

通感赋能低空覆盖网络技术



Integrated Sensing and Communication-Empowered Low-Altitude Networks Technology

胡文豪/HU Wenhao^{1,2}, 何振耀/HE Zhenyao^{1,2},
徐甜甜/XU Tiantian¹, 许威/XU Wei^{1,2}

(1. 东南大学, 中国 南京 210096;
2. 紫金山实验室, 中国 南京 211111)
(1. Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250221.0847.002.html>

网络出版日期: 2025-02-21

收稿日期: 2024-12-10

摘要: 深入探讨了低空覆盖网络中低空飞行器在通信感知融合 (ISAC) 及协作调度方面的技术路线和实现方案, 系统阐述了无人机 (UAV) 与基站之间、UAV 集群之间、UAV 集群与基站之间的关键技术以及面临的挑战, 重点分析了 UAV 与基站之间的通感波形设计与任务分配、UAV 集群之间的协作机制与轨迹优化、UAV 集群与基站之间的协作调度策略。分析表明能效优化和协同调度技术是低空覆盖网络未来重点技术研究方向。

关键词: 低空覆盖网络; ISAC; UAV; 波形设计; 协作调度

Abstract: The technical pathways and implementation strategies for low-altitude aerial vehicles in integrated sensing and communication (ISAC) and collaborative scheduling within low-altitude networks are discussed in this paper. It provides a systematic analysis of the key technologies and challenges associated with interactions between unmanned aerial vehicles (UAVs) and base stations, UAV swarms, and UAV swarms with base stations. Special focus is placed on the design of communication and sensing waveforms, task allocation between UAVs and base stations, collaborative mechanisms and trajectory optimization within UAV swarms, and collaborative scheduling strategies between UAV swarms and base stations. The analysis highlights that energy efficiency optimization and collaborative scheduling technologies are critical research directions for the future advancement of low-altitude networks.

Keywords: low-altitude network; ISAC; UAV; waveform design; collaborative scheduling

引用格式: 胡文豪, 何振耀, 徐甜甜, 等. 通感赋能低空覆盖网络技术 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 6-12. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501003

Citation: HU W H, HE Z Y, XU T T, et al. Integrated sensing and communication-empowered low-altitude networks technology [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 6-12. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501003

1 低空通感网络概述

作为 6G 系统的关键技术, 通信感知一体化 (ISAC) 技术将通信和感知功能融合在同一频段, 显著地提高了系统的频谱利用率。此外, ISAC 技术通过硬件资源复用, 大幅减少了硬件冗余, 降低了系统的成本与复杂度, 提高了无线设施利用率。该技术凭借其卓越的高分辨率感知能力, 为 6G 网络开创了全新的定位范式。这将为智能城市、智能制造和自动驾驶等依赖高精度感知的应用领域带来前所未有的发展机遇。然而, 现有地面

ISAC 网络架构在应用中存在明显局限: 一方面, 其覆盖范围相对有限; 另一方面, 复杂环境中的障碍物易遮挡远程目标的直视链路, 致使系统感知性能显著降低^[1]。为了应对这些挑战, 学术界提出了通过无人机 (UAV) 搭载 ISAC 服务来构建低空覆盖网络的方案。得益于卓越的机动性能和快速部署能力, UAV 可作为空中临时基站。这不仅能有效提升区域通信容量, 还可显著增强对重点目标的实时监测能力, 从而为 6G 网络的无缝覆盖提供可靠保障。目前, UAV 已在航拍、农业、测绘、遥感、通信等多个领域得到广泛应用, 低空覆盖网络的规模正逐步扩大。低空覆盖网络的发展, 不仅增强了 6G 网络的覆盖能力, 也为 ISAC 技术的应用提供了新的可能性, 进一

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62022026)

