无人机使能的通信感知一体化组网与技术研究综述

胡杨林[①] 张天魁*[①] 李 博[②] 杨鼎成[③]

[①](北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

[②](哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院 威海 264209)

[③](南昌大学信息工程学院 南昌 330031)

摘 要：无人机(UAV)凭借灵活部署和高移动性，在通信感知一体化(ISAC)技术的推动下，展现出广阔的应用前景。该文系统地综述了无人机使能的ISAC组网与关键技术的研究进展。首先，概述了ISAC技术的原理与特点。其次，针对感知辅助通信任务的应用场景，探讨了ISAC设备在无人机与地面基站中部署的不同组网结构及其优势；针对通感融合任务的应用场景，分析了无人机在定位、边缘计算与缓存等面向通感融合任务中的组网模式及关键作用。此外，从感知使能技术和资源分配技术两个维度，总结了无人机使能的ISAC关键技术发展现状。最后，针对无人机面临的能量受限、复杂传播环境、地理环境和网络安全性等挑战，探讨了无人机与无线携能、可重构智能表面、地理信息辅助及隐蔽通信等技术的融合进展，为未来智慧城市、地理测绘、应急救援等新兴低空经济场景提供技术路径与研究方向。

关键词：通感一体化；无人机组网；无线资源分配

中图分类号：TN92 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2025)04-0859-17

DOI: 10.11999/JEIT241116

1 前言

低空经济以低空网络为依托，以无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)及其相关产业为核心，构建了涵盖智慧城市、快递物流、地理测绘、农林植保、应急救援等领域的综合经济体系，深度融入传统行业的生产运行环节[1]。无人机作为小型飞行设备，其本身具有的多功能、高移动、易部署和低成本等优势，逐步成为通信网络的新型基础设施与终端[2]。通过将无人机部署于网络的各个部分，承担基站中继等功能或作为接入终端，可以应对网络热点覆盖、网络边缘性能增强、地面基础设施损毁等场景下对通信服务的需求[3]，进而赋能“无人机+农业”、“无人机+交通”、“无人机+医疗”、“无人机+物流”等低空经济场景下的新兴商业模式，加速传统产业智能化信息化转型。

上述多种低空经济场景不仅向低空网络提出了高可靠低延迟的通信需求，还往往伴随着例如交通监测、灾情监控、实时情报收集等快速可靠的感知需求，凭借其高机动和灵活的快速部署能力、高空视角、广域覆盖的高效信息采集能力，尤其在网络边缘通信能力不足或地面基础设施损毁等应急场景中，无人机成为承担数据采集、目标定位等感知任务的首要选择。然而通信与感知两种任务的异构性与高相关性需求对无人机及低空网络的泛用性要求进一步提高。在传统的系统架构中，通信和感知任务往往通过独立的设备和网络完成，这种方式存在资源利用率低、部署成本高等问题，对能量有限的无人机平台而言，难以应对复杂且动态的环境与工作时长的双重挑战。为了实现“泛在连接、全域感知、智能计算”的低空网络建设目标[1]，迫切需要一种能够在同一平台上高效整合通信与感知功能的系统架构，以便快速获取信息并实时通信[4]。因此，无人机使能的通信感知一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)技术受到学术界和工业界的广泛关注。

通感一体化技术目前作为移动通信领域的热点研究领域之一，旨在将通信和感知(如信息感知、目标定位等)功能集成到同一系统中，通过共享硬件资源和频谱资源，实现对通信和感知功能的协同设计，以提高系统的整体性能和资源利用效率[5]。通过进一步将AI融入通感一体化技术，降低其对精确的数学模型的依赖，缓解了其高复杂度的弊端[6]。在无人机系统中引入通感一体化技术，可以充分发挥无人机的机动性和广覆盖能力，优化无人机频谱资源利用，不仅为无人机在多样化和动态变化的环境中实现高效任务执行奠定了基础，还为无人机在资源受限、环境复杂的场景下执行任务提供了更强的适应性和实时性[7]。

收稿日期：2024-12-19；改回日期：2025-03-29；网络出版：2025-04-07

*通信作者： 张天魁 zhangtiankui@bupt.edu.cn

基金项目：国家自然科学基金(62371068)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (62371068)

无人机使能的通感一体化应用中，无人机既能够作为空中通信节点、移动感知平台或协作中继，为地面和空中提供可靠的通信链路，还能通过高精度的实时感知支持以低空经济为主的场景下的高效决策。例如，“无人机+应急救援”场景下，无人机可以迅速部署于灾区，利用通信和感知功能有效探测受灾情况并提供可靠的通信支持；在“无人机+环境监测”场景下，无人机能以网联或自组网的形式在电力巡检、油田巡检和工业生产线巡检等应用中执行持续的设施、安保、环境等监测任务[8]。

本文将综述无人机使能的通感一体化的组网与技术的研究进展与应用潜力。首先，将介绍通信感知一体化技术。然后，聚焦无人机使能的通感一体化组网方案，探究无人机在网络中执行不同节点功能的网络结构和组网优势，通过不同的组网模式分析无人机在通感融合网络架构中的位置，发掘差异化特定场景中的潜在应用价值。进一步，梳理以感知使能技术与资源分配技术为代表的无人机使能的通感一体化关键技术研究进展与创新应用，并分析了能量收集、隐蔽通信、可重构智能表面辅助等潜在方向如何进一步提升无人机通感一体化网络的可靠性与多场景应用下的适应性。

2 通感一体化感知技术

通感一体化技术被认为是未来6G(sixth-Generation mobile communication, 第六代移动通信)网络的关键技术之一，传统的波形感知与通信一体化技术通过将射频雷达感知与通信功能整合到同一系统中，实现了硬件和频谱的共享，从而提高了系统的效率，成本低，易于集成，可以获取目标的宏观信息，如距离、速度和方位等。与此不同，多模态感知与通信一体化(multi-modal sensing-communication integration)则通过结合不同类型的传感器，如光探测和测距(light detection and ranging, LiDAR)、红绿蓝(red-green-blue, RGB)摄像头、全球定位系统(global positioning system, GPS)等，能够在不同频段和物理原理下收集多维度的数据，如物体的精确3维位置、形状、纹理等，从而实现更全面的环境感知[9]。

2.1 波形感知与通信一体化

通感一体化波形感知旨在将通信和感知(如雷达探测、物体定位)功能集成到同一系统中。传统上，通信和雷达系统分别使用各自独立的波形，但通感一体化技术可以使用同一波形同时满足通信和感知的设计目标和约束条件，整合了异构的通信与感知系统。一般性的通感一体化接收信号可以表示为：$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{HWX}+\boldsymbol{N}$。其中：$\boldsymbol{Y}$为接收信号矩阵；$\boldsymbol{H}$为信道矩阵，描述了传输信道的特性；$\boldsymbol{W}$为联合波束形成(预编码)矩阵，用于空间信号的定向传输；$\boldsymbol{X}$为发射信号矩阵，包含了待传输的信息和感知所需的波形；$\boldsymbol{N}$为系统噪声矩阵，表示环境噪声和干扰。通过设计发射波形$\boldsymbol{X}$和预编码矩阵$\boldsymbol{W}$，可以在同一信号中兼顾通信和感知的性能需求[5]。通信系统的核心任务是将消息从源端可靠地传输到目标端，这一过程受制于香农定理所定义的理论极限。

为了评估通信性能，我们通常从有效性和可靠性两个角度出发。有效性关注资源的高效利用，指标包括频谱效率、能量效率和信息速率等，反映了系统在带宽和能量方面的利用效率。可靠性则衡量系统在各种条件下准确传输信息的能力，常用的指标有中断概率、误码率、误符号率等，这些指标直接影响用户体验和通信质量。而感知系统的性能方面，指标体系根据功能可分为检测、估计和识别3大类。(1)检测指标：旨在噪声和干扰背景下判断目标的存在与否，其性能通过检测概率、虚警概率和漏警概率来衡量。这些指标反映了系统在复杂环境中准确发现目标的能力。(2)估计指标：关注从噪声或干扰中提取并精确估计目标的参数信息，如位置、速度等。评估估计性能时，通常采用均方误差(Mean Squared Error, MSE)和克拉美罗下界(Cramér-Rao bound, CRB)等统计指标，这些指标提供了估计精度的量化标准。(3)识别指标：涉及对自然现象和人类活动的理解和分类，评价系统对目标属性或类别正确辨识的能力。识别精度是衡量这类性能的关键指标，直接影响系统在高级感知任务中的有效性[5]。综合来看，一个高性能的通信与感知一体化系统需要在通信的有效性和可靠性与感知的检测、估计和识别性能之间取得平衡。这要求在通感一体化系统设计中充分考虑各种性能指标的权衡，通过协同优化来满足多重功能需求，从而实现资源的高效利用和系统整体性能的提升。

在通感一体化网络中，波形设计是实现高效通信与精确感知的基础。波形设计主要分为：(1)面向感知功能的波形设计，(2)面向通信功能的波形设计，(3)通信感知统一的波形设计，如表1所示。

面向感知功能的波形设计和面向通信功能的波形设计两种方法旨在将通信/感知功能整合到现有的感知/通信波形或感知/通信设备中，以最小化新增功能对原有功能性能的影响。目前，以正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)为基础波形的占据研究主流，对于传统低频段如Sub-6G(6 GHz以下)，通信和感知均采用OFDM波形；对于毫米波，通信继续沿用OFDM波形，而感知采用雷达波形。

然而随着通感一体化进程的不断加速，继续对传统的通信技术与雷达技术进行单方面演进，面临着很大挑战，尤其在充分利用有限的频谱资源使得传统信号同时具有通信与感知的双重功能方面。因此，通信感知统一的波形设计成为更优选择，这种设计不仅能够在底层提高通信与感知功能的融合程度，还能通过合理的联合设计波形与资源的分配方案，更进一步提高通信系统的性能，促进感知能力的提升，实现系统整体通信与感知性能的双重提升。

