicle assisted intelligent edge network [J/OL]. Telecommunication Engineering, (2023-02-09) [2023-04-22]. <https://doi.org/10.20079/j.issn.1001-893x.221102006> (in Chinese).
- [27] LIU Z Q, NAN Y, YANG Y. Airspace conflict detection method based on subdivision grid [C]//Artificial Intelligence in China. Singapore: Springer, 2022: 670-677.
- [28] CAI M, WAN L J, JIAO Z Q, et al. Clustering method of large-scale battlefield airspace based on multi A\* in airspace grid system [J]. Applied Sciences, 2022, 12(22): 11396.
- [29] 谢华, 苏方正, 尹嘉男, 等. 复杂低空无人机飞行冲突网络建模与精细管理 [J]. 航空学报, 2023, 44(18): 221-241.
- XIE H, SU F Z, YIN J N, et al. Network modeling and refined management of UAV flight conflicts in complex low altitude airspace [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(18): 221-241 (in Chinese).
- [30] 邱诚, 黄大庆, 王浩雪, 等. 基于改进蚁群算法的网格空间航迹规划 [J]. 电子设计工程, 2023, 31(4): 137-142.
- QIU C, HUANG D Q, WANG H X, et al. Track planning in grid space based on improved ant colony algorithm [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(4): 137-142 (in Chinese).
- [31] CORBETTA M, BANERJEE P, OKOLO W, et al. Real-time UAV trajectory prediction for safety monitor-

- ing in low-altitude airspace [C] //Proceedings of the AIAA Aviation 2019 Forum. Reston: AIAA, 2019.
- [32] BHUSAL R, KHANAL A, SUBBARAO K, et al. Uncertainty quantification and collision assessment in a traffic of unmanned aerial vehicles [C] //Proceedings of the AIAA SCITECH 2023 Forum. Reston: AIAA, 2023.
- [33] LIU S T, ZHANG Z Y, LIU S C. Construction and capability analysis of air-space-ground integrated early warning and detection system [C] //Proc SPIE 12332, International Conference on Intelligent Systems, Communications, and Computer Networks (ISCCN 2022). 2022: 155-165.
- [34] GAN X S, WU Y R, LIU P N, et al. Dynamic collision avoidance zone modeling method based on UAV emergency collision avoidance trajectory [C] //2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 693-696.
- [35] 周博, 马欣怡, 况婷妍, 等. 电磁频谱空间态势认知新范式: 频谱语义和频谱行为 [J]. 数据采集与处理, 2022, 37(6): 1198-1207.
- ZHOU B, MA X Y, KUANG T Y, et al. New paradigm of electromagnetic spectrum space situation cognition: Spectrum semantic and spectrum behavior [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2022, 37(6): 1198-1207 (in Chinese).
- [36] 胡杰, 杨鲲. 面向未来 6G 网络的绿色通信感知计算技术 [J]. 信息通信技术与政策, 2022(11): 30-38.
- HU J, YANG K. Towards green integration of communications, sensing and computation in future 6G [J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022(11): 30-38 (in Chinese).
- [37] 杨艳, 李福昌, 张忠皓. 6G 通感传算融合需求分析与关键技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 83-88.
- YANG Y, LI F C, ZHANG Z H. Discussion on requirement and typical technology of 6G integrated communication, sensing, wireless power transfer and computing [J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(1): 83-88 (in Chinese).
- [38] 董超, 沈赟, 屈毓铨. 基于无人机的边缘智能计算研究综述 [J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(3): 227-239.
- DONG C, SHEN Y, QU Y B. A survey of UAV-based edge intelligent computing [J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(3): 227-239 (in Chinese).
- [39] 张寒, 黄祥岳, 孟祥君, 等. 基于 SDN/NFV 的天地一体化网络架构研究 [J]. 军事通信技术, 2017, 38(2): 33-38.
- ZHANG H, HUANG X Y, MENG X J, et al. Architecture of space-terrestrial integrated network based on SDN/NFV [J]. Journal of Military Communications Technology, 2017, 38(2): 33-38 (in Chinese).
- [40] 蒋长林, 李清, 王羽, 等. 天地一体化网络关键技术研究综述 [J/OL]. 软件学报, (2023-02-09)[2023-04-22]. <https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.006753>.
- JIANG C L, LI Q, WANG Y, et al. Survey on key technologies in space-ground integrated network [J/OL]. Journal of Software, (2023-02-09)[2023-04-22]. <https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.006753> (in Chinese).
- [41] 朱永文, 谢华, 蒲钊, 等. 空域网格化方法及其在空管中的应用研究 [J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 12-24.
- ZHU Y W, XIE H, PU F, et al. Research of airspace gridding method and its application in air traffic management [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 12-24 (in Chinese).
- [42] 余江帅. ADS-B 技术应用风险与对策 [J]. 电子技术与软件工程, 2019(7): 204.
- YU J S. Application risks and countermeasures of ADS-B technology [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(7): 204 (in Chinese).
- [43] ZHANG Y F, JIA Z Y, DONG C, et al. Recurrent LSTM-based UAV trajectory prediction with ADS-B information [C] //GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [44] YIU C Y, TAM T K, NG K K H. An ADS-B aided dynamic traffic alert for robust safety assessment in controlled airspace [C] //2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Piscataway: IEEE Press, 2022: 319-323.

(责任编辑: 李丹)

## Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks

WU Qihui<sup>1</sup>, DONG Chao<sup>1,\*</sup>, JIA Ziyi<sup>1</sup>, CUI Can<sup>1</sup>, FENG Simeng<sup>1</sup>, ZHOU Fuhui<sup>1</sup>, XIE Hua<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

2. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

**Abstract:** Low-Altitude Intelligent Network (LAIN), as a new type of intelligent network, relies on space-air-ground-sea facilities to constitute a digital intelligent network system. It is a key component of the space-air-ground integrated network, and can support the seamless and ubiquitous connections of the sixth generation communication technology and promote the development of intelligent network service from ground to low-altitude space. However, LAIN is still in the developing stage and faces the following key challenges: intractability of aerial control, severe spectrum interference, and multi-dimensional resource limitation. This article focuses on the issues of LAIN architecture and safety control, including the current development status of low-altitude network and its significance for industrial technology transformation. Then, from the perspective of spectrum resources, network resources, and airspace resource management, the recent related works are analyzed. Furthermore, we analyze the key technologies such as low-altitude aircraft air-ground spectrum sharing, sensing, transmission, computing networking coverage, low-altitude airspace intelligent supervision, and point out future development directions. Finally, an application demonstration of LAIN is proposed, aiming to satisfy the significant requirements for efficient operation and safety in low-altitude airspace, and providing the theoretical basis as well as technology for the further development of the next generation space-air-ground integrated network.

**Keywords:** low-altitude intelligent network; space-air-ground integrated network; low-altitude aircraft; resource management; low-altitude airspace

---

**Received:** 2023-04-04; **Revised:** 2023-04-18; **Accepted:** 2023-04-27; **Published online:** 2023-05-15 13:59

**URL:** <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/Y2024/V45/I3/28809>

**Foundation items:** National Key R&D Program of China (2022YFB3104502); Natural Science Foundation on Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu (BK20222013)

\* **Corresponding author.** E-mail: dch@nuaa.edu.cn