步推动了6G技术在更广泛领域的应用和创新。

1.1 研究背景

随着频谱资源的日益稀缺和硬件成本的不断上升, ISAC技术已经成为一个不可忽视的关键技术。ISAC旨在通过设计融合通信感知波形, 探索合适的信号处理方法, 来构建统一的平台以实现通感频谱复用及硬件共享, 进而提高频谱利用率, 降低系统成本。ISAC技术的优势在于能够通过感知的实时反馈来提升通信性能, 同时实现精确的目标检测与跟踪。以自动驾驶场景为例, ISAC技术不仅能为车辆提供高效的通信支持, 还能通过感知功能辅助其获取周围环境信息, 从而增强驾驶安全性和智能决策能力。ISAC技术能够满足包括自动驾驶、UAV、智能交通等在内的复杂应用场景的需求, 通过感知和通信数据的实时融合, 提供更高效的决策支持和系统管理。这种技术的应用, 不仅增强了通信网络的智能化水平, 也为各种智能应用提供强大的支撑。因此, 学术界和工业界普遍认为ISAC技术是6G移动通信的关键技术之一^[2]。它不仅解决了频谱资源和硬件成本的问题, 还为未来的通信和感知技术的发展提供了新的方向和可能性。

然而, 传统的ISAC主要基于地面基站架构, 其覆盖范围和感知能力容易受到物理障碍物(如建筑物、山脉和森林)的影响, 这导致该设计在一些特殊应用场景中存在明显的局限性。例如, 在城市环境中, 建筑物的密集分布可能会造成信号遮挡, 而在山区、丘陵等复杂地形中, 地面基站和传感器往往无法获得足够的视距链路来进行远程感知。这些问题不仅降低了感知系统的准确性, 还可能导致通信质量的下降, 进而影响整个系统的性能。此外, 在突发自然灾害和紧急救援等应急场景中, 传统的地面基站网络基础设施往往受损或无法及时恢复, 这会导致通信和感知服务的中断。为了克服这些问题, 学术界提出了诸多方案, 例如通过UAV、气球或飞艇等设备搭载ISAC服务来构建低空覆盖网络^[3]。由于UAV的高机动性和灵活部署性, UAV作为空中移动平台的研究受到广泛关注。UAV能够避开地面障碍物(如建筑物、树木等), 保持良好的视距链路, 从而大幅提升远程目标的感知能力。例如, 在灾后救援场景中, 地面基站的通信和感知功能往往受限于周围环境, 但UAV可以在灾区上空飞行, 为地面操作人员提供实时的环境感知数据, 同时保障通信的可靠性和稳定性。UAV能够灵活地调整飞行位置, 以覆盖不同区域, 确保网络覆盖的连续性和感知性能的稳定性。此外, 基于UAV的低空覆盖网络可

以根据网络负载和任务需求动态调整UAV部署和分工, 实现更加灵活的资源管理, 进一步提高作业效率和应急响应能力。2021年, 在河南新乡遭受暴雨洪灾时, 多架UAV被委以重任, 用于灾区的实时监测、情报搜集工作, 并辅助救援指挥行动。凭借高机动性的独特优势, UAV快速飞行到灾区现场并将实时画面迅速传递, 为抢险救援工作提供了不可或缺的关键信息, 有力地推动了救援行动的高效开展^[4]。此外, 甘孜—康定地震带是中国地震史上最活跃的地区之一。当地震发生后, 灾区的通信网络往往遭受严重破坏甚至瘫痪, 然而应急通信需求却急剧增加, 现有规模的基站难以满足大规模应急通信传输的需求^[5]。在这种情况下, 部署应急通信UAV是一种有效的解决方案。快速部署UAV能迅速扩大基站覆盖范围, 有效应对灾区短期通信需求。

1.2 技术特征

作为6G覆盖网络的关键部分, 面向低空覆盖的通感融合网络在信息网络中占据重要战略地位。面对日益复杂的通信需求以及诸多突发场景, 低空覆盖网络需同时提供通信和感知服务, 以支持更高速率的数据传输和更高精度的目标感知。特别是在低空飞行器(如UAV、飞艇等)的辅助下, 低空覆盖网络呈现以下技术特征:

1) 高频谱利用率

低空覆盖网络将通信和感知功能融合在一个统一平台上, 不仅能够提供传统的无线通信功能, 还能实时感知环境、检测目标、监控区域, 进而提供更全面的服务, 同时降低系统的硬件成本。这种融合提高了频谱利用率和系统效率, 尤其在复杂动态场景下, 如灾后救援、交通监控等应用场景。