已有研究中，通感一体化波形设计进一步将波形联合多维资源(时域、频域和空域)分配与优化，可以充分提高资源利用率和系统性能。主流技术从两大角度出发，分别是面向正交资源分配的ISAC设计以及统一的ISAC设计。

面向正交资源分配的ISAC波形设计主要包括时分ISAC 波形设计、频分 ISAC 波形设计以及空分ISAC波形设计等。

图1(a)所示的时分ISAC波形设计的主要思想是将单位ISAC传输周期分为独立的时间块，并在不同的时间块内分别实现感知与通信功能，在时分ISAC系统设计中，可以在固定时隙分配通信感知任务，也可以根据需要灵活设计通感任务的时间。图1(b)所示的频分ISAC波形设计旨在根据不同的感知和通信服务需求及信道条件等因素，将频谱资源分配为不同子载波分别实现感知与通信功能。图1(c)表示的空分ISAC波形设计思路是分别给感知和通信服务分配正交的空间波束资源，利用多天线与波束成型技术，空分ISAC设备可以为不同用户提供独立的通感服务[22]。而统一的 ISAC资源分配

表 1　通感一体化网络中的波形设计分类

面向感知功能的波形设计	面向通信功能的波形设计	通信感知统一的波形设计			统一的ISAC设计
		面向正交资源分配的ISAC设计			
		时分ISAC波形设计	频分ISAC波形设计	空分ISAC波形设计	
文献[10]	文献[11]	文献[12–15]	文献[16]	文献[17]	文献[12, 18–21]

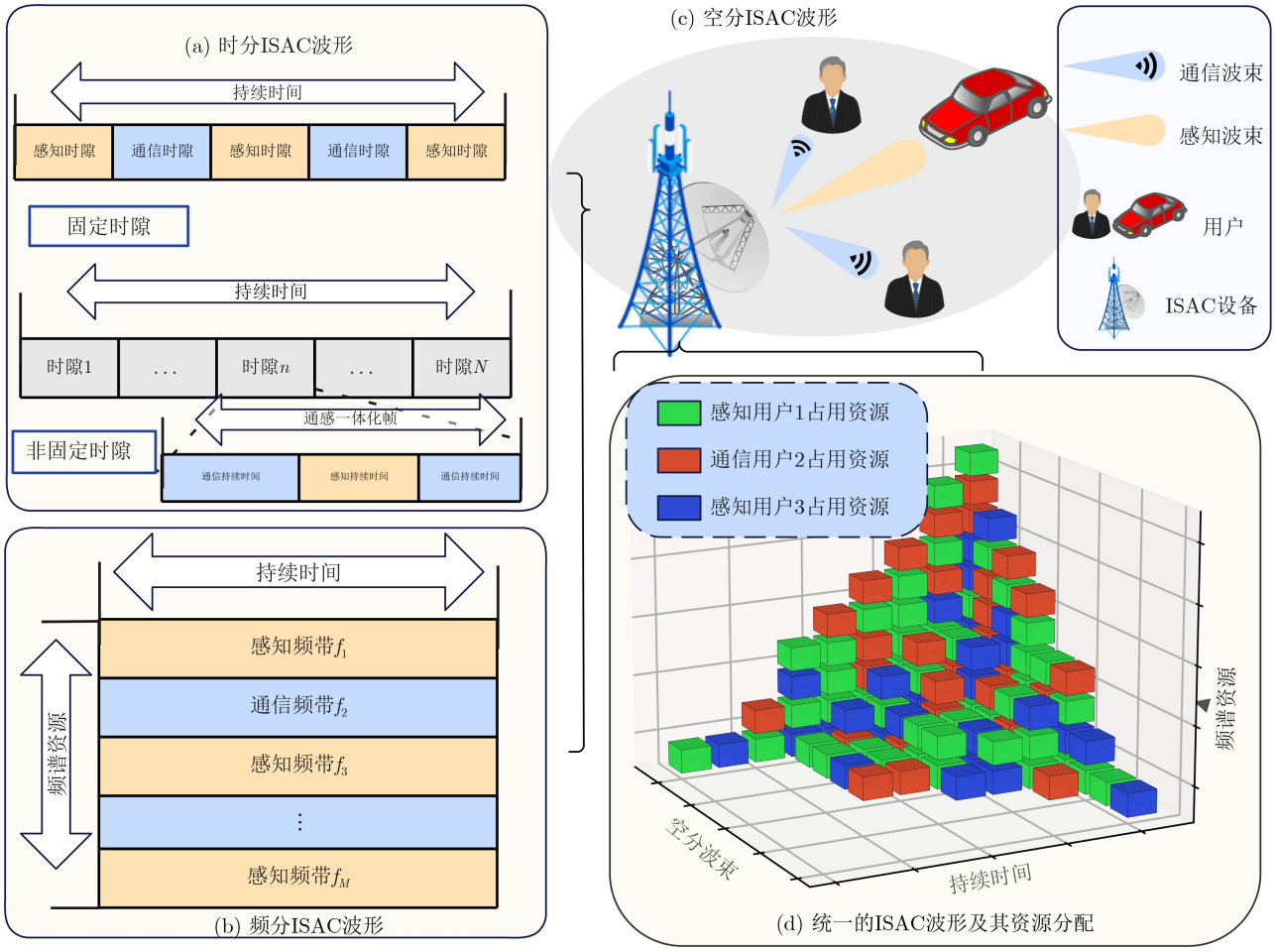

图 1 通感一体化波形资源分配场景

设计统一使用合适的波形，利用同一资源池完成通信与感知任务，如图1(d)展示的场景中，通感一体化无人机完成用户1、用户2与用户3的任务。还可以考虑将非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)等非正交复用技术用于通感一体化场景[18]，更进一步增大了资源利用效率，提高了系统性能。

2.2 多模感知与通信一体化

多模感知与通信一体化通过深度整合不同类型的传感器和通信技术，提升了环境感知和通信系统的整体性能，处理环境重建、信息采集和场景识别等融合任务时相比于波形感知具有一定优势。与波形感知与通信一体化将“集成”限制在统一硬件或波形中的做法不同，多模感知通信一体化旨在通过多种传感技术的互补，综合利用不同传感器的数据以提供更全面、更精确的环境感知能力，实现在通信和传感系统中的功能协作和性能增强。

如图2的场景所示，多模感知与通信一体化包含的多种传感器的工作原理各异，能够收集不同属性的环境数据。常见的传感器包括雷达、LiDAR、红绿蓝深度(Red-Green-Blue Depth, RGB-D)摄像头和GPS。其中，雷达是传统通感一体化系统中常用的射频频段传感器，它主要用于目标检测和参数测量，而非射频的传感器(如LiDAR和RGB-D摄像头)则能够提供更为丰富的环境数据，例如3维物体的位置、形状和纹理等信息。与射频雷达的单一目标检测功能不同，非射频传感器能够实现更多与通信相关的功能，这使得多模感知系统在后5G(beyond 5G, B5G)/6G时代的通信和传感系统中具有广阔的应用前景。

多模感知与通信一体化通过对来自不同传感器的数据进行集成实现对环境的强化感知，感知结果又可以辅助网络进行通信。例如，LiDAR辅助波束选择可以加速波束预测过程，传统方法需要通过对所有候选波束对进行详尽的搜索，而LiDAR, RGB摄像头和GPS的辅助可以减少计算量，提高效率速度以及系统在复杂环境中的适应能力和响应速度[23]。

多模感知与通感一体技术中的融合技术尤为关键。对图像数据、雷达数据和通信数据等多种信息源的高效整合，能够对复杂场景进行更全面的分析和理解。例如，结合图像数据的高分辨率与雷达数据的抗干扰能力，可以有效克服单一数据源在特定环境中的局限性，提高目标识别的准确性和对动态环境的响应能力[24]。然而，多模感知数据融合的挑战在于如何高效地处理和融合来自不同传感器的数据，以保证系统的实时性和准确性。随着深度学习技术的进步，基于机器学习的多模态融合算法已经成为解决这一问题的重要途径[25]。总之，通感一体化技术不仅可以使用传统射频传感器进行雷达探测，还可以扩展到包括激光雷达、摄像头在内的众多非射频传感器，扩展为多模态感知与通信一体化，成为通感一体化技术发展的重要研究方向。

2.3 通感一体化标准化工作

通感融合(ISAC)作为5G-Advanced与6G的重要技术方向，已经引起国内外标准化组织的广泛关注。国内国际移动通信标准组织 IMT-2020(International Mobile Telecommunications-2020，IMT-2020)通感组聚焦于5G-Advanced阶段，通过《5G-Advanced通感融合空口技术方案研究报告》等研

