

低空通感一体化网络资源管理关键技术研究

刘向南^{1,2}, 刘玉佩³, 张海君^{1,2}, 迟凯⁴

(1.北京科技大学智能与通信融合北京市重点实验室, 北京 100083; 2.北京科技大学河北省空地智能通信重点实验室, 北京, 100083; 3.国家无线电监测中心 北京 100037; 4.多域数据协同处理与控制全国重点实验室, 陕西 西安 710126)

摘要: 本文围绕低空通感一体化网络资源管理技术开展系统性综述, 旨在梳理低空空域通感协同机理的研究进展与关键问题。首先, 从低空经济发展需求出发, 总结了低空通感一体化的典型应用场景与发展背景, 并回顾近年来相关网络资源管理技术的研究进展。其次, 围绕频段选择与频谱资源管理, 对公网与专网场景下 Sub-6 GHz 及毫米波、太赫兹频段的管理策略进行分类归纳与探讨。随后, 从空域资源管理角度出发, 综述通感波束赋形与航迹优化等关键技术的发展现状及其特点。接着对于低空通感一体网络以算存为代表的新型资源予以交代。最后, 归纳当前研究中存在的主要挑战, 并对未来发展趋势进行展望, 包括低空通感一体化网络的未来发展趋势, 包括跨系统与跨场景协同, 低空信道知识地图以及新型动态天线技术等, 以有效提升多维资源利用率和网络适应能力, 满足未来高效、智能、安全的通感一体化网络需求。

关键词: 低空经济; 通感一体化; 频谱分配; 波束赋形; 算存部署

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000

Key technologies for low-altitude ISAC networks resource management

LIU Xiangnan^{1,2}, LIU Yupei³, ZHANG Haijun^{1,2}, CHI Kai⁴

1. Beijing Key Laboratory of Intelligent and Communication Integration, Beijing 100083, China

2. Hebei Key Laboratory of Space-Air-Ground Intelligent Communication, Beijing 100083, China

3. Institute of Microelectronics, State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China

4. China Xi'an Navigation Technology Research Institute, Xi'an 710068, China

Abstract: This paper presents a systematic review of resource management technologies for low-altitude integrated sensing and communication (ISAC) networks, aiming to summarize the research progress and key issues of sensing-communication coordination mechanisms in low-altitude airspace. First, the societal demands, application scenarios, and the evolution of resource management in low-altitude ISAC networks were summarized. Then, frequency band selection and spectrum resource management were classified and summarized, with particular emphasis on sub-6 GHz and millimeter-wave/terahertz bands in both public and private network scenarios. Subsequently, space resource management was discussed, mainly from the perspectives of coordinated beamforming and trajectory optimization. Next, computation and caching, as emerging resource dimensions in low-altitude ISAC networks, Finally, this paper summarized the main challenges in current research and prospects future development trends, including cross-system and cross-scenario collaboration, low-altitude channel knowledge maps, and new dynamic antenna technologies, to further improve multi-

收稿日期: 2026-03-27; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 张海君, zhanghaijun@ustb.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62225103, No.62501048, No.U22B2003, No.U2441227);北京市自然科学基金资助项目(No.L253003, L254013)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 62225103, No. 62501048, No. U22B2003, No. U2441227), Beijing Natural Science Foundation (No.L253003, L254013)

mensional resource utilization and network adaptability for efficient, intelligent, and secure ISAC networks.

Key words: Low-altitude economy, integrated sensing and communication, spectrum allocation, beamforming design, computation and caching deployment

0 引言

现如今，以低空空域为依托，通用航空产业为主导的低空经济，正在国家政策和技术进步的不断推动下，迎来了产业与生态的迭代更新。作为新兴战略性技术产业，低空经济以其产业链长、带动性强的优势，在医疗、气象、农业等领域都有广泛的应用前景^[1]。如何在不扩大专用基础设施建设规模的前提下，充分复用以 5G-Advanced 和 6G 为代表的移动通信网络覆盖与运维体系，构建可管可控、低时延高可靠、广域连续的低空跨域无缝连接通信保障机制，已成为移动通信与低空网络构建值得深入研究的关键问题。

如图 1 所示，作为低空经济的先进应用载体，无人机^[2] (Unmanned aerial vehicle, UAV) 和电动垂直起降飞行器^[3] (Electric vertical take-off and landing, eVTOL) 等低空巡航设备在现有通信体系中既是空中用户，也可以充当空中基站。当低空巡航设备作为空中用户时，低空巡航设备的三维移动性、空地融合网络的复杂特性，以及空中链路独特的传输特征，现有地面及空中基站如何协同部署给空中用户的低空巡航设备提出了如覆盖优化、干扰抑制和资源调度等新的技术挑战；与此同时，低空巡航设备亦可作为空中基站，依托视距空地通信链路的优质无线信道，通过调整自身垂直高度与水平飞行轨迹，有效提升通信链路的信号传输质量，同

时扩大信息覆盖范围。另一方面，作为 6G 关键技术之一，通感一体化^[4]以其通信与雷达兼具的技术优势适用于低空空域，尤其在智慧物流，应急救援，生态监测以及空中驾驶具备显著的应用价值，相关的通信架构和参数要求也在提上讨论和逐步规范当中^[7]。通感一体化能够解决低空飞行中低空建筑密集、卫星导航信号稳定性差、雷达密集部署经济性差等问题，还能支持多目标探测和跨区域完整航迹的连续跟踪与上报，为低空安防等低空经济领域的各类应用提供技术和网络支持。

从国际发展趋势来看，各国低空领域相关政策正从早期的“飞行限制与安全监管”逐步转向“低空空域开放、无人机交通管理、超视距飞行和规模化应用验证”。美国联邦航空管理局^[5]积极推进 UAV 融入国家空域系统，重点围绕 Remote ID、超视距飞行和探测避让低空交通管理开展制度建设与技术验证；欧盟则形成了较为系统的 U-space 框架^[6]，强调通过数字化空域服务支撑无人机在城市和复杂环境中的规模化运行；韩国强调“示范先行、监管跟进”的发展思路，通过 K-Drone Delivery^[7]等项目推进无人机配送和无人机示范城市建设配套监管制度建立健全。国内方面，我国国务院已于 2024 年 1 月起明确提出对无人驾驶航空器设计、生产、运行、操控人员、飞行活动和应急处置等进行规范管理，并强调分类管理、协同监管和产业健

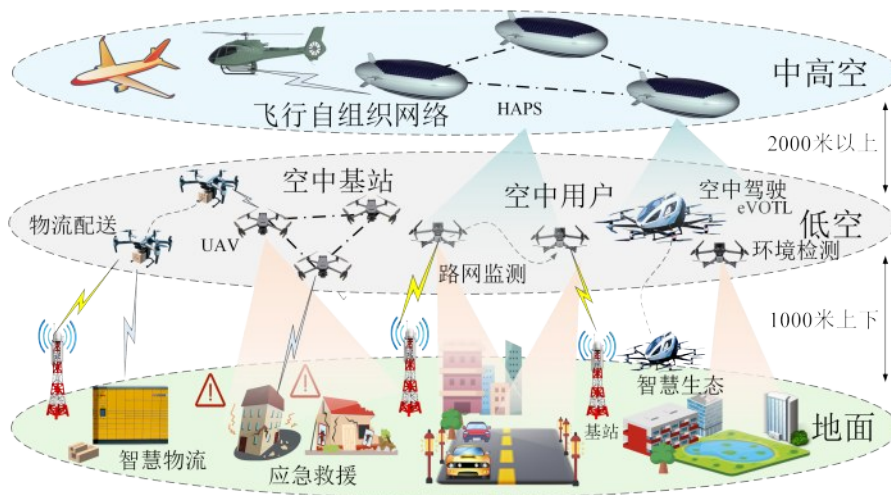


图 1 系统架构低空通感一体化在未来网络的构成与应用

康发展^[8];工业和信息化部等部门的政策文件^[9]针对5G/5G-Advanced等技术推进低空通信与感知网络的建设,强调开展基于通信与感知融合的低空网络试点。

在传统的分立式系统中,通信与感知分别由通信基站与独立雷达系统承担,各自占用独立的频谱与硬件资源。这种模式下虽然各功能独立、易于实现,但存在频谱利用低效、硬件成本高、缺乏协同感知等不足。而通感一体化通过将通信与感知功能在信号、频谱和处理链路上进行一体化融合,不仅提高了资源利用效率,还能通过感知信息增强通信性能。未来通感一体化网络将是低空飞行网络建设的重要发展方向,通过在移动通信网络中集成感知功能,使得低空领域中网络不仅可以进行信息数据传输,还能够通过分析无线电波的直射、反射、散射等特性,对目标或环境信息等进行测距、测速、测角等,实现对低空所有巡航设备的精细化监测、识别、定位和报送^[10]。相应地,原有无线网络资源管理也将从原有的地面通信逐步向低空跨域与通感算存多维演进,未来通感一体化技术在低空经济中的应用是多层次、多维度的,聚焦通感算存跨域协同场景下多维度资源的动态调度、优化配置与高效利用,解决通信需求与感知任务冲突、运算供给与场景动态不匹配的核心痛点,实现各类形式的低空巡航设备运行统一调度,集中管理和高效通行,推动低空空域的安全有序发展。