2) 高机动性和灵活性

低空飞行器具有较高的机动性和灵活性, 能够在短时间内覆盖大范围区域。相较于地面基站, 基于低空飞行器构建的临时空中平台可根据实际需求快速部署、灵活调整飞行轨迹, 从而优化通信覆盖和感知能力。UAV、空中飞艇等低空飞行器能够随时调整位置和飞行高度, 以确保在目标区域内提供无缝的通信和精确的感知服务。

3) 实现三维空中视距链路

低空飞行器在三维空间中可实现直接视距(LoS)链路, 这使得通信和感知链路更加稳定且不受地面障碍物的影响, 进而可以获得更高的传输速率和感知精度。这使得低空覆盖网络可以在复杂地形和环境中提供更广泛、更高质量的信号覆盖。

4) 实时数据处理与决策支持

低空覆盖网络通常需要处理大量的感知数据和通信数据，实时分析传感器数据（如视频、环境监测数据等），并与基站通信，为系统决策提供了高效的数据支持。例如，在自动驾驶、智能交通、灾难救援等场景中，低空覆盖网络能够实时优化行动方案。

5) 实时调度与资源优化

低空覆盖网络需要根据实时环境变化、飞行任务和通信感知任务需求进行实时调度与资源优化。通过智能算法，网络能够对通信、感知和计算资源进行高效分配，确保系统的整体效能，尤其在高负载或频繁变化的环境中。

6) 增强的安全性与隐私保护

低空覆盖网络由于涉及大量的实时数据传输和感知操作，在安全性和隐私保护方面具有较高的需求。网络需要设计加密、认证等机制，确保数据传输的安全性，防止恶意攻击或数据泄露，特别是在敏感领域（如军事、应急救援等）中。

低空覆盖的通感融合网络凭借其独特的技术特征能够为各种应用场景提供更高效、智能和灵活的支持，推动未来6G等通信技术的应用发展。

1.3 研究现状

目前，低空覆盖网络的研究主要集中在以UAV为核心的技术应用上。UAV辅助通信方面的研究包括场景分析、架构设计、UAV与地面用户之间的信道建模、覆盖和性能分析、UAV部署的位置优化等。而UAV辅助感知方面的研究较少，因此越来越多的研究者致力于这一方向。与单一功能的UAV平台相比，ISAC赋能的UAV平台可以使通信和感知性能相互受益，UAV支持的ISAC将加快相关ISAC理论和原则的形成。然而，目前文献中关于ISAC赋能低空覆盖网络架构设计的研究仍相对较少，只有部分研究探讨如何设计UAV平台的ISAC系统波形和部署策略，以下是一些相关研究的进展。

在波形设计方面，LYU等优化了UAV的轨迹、发射波束成形和雷达信号，提出了一种在保

证性能前提下提高通信数据速率的低空覆盖网络系统设计^[6]。WEI等提出了一种基于UAV的ISAC设计框架，旨在保证目标跟踪性能的前提下最大化UAV下行链路通信容量^[7]。在部署策略方面，MENG等提出了一种UAV周期性感知与通信的方案^[8-9]。该方案通过联合优化感知频率、波束方向图、飞行轨迹、传输预编码器和感知开始时间，最大化系统的通信速率和感知性能。XU等研究了UAV如何融合感知、计算和通信功能^[10]，将感知到的环境信息通过计算任务卸载到地面基站处理，实现任务的分配与优化。这种方案可以有效降低UAV的计算负担，通过合理的时间和计算的资源分配，提高低空覆盖网络的工作效率和资源利用率，有助于实现更为高效的通信与感知协同服务。此外，AT&T的COW项目和诺基亚的F-cell项目正积极研究利用UAV构建低空覆盖网络，以提供ISAC服务^[11]。这些项目的核心目标是通过灵活部署的空中通信平台，实现多种应用场景的覆盖，包括交通事故救援、高精度地理测绘以及在临时热点区域（如大型活动、突发事件现场）提供增强的通信服务。具体而言，这些项目旨在通过UAV在三维空间中的高机动性和强大的空地LoS链路来改善通信覆盖，提高感知性能。如图1所示，通过ISAC技术的加持，低空覆盖网络将提供更广泛的通信感知服务覆盖，并在复杂环境中灵活地适应不同场景下的通信感知需求，进一步推动系统的智能化和实时响应能力。