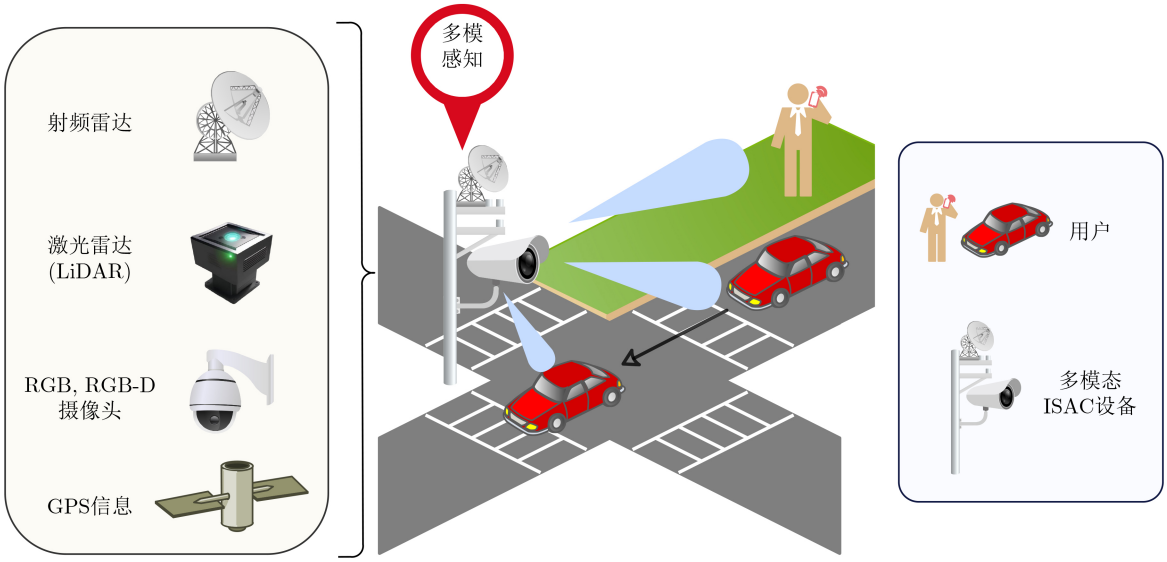

图 2 多模感知与通信一体化场景

究，对适用于通感场景的感知模式进行了深入分析，梳理了无线接入网的协议架构，并提出了包括波束成形与干扰管理在内的物理层关键技术解决方案[26]。同时，《5G-Advanced通感融合网络架构研究报告》(第二版)通过增强用户设备(user equipment, UE)感知和非3GPP (3rd Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划)感知相关的功能和流程设计，使通感融合网络的功能更加完善[27]。国际移动通信标准组织 IMT-2030(International Mobile Telecommunications-2030)通感组面向6G阶段的通感技术，通过《通感一体网络架构设计及关键技术研究报告》和《6G通信感知一体化空口关键技术研究报告》等系统性地阐述了6G下通感一体化网络架构的设计原则与关键技术。在国际层面，国际电信联盟无线通信部门(ITU-R, International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector)在《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》中将ISAC列为IMT-2030的核心应用场景之一，提出通过多模态感知与通信共存实现数据深度融合[28]。3GPP自2022年起正式立项研究ISAC, TSG RAN1组深入探讨了ISAC的信道建模问题，基于TR 38.901 Release 16等标准，提出了目标检测、环境监测和运动跟踪等应用场景，并在随后一系列会议中，对物理层支持ISAC的必要性以及反射体和多径特性进行了技术分析。这些努力为未来通感一体化的落地提供了技术基础和标准保障[29,30]。

随着通感一体化标准化进程的加速，许多组织对无人机使能的通感一体化应用愿景进行了展望，进一步推动技术在低空经济中的广泛应用。例如，IMT-2020(5G)推进组在《5G无人机应用白皮书》中对无人机感知与通信融合的应用进行了详细探讨，展现了无人机在未来智能感知与高效通信支持下的广泛潜力[2]。此外，中国电信在《通感一体低空网络白皮书》中系统性地阐述了通感一体化技术在低空经济中的8大核心应用场景，这些场景包括无人机赋能的快递物流、地理测绘、城市管理、应急救援、能源巡检、交通巡检、农林植保以及载人无人机等[1]。通过通感一体化技术的引入，无人机不仅能够实现更高效的任务执行，还能进一步增强低空经济在智能化、自动化和精确化方面的能力，为产业发展带来革命性突破。

3　无人机使能的通感一体化组网方案

无人机通信网络可看成一个飞行的无线网络，其中无人机作为网络节点可以接收或者发送信息，也可以作为中继节点提供中继服务。图3给出了无人机通信网络示意图。无人机通信的网络形式可以是没有基础设施支持的自组织网络，也可以是由地面通信或者卫星通信的基础设施支持的无人机辅助通信网络。无人机通信网络的拓扑结构多种多样，可以是星状、网状、直线状的，因具体的应用场景而异。

无人机通信网络具有以下特点。

(1)节点3维运动：无人机作为一种高速运动的智能化工具，具有3维高速运动的特征，能够轻易的穿越障碍物，在诸如城市环境地震救援，以及高海拔地区的大范围监视情况中，可以高效完成许多人类以及传统工具无法完成的任务，组建常规通信网络无法形成的网络形式。

(2)LoS电波传播：飞机在高空飞行，导致无人

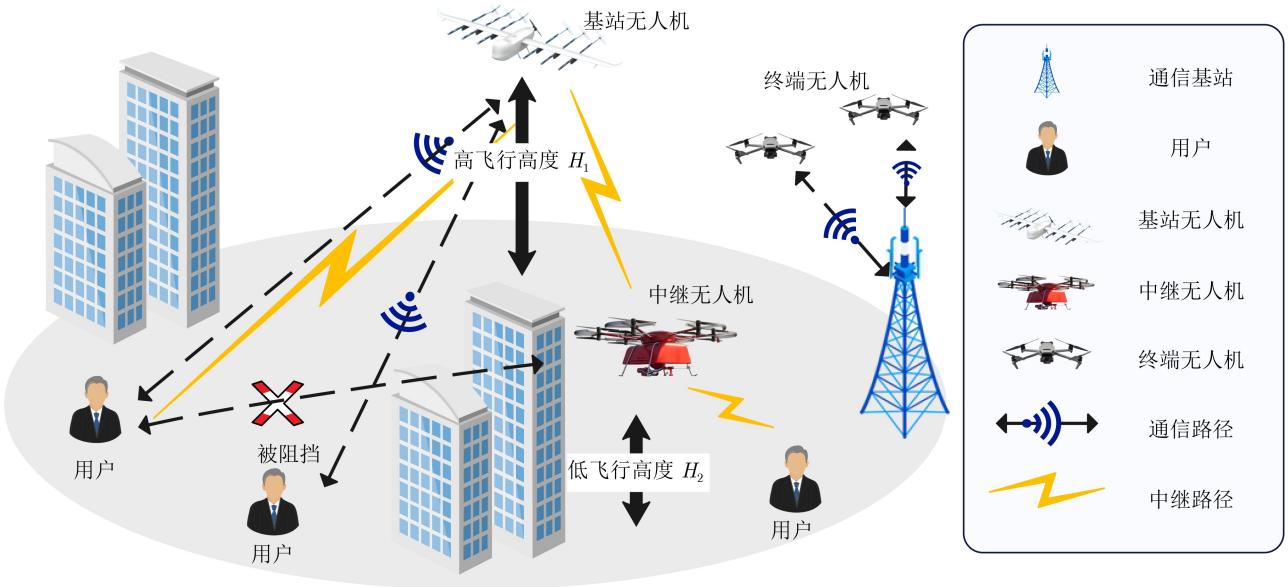

图 3 无人机通信网络示意图

机距地面入户基站之间的通信信道十分独特。通常认为无人机与地面用户基站之间的通信信道主要由视距信道(Line-of-Sight, LoS)组成，其空间散射物较少，阴影效应及多径衰落造成的影响很小，信道质量更好，链路可靠性更高。但另一方面其更容易造成强烈的空地干扰，限制无人机服务通信网络的容量，因此需要更加注意干扰控制。

(3)周围环境陌生：由于无人机的活动范围广、机动性强，通常需要在一些不熟悉甚至恶劣的环境中执行任务，因此无人机对陌生环境中自身周围的通信链路特性，频谱资源以及空地通信信道(Air to Ground, AG)，无人机机间信道的信道特征获取成为无人机通信组网的挑战之一。

(4)信息处理与能量供给能力有限：相比于地面通信设施，无人机受到载荷能力和机动能力的限制，所携带的电池容量有限，飞行过程中能量补给较为困难，因此无人机在处理密度信息时常会受到所携硬件与能量供给的限制，这是与传统通信网络相比，无人机通信网络设计和优化最需要考虑的限制因素。

(5)易受气候与干扰影响：相对于固定基站，有线节点或手机等移动终端，远离地面的高机动无人机更易受到气候以及各种干扰的影响。因此无人机对恶劣气候、恶意干扰节点等的准确估计与避让，可以很大程度提高无人机通信组网的效果。

传统的通感一体化设备通常采用固定部署，机动性弱，环境适应性差，无法获得广覆盖范围与快速的感知通信部署能力。与此相比，无人机凭借其高度的机动性和灵活性，能够在复杂和多变的环境中快速部署并执行任务，使得无人机能够迅速响应突发事件或需求变化，实现更广范围的感知和通信覆盖，而传统的固定基站或感知设备则往往受限于固定位置，难以满足这种高效的部署需求。无人机感知的优势还表现在其对地广范围，低成本的感知能力。无人机整合多种传感器，涵盖雷达、光学、红外等实时数据，以在空中实时采集环境信息，结合地面传感器数据，提供更加精准和全面的感知结果[31]。无人机使能的通感一体化网络，通过联合波形设计和资源分配，能够在同一信号中同时满足通信和感知的需求，这不仅优化了频谱的利用效率，降低了能耗，还能够显著提升系统的整体性能。经过合理的轨迹规划，充分利用无人机灵活调整能力和实时决策能力，使得其在动态场景中的优势尤为突出[32]。因此，无人机使能的通感一体化网络为未来空地一体化的发展奠定了坚实基础，具体的无人机使能的通感一体化组网模式中，不同组网方案的区别主要在于无人机在其中扮演的角色与发挥的功能不同。无人机通常在通感一体化组网方案中，主要面向两类任务，分别为感知辅助通信任务和通信感知融合任务。本文针对上述两类任务进行了总结分析。

3.1 面向感知辅助通信任务的无人机通感一体化网络

在面向感知辅助通信任务的无人机通感一体化组网场景中，无人机主要依靠其移动性为无线通信网络提供扩展，作为空中基站为更大范围的用户提供通信服务，同时，借助通感一体化能力，无人机使能的通信网络可以在较少的频谱资源开销下，通过对环境的感知能力进行辅助，为自身或其他设备提供更高质量的通信服务。此外，无人机也可以作为通信终端接入地面基站完成通信任务，借助灵活机动和LoS传播的特性满足各类业务服务质量要求，其主要组网场景可以分类为通感无人机辅助通信网络与通感地面基站辅助通信网络两类。面向感知辅助通信任务的无人机通感一体化组网如表2所示。