如图2所示,在2019年之前,低空网络资源管理领域主要聚焦以通信为主导的UAV通信^[11]无线资源管理,以频谱分配^[12]、轨迹规划^[13]、功率控制^[14]等为代表的传统通信优化技术也为日后通感一体化网络资源管理迈向低空领域提供了坚实的理论基础,但考虑到通信与感知波形异构导致的干扰耦合、度量维度的非一致性等差异,传统优化方法也难以捕捉两者间的权衡关系,因此尚未把雷达感知指标纳入整体通信网络性能评估当中;后来随着通感一体化^[5-6]的兴起,以UAV通信为代表的低空通信开始从速率,时延和能耗变成了通信性能指标和感知性能指标,如检测概率^[15]、定位误差^[16]、克拉美罗界^[17]等感知性能指标引入产生的多目标权衡,网络资源也从频谱和功率扩展到波形、波束、时空等更为复杂的网络资源管理^[18];2023年之后,边缘智能以及算力的迅猛发展^[19]使得低空

场景下的UAV不只是感知探测目标,还需要承载理解-决策-协同控制功能,计算与缓存资源^[20]成为低空网络的核心需求之一,资源竞争不再局限于通信与感知的双重功能,而是包括算存资源的调度和优化,尤其是在边缘计算的支持下,网络能够实现实时数据处理、决策与控制^[21];现如今低空通感一体化网络在国家政策导向^[1]和学术界前期研究积累的共同作用下,将通感一体化网络资源管理研究推到了更为立体化的维度,而是需要综合刻画以频谱为代表的无线通信资源、以空间波束赋形与低空飞行器航迹优化为代表的空域资源、由人工智能发展催生的算力与存储资源,以及彼此资源域间的复杂耦合关系,研究重点也逐步转向低空巡航设备的高动态性、三维信道的不确定性以及动力能耗约束,确保航迹规划与通感算存资源动态紧密耦合,因而亟需填补和丰富低空通感一体化网络资源的相关研究空白。当前,低空通感一体化网络资源管理面临的核心问题主要体现在四个方面:其一,低空场景业务密度快速上升,而可用频谱、发射功率与空间自由度受限,使Sub-6GHz与毫米波、太赫兹频段在覆盖、抗阻塞和高容量之间存在显著约束;其二,低空巡航设备高机动、三维分布和动态拓扑使空域资源管理不再只是航迹规划问题,而需要与链路维持、干扰控制和协同感知联合设计;其三,频谱、空域与新兴的算存等资源间呈现出更强的跨域耦合,单一资源维度的局部优化往往难以保证系统级最优,因而需要面向通信、感知、计算与控制的一体化协同框架。与现有地面通感一体化网络发展态势一致,低空通感一体化网络的关键挑战已从单资源分配进一步演进为多资源耦合下的性能协同与折中优化。

据此,本文全面综述了低空通感一体化网络资源,包括频谱,空域以及算存资源的研究现状与进展,梳理了相关理论研究与技术方法,对频谱资源分配,空域资源管理以及算存资源部署着重进行了详细总结,最后对低空通感一体化网络资源管理技术发展趋势做出了未来展望。

1 频域资源——频段选择与频谱资源管理

1.1 低空通感一体化网络的频谱选择

在低空通感一体化网络中,鉴于5G/B5G网络的两类频段Sub-6GHz和毫米波等超高频段,频谱

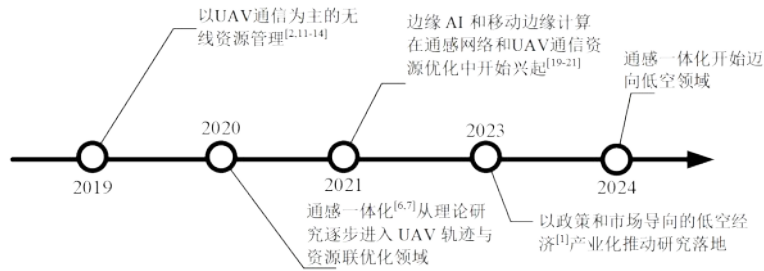


图2 低空通感一体化网络资源的历史发展与关键节点

资源管理主要有两种部署方式可供选择：一种是基于现有运营商的公网系统，另一种是针对低空的专用网络。相较于Sub-6GHz频段，毫米波^[22-23]等超高频段的专频专网在网络容量以及感知精度上更优，但也存在着抗干扰能力、网络安全性、可靠性差等技术挑战，因为两类频段的如何选择这仍然取决于网络规模、业务需求以及部署成本等多因素影响。

(1) 基于5G-advanced公网的Sub-6GHz频段

Sub-6GHz频段作为5G网络的核心频段之一，其频率范围一般在3GHz到6GHz之间，具有覆盖范围广、信号穿透能力强、部署成本较低等优势。对低空通感一体化网络而言，对5G公网中的Sub-6GHz频段进行管理和优化设计，具有重要的研究价值和潜在应用前景。鉴于现有频率资源及频段特点，其低空网络可以采用2.1GHz，2.6GHz，

3.5GHz和4.9GHz进行建设，在2.1GHz和2.6GHz等中低频段的5G网络中，低空基站可占覆盖区域地面5G基站总数的3%~5%，其中2.1GHz和2.6GHz用于地面覆盖，而3.5GHz和4.9GHz频段用于低空覆盖的同时，也可以兼顾地面覆盖^[24]。北京电信通过利用3.5GHz频段进行双载波异频组网^[25]，使得低空巡航设备的上行速率提升近3倍，时延也控制在50ms以内；在广东移动的南方基地低空测试场中，中兴通讯已部署了3个4.9GHz的128TR通感一体基站，可实现对0.01平方米飞行物在速度1m/s至40m/s飞行的精准感知^[26]。

(2) 基于专用网络的毫米波/太赫兹频段

作为未来移动通信技术的拓展频段，毫米波和太赫兹等超高频段具有宽频带、高速率和高分辨率的显著技术优势，但也存在着信号抗衰弱和阻塞易干扰等难题。相比于Sub-6GHz频段，这些高频段

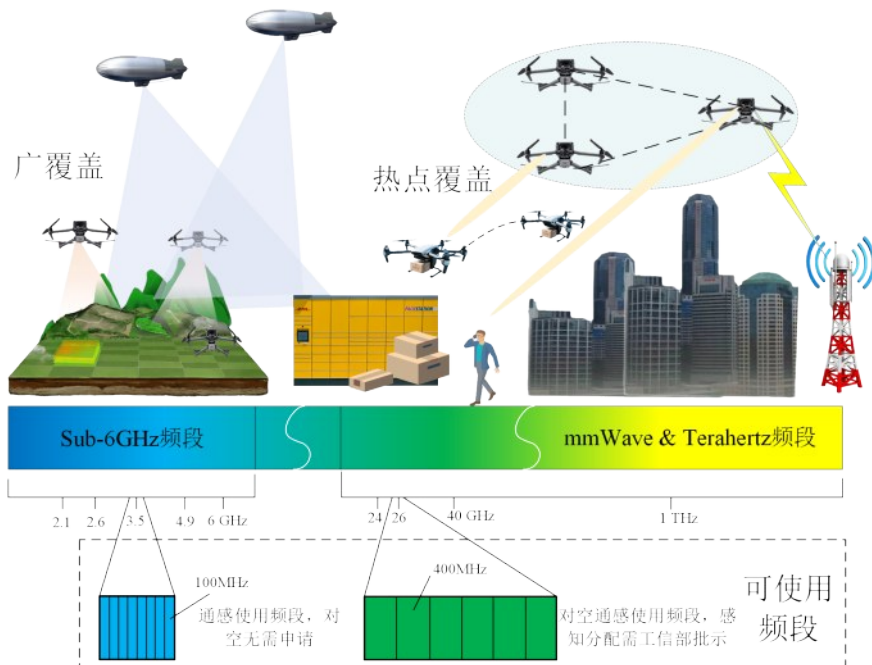


图3 低空通感一体化的频谱资源划分与应用

主要用于专用网络,能够更好地满足低空通感一体化网络中对高精度感知和超高速通信的需求,毫米波和太赫兹频段可提供8-10GHz的连续带宽,可满足低空场景下飞行器间20Gbps级高速通信需求,端到端时延压缩至0.8ms,支持厘米级实时定位^[27]。针对城市低空起降场以及飞行线路,基于毫米波的通感一体化低空专网能很好地满足低空通信和感知的需求。由于低空专网只需覆盖低空起降场及飞行线路空域中的UAV和未来的eVTOL,无需兼顾地面人群和室内的覆盖需求,站点的部署密度可以大幅降低。同时,结合毫米波相控阵技术,毫米波低空专网设备的发射功率和整机功耗也可以大幅降低,相应地减少设备功耗和成本,显著降低网络建设成本和运维成本。2024年2月,中兴公司研制的26GHz的毫米波通感一体基站联网部署利用通感基站感知和算控能力,在广州全运会上得到广泛应用,对不明低空飞行器进行预判和制服。在深圳UAV物流试点中,采用E波段(71-76/81-86GHz)毫米波通信系统,实现300米高度内多机协同避障响应速度提升5倍^[23];Ai等人构建了一个三维的非平稳几何随机信道模型^[28]以精准还原毫米波UAV信道的非平稳特性,用多层圆柱结构区分远/近、静止/移动散射簇,再用两状态马尔可夫链刻画簇的动态出现/消失,填补了毫米波低空飞行器之间信道建模的空白;Chen等人提出的多波束联合赋形方案使太赫兹基站覆盖半径从200米扩展至1公里,满足城际低空巡航设备通信需求^[29],通感波形在数字域产生一体化波形,通过混频搬移到太赫兹波短,可以实现高精度的感知性能以及高速率的通信性能。