2 低空通感协作技术

在低空覆盖网络中，低空飞行器与地面基站之间的

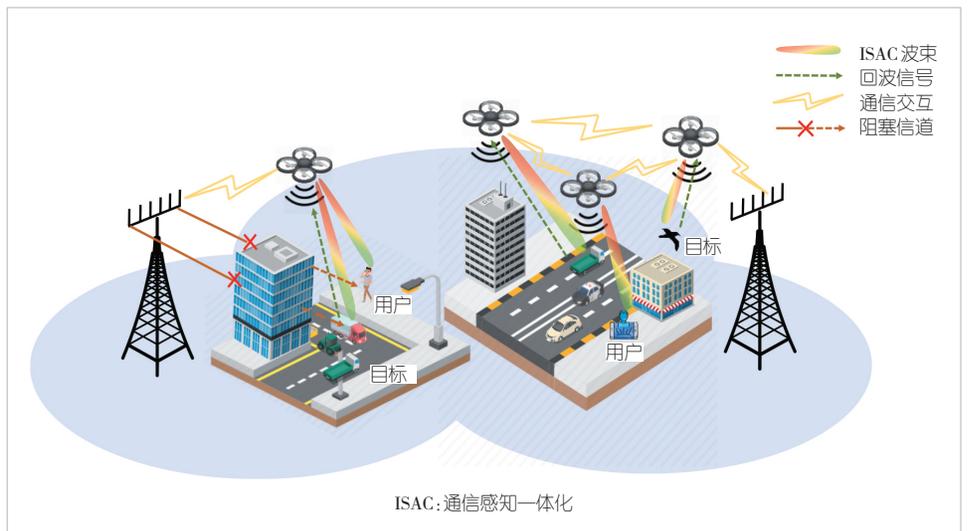


图1 ISAC赋能的低空覆盖网络应用场景

通信与协作起着至关重要的作用。以 UAV 为例，作为中继节点，UAV 可以显著扩展基站的服务范围并增强系统的感知能力。这种协同工作不仅扩大了网络的覆盖面积，还能够一些复杂或恶劣的环境中实现更加精准的目标感知。尽管 UAV 与基站的协作具有显著优势，但在实际应用中仍面临诸多技术挑战，尤其是在动态环境中的通信稳定性、时延控制、频谱资源管理等方面。同时，UAV 集群的协作也成为了低空覆盖网络的一个关键研究方向，例如多个 UAV 在协同执行通信与感知任务时，如何保持稳定的集群编队、高效的任务分配以及灵活的飞行调整策略。然而，目前关于 UAV 集群协作和碰撞避免的研究仍处于初步阶段，尤其是在集群成员之间的实时通信、动态路径规划和冲突检测等方面，依然存在着较大的技术难题。此外，UAV 集群之间的信息交互，以及 UAV 集群与地面基站之间的大容量数据交互，将为低空覆盖网络带来更大的增益。特别是在应急救援、灾难监测、智能交通等场景中，UAV 集群和基站的协同工作可以大幅提升网络的服务能力和灵活性。然而，如何高效地进行 UAV 任务分配与资源调度，确保基站能够最大程度地优化资源配置，以及如何保证大容量数据的稳定传输，仍是当前亟待解决的核心问题。如表 1 所示，我们总结了现有的技术方案以及面临的挑战，并在下文逐一介绍。

2.1 基站与 UAV 之间协作调度

在低空覆盖网络中，UAV 与基站的协作在分担基站负载、扩大网络覆盖范围、提升灵活性等方面具有显著优势，已经成为一个重要的研究方向。目前，关于 UAV 与基站协作的研究主要集中在 UAV 作为中继节点来辅助信息传递和感知增强。UAV 作为中继节点不仅能够为用户提供通信转发功能，还可以在更大的范围内探测地面目标，并将感知到的信息实时转发给基站。这种中继功能极大地扩展了基站的覆盖范围，特别是在通信和感知