3.1.1 通感无人机辅助通信网络

无人机利用自身所配置的通感一体化设备所感知的环境信息提升自身或者地面设备的通信性能，提高通信网络的服务质量与资源利用率。

(1)无人机感知用户位置辅助自身轨迹规划：无人机基站凭借其高度机动性和灵活部署能力，能

表 2 面向感知辅助通信任务的无人机通感一体化组网分类

无人机功能	一体化波形方案	网络部署特点	主要优化目标	参考文献
通信基站	时分波形	允许感知和通信在时间上交替进行	最大化用户通信速率	[12]
通信终端	蜂窝信号	使用蜂窝基站信号测距无人机	预测并补偿时钟同步偏差	[13]
通信基站	时分波形	允许无人机在通信过程中根据实际需求灵活配置感知时间	最大化平均系统吞吐量	[19]
通信基站	统一的波形设计	利用无人机高移动性特点提高基站服务的安全性	最大化基站实时保密率与合法用户通信速率	[20]
通信基站	时分波形设计	结合天地空地综合网络与卫星信息辅助	最大化系统能量效率	[21]
频谱感知	频分波形	使用认知无线电的压缩感知技术	最大化占用子信道检测概率	[33]
信道估计	/	深度融合无人机飞行仿真与实际场景	最小化信道路径损耗误差	[34]
通信终端	蜂窝信号	无人机记录无线下行信号反射并反馈基站	最小化系统能耗	[35]

够进入传统地面基站无法触及或信号弱的区域，为偏远山区、海洋、灾区和大型临时活动场所提供迅速灵活广泛的覆盖，但由于无人机通信功率受限，信号遮挡和多径效应会显著影响其通信质量，因此利用LOS径进行信号传输对于高能量效率通信至关重要。通过通感一体化技术，可以充分利用目标位置的信息，联合设计与优化无人机的位置与轨迹，灵活配置通感时隙，相比传统无人机基站，可以提高平均吞吐量同时保证通信服务质量要求[19]。不仅如此，无人机基站由于具有移动灵活的特性，在面对非法窃听者时，通过ISAC技术联合考虑窃听者与合法通信用户的位置，得出合适的轨迹设计，尽可能远离入侵者并靠近通信用户，可以获得更优的安全通信性能，减少信息泄露，由于通感一体化设备定位的及时性，无人机安全轨迹的实时性也可以得到保障[20]。

(2)无人机感知用户位置辅助波束对准与追踪：在无人机端搭载的通感一体化多天线系统，可以通过波束成形技术实现对信号的精确定向，利用对卡尔曼滤波等方法对用户位置进行感知与预测。在通信功率受限的场景下，可以将绝大部分信号能量对准目标用户，能够显著提升目标方向的波束方向图增益，从而提高通信效率和链路质量[12]。不仅如此，进一步考虑目标移动问题，通过预测与感知信息，实时跟踪目标位置，联合目标位置与飞行轨迹进行优化，从而提供高质量的连续通信覆盖，相比于利用卫星信号进行定位与跟踪，无人机利用ISAC技术跟踪不要求被测目标拥有卫星定位设备，且避免了长距离传输导致的高路径损耗，大幅降低无人机通信与跟踪目标所需的能耗[21]。

(3)无人机频谱感知和信道估计：无人机可以通过感知通信资源，优化网络性能，提高通信效率，主要体现在辅助信道估计与频谱感知两个方面。频谱资源是无线通信的关键要素，无人机利用其灵活的移动性，执行频谱感知任务，检测周围环境中的可用频谱，辅助实现对通信网络的动态频谱接入，避免信号干扰，提高频谱利用率。例如，在认知无线电网络中，无人机可以实时监测频谱占用情况，识别空闲频段，为通信网络提供额外的频谱资源[33]。无人机还可以通过在不同位置采集信道状态信息(Channel State Information, CSI)，为通信系统提供精确的信道模型，这对于波束成形、功率控制和资源分配等通信策略的优化具有重要意义，由于无人机能够在3维空间中移动，在复杂环境下可以收集更全面的信道信息，例如搭载有图像感知设备的无人机系统可以将采集的图像信息与无线信道信息创新整合，通过基于感知数据仿真平台AirSim和无线信道仿真软件Wireless InSite构建的数据集进行训练，建立物理空间的感知图像信息与电磁空间的路径损耗信息之间的映射关系，实现无人机对地通信场景下更准确的信道估计[34]。

3.1.2 通感地面基站辅助通信网络

在地面基站配置通感一体化设备的通信网络中，无人机作为用户设备可以通过灵活机动的部署，通过与地面基站、卫星或其他空中节点通信实现数据传输、控制指令接收及任务协同，在低空经济赋能的智慧物流、环境监测、农业巡检和应急救援等场景中完成通信任务发挥重要作用。针对主流无人机搭载的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)在时延和安全性方面的不足，地面基站端利用ISAC技术，通过复用通信信号为无人机提供蜂窝导航服务。这种方式利用可以物理广播信道(Physical Broadcast Channel, PBCH)的同步信息进行基于信号到达时间(Time of Arrival, TOA)的精确测距，不仅避免了额外设备的引入，降低了系统成本，还显著提升了无人机导航信息的准确性，构建了感知辅助的高效无人机通信网络[13]。

利用蜂窝网络连接的无人机终端与基站还可以进行协作，例如无人机通过记录无线下行的通信网络OFDM信号的反射反馈给基站，由基站推算目标位置，并基于距离多普勒算法(Range-Doppler Algorithm, RDA)进行目标成像，通过合理的轨迹规划实现了一定分辨率下的基站辅助目标感知和成像，突破了传统基站系统融合ISAC技术的局限性，并且对无人机与ISAC技术在复杂环境下的应用提供了新的思路[35]。

3.2 面向通感融合任务的无人机使能通感一体化

在面向通感融合任务时，为应对低空经济场景中交通监测、灾情监控和实时情报收集等对通信和感知的双重需求，无人机作为灵活部署、移动性强、可扩展性高的移动智能平台，在网络中的角色变得更加多样化，不仅在网络中承担通信任务，还同时承担通信、感知、计算和缓存的融合任务，进一步优化网络部署和性能表现，推动低空经济场景下的智能化和信息化转型。其主要的组网场景包括：通感无人机实现定位、通感无人机进行缓存与计算、通感地面基站辅助无人机应用。面向通感融合任务的无人机使能通感一体化组网分类如表3所示。

3.2.1 通感无人机实现定位

感知物体的物理位置是无人机面向通感融合任务的最重要应用场景，如图4所示。无人机的高空

飞行特性有助于增强感知效果，其较高的飞行高度可提供出色的视距信道条件，感知信号不易被地面障碍物(如建筑物和山脉)阻挡或散射，从而提高了感知质量，在更大的覆盖范围下确保了高精度和稳定的感知性能。不同天气环境对无人机的感知信号覆盖影响较大，恶劣天气场景约束下的覆盖方案性能有较大差异，选用优良方案可以最大化降低气候影响，对于多无人机感知多个目标的场景下达到更优覆盖效果[39]。在频谱利用方面，由于无人机可以使用经过设计的统一波形同时进行通信与感知任务，极大地节省了对频谱资源的占用，提高了频谱利用效率[16]。

从通感一体化信号的收发路径的角度划分，无人机使能的通感一体化网络可以通过多种模式实现对目标物体的定位和跟踪。

(1)无人机自发自收感知信号定位：无人机自发自收感知信号是目前无人机使能的通感一体化网络的主流感知方案，其场景为无人机在提供视距通信支持服务的同时，对感知目标进行速度位置等信息的估计服务，如何同时保证高效的通信与感知服务，或在两者之间权衡以获得更好的服务质量，是此场景下研究重点。

对于由单个无人机提供通感一体化服务的场景下，通过交替优化等优化算法对于其感知与通信的持续时间进行灵活配置，并加以优化通信和传感的成型波束以及无人机轨迹，满足特定的目标感知的

表 3 面向通感融合任务的无人机使能通感一体化组网分类

无人机功能	一体化波形方案	网络部署特点	主要优化目标	参考文献
定位/边缘缓存节点	频分波形	定位信号自发自收/多播技术和多天线结合完成内容交付与感知	最大化雷达接收功率与通信速率组合的效用函数	[7]
定位	无蜂窝通信信号	定位信号自发它收/基于无蜂窝网络架构实现ISAC	最小化感知目标位置的克拉美罗下界	[11]
定位	时分波形	定位信号自发它收/使用毫米波进行协作感知	最小化响应时间延迟	[14]
数据采集/边缘缓存节点	时分波形	考虑无人机传感与通信之间的相互干扰	最大化雷达估计速率	[15]
定位	频分波形	定位信号它发自收自发自收/考虑多无人机与多用户关联问题	最大化无人机间最小加权频谱效率	[16]
定位	时分波形	定位信号自发自收/多无人机重叠分配相同任务	最小化整体感知任务完成时间	[17]
定位	时分波形	定位信号自发自收/感知持续时间根据应用需求灵活配置	最大化平均系统吞吐量	[19]
定位	蜂窝信号	定位信号它发自收/无人机和基站形成双基地合成孔径雷达进行感知	最小化系统能耗	[35]
目标监测	统一的波形设计	考虑无人机感知信息对于控制中心的滞后性	最小化系统的平均峰值AoI	[36]
边缘计算节点	时分波形	无人机携能供给用户	最大化无人机能量效率和任务处理速率	[37]
终端应用	时分/空分波形	多基站协同组网模式辅助无人机终端应用	/	[38]