1.2 低空通感一体化网络的频谱资源管理

在低空通感一体化网络资源管理中,频谱资源管理是核心问题之一,由于频谱本身是极其珍贵的资源,如何在通信与感知功能间进行高效动态共享与调度成为低空网络资源管理的关键技术挑战^[30]。

与此同时,低空巡航设备的高速移动、轨迹快速变化以及低空环境三维信道的时空不确定性,使低空通感一体化网络中的频谱资源管理面临基于准静态假设的频谱分配方法难以精准适配。由此,低空通感一体化频谱资源管理需要从面向单一通信性能的静态优化,转向面向通信-感知协同的动态、预测式和联合优化框架。

低空巡航设备的频谱感知能力可用于感知网络状态,从而为通信提供高效的频谱分配。通过定义不同授权用户和任务的优先级^[31-32],借助频谱感知方法将空闲或干扰较小的物理资源块分配给不同的授权用户和任务,以此实现低干扰的可靠连接。同时高动态飞行会导致Sub-6GHz与毫米波等频段的链路状态快速演化、CSI老化、频繁切换及波束失配,从而增加频谱调度与干扰协调的实时性压力,在定位精度要求较高的情况下,可优先使用毫米波频段和更高频谱来提升感知分辨率和时空细节,在数据传输高峰期则可优先保障Sub-6GHz等中低频段的通信带宽。通过网络切片技术^[33]也可按照差异化服务需求划分逻辑频谱资源池,实现网络级的频谱灵活管理。Sub-6GHz频段由于其更强的穿透性和更广的覆盖范围,适用于低空移动目标的稳定通信与基础感知服务,而毫米波频段凭借其大带宽优势可在短距离内实现高精度环境感知、细粒度定位和高速数据传输^[4]。在低空通感一体化场景中,可以设计跨频段协同机制,使通信基站和UAV平台在基于环境与任务优先级的条件下动态选择最佳频段组合^[34];基于公网可构建多基站的协同通感框架,即在Sub-6GHz上利用其广覆盖与稳健链路优势,多个地面基站可同时为低空目标提供连续通信,并通过多站观测到达时间差,往返时间,到达角等测量或通感回波等数据,在边缘或云侧进行联合融合,提升定位可用性与抗遮挡能力^[35];同时,在需要更高角/距分辨率或精细跟踪时,可调用毫米波等高频段的大带宽与窄波束优势,结合多基站联合波束赋形和多点协作联合发射与分布式多站、多静态感知,实现更高的感知信噪比与更精细的目标特征解析,从而进一步提升低空巡航设备的高精度定位与感知能力^[36];文献[37]则将UAV同时赋予了通信基站和雷达功能,在Sub-6GHz频段联合航迹优化,这样不仅能保证基础通信链路的连续性,还能在需要高精度感知时调用更高频段资源以提升感知性能;文献[38]考虑了Sub-6GHz和毫米波频段测试环境下的低空巡航设备的通感双功能实现,实验结果表明在3.5GHz频段下感知范围可达1.6公里,而在26GHz频段下,感知精度达到了亚米级精度,这为利用高低频协同的低空通感一体化网络建设提供了实证支持。

2 空域资源——波束赋形与航迹优化技术

随着低空空域中以 UAV 和 eVTOL 为代表的新型飞行器数量的持续增加,传统的固定波束和静态设计已无法满足动态环境中对通信连续性和精确度的高要求,以空间波束和低空巡航器空间运动轨迹优化为代表的空间资源显得尤为重要,低空波束赋形和航迹优化可以提升低空网络覆盖、增强巡航设备的通信质量,且进一步提高空间资源利用率。因此,低空波束赋形与航迹优化不仅是提升低空网络性能的必要手段,也是支撑低空经济持续发展的基础技术。

2.1 低空通感一体化网络的波束赋形

(1) 波束成形与对齐

在低空通感一体化网络中,节点与用户间不仅需跨域完成传统的通信任务,还需执行诸如定位导航和环境监测等感知任务,这要求通信网络在高动态、复杂环境下能够保证多个低空巡航设备的同时稳定运行。低空通感一体化网络三维高速机动、遮挡切换频繁,为保证通信链路预算与感知回波信噪比,须通过波束成形与对齐,塑造空间主瓣宽度与旁瓣,实现通感共享资源下的覆盖与精度权衡、抑制同频与自干扰,以便进一步支撑多用户与多节点协同。作为空域资源的重要环节,波束成形与对齐一直以来通感一体化网络和 UAV 通信关注的重点,如表 1 所示。文献[32]针对低空经济场景,提出基于多输入多输出蜂窝系统的通感一体化波束赋形联合设计方案,无需额外干扰数据流,在合法用户与未授权 UAV 总数超基站天线数的场景下仍能有效运行,通过半定松弛实现合法用户通信速率达标与未授权 UAV 干扰效果最优的双重目标;Liu 等人^[37]将低空巡航设备赋予了通感基站的功能,通过与地面节点间的协同波束赋形为执行通感任务或仅感知任务的异构低空巡航设备提供服务,联合优化了基站发射波束赋形与低空巡航设备航迹;文献[39]则考虑了将高空平台通信系统(High-altitude platform station, HAPS)作为空中通感基站,在满足 HAPS 功率约束的前提下,最大化朝向期望感知角度的最小波束方向图增益,同时保障通信用户的信噪比需求;而在含有 UAV 的低空立体网络中,文献[40]使用无蜂窝网络消除由于 UAV 的快速移动造成严重小区边缘以及小区切换问题;文献[41]的作者分析了在含有 UAV 的低空立体网络中的上下

行通信性能分析,这其中 UAV 作为空中用户,与地面基站上行通信的同时负责执行感知任务,使用目标位置估计的克拉美罗下界作为感知性能的评估标准,并在通信性能中考虑感知回波信号对上行通信信号的干扰;Kirik 等人围绕飞行自组织网络中 HAPS 高机动性产生的波束难对准这一问题,提出了通感辅助的两步波束对准设计:第一步通过低频雷达信号实现粗对准,提取角度、时延、多普勒等信道参数并避免误连接,第二步在窄化区域内通过高频通信信号完成精对准^[42];由于 UAV 的高动态特性,其搭载的空中基站波束难以与地面用户和宏基站精准对准,导致通信速率下降,文献[43]利用通信的信道状态信息辅助空中基站的机载雷达感知地面节点的位置,通过波束对准提升通信速率,并构建了联合优化发射功率、传感功率与传感驻留时间分配的通信速率最大化问题。

(2) 协同波束赋形

当前低空通感一体化逐步趋于网络化,使得不同节点间的跨域协同波束赋形日益成为提升网络性能的关键技术。协同波束赋形通过多个天线或基站的协作调整信号发射方向和强度,可有效增强信号覆盖、减少干扰并提升链路稳定性,这在多 UAV 编队或蜂群通信中尤为重要。例如,在无人蜂群中,协同波束赋形能够构建虚拟天线阵列,提高通信数据率和抗遮挡能力,同时保障节点之间的信息共享与空域协同任务执行。利用协同波束赋形框架来优化 UAV 编队的空间信号性能,并结合集群控制方法实现通信与飞行协同调度,有效提升群体网络吞吐量与整体鲁棒性。此外,在对抗场景下,协同波束赋形也可用于增强抗干扰能力与目标定向通信,保障编队在复杂电磁环境下的任务完成能力。具体来说,如图 4 所示,协同波束赋形通常涉及以下四个步骤:

信号合成:多个通信节点需通过协作来合成多个波束。每个节点根据当前飞行器或用户的位置信息调整其发射信号的方向和强度,使得信号能够在多个方向同时传播,覆盖更广的区域;

干扰消除:在多用户环境中,信号可能会互相干扰,协同波束赋形可以通过相位和幅度的调整,减少不同信号之间的干扰,使得不同飞行器或设备之间的通信质量得到保障;