链路受限的区域，UAV 可以通过中继作用保障通信和感知的顺利进行。LIU 等提出了一种基于 UAV 与基站协作的低空覆盖网络服务方案^[12]。该方案将一个时隙划分为感知和通信两个子时隙：在感知子时隙中，UAV 对目标用户进行感知；在通信子时隙中，UAV 将感知信息传输至基站。为了降低系统能耗并保证感知的公平性，文献[12]对用户调度、发射功率和 UAV 轨迹进行了联合优化。进一步地，KHALILI 等针对低空覆盖网络的通信帧结构进行了优化设计，将帧结构划分为通信时隙和感知时隙^[13]。为了保证感知性能，UAV 在每个感知时隙悬停在一个目标上方对其进行探测，并将感知信息卸载到基站。当处于通信时隙时，UAV 前往下一个感知目标并作为基站的通信中继为附近用户提供通信服务。此外，为了降低 UAV 平均功耗，文献[13]对 UAV 的轨迹、速度、波束成形、发射功率和悬停时间进行了联合优化。Hu 等设计了 UAV 辅助的双基站感知低空覆盖网络架构，其中基站为通信用户提供下行无线服务，UAV 接收来自基站的 ISAC 信号回波并用于雷达感知^[14]。HUANG 等提出将移动计算技术融入低空覆盖网络架构中^[15]。在该方案中，UAV 将感知到的多个目标数据卸载到基站，并通过基站的服务器进行模型训练。该研究制定了一个联合优化框架，旨在通过联合优化感知任务分配、时隙调度、通信与感知功率分配以及 UAV 飞行轨迹，最小化系统开销。

2.2 UAV 集群之间协作

当前，低空覆盖网络中的集群无人机技术正引发新一轮技术热潮。集群 UAV 可以根据任务需求进行智能 UAV 分工和协作，确保多个区域 ISAC 任务高效完成。此外，UAV 集群还可以通过 ISAC 信号融合多个观测角度的感知信息，从而获取更加准确的感知参数估计，这极大提升了低空覆盖网络性能。目前业界已有较多该方面的研究，我们将阐述具有代表性的研究成果。

ABDISSA 等提出了低空覆盖网络的分组方案，其中通

表1 现有低空覆盖网络技术分类

	基站与 UAV 之间的协作调度	UAV 集群之间的协作调度	基站与 UAV 集群之间的协作调度
现有研究方案	基于 UAV 的通感帧结构设计 ^[12-13] 、基于 UAV 的通感波形设计 ^[14] 、UAV 与基站的分布式协作任务卸载 ^[15]	UAV 集群协作通感波形设计 ^[16] 、UAV 集群分布式协作设计 ^[17] 、UAV 集群路径跟踪及轨迹优化 ^[18]	UAV 集群与基站的分布式任务卸载设计 ^[19] 、UAV 集群与基站协作的轨迹优化设计 ^[20] 、UAV 集群与基站协同感知波形设计 ^[21]
面临挑战	基于 UAV 的通感资源分配、基于 UAV 的通感波形设计、基站与 UAV 之间任务的高效分配	UAV 集群之间的通感资源分配、UAV 集群之间的路径协作设计、UAV 集群轨迹优化	UAV 集群与基站的协作波形设计、UAV 集群与基站的协作调度

UAV: 无人机

信用户和感知目标划分为不重叠的组，每个 UAV 只负责服务其对应组内的用户和目标^[16]。CHEN 等提出了集群 UAV 构成的低空覆盖网络^[17]。其中，每架 UAV 均产生一个感知波束和一个通信波束：感知波束指向地面，用于感知目标；通信波束指向中心 UAV，用于传输通信和感知数据。中心 UAV 对所有数据进行合并处理。此外，在动态复杂环境中 UAV 集群如何避免碰撞并保持稳定的编队状态也是重点研究方向。ISAC 技术为解决这一问题提供了新的思路。利用 ISAC 信号，UAV 可以在感知周围环境中是否存在障碍物的同时与编队内其他 UAV 进行信息交换，从而更高效地调整飞行策略，提高集群编队的稳定性并有效避免碰撞。WANG 等研究了低空覆盖网络中 UAV 集群中路径跟踪、障碍物感知以及飞行调度问题^[18]。其中，基于 ISAC 信号进行障碍物距离和速度估计，避免了雷达和通信信号的顺序传输，从而减少了通信开销。