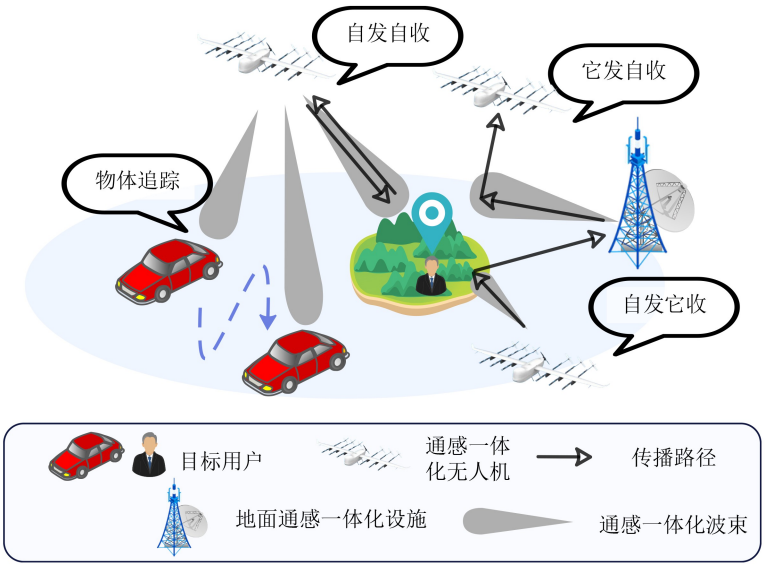

图 4 通感无人机定位场景

波束模式增益门限[19]。还可以调整优化UAV在空中的感知位置和通信位置以及UAV和目标的匹配关系，降低系统的平均峰值信息年龄(Age of Information, AoI)，改善基站从无人机终端感知目标信息的实时性[36]。

在多无人机对不同用户提供通感一体化服务的复杂场景下，用户关联问题，即多无人机如何分配所服务的具体用户，也将大幅影响通感一体化系统的服务质量，通过深度学习等方法对用户关联、轨迹和功率进行联合求解，可以对用户进行有效划分与关联，从而提升系统整体效率[16]。在动态性高、信道条件差的环境下，为了完成通感一体化任务，多无人机可以通过重叠任务分配来优化任务分配和传输功率，经过优化，多无人机重叠传输任务得到的信噪比增益可以超过任务重复所带来的损失，最终减少整个系统的任务完成时间[17]。这些算法能够在不需要精确环境信息的情况下实现多无人机场景下的资源分配和轨迹规划的优化，显著提升系统的通信和感知性能。

(2)无人机发送感知信号辅助定位：在无人机发送感知信号辅助定位的模式中，无人机作为空中信号源，主动发送感知信号，其他设备接收并利用该信号完成自身的定位任务。这种模式利用了无人机的高机动性和灵活部署能力，通过优化无人机的飞行轨迹，以及发射信号的功率与波形，旨在同时提供更高精度和广覆盖的定位效果与高质量通信服务，特别是在具有复杂地形或信号遮挡的环境中。

在发送感知信号时，通过联合设计无人机的发射功率、飞行轨迹等，可以限制无人机的感知信号的干扰在可控范围内，在不影响无人机提供的通信服务质量的同时，赋予地面终端高精度的定位能力[11]。通过进一步的灵活的时间频率资源配置，终端可以在提供通信服务的同时，在适当时间发送感知信号，在高需求的数据传输场景中辅助定位，提供支持[14]。

(3)无人机接收辅助感知信号定位：在无人机接收辅助感知信号定位的模式下，无人机通过接收来自地面基站(Base Station, BS)或其他传感节点的辅助感知信号，实现对目标的定位。这一模式的特点是基站发送下行信号，信号在目标物体上反射后被无人机接收，无人机随后将回波信号传回基站进行目标的检测与成像分析。经典结构例如双基地合成孔径雷达(Bistatic Synthetic Aperture Radar, BiSAR)系统结构利用了无人机的机动性与视距条件，使其能够在更广泛的环境中执行高效的定位任务[35]。为了优化这种模式的效果，无人机可以进行飞行路径与传输功率联合优化，以在满足感知和通信要求的同时，最小化飞行与通信能耗。无人机可以在特定时间内执行感知任务，而在其他时间段专注于通信计算等任务，以完成通感融合网络的任务要求。

3.2.2 通感无人机实现缓存与计算

在移动边缘计算架构中，无人机由于其灵活性高、机动性强、成本低、可靠性高、操作简单等优点被广泛应用于数据采集、边缘缓存与边缘计算等方面，即使是在地理位置复杂的区域，无人机也可以实现高效快速的部署，较好地解决边缘网络中的应急需要。在图5所示的通感融合任务中，无人机辅助移动边缘计算部分的典型场景如下：在辅助的物联网(Internet of things, IoT)或多设备通信场景中，无人机通过不断飞行，寻找并感知地面设备或子节点，在此基础上建立与终端的通信链路来采集实时数据[15]。无人机在服务IoT节点时，通过雷达信号感知和通信信号传输的结合，设计优化多维飞行轨迹和功率波束等资源，在低功耗条件下不间断采集节点的状态数据，确保节点在恶劣环境下的信息传输[15]。

无人机在移动边缘计算网络可以进行边缘缓存-转发，其在飞行过程中感知节点，采集数据并缓存用户请求的内容，通过优化预编码矩阵与飞行轨迹，实现低延时的数据传输。同时，借助多播技术(Multicasting)，无人机能够同时向多个用户交付缓存内容，提高了缓存资源的利用效率，并结合波束成形技术优化了传输性能[7]。

同时用户终端也可以将任务部署于无人机使其成为边缘计算节点，无人机的高机动性和空中部署优势，是作为边缘计算节点的理想平台，特别适用于远程和恶劣环境中任务密集的场景。通过优化任务卸载，已有资源与飞行轨迹，无人机可以提供灵活而便捷的边缘计算服务，并可以搭载能量回收或供能设备，成为更高能效的边缘计算任务处理节点[37]。

3.2.3 通感地面基站辅助无人机应用

在图6所示的通感地面基站辅助无人机应用场景中，无人机作为终端用户，在执行特定任务如餐饮外卖、生鲜快递、医疗冷链和应急配送等场景时，基站对无人机可靠指挥控制和通信能力至关重要，由于此类应用对时延有严格要求，需要即时上报飞行状态，还要求基站能够支持低空连续大面积覆盖，保证通信链路稳定可靠，并同时保障边缘速率，这是利用卫星导航进行定位的传统无人机与基站系统无法满足的。因此将辅助无人机的基站集成

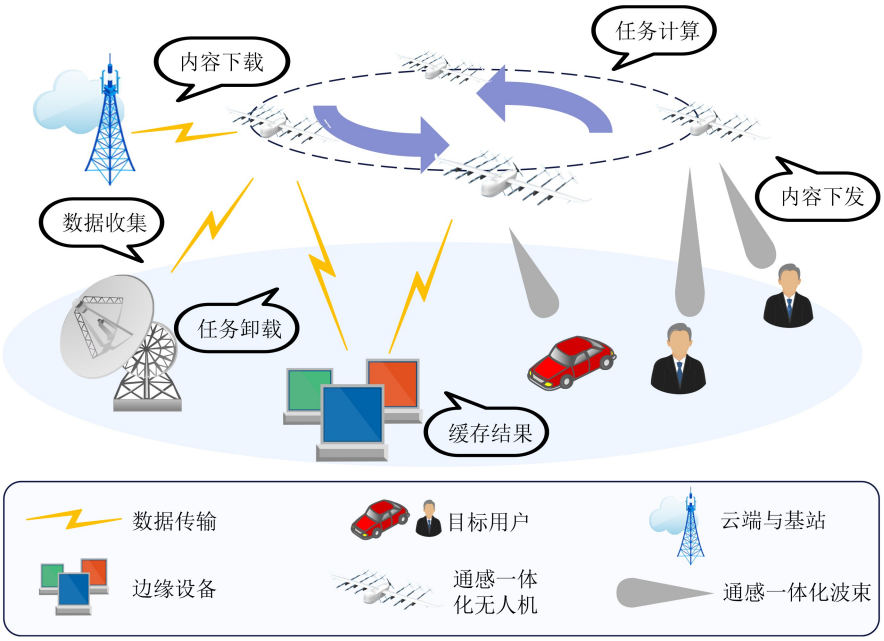

图 5 通感无人机缓存计算场景

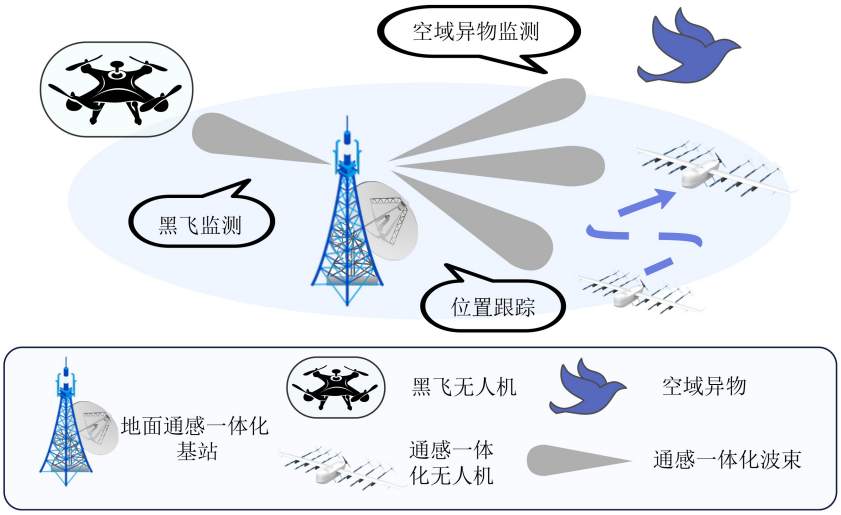

图 6 通感地面基站辅助无人机应用场景

通感一体化系统成为满足这些需求的重要选择与关键技术[38]。

通过通感基站对无人机进行辅助，可以在满足对无人机通信需求的同时，感知无人机位置、高度、航向、速度等信息，并预测其航迹，实时发出控制指令规划无人机航迹。由于无人机组网局限性，例如当无人机相机受到光线影响或卫星雷达受到降雨等天气影响时，无人机自身无法获取准确定位，进而无法按预定轨迹精确飞行，需要外部基站辅助感知，调整飞行路线，进行飞行轨迹跟踪，从而确保无人机起降的安全性和运营效率。不仅如此，通感一体化基站还能够为无人机终端提供航线保护，检测并识别无人机身份，监测非法入侵和乱飞行为，同时满足对特定区域全覆盖感知的需求，灵活设置感知范围和时间，确保探测距离、高度、顶空盲区、测距精度和虚警概率等要求，并能区分飞鸟等目标，以实现对无人机立体航道监管的航迹跟踪、态势感知和电子围栏边界设置[38]。