动态调整:根据实时的通信和感知需求,协同

表1 低空通感一体化网络中的波束成形与对齐方法对比

文献	核心原理	感知指标	通信指标	巡航设备类型	巡航设备功能
文献[32]	地面基站同时承担合法用户通信和避免未授权 UAV 干扰任务, 将最小化发射功率与通信/干扰约束的非线性问题, 通过半定松弛求解	感知信干噪比	信息速率	UAV	探测用户
文献[37]	UAV 向地面合法用户下行通信, 并通过回波定位未知移动目标, 采用融合半定松弛和逐次凸逼近的交替优化算法求解非凸问题	克拉美罗界	信息速率	UAV	空中基站
文献[39]	HAPS 充当通感基站, 为地面用户和目标提供服务, 通过遗传算法求解功率约束下的目标最小波束增益并满足通信用户 SINR 要求	最小波束方向图增益	通信用户 SINR	HAPS	空中基站
文献[40]	提出用扩展卡尔曼滤波协作估计移动用户的位置与速度, 再通过块坐标下降算法, 结合分数规划和半定松弛求解	位置估计的均方根误差	系统平均和速率	UAV	空中基站
文献[41]	针对感知定位精度与频谱效率的资源权衡问题, 提出克拉美罗界量化+块坐标下降算法+多凸优化技术的联合优化方案	克拉美罗界	频谱效率	UAV	探测用户
文献[42]	针对 HAPS 高机动性产生的波束难对准问题, 提出了通感辅助下的粗细两阶段波束对准设计, 用感知先验信息压缩通信搜索空间	探测概率	频谱效率	HAPS	飞行自组织网络
文献[43]	以克拉美罗界量化定位误差与通信速率的关联, 采用连续凸近似与深度强化学习求解非凸优化问题	克拉美罗界	信息速率	UAV	探测用户

波束赋形技术能够动态调整每个节点的波束方向和形状。这对于低空巡航设备尤为重要, 因为它们的高速飞行过程中, 信号的传播路径和环境因素可能发生快速变化;

联合优化: 多个节点可以根据网络中其他节点的信号状态、资源利用情况、干扰水平等信息进行联合优化, 确保系统整体性能最优。例如, 基站和飞行器可以共享位置信息和传输条件, 通过协调工作调整波束指向, 提升传输效率。随着低空飞行设备应用规模的快速增长, 空域运行对通信、感知与监管能力提出了更高要求, 面向空间协作的网络化通感一体化技术逐渐成为支撑低空场景多维需求的重要方向。Cheng 等人网络化通感一体化协作场景系统框架, 通过多个地面节点协同传输信息与感知信号, 实现对授权 UAV 的通信服务和三维空间未授权目标的探测感知^[44]; 文献[45]提出了利用碰撞概率地图避障的 UAV 避障通信系统模型, 为解决低空混合障碍下最大化 UAV 通信能效的问题, 将 UAV 视作智能体, 每个智能体同时获得环境信息并做出决策; 文献[46]提出了网络化通感一体化的 UAV 跟踪与切换方案: 通过定义由若干相邻基站扇区组成的虚拟感知小区, 由地面基站发射感知信号, 同时两个附属基站协同接收回波, 经目标指示滤除静态杂波后, 采用多重信号分类算法估计 UAV 的水平角、仰角、距离和径向速度, 再通过集中式扩展卡尔曼滤波融合多基站数据实现多

UAV 区分与跟踪; 多架空中基站协同也可为地面用户提供集成通感服务, 文献[47]在通过设计 UAV 的发射波束赋形与部署位置, 最大化目标区域内的最小探测概率, 同时满足地面用户各自的最小信干噪比约束、用于避障的 UAV 间最小距离约束, 以及 UAV 的最大发射功率约束。协同波束赋形作为支持未来低空通感一体网络化的关键技术, 正在从传统单一通信波束设计向多目标、协同优化与智能化设计方向演进, 其研究不仅涵盖波束设计本身, 还融合了 UAV 轨迹控制、智能反射面辅助、智能优化等技术, 呈现出多领域交叉、系统级整体优化的研究态势。

具身智能与大模型技术的快速发展, 进一步推动了 AI+相关产业和应用场景的持续拓展。在此背景下, 低空领域的波束成形技术也受到地面智能波束成形研究进展的带动, 呈现出蓬勃发展的趋势。现有研究主要集中在以下方向: 深度强化学习赋能的波束-轨迹联合优化^[48]、深度学习辅助的预测波束成形^[49-50]以及环境感知的波束成形^[51]等。总体来看, 这些研究为低空通感一体化场景下的动态覆盖、链路保持和资源高效利用提供了新的技术路径。文献[48]使用深度强化学习联合优化地面基站的波束成形和低空巡航设备轨迹, 在满足感知约束的同时提升低空 UAV 的期望通信总速率, AI 已直接进入波束决策环; 除此以外 AI 也被广泛运用于预测波束成形方面, 如文献[49]利用时序预测模型

同时跟踪合法用户与窃听者状态，并以保密速率为目标优化波束；文献[50]则以历史通感回波为输入，通过卷积神经网络配合时域卷积网络联合提取空时特征并动态加权关键时隙，端到端预测双向波束成形矩阵；文献[51]则提出了环境知识获取的AI算法来缓解多 UAV 轨迹规划下的通感一体化系统中波束成形联合优化复杂的难题。

2.2 低空通感一体化网络的航迹优化

低空巡航设备的航迹控制优化一直以来在移动通信研究中被视为引入了一种新的空间自由度，以提升期望信号强度并抑制非期望干扰，进而改善通信与感知性能，相比于传统的巡航优化，感知功能的引入使得低空环境与目标的动态信息得以更加丰富，这些感知信息反馈至通感一体化的决策中枢，形成“感知-决策-执行-再感知”的迭代优化链路，如表2所示，当前主要的航迹规划算法大致可分为空间搜索类^[52-56]、智能寻优类^[57-58]以及数学规划类^[35,59-61]等三类。

(1) 空间搜索类算法

空间搜索类算法以低空巡航设备的飞行空间几何探索为核心，主要涵盖基于图搜索^[52-54]和基于采样^[55-56]两类方法，其核心逻辑是通过空间离散化或随机采样直接寻找可行航迹。图搜索算法^[52-54]需先将空域建模为栅格或拓扑图，通过节点搜索获取全局最优路径，适配环境已知、对航迹可解释性和安全性要求高的低空通感静态任务；而采样算法^[55-56]无需精确建模，通过随机采样快速探索未知空间生成可行轨迹，更适合环境动态复杂、实时性需求强的应急救援、移动目标跟踪等场景。此类算法的共性是直接面向空间几何约束，能快速融入感知视距、通信链路衰减等低空通感物理约束，是航迹规划中较为直观且应用广泛的基础方法。

(2) 智能寻优类算法

智能寻优类算法聚焦多目标、多约束下的全局性能优化，包含仿生群智能算法和数据驱动的智能算法两大分支，核心是通过启发式迭代或交互学习实现航迹参数的寻优。仿生群智能算法模拟粒子

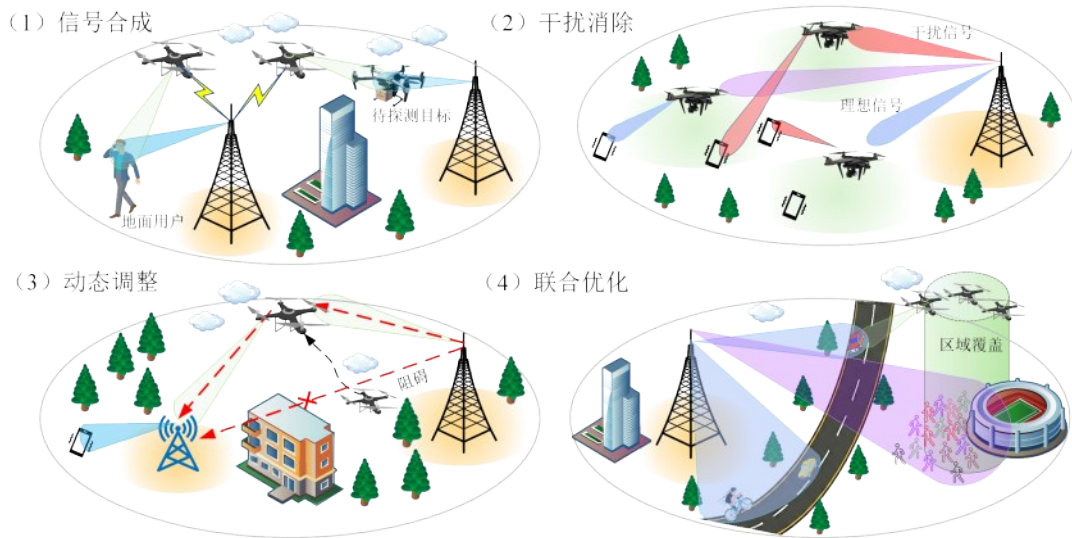


图4 低空通感一体化协同波束赋形的关键步骤示意图

表2

3 算法核心特征对比表

方法类别	空间搜索类	智能寻优类	数学规划类
核心求解思路	空间遍历，采样找可行路径	启发式迭代，数据学习寻优	数学建模，求解器精确求解
解的特性	图搜索：全局最优；采样：概率可行	仿生：局部/全局最优；智能：自适应最优	凸问题：全局唯一最优；非凸：近似最优
环境信息需求	已知或部分未知	无需精确已知	精准已知，需量化建模
通感场景适配性	准静态任务	动态协同任务	高精度、高可靠任务
典型代表算法	A* ^[52] 、RRT* ^[55]	粒子群算法 ^[57] 、深度强化学习 ^[58]	二阶锥规划 ^[35] ，连续近似凸优化 ^[44]