2.3 基站与 UAV 集群协作调度

在低空覆盖网络中，UAV 集群需要处理大量的数据交互和计算任务，而 UAV 本身的计算能力有限，因此通常需要将数据卸载到基站进行分析和处理。这一过程虽然能有效减轻 UAV 的负担，但也带来了一系列挑战。WANG 等提出了一种 UAV 集群与基站协同的低空覆盖网络服务方案^[19]。其中，每个 UAV 为一组用户提供通信服务，集群整体作为分布式雷达执行感知任务，各个 UAV 将获取的感知信息上传至基站统一处理^[19]。此外，针对该方案，WANG 等设计了一种能够产生正交波束的新型天线阵列，并提出了相应的波束赋形算法^[19]。ZHANG 等考虑了一个多 UAV 协同检测的场景，每架 UAV 感知多个目标，并通过通信功能将检测数据上传到基站^[20]。为了优化集群中 UAV 的轨迹规划和功率控制，ZHANG 等提出了一种改进的多智能体深度强化学习算法，为集群中每个 UAV 在连续的观察-动作空间中寻找了轨迹最优决策^[20]。TTROPKINA 等提出了一种新颖的低空覆盖网络 UAV 集群碰撞避免方案，其中地面基站组成分布式发射机发送 ISAC 信号，每个 UAV 装备 ISAC 信号接收机，进而根据感知回波识别附近 UAV 和障碍物^[21]。

总之，低空覆盖网络在通信、感知与协作等方面展现出巨大的发展潜力，但要充分发挥这些潜力，仍需在多个技术领域进行深入探索与创新。图2梳理了基于 UAV 的低空覆盖网络的研究方向与挑战，并展示了利用现有的数学工具和方法加以解决的思路。

3 未来挑战和发展前景

低空覆盖网络不仅能够有效弥补地面网络的局限性，提升系统的灵活性、覆盖能力和精确感知能力，还能为未来 6G 网络和智能化应用提供更加高效和可靠的技术支持。然而，这一方案的实施仍然面临一些技术和安全挑战，亟需进一步的技术创新和多领域协同研发，从而实现低空覆盖网络的全面部署和应用。

3.1 通信能效与低空续航

低空飞行器的续航能力是制约其广泛应用的关键因素，尤其是在执行长时间、高负载任务时，续航问题往往成为主要瓶颈。以 UAV 和无人飞艇为例，在高负载任务下，UAV 需要处理复杂的通信和感知任务，这对能源效率提出了更高的要求。在这种情况下，优化 UAV 的气动功耗、飞行速度、飞行轨迹以及能量消耗变得至关重要。此外，为了确保 UAV 能够在执行长时间任务时保持稳定运行，设计节能高效的通信感知算法至关重要。同时，根据任务需求和环境变化，UAV 需要动态调整通信与感知任务，实现高效的低空覆盖网络。