然而，面对高度复杂且动态的空中环境，在高精度定位和长距离监测任务中，单一基站的感知精度和覆盖范围有限，往往难以满足无人机监测的实时性与准确性需求。为此，基于网络化移动通信系统的多基站协同感知技术应运而生，借助已有广域覆盖的地面蜂窝网网络基站，通过多个基站协同工作，大幅提升对无人机等“低慢小”类空中飞行器的感知精度，扩展感知范围，实现高精度、长距离和长时间连续感知，满足无人机飞行所需的实时监控能力[40]。多基站协同感知技术可采用信号级(Sig-

nal-level)、符号级(Symbol-level)等感知信息融合方法处理多基站信息，融合方式灵活多样。信号级融合注重相干信号带来的信噪比增益，符号级融合则从多个基站的回波信号中提取解调符号并进行相位特征融合，从而实现协同感知，提高了无人机位置和速度估计的精度的同时，还降低了同步要求[41]。通过低成本复用广泛部署的网络化移动通信系统，基于ISAC技术的单/多通感基站将成为无人机定位与监测的重要技术手段，推动无人机向低空经济等更广泛的应用场景拓展。

4　无人机使能的通感一体化关键技术研究

无人机使能的通感一体化网络结合了感知、通信与计算等多种技术，能够实时感知环境并进行数据处理，为执行复杂任务提供支持。随着应用场景的不断拓展，为了适应多变的环境并提升系统性能，以感知使能技术和资源分配技术为代表的关键技术在无人机使能的通感一体化网络中得到了一定程度的应用。

4.1　感知使能技术

在无人机使能的通感一体化网络中，感知技术是确保无人机高效获取并处理环境信息的基础。随着应用场景的扩展，传统感知方式已难以满足复杂任务的需求，大规模MIMO、协作感知、近场通信及多模态感知等新技术的应用能显著增强无人机在动态环境中的感知精度与覆盖范围，从而支持任务的成功执行。

4.1.1　大规模MIMO

在无人机使能的通感一体化网络中，大规模输入输出(Massive Multiple Input Multiple Output, Massive MIMO)技术与无人机的结合极大地提升了系统的通信性能和数据处理能力。大规模MIMO通过在基站与无人机上部署多天线阵列，能够在同一频段上同时为多个用户提供高质量的服务，或实现多个高信噪比连接，从而显著提高频谱效率和抗干扰能力。此外， MIMO的分布式部署方式，即虚拟多天线技术，则利用多个无人机的天线系统形成虚拟天线阵列，实现信号的空间复用和优化传输。这一技术的优势在于，不仅提升了网络的覆盖范围，还能够通过波束成形技术实现精准的信号传输，降低信号干扰，进一步形成虚拟多天线系统，可以使不同无人机分配相同传输任务，通过网络优化，所获的信号强度增益将超过重复分配任务的损失，从而提高整个系统的效率[17]。

4.1.2　协作感知

协作感知技术在无人机使能的通感一体化网络中发挥着至关重要的作用。通过多架无人机的协同工作，系统能够共享各自的传感器数据，从而提高环境感知的精度和覆盖范围。协作感知技术能够克服单一无人机在复杂环境下的感知盲区，借助信息融合算法，将不同无人机获取的信息进行综合处理，实现对目标的更准确定位和识别。同时，协作感知也可以有效减少通信延迟，提高系统的实时性和响应能力，在缺少集中控制节点的情况下，各无人机节点利用分布式的协作感知算法还可以利用局部测量和邻居交换的信息，进行有效的数据融合[42]。当前的研究主要集中在优化无人机之间的信息传输策略，以及利用机器学习技术提升感知数据的处理效率，以应对动态环境中日益复杂的任务需求，这一技术的进步将为通感一体化网络在智能交通、灾害监测等领域的应用提供强有力的支持。

4.1.3　近场感知通信

在无人机使能的通感一体化网络中，随着天线规模的扩大和频率的不断提高，菲涅尔区逐渐扩展，这使得远场通信的假设变得不再适用全部场景。传统远场通信假设的弊端在于其忽略了近场效应对信号传播的影响，导致在实际应用中信号衰减和失真严重，而近场通信则通过球面波前进行建模，其信道模型与用户到达基站的角度和距离密切相关。近场条件下，通信不仅可以进行数据传输，还能够实时估计用户的角度和距离，从而实现通信与感知的有效融合。已有的研究方案将近场定位问题分解为角度和距离的估计，分别利用稀疏贝叶斯学习和空间谱优化技术进行处理，这为无人机在复杂环境中的定位和通信提供了新的解决思路[43]。

4.2　资源分配技术

无人机在执行任务时，由于体积和机动性的限制，飞行过程中能量补给困难，通信和计算能力有限且多处于陌生动态的电磁环境中，因此面临着多种资源限制，包括能量、时间和频谱等。因此，如何在有限资源的条件下，高效分配资源，以提高无人机的通感一体化能力，成为提升无人机通感一体化网络性能的关键。

4.2.1　离线资源分配技术

离线资源分配技术主要通过数学优化模型，根据已知的环境信息和任务需求进行资源配置。此类方法通常采用非凸/凸优化技术，通过对各种变量的分析，优化无人机的资源分配策略。在离线资源分配中，主要考虑的约束条件包括用户分布、信道状态、通信速率和感知目标等。此外，资源分配的自由度也体现在多个方面，例如针对通感一体化波形的设计、联合时间、空间与频率进行资源分配，

结合无人机ISAC设备的功率、飞行轨迹、感知角度等特点进行优化，可以最大化资源的利用效率[15]。为了处理大规模多无人机与多用户的接入问题，在处理节点与边连通性上具有优势的图论优化方法逐步被用于无人机的资源分配与路径规划，例如使用A*算法、Dijkstra算法处理资源分配与路由[44]，使用匹配理论处理无人机资源与用户的耦合关系[45]。

离线优化方法通常适用于已知的环境和任务需求，并能够在预定时间内获得约束下的最优解，适用于静态或半静态的任务场景。然而，离线方法的局限性在于，它无法及时应对动态环境中的变化，一旦任务需求或环境发生变化，需要重新计算优化方案，基于图论的方法还需要重新获取环境变化后的连通性信息，这对于实时性要求较高的系统来说可能无法满足需求。

4.2.2 在线资源分配技术

与离线资源分配技术不同，在线资源分配技术主要应对动态环境和实时任务的需求。无人机系统中，随着任务的进行，环境、任务需求以及无人机自身状态都在发生变化，这要求资源分配能够根据实时信息进行调整。因此，在线资源分配技术通常依赖于机器学习和多次迭代的启发式算法，尤其是在多无人机协作的场景下，能够更好地应对动态变化。

在线资源分配的实时性是其特点之一，体现在无人机通过与环境和其他无人机的实时交互，不断迭代优化其资源分配策略。例如，每一次获取新的环境信息后，使用连续凸近似(SCA)技术来解决非凸优化问题，通过迭代算法逐步逼近最优的飞行轨迹[20]。

在线资源分配技术的另一个显著特点是其适应性。在面向通感融合任务时，每个无人机可以根据环境变化、任务需求及能量状态，动态调整其资源使用策略。例如，在多无人机协作场景下，分布式多智能体强化学习算法可以将部分计算任务卸载到邻近的无人机或基站，从而减轻单个无人机的计算负担，延长其飞行时间并提升系统的整体性能。此外，集中式算法也能加快环境学习和模型收敛速度，使得系统能够在更短时间内适应未知环境[16]。

随着无人机规模的持续扩大，将多无人机网络建模为图，并利用图神经网络(Graph Neural Network, GNN)来提取和更新环境信息，进行资源分配，已成为未来研究的一个潜力方向。通过图神经网络对信息的聚合性与节点的可扩展性，在高动态、大规模、可变的环境下，这一方法有望实现更优的性能[46]。

5 无人机使能的通感一体化主要技术挑战与研究方向

尽管上述关键技术已经取得了初步进展，并在无人机使能的通感一体化网络中得到了应用，但仍然面临着许多技术瓶颈和未解决的问题。这些挑战主要集中在能源限制、复杂的传播环境以及网络安全等方面，将这些方向的前沿技术与无人机使能的通感一体化网络深度融合，才能进一步面向更复杂的场景提供高效可靠的应用。

5.1 面向能量受限的无线携能技术

在无人机使能的通感一体化网络中，无人机有限的能量是制约网络性能提升的关键瓶颈。传统旋翼无人机依赖锂电池供电，其续航时间通常限制在30分钟左右，难以满足长时间飞行任务的需求。尽管优化能量分配技术能提升性能，但其效果逐渐趋于饱和。因此，集成无线携能技术，使无人机能够在飞行过程中从环境中获取能量，已被认为是突破这一瓶颈的潜在解决方案。例如能量收集技术(Energy Harvesting, EH)通过将太阳能、风能或无线电频率等能量进行转移与收集，显著延长了无人机与移动终端的续航能力，实现自我供能，减少对地面能源的依赖，还能增强网络的可靠性，并在偏远地区或无电源接入的情况下，延长通感服务的提供时间。但是对于高机动性的无人机设备而言，动态环境下的随机能量和数据服务之间的相互作用给系统设计也带来了新的挑战与潜在的研究方向[37]。

5.2 面向复杂传播环境的RIS辅助网络设计

在无人机使能的通感一体化网络中，如第3节特点(3)所言，陌生的复杂传播环境对无人机的LOS径通信产生了巨大的不利影响，虽然通过利用通感信息对无人机位置进行规划可以一定程度上避开障碍物的遮挡，但是仍然无法完全避免阴影效应所导致的不利影响和长距离传输损耗，长距离传播的不可控性也极大地限制了发射波束形成增益，导致不可避免的性能损失。为了解决上述问题，在无人机通感一体化网络中部署面向复杂传播环境的可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)被认为是一种创新技术，通过智能操纵传播环境来提供额外的自由度，通过大量无源元件组成的平面阵列，精确调整发射信号的相移和幅度，从而协同实现可控且良好的传播环境。RIS辅助的单小区通感一体化场景已有了初步的研究进展[47]，但是如何将RIS与无人机的高机动性结合，进一步增强无人机使能的通感一体化网络性能，仍然是一个亟待研究的潜在方向。