群^[57]、蚁群^[62]等生物群体协作行为,将航迹参数编码为优化个体,通过迭代平衡通信吞吐量、感知精度、飞行能耗等通感指标,适配多 UAV 编队协同等复杂任务;智能算法等数据驱动算法则通过与环境的实时交互^[58,63],学习端到端的航迹决策策略,无需显式建模即可应对强动态、强不确定性的通感场景。这类算法鲁棒性强,无需依赖精确环境模型,但存在仿生算法易陷入局部最优、强化学习训练成本高的局限。

(3) 数学规划类算法

数学规划类算法以精确的数学建模和求解为核心,以凸优化算法^[44,61]为典型代表,其核心思路是将航迹规划转化为标准数学优化问题,该类算法需将低空巡航设备的动力学约束、空域管制规则、通感性能指标等转化为量化的数学表达式,针对非凸问题通过凸松弛、线性近似等手段转化为凸优化问题,再利用成熟求解器获取全局唯一最优解,适配环境信息精准已知、对航迹精度和可靠性要求严苛的低空通感任务,如毫米波通信 UAV 的波束对准航迹规划、多 UAV 编队相对位置协同规划。其优势是解的数学可解释性强,适合高精度场景,但对环境模型依赖性高,动态场景下实时重规划能力较弱,常与空间搜索类、智能寻优类算法混合使用,以兼顾全局最优性和动态适应性。

3 算存资源——计算卸载与缓存部署

随着智能算力处理能力的不断增强,低空通感一体化网络对于计算卸载与缓存部署的需求愈加迫切,人工智能技术在数据分析、实时决策和预测方面的应用,要求网络具备更强的计算处理能力和更低的时延。因此,合理的计算卸载与缓存部署影响着低空通感网络性能的优劣^[64-65]。通过将计算任务卸载到边缘计算平台或云端,降低本地设备的计算压力,同时通过缓存机制减少数据传输延迟,这不仅提升了网络的响应速度,还增强了系统的处理能力和稳定性,尤其在高精度定位和实时感知等任务中发挥重要作用^[66]。

3.1 低空通感一体化网络计算卸载

移动边缘计算可将网络边缘的计算资源与低空巡航设备的高速移动性有效集成,来增强低空任务处理能力,在围绕以 UAV 为代表的低空巡航设备通信的研究中,移动边缘计算可以扩展到低空当中

来增强其算存能力^[67],因此如何有效地实现对于计算卸载是值得深入研究的。目前对于算存资源部署主要存在两种模式^[68],一种是感知功能作为核心网的逻辑功能开放能力,这适用于一些行业专网感知场景中;另一种则是感知功能下沉至接入网,与边缘计算同机房部署,这类数据偏多站感知数据和多模态数据,可在本地边缘计算服务器上进行低时延计算和融合。Liu 等人提出了能效最优的计算卸载策略,即通过车辆与 UAV 协同架构、优先级资源分配和连续凸近似优化算法,在降低 UAV 能耗和数据融合延迟的同时可有效支撑通感一体化网络的高精度感知需求^[20];文献^[69]则首次实现了低空通感一体化网络中计算卸载与目标跟踪的联合优化,在延迟、跟踪精度、预算约束间实现平衡;也有工作^[70]聚焦核心是通过分布式联合计算卸载与通感一体化波束赋形优化,解决终端计算能力有限的痛点,在满足感知精度要求的同时,最小化通信感知任务的平均执行延迟;在低空通感一体化网络中,端侧采集节点通常具有较弱计算能力,需要将感知生成的数据或预处理任务卸载到靠近边缘的节点处理,文献^[71]采集了 UAV 与地面节点双层参与感知过程,地面节点边缘参与计算与初步采样,UAV 负责高时效性数据的中继及路径调度,这种分层协同结构本质上可以视作一种动态卸载结构,同时还考虑了数据采集的实时性,也融入了动态任务分配与路径决策的计算权衡;进一步地,Xu 等人聚焦 UAV 辅助联邦边缘学习场景,针对感知、计算、通信资源耦合竞争及 UAV 部署影响通感系统性能的问题,提出了带宽-批处理大小-位置联合优化方案,证明了 UAV 均匀成功感知概率可缓解数据异质性负面影响,也为 6G 场景下的边缘智能延伸至低空领域提供了有效技术支撑^[72]。

3.2 低空通感一体化网络缓存部署

缓存部署在低空通感一体化网络中,本质是将数据传输转化为数据本地化调度,从通信时延、感知效率、网络鲁棒性和资源利用率四个维度赋能系统性能跃升,是实现低空通感网络轻量化、算力自主化、集群协同化的关键技术环节。围绕低空通感一体化网络,缓存可以用于缓冲延迟/预处理感知数据来提高这些机制的效率,在此背景下进一步扩展研究数据缓存策略作为一种优化工具^[73]。文献^[74]围绕算存部署下的低空通感一体化网络,考

虑了缓存部署对与整体低空通感一体化网络能耗的影响；文献^[75]则考虑了非正交多址接入辅助下的 UAV 集成通感一体化网络，核心是通过深度强化学习驱动的轨迹规划与波束赋形配合非正交多址接入，在满足超可靠低延迟通信、感知质量、功率约束的前提下，最大化系统计算吞吐量，并缓解通感与计算功能耦合冲突以及传统优化算法复杂度高的痛点；文献^[76]通过联合优化 UAV 缓存任务调度、通感功率分配及三维 UAV 飞行航迹参数，采用基于逐次凸逼近的三层迭代优化算法解决通感间的互干扰问题，最终实现雷达估计率最大化；文献^[77]聚焦 UAV 辅助下的通感一体化网络，针对组播内容分发与目标感知协同优化的核心需求，通过定义通信速率与感知功率的加权效用函数，在满足功率、缓存、碰撞避免等约束下最大化系统综合性能。

由于 UAV 节点的算力与存储资源通常受限，在多 UAV 编队或蜂群场景下，节点间可以协同分担计算任务，通过边缘、云端协同处理有效减少单节点的计算压力，同时动态缓存关键数据以降低重复通信开销，这对于实时感知、定位及协同任务执行尤为关键。在 UAV 群体边缘计算架构中，任务卸载策略通常结合移动边缘计算节点或集群内部分布式处理机制，使计算密集型任务如图像分析、模

型推理等能够被高效处理，从而提升系统的实时性、降低延迟和能耗，并提高资源利用效率。

在低空通感一体化网络中，频谱、空域与算存资源之间并非相互独立，而是存在显著的耦合关系。具体而言，频谱资源优化通常强调高吞吐与高分辨率，空域资源优化则更关注轨迹可行性与干扰几何，而算存资源优化则倾向于降低处理复杂度与系统能耗。因此，三类资源的联合配置本质上可视为作为一个多目标权衡过程，需要在通信性能、感知精度、飞行能力、计算开销以及系统能耗之间寻求折中解。作为多目标优化问题中所有非支配解在目标空间中的集合，Pareto 前沿被广泛用于刻画多个冲突性能指标之间的最优折中边界。通信速率与感知精度间的权衡一直以来是通感一体化网络领域的重要关注方向，Xiong 等人从高斯信道的信息论角度提出用 CRB-rate 区域来刻画通信-感知权衡，并指出这种权衡与资源调配是密切相关的^[78]；进一步地，Hua 等人则直接给出了围绕通感两类资源 Pareto 前沿的显式分析^[79]；随后计算也被引入 Pareto 前沿的研究当中，文献^[80]把终端任务划分到本地、边缘、云，并联合优化子帧分配与任务切分，可以得到 Pareto 前沿的最优解，目标是同时平衡感知、通信和计算性能；类似地，面向联邦边缘学习的通感一体化工作也把空间轨迹联合纳入任务