3.2 实时感知与通控决策

低空飞行器在飞行过程中通常经历位置变化，传感器采集的数据可能会受到飞行速度、方向变化以及飞行

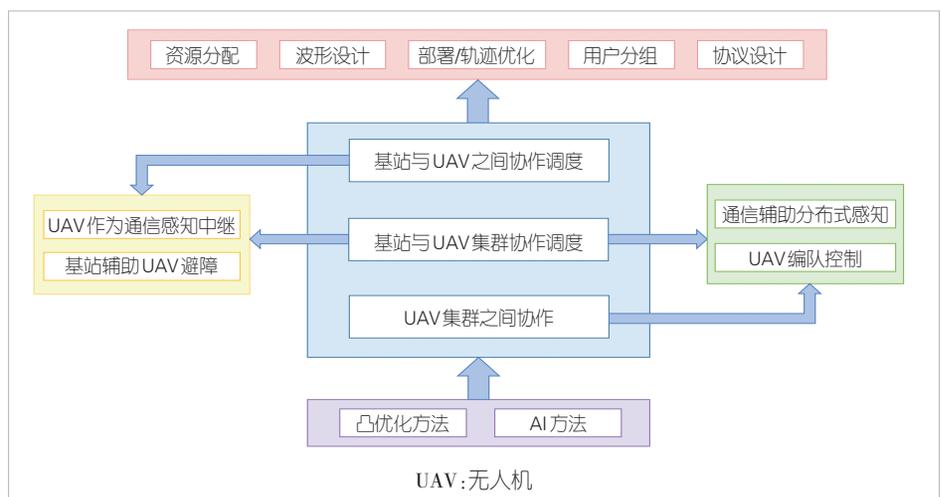


图2 低空覆盖网络面临挑战与解决方案

环境等因素的干扰,从而影响感知精度。例如,快速的移动可能导致传感器无法在短时间内准确捕捉到目标物体的静态信息,进而使得目标的实时定位和跟踪出现误差。此外,低空飞行器在不同高度和角度的飞行姿态下,传感器与目标之间的相对关系会发生变化,这可能导致传感器对目标的识别和距离测量精度受到影响。为解决这一问题并确保高精度感知,必须设计合理的资源调度方案,优化通信与感知任务的分配,以提升飞行过程中的目标感知精度。此外,为实现对目标的精确跟踪,高效的智能算法设计以动态调整低空飞行器的飞行策略也必不可少。

3.3 资源协同与优化配置

对于 UAV 集群协同的低空覆盖网络,如何有效对 UAV 集群进行任务调度和资源管理,以保证 UAV 之间的协作效率和网络的稳定性,仍是需要重点解决的问题。在复杂的灾区或应急场景中,UAV 集群需要协同工作,实时共享数据,并基于任务需求进行合理分工。因此,如何高效实现 UAV 集群内部之间的信息交换、任务分配以及向地面基站的数据卸载,将对低空覆盖网络的整体性能产生重要影响。

3.4 数据融合与处理能力

在低空覆盖网络中,低空飞行器需要实时收集大量的感知数据和通信数据,并进行高效的数据融合与处理。如何在飞行器上实现高效的计算和数据处理,确保感知结果和通信内容的实时性与准确性,是一个重要的技术挑战。尤其是当飞行器上部署的传感器种类繁多(如激光雷达和摄像头)且产生海量数据的情况下,如何设计高效的算法实现多源传感器数据的融合、处理和分析,同时降低计算资源的消耗,是提升系统性能的关键。

3.5 低空安全与隐私保护

安全性和隐私保护问题也是低空覆盖网络中不可忽视的挑战。低空飞行器作为空中平台进行大范围感知和通信服务时,可能会收集大量敏感信息,因此如何保护这些数据不被泄露或滥用,防止恶意攻击和干扰,是需要重点考虑的问题。尤其是在敏感应用中,如自动驾驶、无人监控、军事等场景,如何确保数据传输的加密性和隐私保护,将直接影响 ISAC 系统的广泛应用。

4 结束语

低空覆盖网络已经成为 6G 网络的重要组成部分,并

在未来通信体系中发挥着越来越关键的作用。通过 ISAC 技术赋能的低空覆盖网络能够显著提升通信覆盖范围、感知能力和系统效率。特别是在面对动态负载和多样化服务需求时,低空飞行器能够灵活地调整飞行路径和工作模式,提供实时、精准的服务,从而发挥出低空覆盖网络在多种应用场景中的巨大潜力。尽管低空覆盖网络在资源管理、UAV 集群协作、能效优化以及安全隐私等方面仍面临一系列技术挑战,但这些挑战也为技术的进一步发展提供了动力,并为低空覆盖网络的成熟奠定了坚实的基础。随着 ISAC 技术的加持和未来 AI 技术的引入,低空覆盖网络将逐步克服这些技术瓶颈,变得更加智能和高效,在智能城市、自动化系统、智能交通和应急响应等领域发挥越来越重要的作用,为社会带来更加创新和高效的解决方案。