5.3 面向复杂地理环境的地理信息辅助规划

在无人机使能的通感一体化网络中，地理环境的复杂性对系统设计提出了更高的挑战。一方面，无人机飞行区域涵盖了从开阔区到城市等复杂地形的广泛区域，另一方面，随着地理信息系统的不断完善，对于这些地形的精准掌握也逐渐成为可能。因此，基于地理信息的辅助设计逐渐成为潜在的研究方向。例如，利用3维环境地图不仅能够实现更加精确的信道估计，还可以为无人机的部署区域规划提供依据，从而优化无人机与用户之间的通信连接质量[48]。

随着无线通信系统环境感知能力的不断提升，通感一体化技术使得无人机系统能够精准“感知”其所处的环境。通过对环境信息的收集与整合，能够构建结合电磁与物理环境的无线电地图(Radio Map)，该地图囊括了特定区域内各位置的通信质量与特性，如接收信号强度、功率谱密度、信道增益等信息。无线电地图技术不仅增强了对环境大范围的感知能力，使其能够通过测量可用信道和频谱资源精确掌握周围环境，还为后续的网络优化与调度提供了有力支撑。如何将地图构建结果实时反馈至无线电地图，实时更新该地图，确保其信息的时效性与准确性，是利用地理信息辅助规划的关键研究方向之一[44]。

5.4 面向网络安全的隐蔽通信技术

在许多与国防有关的应用中，网络安全至关重要，无人机使能的通感一体化网络同样面临着此类安全需求，例如通感一体化基站位置等关键设施的敏感信息，在传输过程中应该得到重点保护。雷达辅助的低截获概率(Low Probability of Intercept, LPI)通信技术可以有效满足这一需求，截取概率被定义为保密通信的关键性能度量，传统上，LPI是通过频率/时间跳跃或扩频方法实现的，需要大量的时间和频率资源。然而，从通感一体化的角度来看，更有效的方法是将通信信号嵌入雷达回波中，以屏蔽数据传输的特征[10]。无人机ISAC设备所搭载的多天线系统在隐蔽通信领域的研究还处于起步阶段，特别在解决多用户的共存性与感知波束的广域方向性方面，仍存在挑战。无人机的可移动性与多天线波束的方向性给隐蔽通信实现带来机遇，但也对面向无人机使能的通感一体化网络进行有效的隐蔽通信设计提出了更大的挑战。

6 结论

综上所述，无人机使能的通感一体化网络通过融合通信与感知功能，为智慧城市、智能交通等低空经济场景等提供了更灵活的支持。借助ISAC技术，无人机不仅可以利用其感知能力辅助通信网络，进一步提升通信系统性能。在面向通感融合任务时，无人机能够在不同网络位置上实现环境感知、数据采集、边缘计算和缓存等功能，同时，通感地面基站可以辅助无人机执行更多复杂任务。尽管以感知使能技术与资源分配技术为代表的关键技术取得了很大进展，但无人机使能的通感一体化网络仍面临能量受限、多种干扰和复杂环境下的新挑战，随之而来的新兴技术与无人机通感一体化网络的结合成为研究的潜在方向。

参 考 文 献

[1] 中国电信集团有限公司, 爱立信, 诺基亚, 等. 通感一体低空网络白皮书[R]. 2024.
China Telecom, Ericsson, Nokia, *et al*. The low-altitude network by integrated sensing and communication[R]. 2024.

[2] IMT-2020(5G)推进组. 5G无人机应用白皮书[R]. 2018.
IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper on 5G drone applications[R]. 2018.

[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. doi: 10.11999/JEIT210789.
CHEN Xinying, SHENG Min, LI Bo, *et al*. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781–789. doi: 10.11999/JEIT210789.

[4] KIM J H, LEE M C, and LEE T S. Generalized UAV deployment for UAV-assisted cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(7): 7894–7910. doi: 10.1109/twc.2023.3345839.

[5] LIU An, HUANG Zhe, LI Min, *et al*. A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(2): 994–1034. doi: 10.1109/comst.2022.3149272.

[6] ZHANG Jifa, LU Weidang, XING Chengwen, *et al*. Intelligent integrated sensing and communication: A survey[J]. *Science China Information Sciences*, 2025, 68(3): 131301. doi: 10.1007/s11432-024-4205-8.

[7] BAYESSA G A, CHAI Rong, LIANG Chengchao, *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.

[8] 王莉, 魏青, 徐连明, 等. 面向通信-导航-感知一体化的应急无人机网络低能耗部署研究[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 1–20. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022138.
WANG Li, WEI Qing, XU Lianming, *et al*. Research on low-energy-consumption deployment of emergency UAV network for integrated communication-navigating-sensing[J].

Journal on Communications, 2022, 43(7): 1–20. doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022138.

[9] CHENG Xiang, ZHANG Haotian, ZHANG Jianan, *et al*. Intelligent multi-modal sensing-communication integration: Synesthesia of machines[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(1): 258–301. doi: 10.1109/comst.2023.3336917.

[10] CIUONZO D, DE MAIO A, FOGLIA G, *et al*. Intrapulse radar-embedded communications via multiobjective optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(4): 2960–2974. doi: 10.1109/taes.2015.140821.

[11] 崔世林, 薛婉雨, 李佳珉. 基于无蜂窝通感一体化系统的无人机轨迹优化[J]. 移动通信, 2024, 48(9): 166–172. doi: 10.3969/j.issn.1006-1010.20240909-0003.
CUI Shilin, XUE Wanyu, and LI Jiamin. UAV trajectory optimization for cellular-free integrated sensing and communication systems[J]. *Mobile Communications*, 2024, 48(9): 166–172. doi: 10.3969/j.issn.1006-1010.20240909-0003.

[12] MENG Kaitao, WU Qingqing, MA Shaodan, *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.

[13] YAO Zhiqiang, GUO Xiaona, CHEN Kang, *et al*. Ranging estimation and implementation with cellular signals for UAV navigation[C]. 98th IEEE Vehicular Technology Conference, Hong Kong, China, 2023: 1–5. doi: 10.1109/vtc2023-fall60731.2023.10333488.

[14] ZHANG Qixun, SUN Hongzhuo, GAO Xinye, *et al*. Time-division ISAC enabled connected automated vehicles cooperation algorithm design and performance evaluation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(7): 2206–2218. doi: 10.1109/jsac.2022.3155506.

[15] LIU Zechen, LIU Xin, LIU Yuemin, *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.

[16] QIN Yunhui, ZHANG Zhongshan, LI Xulong, *et al*. Deep reinforcement learning based resource allocation and trajectory planning in integrated sensing and communications UAV network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 8158–8169. doi: 10.1109/twc.2023.3260304.

[17] MENG Kaitao, HE Xiaofan, WU Qingqing, *et al*. Multi-UAV collaborative sensing and communication: Joint task allocation and power optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(6): 4232–4246. doi: 10.1109/twc.2022.3224143.

[18] CUI Zhichao, HU Jing, CHENG Jian, *et al*. Multi-domain NOMA for ISAC: Utilizing the DOF in the delay-Doppler domain[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(2): 726–730. doi: 10.1109/lcomm.2022.3228873.

[19] DENG Cailian, FANG Xuming, and WANG Xianbin. Beamforming design and trajectory optimization for UAV-empowered adaptable integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 8512–8526. doi: 10.1109/twc.2023.3264523.

[20] WU Jun, YUAN Weijie, and HANZO L. When UAVs meet ISAC: Real-time trajectory design for secure communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(12): 16766–16771. doi: 10.1109/tvt.2023.3290033.

[21] MAO Weihao, LU Yang, PAN Gaofeng, *et al*. UAV-assisted communications in SAGIN-ISAC: Mobile user tracking and robust beamforming[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025, 43(1): 186–200. doi: 10.1109/jsac.2024.3460065.

[22] 吴韵怡, 刘晨熙, 蔡昌俊, 等. 面向6G智能协作感知的无人机通信系统[J]. 移动通信, 2023, 47(9): 77–83. doi: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230909-0001.
WU Yunyi, LIU Chenxi, CAI Changjun, *et al*. Towards intelligent cooperative sensing in 6G UAV communication systems[J]. *Mobile Communications*, 2023, 47(9): 77–83. doi: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230909-0001.

[23] KLAUTAU A, GONZALEZ-PRELCIC N, and HEATH R W. LIDAR data for deep learning-based mmWave beam-selection[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(3): 909–912. doi: 10.1109/lwc.2019.2899571.

[24] YAO Peng and WEI Xin. Multi-UAV information fusion and cooperative trajectory optimization in target search[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 16(3): 4325–4333. doi: 10.1109/jsyst.2021.3117959.

[25] LU Bohao, WEI Zhiqing, WU Huici, *et al*. Deep-learning-based multinode ISAC 4D environmental reconstruction with uplink-downlink cooperation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(24): 39512–39526. doi: 10.1109/jiot.2024.3443648.

[26] IMT-2020(5G)推进组. 5G-Advanced通感融合空口技术方案研究报告[R]. 2024.
IMT-2020(5G) Promotion Group. Research report on 5G-advanced integrated sensing and communication air interface technology[R]. 2024.

[27] IMT-2020(5G)推进组. 5G-Advanced通感融合网络架构研究报告[R]. 2版. 2024.
IMT-2020(5G) Promotion Group. Research report on 5G-advanced integrated sensing and communication air interface technology[R]. 2nd ed. 2024.

[28] International Telecommunication Union. Recommendation

ITU-R M. 2160 Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2023.

[29] KAUSHIK A, SINGH R, DAYARATHNA S, *et al*. Towards integrated sensing and communications for 6G: A standardization perspective[J]. arXiv: 2308.01227, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2308.01227.