表 3 低空通感一体化网络中的算存部署方法对比

资源类型	文献	技术方案	衡量指标
算力资源	文献 ^[20]	基于协同架构，优先级分配以及凸优化求解，本质是通过联合调度资源与卸载决策，平衡 UAV 能耗和任务延迟	能耗、延迟、传输速率与感知覆盖范围
	文献 ^[69]	联合计算卸载与目标跟踪，通过遗传算法优化任务拆分和 UAV 位置，在满足预算约束的前提下，实现延迟与跟踪精度的平衡	延迟、信息速率与克拉美罗界
	文献 ^[70]	用云边缘三层架构拓宽计算资源边界，在满足感知精度的前提下，最小化任务平均执行延迟和能耗的加权和	能耗、延迟、传输速率与检测概率
	文献 ^[71]	提出的计算辅助的低空通感网络框架，在满足任务延迟和模型训练误差约束下最大化最小感知信噪比，实现感知-通信-计算性能的均衡提升	延迟、信息速率与最小感知信噪比
缓存资源	文献 ^[72]	聚焦 UAV 辅助联邦边缘学习下的通感一体化 ISAC 技术，提出带宽-批次大小-位置联合优化方案，在满足模型训练精度约束下最小化总训练时间	总训练时间、频谱图信噪比与成功感知概率
	文献 ^[74]	联合优化决策变量，部分数据压缩以及多层协同，在满足任务延迟、感知质量等约束下，最小化系统总能耗	缓存命中率，能耗与感知互信息
	文献 ^[75]	通过深度强化学习驱动的轨迹规划，波束赋形以及非正交多址接入，在满足超可靠低延迟通信的条件下，最大化系统计算吞吐量	任务队列积压，吞吐量与感知信噪比
	文献 ^[76]	构建 UAV 辅助下的通感一体化网络，通过三维轨迹、任务调度以及功率分配联合优化，缓解改善感知-通信互干扰问题	信息速率与感知估计率
	文献 ^[77]	针对缓存内容分发与目标感知协同优化需求，用户分组-UAV 部署-预编码交替优化，UAV 的缓存容量，通信速率在满足功率、缓存、碰撞避免等约束下最大化系统综合性能	通信速率与感知接收功率

驱动优化框架^[81], 这类研究更接近任务精度与总能耗的 Pareto 分析。然而, 将通信、感知、空域以及算存统一纳入同一 Pareto 前沿分析的研究仍相对有限, 现有工作更多停留在一体化架构、资源协同机制与场景驱动优化层面, 尚缺乏通用且成熟的四维性能边界建模方法。

3.3 能耗与实时性

能耗与实时性是算存资源部署设计的关键性目标, 未来也将是低空通感一体化系统资源管理中不可忽视的关键因素。与传统地面移动边缘计算不同, 低空平台通常受限于机载电池容量、载荷能力和持续飞行时间, 其能量消耗不仅来自通信链路中的发射功率和信号处理开销, 还包括主动感知过程中的波束扫描、目标探测、数据处理以及低空巡航设备机动飞行所带来的推进能耗。在实时性维度上, 如避障导航、突发目标跟踪等安全敏感型任务通常面临极其严苛的时延约束, 要求系统在毫秒级内完成“通感-决策-控制”的闭环。通信速率提升往往需要更高的发射功率或更密集的波束覆盖, 感知精度提升可能依赖更高分辨率的探测信号和更频繁的感知更新, 而边缘计算与数据缓存又会引入额外的计算与存储能耗。因此, 综合考虑通信速率、感知精度、任务时延、计算开销和飞行能耗之间的耦合关系, 并通过节能波束赋形、轨迹-功率联合优化、任务卸载和能量感知调度等方法实现原有系统性能与能耗、实时性之间的平衡。

4 未来发展趋势

4.1 跨系统与跨场景协同

跨系统与跨场景协同是未来低空通感和低空空域智能化发展的关键趋势, 通过多种空域网络、感知系统和应用场景之间的紧密协同来实现更高效、更安全、更可靠的空域服务。在这一方向上, 研究不仅要解决传统地面通信网络与通感系统自身的优化问题, 还要将地面网络、空中节点、高空平台乃至卫星层网络整体融合, 构建一种纵向贯通、横向协同的多层空域网络架构^[74], 以实现网络的无缝覆盖与功能互补。这种协同不仅体现在网络覆盖上, 还涵盖对异构资源的统一调度与跨层优化, 例如在低空通感一体化网络中多种通信链路、传感节点和计算资源之间动态分配频谱、感知能力和算力^[75]。当卫星、高空平台、UAV 与地面基站组成

多层空域网络时, 由于空地链路的视距传播特性, 低空节点的信号会对地面网络产生大范围的越区干扰, 因而发展任务驱动型的低空网络架构尤为迫切, 根据剩余算力决定是在空中节点还是边缘云执行决策, 实现功能上的深度融合而非简单的跨场景协同。此外, 跨系统协同还要求设计与发展统一的数据交换标准与协议层, 以便让不同来源的数据和控制信息能够安全、低延迟地互操作, 使得感知信息可直接辅助通信算法、导航系统可反馈给调度层进行资源重配置。

4.2 低空信道知识地图

低空信道知识地图主要通过图示化的方式汇聚和表示信道的各类信息, 帮助系统更好地理解和管理信道状态, 信道知识地图^[76]可以将信道如信道衰落、路径损耗、多径效应、干扰等信息结构化地展示出来。在低空通感一体化网络中, 多个飞行器和地面基站需要协同工作, 尤其是对于低空巡航器群体飞行和低空地面通信跨平台协作, 信道知识地图提供了一种信道信息共享的机制, 使得各个节点能够同步了解其所在位置及邻近环境的信道状态^[77], 通过共享信道知识, 各个节点能够更好地协调工作, 优化通信、感知与计算任务的分配, 提高整体网络的效能和稳定性。但目前低空复杂散射与非视距条件下的环境感知建图仍不成熟, 低空城市场景常存在遮挡、反射和杂波, 仅靠视距条件假设很难支撑高可靠感知与定位; 与此同时, 低空信道知识地图的有效性依赖位置标注的高质量信道数据, 因此如何设计实测成本低且航线采样节省的信道知识地图将是未来的重要研究方向。

4.3 新型动态天线设计

在低空通感一体化系统中考虑动态天线设计亦是未来提高通信与感知性能的关键技术方向之一。一方面, UAV 平台的三维动态运动与机身电磁特性使得固定辐射模式的传统天线难以在整个飞行过程中保持最优覆盖与感知准确度; 另一方面, 动态天线通过调整天线位置、辐射方向与模式, 可实现对通信覆盖、目标跟踪与感知方向的实时适配, 从而改善通感一体化系统的链路质量与参数估计性能, 目前已有研究展示了动态天线^[78]在通感一体化中改善总性能的潜力, 并提出了基于可旋转天线的通感信道重构框架, 为未来低空通感一体化网络中动态天线设计提供了理论与算法支持。但目前的

动态天线硬件复杂度、控制开销与平台能耗之间存在显著矛盾,未来可重点围绕动态天线-资源管理协同优化、低功耗轻量化实现、多功能动态天线协同部署以及面向可靠控制和安全监视的任务驱动设计等方向开展研究。

5 结束语

随着移动通信网络从传统地面蜂窝架构向低空空域拓展,更加自主化的低空巡航设备将实现未来移动通信的智能化空域延伸。为了实现这一美好愿景,需要在低空通感一体化网络资源管理层面建立系统理论体系与方法框架。其中,在频谱资源管理方面,传统的sub-6GHz频段将与新兴太赫兹频段、高频感知带宽等资源结合,通过智能分配与共享提高频谱利用效率,以支撑同时进行高带宽通信与高精度感知功能;在空域资源协同方面,低空通感一体化将进一步挖掘协同波束赋形和航迹优化,获取信号合成、动态调整、联合优化等关键流程突破,实现动态目标环境下实现灵活的链路调度;在算存部署方面,通感将与算存间进行深层次的资源转置,获取算存约束下的通感节点跨域协作与多模态数据融合交互,最终实现面向低空经济的高效、可靠和智能化通感一体网络。

参考文献:

- [1] 通用航空装备创新应用实施方案(2024-2030年)[R]. 北京:工业和信息化部,科学技术部,财政部,中国民用航空局,2024. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/P020240328724691408759.pdf>.
General aviation equipment innovation application implementation plan (2024-2030) [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Science and Technology, Ministry of Finance, Civil Aviation Administration of China, 2024. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202403/P020240328724691408759.pdf>.
- [2] Zeng Y, Zhang R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. *IEEE Transactions on wireless communications*, 2017, 16(6): 3747-3760.
- [3] Zaid A A, Belmekki B E Y, Alouini M S. eVTOL communications and networking in UAM: Requirements, key enablers, and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(8): 154-160. DOI:10.1109/MCOM.004.2300061.
- [4] Song Y, Zeng Y, Yang Y, et al. An overview of cellular ISAC for low-altitude UAV: New opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2025, 63(12): 88-95. DOI: 10.1109/MCOM.002.2400742.
- [5] Federal Aviation Administration. Remote Identification of Drones [OL]. (2025) https://www.faa.gov/uas/getting_started/remote_id.
- [6] European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) 2021/664 of 22 April 2021 on a regulatory framework for the U-space [OL]. (2021) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0664>.
- [7] Republic of Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Korea announces expansion of K-Drone Delivery operations [OL]. (2025). <https://www.mk.co.kr/en/society/11356989>.
- [8] 中华人民共和国国务院,中华人民共和国中央军事委员会. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[OL]. (2024). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6888800.htm.
The State Council of the People's Republic of China, Central Military Commission of the People's Republic of China. Interim Regulations on the Administration of Unmanned Aircraft Flight[OL]. (2024). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/content_6888800.htm.
- [9] 工业和信息化部,中央网络安全和信息化委员会办公室,国家发展和改革委员会,等.5G规模化应用“扬帆”行动升级方案[OL]. (2024). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202411/content_6989412.htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Cyberspace Administration of China, National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, et al. Upgrade Plan for the "Sailing" Initiative of Large-scale 5G Applications [OL]. (2024). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202411/content_6989412.htm.
- [10] Leyva-Mayorga I, Saggese F, Li L, et al. Integrating atmospheric sensing and communications for resource allocation in NTN[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(11): 9703-9718. DOI: 10.1109/TWC.2025.3574760.
- [11] Gupta L, Jain R, Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 1123-1152. DOI:10.1109/COMST.2015.2495297.
- [12] Ji L, Chen J, Feng Z. Spectrum allocation and performance analysis for backhauling of UAV assisted cellular network[J]. *China Communications*, 2019, 16(8): 83-92. DOI:10.23919/JCC.2019.08.008.
- [13] Zhang J, Zhou L, Zhou F, 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. DOI:10.1109/TVT.2019.2960103.
- [14] Wu Q, Zeng Y, Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109-2121.
- [15] An J, Li H, Ng D W K, et al. Fundamental detection probability vs. achievable rate tradeoff in integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(12): 9835-9853.
- [16] Zhang J, Yan S, Peng M, et al. Coordinated multi-point enabled ISAC under asynchronous errors: performance analysis and waveform-beamforming optimization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(8): 12189-12205. DOI:10.1109/TVT.2025.3550650.
- [17] Liu F, Liu Y F, Li A, et al. Cramér-Rao bound optimization for joint radar-communication beamforming[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2022, 70: 240-253. DOI:10.1109/TSP.2021.3135692.
- [18] DONG F, LIU F, CUI Y, et al. Sensing as a service in 6G perceptive networks: A unified framework for ISAC resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 22(5): 3522-3536.
- [19] 尹浩,黄宇红,韩林丛,等.6G通信-感知-计算融合网络的思考[J]. *中国科学:信息科学*, 2023, 53(9): 1838-1842.

- Yin H, Huang Y, Han L, et al. thoughts on 6G communication-sensing-computing integrated network [J]. *Science China: Information Sciences*, 2023, 53(9): 1838-1842. DOI: 10.1360/SSI-2023-0135.
- [20] Liu Q, Liang H, Luo R, et al. Energy-efficiency computation offloading strategy in UAV aided V2X network with integrated sensing and communication[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, 3: 1337-1346. DOI:10.1109/OJCOMS.2022.3195703.
- [21] Gong T, Zhu L, Yu F R, et al. Edge Intelligence in Intelligent Transportation Systems: A Survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(9): 8919-8944. DOI: 10.1109/TITS.2023.3275741.
- [22] Yang J, Jin S, Wen C K, et al. Fast beam training architecture for hybrid mmWave transceivers[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(3): 2700-2715. DOI:10.1109/TVT.2020.2963847.
- [23] Zhang R, Wu W, Chen X, et al. Terahertz integrated sensing and communication-empowered UAVs in 6G: A transceiver design perspective[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2025: 2-11. DOI: 10.1109/MVT.2025.3531088.
- [24] 毕奇, 向际鹰, 冯盾, 等. 基于 5G、6G 和通感一体的低空覆盖之机遇及挑战[J]. *移动通信*, 2025, 49(10): 156-162. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20250725-0002.
- Bi Q, Xiang J, Feng D, et al. Opportunities and challenges on low altitude airspace coverage using 5G, 6G and integrated sensing and communication[J]. *Mobile Communications*, 2025, 49(10): 156-162. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20250725-0002.
- [25] 魏明烁, 谢伟良. 低空 3.5 GHz 双载波网络覆盖解决方案研究[J]. *电信科学*, 2025, 41(03): 87-95. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025098.
- Wei M, Xie W Research on the coverage solution of low-altitude 3.5 GHz dual-carrier network [J]. *Telecommunication Science*, 2025, 41(03): 87-95. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025098
- [26] 中兴通讯广东移动. 中兴通讯与广东移动共建高质量低空智联网络[OL]. (2024). <https://finance.sina.com.cn/roll/2024-12-31/doc-ineckerv1908028.shtml>
- ZTE Corporation & Guangdong Mobile. ZTE and Guangdong Mobile build a high-quality low-altitude intelligent network [OL]. (2024). <https://finance.sina.com.cn/roll/2024-12-31/doc-ineckerv1908028.shtml>.
- [27] Wang C X, Wang J, Hu S, et al. Key technologies in 6G terahertz wireless communication systems: A survey[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2021, 16(4): 27-37.
- [28] Ma Z, Ai B, He R, et al. a non-stationary geometry-based MIMO channel model for millimeter-wave UAV networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(10): 2960-2974. DOI: 10.1109/JSAC.2021.3088659.
- [29] 陈智, 刘轲, 李玲香, 等. 太赫兹通信感知一体化技术综述[J]. *中国科学: 信息科学*, 2024, 54(5): 1215-1235. DOI: 10.1360/SSI-2023-0354.
- Chen Z, Liu K, Li L, et al. A survey on terahertz communication-sensing integration technology [J]. *Science China: Information Sciences*, 2024, 54(5): 1215-1235. DOI: 10.1360/SSI-2023-0354.
- [30] 工业和信息化部. 工业和信息化部关于微波通信系统频率使用规划调整及无线电管理有关事项的通知[OL]. (2022). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-01/09/content_5735782.htm.
- Ministry of Industry and Information Technology. notice on adjusting the frequency use plan for microwave communication systems and related radio management issues [OL]. (2022). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-01/09/content_5735782.htm.
- [31] Jiang Y, Li X, Zhu G, et al. Integrated sensing and communication for low altitude economy: opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2025, 63(12): 72-78. DOI: 10.1109/MCOM.001.2400685.
- [32] Li Z, Gao Z, Wang K, et al. Unauthorized UAV countermeasure for low-altitude economy: joint communications and jamming based on MIMO cellular systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(6): 6659-6672. DOI:10.1109/JIOT.2024.3491796.
- [33] 胡杨林, 张天魁, 李博, 等. 无人机使能的通信感知一体化组网与技术研究综述[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(04): 859-875. DOI: 10.11999/JEIT241116.
- Hu Y, Zhang T, Li B, et al. A survey on UAV-enabled communication-sensing integration networking and technology [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2025, 47(04): 859-875. DOI: 10.11999/JEIT241116.
- [34] Cui C, Jia Z, You J, et al. Robust and secure computation offloading and trajectory optimization for multi-UAV MEC against aerial eavesdropper[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2026, 75(3): 4987-5000. DOI: 10.1109/TVT.2025.3612755.
- [35] Meng K, Han K, Masouros C, et al. Network-Level ISAC: An Analytical Study of Antenna Topologies Ranging From Massive to Cell-Free MIMO[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(12): 10003-10018. DOI:10.1109/TWC.2025.3576432.
- [36] Zhang H, Guo Y, Xue L, et al. Millimeter-wave Energy-efficient Hybrid beamforming architecture and algorithm[OL]. *arXiv*, 2025[2026-01-15]. <http://arxiv.org/abs/2501.01684>. DOI: 10.48550/arXiv.2501.01684.
- [37] Jing X, Liu F, Masouros C, et al. ISAC from the Sky: UAV trajectory design for joint communication and target localization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(10): 12857-12872. DOI:10.1109/TWC.2024.3396571.
- [38] Yuan B, Zhang Q, Jiang Z, et al. Synergistic multi-frequency ISAC for joint aerial and maritime target tracking: A 3.5 GHz and 26 GHz outdoor experiment[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025: 1-1. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3622585.
- [39] Kanani P, Omidi M J, Modarres-Hashemi M, et al. HAPS-ISAC: enhancing sensing and communication in 6G networks with advanced MIMO beamforming[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2025, 6: 5988-6004. DOI:10.1109/OJCOMS.2025.3587077.
- [40] Zhong J, Wu J, Li Y, et al. Joint beamforming design and trajectory optimization for UAV-enabled cell-free ISAC MIMO systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2025, 29(8): 1849-1853. DOI: 10.1109/LCOMM.2025.3577697.
- [41] Hu Y, Zhuo X, Meng Z, et al. Collaborative Positioning Optimization for Multiple Moving Users in UAV-Enabled ISAC[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 11(5): 3016-3030. DOI:10.1109/TCCN.2025.3591980.
- [42] Kirik M, Afeef L, Arslan H. An ISAC-assisted beam alignment design for HAP-based 6G flying Ad-Hoc networks[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2025, 6: 5923-5939. DOI: 10.1109/OJCOMS.2025.3586964.
- [43] Liu J, Zhou C, Sheng M, et al. resource allocation for adaptive beam