参考文献

- [1] MENG K T, WU Q Q, XU J, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication: opportunities and challenges [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(2): 97-104. DOI: 10.1109/MWC.131.2200442
- [2] HE Z Y, XU W, YANG Z H, et al. Unlocking potentials of near-field propagation: ELAA-empowered integrated sensing and communication [J]. IEEE communications magazine, 2024, 62(9): 82-89. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300635
- [3] XU W, YANG Z H, NG D W K, et al. Edge learning for B5G networks with distributed signal processing: semantic communication, edge computing, and wireless sensing [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2023, 17(1): 9-39. DOI: 10.1109/jstsp.2023.3239189
- [4] MA L. On the application of UAV in emergency rescue [J]. China plant engineering, 2024(19): 44-46
- [5] ZHAO L, LUO X, ZHENG J, et al. Application of UAVs in emergency communication [J]. Scientific consultation: technology and management, 2024, (9): 118-121
- [6] LYU Z H, ZHU G X, XU J. Joint maneuver and beamforming design for UAV-enabled integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(4): 2424-2440. DOI: 10.1109/TWC.2022.3211533
- [7] WEI Z Q, LIU F, NG D W K, et al. Safeguarding UAV networks through integrated sensing, jamming, and communications [C]// Proceedings of ICASSP 2022-2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2022: 8737-8741. DOI: 10.1109/icassp43922.2022.9746707
- [8] 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. DOI: 10.1109/lwc.2022.3161338
- [9] MENG K T, WU Q Q, MA S D, et al. Throughput maximization for UAV-enabled integrated periodic sensing and communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(1): 671-687. DOI: 10.1109/twc.2022.3197623
- [10] XU Y, ZHANG T K, LIU Y W, et al. UAV-enabled integrated

sensing, computing, and communication: a fundamental trade-off [J]. IEEE wireless communications letters, 2023, 12(5): 843-847. DOI: 10.1109/lwc.2023.3245728

[11] ZENG Y, WU Q Q, ZHANG R. Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12): 2327-2375. DOI: 10.1109/jproc.2019.2952892

[12] LIU Y M, LIU S, LIU X, et al. Sensing fairness-based energy efficiency optimization for UAV enabled integrated sensing and communication [J]. IEEE wireless communications letters, 2023, 12(10): 1702-1706. DOI: 10.1109/lwc.2023.3288529

[13] KHALILI A, REZAEI A, XU D F, et al. Efficient UAV hovering, resource allocation, and trajectory design for ISAC with limited backhaul capacity [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(11): 17635-17650. DOI: 10.1109/TWC.2024.3455370

[14] HU S Y, YUAN X, NI W, et al. Trajectory planning of cellular-connected UAV for communication-assisted radar sensing [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(9): 6385 - 6396. DOI: 10.1109/tcomm.2022.3195868

[15] HUANG N, DOU C L, WU Y, et al. Unmanned-aerial-vehicle-aided integrated sensing and computation with mobile-edge computing [J]. IEEE Internet of Things journal, 2023, 10(19): 16830 - 16844. DOI: 10.1109/jiot.2023.3270332

[16] ABDISSA BAYESSA G, CHAI R, LIANG C 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

[17] 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. DOI: 10.1109/tvt.2020.3042466

[18] WANG C H, WEI Z Q, JIANG W J, et al. Cooperative sensing enhanced UAV path-following and obstacle avoidance with variable formation [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(6): 7501-7516. DOI: 10.1109/tvt.2023.3348665

[19] WANG X Y, FEI Z S, ZHANG J A, et al. Constrained utility maximization in dual-functional radar-communication multi-UAV networks [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(4): 2660-2672. DOI: 10.1109/tcomm.2020.3044616

[20] ZHANG T, ZHU K, ZHENG S Q, et al. Trajectory design and power control for joint radar and communication enabled multi-UAV cooperative detection systems [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(1): 158-172. DOI: 10.1109/tcomm.2022.3224751

[21] TROPKINA I, SUN B, MOLTCHANOV D, et al. Distributed

communication and sensing system co-design for improved UAV network resilience [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(1): 924 - 939. DOI: 10.1109/tvt.2022.3206863

作者简介



胡文豪，东南大学在读博士研究生；主要研究方向为 MIMO 技术、面向 6G 的通感一体化技术等；申请专利 1 项。



何振耀，东南大学在读博士研究生；主要研究方向为 MIMO 技术、面向 6G 的通感一体化技术等；已发表论文 8 篇，申请专利 3 篇。



徐甜甜，东南大学在读硕士研究生；主要研究方向为 MIMO 技术、面向 6G 的通感一体化技术等。



许威，东南大学教授、IEEE Fellow；主要研究方向为协作与智能 MIMO 通信、通信-计算-感知融合理论方法、信息理论等；拥有中国发明专利 30 余项、美国发明专利 5 项，已发表论文 100 余篇。