[30] ZHANG Yuxiang, ZHANG Jianhua, PEI Yuanpeng, *et al*. Latest progress for 3GPP ISAC channel modeling standardization[J]. *Science China Information Sciences*, 2024, 67(11): 217301. doi: 10.1007/s11432-024-4172-8.

[31] MORO S, MANZONI M, LINSALATA F, *et al*. ISAC technology in action: UAV-based SAR imaging potential[C]. 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece, 2024: 6550–6554. doi: 10.1109/igarss53475.2024.10642814.

[32] JING Xiaoye, LIU Fan, 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.

[33] XU Wenbo, WANG Shu, YAN Shu, *et al*. An efficient wideband spectrum sensing algorithm for unmanned aerial vehicle communication networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 1768–1780. doi: 10.1109/jiot.2018.2882532.

[34] 孙铭然, 黄子蔚, 白露, 等. 基于感知图像信息的无人机信道路径损耗预测[J]. 模式识别与人工智能, 2023, 36(11): 987–996. doi: 10.16451/j.cnki.issn1003-6059.202311002.

SUN Mingran, HUANG Ziwei, BAI Lu, *et al*. Sensing image data based unmanned aerial vehicle channel path loss prediction[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2023, 36(11): 987–996. doi: 10.16451/j.cnki.issn1003-6059.202311002.

[35] LIU Dingtao, GAO Yuan, HU Shuyan, *et al*. Trajectory design for integrated sensing and communication enabled by cellular-connected UAV[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(7): 1973–1977. doi: 10.1109/lwc.2024.3399268.

[36] 于宝泉, 杨炜伟, 王权, 等. 无人机辅助通感一体化系统中的信息年龄分析优化[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1996–2003. doi: 10.11999/JEIT231175.

YU Baoquan, YANG Weiwei, WANG Quan, *et al*. Age of information analysis and optimization in unmanned aerial vehicles-assisted integrated sensing and communication systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(5): 1996–2003. doi: 10.11999/JEIT231175.

[37] YANG Zheyuan, BI Suzhi, and ZHANG Y J A. Dynamic offloading and trajectory control for UAV-enabled mobile edge computing system with energy harvesting devices[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(12): 10515–10528. doi: 10.1109/twc.2022.3184953.

[38] 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 Chuanbin, LUO Hongliang, and GAO Feifei. Integrated sensing, communication, and computing for low-altitude UAV networks: A base station-centric approach[J]. *Mobile Communications*, 2024, 48(9): 57–63,70. doi: 10.3969/j.issn.1006-1010.20240511-0001.

[39] 柳学斌, 李翰山. 基于数据分析算法的多目标覆盖无人机网络布局方法研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(9): 1388–1392. doi: 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.09.013.

LIU Xuebin and LI Hanshan. Research on multi-target coverage UAV network layout method based on data analysis algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(9): 1388–1392. doi: 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.09.013.

[40] LU Xi, WEI Zhiqing, XU Ruizhong, *et al*. Integrated sensing and communication enabled multiple base stations cooperative UAV detection[C]. 2024 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Denver, USA, 2024: 1882–1887. doi: 10.1109/iccworkshops59551.2024.10615952.

[41] WEI Zhiqing, XU Ruizhong, FENG Zhiyong, *et al*. Symbol-level integrated sensing and communication enabled multiple base stations cooperative sensing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(1): 724–738. doi: 10.1109/tvt.2023.3304856.

[42] XIE Zhanyuan, WANG Ziyuan, ZHANG Zekai, *et al*. Distributed UAV swarm for device-free integrated sensing and communication relying on multi-agent reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(12): 19925–19930. doi: 10.1109/tvt.2024.3438854.

[43] ZHANG Yinan, WANG Guangxue, PENG Shirui, *et al*. Near-field beamforming algorithms for UAVs[J]. *Sensors*, 2023, 23(13): 6172. doi: 10.3390/s23136172.

[44] ZHU Botao, BEDEER E, NGUYEN H H, *et al*. UAV trajectory planning in wireless sensor networks for energy consumption minimization by deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 9540–9554. doi: 10.1109/tvt.2021.3102161.

[45] ZHANG Ruizhi, ZHANG Ying, TANG Rui, *et al*. A joint UAV trajectory, user association, and beamforming design strategy for multi-UAV-assisted ISAC systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(18): 29360–29374. doi: 10.1109/JIOT.2024.3430390.

[46] LUO Jihao, FEI Zesong, WANG Xinyi, *et al*. GNN-based resource allocation for digital twin-enhanced multi-UAV radar networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*,

2024, 13(11): 3137–3141. doi: 10.1109/lwc.2024.3456247.

[47] YANG Xiaoyu, WEI Zhiqing, LIU Yuanwei, *et al*. RIS-assisted cooperative multicell ISAC systems: A multi-user and multi-target case[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 8683–8699. doi: 10.1109/twc.2024.3353336.

[48] XIAO Meng, CUI Huanxi, ZHAO Zhongliang, *et al*. Joint 3D deployment and beamforming for RSMA-enabled UAV base station with geographic information[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(4): 2547–2559. doi: 10.1109/twc.2023.3299650.

胡杨林：男，博士生，研究方向为通感一体化技术、通感算一体化网络、无人机通信网络.

张天魁：男，教授，研究方向为移动算力网络、无人机通信网络、移动边缘协同计算、未来网络融合与管理、大规模天线与协作通信等.

李 博：男，教授，研究方向为无人机通信网络、通感一体化、卫星通信等.

杨鼎成：男，教授，研究方向为低空智联网、移动物联网、无线通信网络规划与优化等.

责任编辑：马秀强

A Survey on UAV-Enabled Integrated Sensing and Communication Networking and Technologies

HU Yanglin[①] ZHANG Tiankui[①] LI Bo[②] YANG Dingcheng[③]

[①](*School of Information and Communication Engineering*, *Beijing University of Posts and Telecommunications*, *Beijing* 100876, *China*)

[②](*School of Information Science and Engineering*, *Harbin Institute of Technology at Weihai*, *Weihai* 264209, *China*)

[③](*School of Information Engineering*, *Nanchang University*, *Nanchang* 330031, *China*)

Abstract:

Significance Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have attracted significant attention due to their flexibility, high mobility, and potential for widespread applications across various industries. The integration of UAVs with Integrated Sensing and Communication (ISAC) technology enables the combination of sensing and communication capabilities on a single platform, facilitating high-quality data collection, processing, and real-time communication, particularly in complex environments. This integration offers substantial benefits in both communication and environmental sensing, addressing key challenges in emerging fields, particularly in low-altitude economic scenarios such as smart cities, geomatics, and emergency rescue.

Progress This paper provides a systematic survey of UAV-enabled ISAC networks, offering a comprehensive discussion on their underlying principles and the integration of communication and sensing tasks. The first section introduces the foundational principles and characteristics of ISAC technology, including a review of waveform sensing-communication integration and multi-modal sensing-communication technologies. The paper also examines recent efforts toward standardizing ISAC technology and emphasizes the importance of sharing and co-scheduling hardware and spectrum resources to improve overall system efficiency. Subsequently, the paper explores two main network architectures for deploying ISAC devices on UAVs and ground stations. First, it investigates sensing-assisted communication tasks, where the deployment of ISAC devices within UAV communication networks ensures efficient resource allocation, improved coverage, and enhanced communication performance, particularly in challenging environments. Second, it discusses sensing-communication fusion tasks, where UAV-enabled ISAC networks integrate functions such as positioning, edge computing, and data caching. UAVs play a pivotal role in combining these functionalities to optimize overall system performance. Through UAV-enabled ISAC technology, the system's capacity to collect environmental data, perform real-time communication, and support intelligent decision-making in complex, dynamic conditions is significantly enhanced. Additionally, the paper surveys the current state of key UAV-enabled ISAC technologies, focusing on two main aspects: sensing-enabled techniques and resource allocation strategies. From the perspective of sensing-enabled technologies, advanced techniques such as massive MIMO, collaborative sensing, near-field

communication, and multi-modal sensing notably improve UAVs' sensing precision and coverage in dynamic environments, thereby facilitating the successful execution of various tasks. Furthermore, the paper examines resource allocation techniques, addressing the challenges of distributing energy, spectrum, and processing power within energy-constrained UAV systems. It also covers the integration of wireless energy harvesting, Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS), and advanced communication techniques, such as covert communication, which enable UAVs to operate more efficiently in challenging environments with limited energy resources.

Conclusions UAV-enabled ISAC technology is progressing rapidly and holds significant potential to transform the integration of communication and sensing tasks within UAV networks. By capitalizing on UAV mobility and versatility, ISAC networks facilitate the seamless integration of communication and environmental sensing on a single platform. This integration enhances UAV performance and adaptability in complex environments while improving resource utilization, ensuring the efficient operation of UAV networks in applications such as smart cities, geographic surveying, and emergency response.

Prospects Although significant progress has been made in developing UAV-enabled ISAC networks, several challenges persist. Energy limitations, complex transmission environments, and network security are critical issues that must be addressed for UAVs to operate effectively in dynamic and diverse environments. Future research will need to focus on overcoming these challenges by integrating emerging technologies such as wireless energy harvesting and RIS, which can enhance energy efficiency and network performance. Furthermore, geographic information-enabled technologies, such as radio maps, will increasingly play a crucial role in optimizing UAV deployment and navigation, particularly in complex environments. In addition, integrating covert communication techniques into UAV networks offers a promising avenue for improving the security and privacy of UAV-based communication systems, especially in sensitive applications such as defense and surveillance. The future of UAV-enabled ISAC networks will depend on addressing challenges related to energy constraints, environmental complexity, and security concerns, while enhancing the efficiency and effectiveness of communication and sensing tasks. As these technologies mature, UAVs will become even more integral to emerging low-altitude economies, fostering the development of smart cities, efficient disaster response systems, and intelligent traffic management.

Key words: Integrated Sensing and Communication (ISAC); UAV networking; Wireless resource allocation