- alignment in UAV-assisted integrated sensing and communication networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025, 43(1): 350-363. DOI:10.1109/JSAC.2024.3492699.
- [44] Cheng G, Song X, Lyu Z, et al. networked ISAC for low-altitude economy: coordinated transmit beamforming and UAV trajectory design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(8): 5832-5847. DOI:10.1109/TCOMM.2025.3541027.
- [45] Kong X, Zhou Y, Li Z, et al. Multi-UAV simultaneous target assignment and path planning based on deep reinforcement learning in dynamic multiple obstacles environments[J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2024, 17: 1302898. DOI:10.3389/fnbot.2023.1302898.
- [46] Zhao C, Feng Y, Luo H, et al. Networked ISAC-based UAV tracking and handover toward low-altitude economy[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(9): 7670-7685. DOI: 10.1109/TWC.2025.3562396.
- [47] Ding W, Ren Z, Fang Y, et al. Multi-UAV-enabled integrated sensing and communications: Joint beamforming and UAV placement design [C]//2024 16th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2024: 770-775.
- [48] Liu X, Wu J, Zhao C, et al. Integrated sensing and communications for UAV assisted internet of things based on deep reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(6): 9604-9616. DOI:10.1109/TVT.2025.3539693.
- [49] Al-Habob A A, Dobre O A, Jing Y. Predictive beamforming approach for secure integrated sensing and communication with multiple aerial eavesdroppers[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(9): 7887-7898. DOI:10.1109/TCOMM.2025.3545678.
- [50] Xu J, Zhou X, Zhang H, et al. Deep learning-based predictive bidirectional beamforming in ISAC-enabled UAV networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2026, 25: 12230-12245. DOI: 10.1109/TWC.2026.3664980.
- [51] Li Z, Zhang C, Shen L, et al. Knowledge-guided reinforcement learning for beamforming and trajectory design in multi-UAV aerial ISAC system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2026: 1-1. DOI: 10.1109/JSEN.2026.3683952.
- [52] Ghambari S, Golabi M, Jourdan L, et al. UAV path planning techniques: a survey[J]. *RAIRO - Operations Research*, 2024, 58(4): 2951-2989. DOI:10.1051/ro/2024073.
- [53] Luo Z, Zhang Y, Mu L, et al. A UAV path planning algorithm based on an improved D* lite algorithm for forest firefighting[C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2020: 4233-4237.
- [54] Ye Z, Wang K, Chen Y, et al. Multi-UAV navigation for partially observable communication coverage by graph reinforcement learning[J]. *IEEE transactions on mobile computing*, 2022, 22(7): 4056-4069. DOI: 10.1109/TMC.2022.3146881.
- [55] Orthey A, Chamzas C, Kavrakli L E. Sampling-based motion planning: A comparative review[J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2023, 7.
- [56] Verginis C K, Dimarogonas D V, Kavrakli L E. Kdf: Kinodynamic motion planning via geometric sampling-based algorithms and funnel control[J]. *IEEE Transactions on robotics*, 2022, 39(2): 978-997.
- [57] 赵棣宇, 郑宾, 殷云华, 等. 改进粒子群算法的 UAV 突防路径规划 [J]. *电光与控制*, 2023, 30(04): 12-16+39. DOI: 10.3969/j.issn.1671-637X.2023.04.003.
- Zhao D, Zheng B, Yin Y, et al. UAV penetration path planning based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 30(04): 12-16+39. DOI: 10.3969/j.issn.1671-637X.2023.04.003.
- [58] Gao Q, Zhong R, Shin H, et al. MARL-based UAV trajectory and beamforming optimization for ISAC system[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(24): 40492-40505. DOI: 10.1109/JIOT.2024.3453195.
- [59] Pan Y, Li R, Da X, et al. Cooperative trajectory planning and resource allocation for UAV-Enabled integrated sensing and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(5): 6502-6516. DOI:10.1109/TVT.2023.3337106.
- [60] Hou P, Zhu H, Lu Z, et al. Learning-based over-the-air integrated sensing, communication and computation in UAV swarm-enabled intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025, 9(3): 1414-1428. DOI: 10.1109/TGCN.2024.3492028.
- [61] 张海君, 夏清悦, 马旭, 等. 6G 低空通信场景下无人机部署优化综述 [J]. *航空学报*, 2025, 46(11): 148-173.
- [62] Hu Y, Zhuo X, Meng Z, et al. Collaborative positioning optimization for multiple moving users in UAV-enabled ISAC[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 11(5): 3016-3030. DOI:10.1109/TCCN.2025.3591980.
- [63] Saikia P, Jee A, Singh K, et al. Hybrid-RIS empowered UAV-Assisted ISAC systems: Transfer learning-based DRL[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(9): 8314-8329. DOI: 10.1109/TCOMM.2025.3548797.
- [64] Ren Q, Abbasi O, Kurt G K, et al. Caching and computation offloading in high altitude platform station (HAPS) assisted intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(11): 9010-9024. DOI:10.1109/TWC.2022.3171824.
- [65] Xu S, Yuan W, Zheng L, et al. DTFIRNet: Deep learning-based radar perception for urban low-altitude wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 12: 3223-3234. DOI: 10.1109/TCCN.2025.3626368.
- [66] Zhang H, Han M, Liu X, et al. Joint resource allocation and trajectory optimization in multi-cell UAV and sidelink heterogeneous networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(11): 16635-16647.
- [67] Qu Y, Dai H, Wang H, et al. service provisioning for UAV-enabled mobile edge computing[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(11): 3287-3305. DOI:10.1109/JSAC.2021.3088660.
- [68] 赵川斌, 罗宏亮, 高飞飞. 基站对低空无人机通感算一体化应用组网研究[J]. *移动通信*, 2024, 48(9): 57-63+70. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20240511-0001.
- Zhao C, Luo H, Gao F. Research on base station-based networking for low-altitude UAV integrated sensing-communication-computing applications [J]. *Mobile Communications*, 2024, 48(9): 57-63+70. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20240511-0001.
- [69] Van Chien T, Cong M D, Cong Luong N, et al. Joint computation offloading and target tracking in integrated sensing and communication enabled UAV networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(6): 1327-1331. DOI:10.1109/LCOMM.2024.3385768.
- [70] Liu P, Fei Z, Wang X, et al. Joint offloading and beamforming design in integrating sensing, communication, and computing systems: A distributed approach[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73

- (7): 4697-4712. DOI:10.1109/TCOMM.2024.3516488.
- [71] Wang K, Zhang H, Liu Z, et al. Collaborative optimization of sensing, communication, and computation functionalities in MEC-Assisted ISAC Systems[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2026, 12: 1342-1355. DOI: 10.1109/TCCN.2025.3612684.
- [72] Tang Y, Zhu G, Xu W, et al. Integrated sensing, computation, and communication for UAV-assisted federated edge learning[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(4): 2647-2662. DOI: 10.1109/TWC.2024.3523381.
- [73] Li B, Yang R, Liu L, et al. Service placement and trajectory design for heterogeneous tasks in Multi-UAV edge computing networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(8): 9360-9371. DOI: 10.1109/JIOT.2024.3439350.
- [74] Zhang Y, Na Z, Lin B, et al. Energy consumption minimization for integrated sensing, communication, computing, and caching in multi-layer aerial Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(22): 47787-47803. DOI:10.1109/JIOT.2025.3602793.
- [75] Qin P, Fu Y, Yu Z, et al. URLLC-aware trajectory plan and beamforming design for NOMA-aided UAV integrated sensing, communication, and computation networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(1): 1610-1625. DOI:10.1109/TVT.2024.3460813.
- [76] Liu Z, Liu X, Liu Y, et al. UAV assisted integrated sensing and communications for Internet of Things: 3D trajectory optimization and resource allocation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(8): 8654-8667. DOI:10.1109/TWC.2024.3352985.
- [77] Abdissa Bayessa G, Chai R, Liang C, et al. Joint UAV deployment and precoder optimization for multicasting and target sensing in UAV-assisted ISAC networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(20): 33392-33405. DOI:10.1109/JIOT.2024.3430371.
- [78] Zhang X, Zhang H, Sun L, et al. STAR-RIS-aided UAV communication for next generation multiple access with resource allocation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2024, 18(7):

1222-1234. DOI: 10.1109/JSTSP.2024.3449124.

刘向南 (1996-), 男, 甘肃金昌人, 博士, 北京科技大学特聘副教授, 主要研究方向为 6G 移动通信, 智能通信和非地面网络等。

刘玉佩 (1994-), 女, 湖北随州人, 博士, 国家无线电监测中心工程师, 主要研究方向为无线电频谱管理和低空通信等。

张海君 (1986-), 男, 辽宁朝阳人, 博士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 6G 移动通信, 人工智能与无线网络, 卫星通信和机器学习与大数据等。

迟凯 (1986-), 男, 陕西西安人, 硕士, 多域数据协同处理与控制国家重点实验室高级工程师, 主要研究方向为数据链网络在线控制, 资源优化和动态重构等。