

面向低空经济的通感一体化系统架构与关键技术综述

杨 杰¹, 刘 凡², 郑 乐³, 袁伟杰⁴, 李 潇², 金 石^{2*}

(1. 东南大学自动化学院, 江苏南京 210096; 2. 东南大学信息科学与工程学院, 江苏南京 211189;
3. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081; 4. 南方科技大学自动化与智能制造学院, 广东深圳 518055)

摘 要: 随着低空经济的快速发展, 典型低空应用对通信与感知能力的需求持续攀升, 推动了通感一体化网络的快速演进。尽管通感一体化已被确立为6G六大典型应用场景之一, 现有研究多聚焦于地面用户, 在低空连续覆盖、三维移动性管理、高精度感知等方面存在显著局限, 难以支撑无人机群规模化协作与精准控制, 亟须构建面向低空经济特征的ISAC系统性解决方案。此外, 现有综述多局限于空口设计、组网协议或安全机制等离散技术点的罗列, 缺乏从场景需求到体系架构、关键技术整体性逻辑框架。因此, 本文系统梳理了面向低空经济的通感一体化系统架构与关键技术进展。首先, 剖析城市管理、物流配送、应急救援等六大典型场景下, 对通信速率、时延、感知精度与范围的差异化性能指标需求。进而, 凝练出涵盖系统架构设计、低慢小目标感知、高动态连续通信覆盖和面向应用的计算资源分配与安全管理四大核心研究问题。针对上述问题, 本论文逐一展开综述: 从无人机辅助、卫星辅助及基于O-RAN的系统架构出发, 构建低空通感一体化的总体框架, 融合低空信道测量与建模揭示低空场景中的传播特性, 为系统设计提供模型支撑; 围绕目标检测、识别、定位、轨迹监视与成像等内容, 系统分析低空感知关键技术, 形成对空域目标与环境状态的实时获取能力; 在此基础上, 探讨感知驱动的移动性管理、通信覆盖增强以及计算资源分配问题, 通过轨迹规划、波束管理、多站切换、任务调度与通感算协同优化, 实现感知信息对通信决策与控制闭环的赋能; 针对隐蔽接入、恶意干扰及窃听等安全威胁, 研究感知驱动的安全管理机制, 并结合智能超表面、可移动天线阵列等新型空中载体, 提升系统的鲁棒性与演进能力。最后, 本文展望基于生成式人工智能的环境-信道知识库构建、面向大规模无人机群的深度闭环协同机理、低空复杂电磁环境下的特征提取与抗干扰鲁棒性增强等未来研究方向, 以为低空经济的高质量发展提供理论支撑与技术参考。

关键词: 低空经济; 通感一体化; 信道建模; 低空感知; 立体通信覆盖

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2024YFE0200103); 国家自然科学基金(No. U25A20392, No. 62301156, No. 62522107, No. 62331023); 江苏省自然科学基金(No. BK20230818)

中图分类号: TN929.5; TN95

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)06-2549-21

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20260286

A Survey of System Architectures and Key Technologies for Integrated Sensing and Communications in the Low-Altitude Economy

YANG Jie¹, LIU Fan², ZHENG Le³, YUAN Weijie⁴, LI Xiao², JIN Shi^{2*}

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

3. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

4. School of Automation and Intelligent Manufacturing, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: With the rapid proliferation of the low-altitude economy, typical low-altitude applications are imposing escalating demands on communication and sensing capabilities, thereby driving the evolution of integrated sensing and communication (ISAC) networks. Although ISAC has been recognized as one of the six flagship scenarios for 6G, existing research predominantly focuses on terrestrial users and exhibits significant limitations in achieving seamless low-altitude coverage, three-dimensional mobility management, and high-precision sensing. These shortcomings hinder the support for

large-scale drone swarm collaboration and precise control, necessitating the development of systematic ISAC solutions tailored to the unique characteristics of the low-altitude economy. Furthermore, existing surveys often confine themselves to discrete technical aspects—such as air interface design, networking protocols, or security mechanisms—and lack a holistic logical framework bridging application requirements, system architecture, and key technologies. To address this gap, this paper provides a comprehensive review of the state-of-the-art in ISAC system architectures and key technologies for the low-altitude economy. First, we analyze the differentiated performance requirements—specifically regarding communication rate, latency, sensing accuracy, and range—across six canonical scenarios, including urban management, logistics delivery, and emergency response. Building on this analysis, four core research challenges are identified: system architecture design, detection and tracking of small, slow, and low targets, continuous communication coverage under high-dynamic conditions, and application-oriented computing resource allocation coupled with security management. Addressing these challenges, this paper presents a structured review: we construct an overarching framework for low-altitude ISAC based on UAV-assisted and satellite-assisted networks alongside O-RAN architectures, integrating low-altitude channel measurements and modeling to reveal propagation characteristics and provide a foundational model for system design; we systematically examine critical low-altitude sensing technologies encompassing target detection, recognition, localization, trajectory monitoring, and imaging to enable real-time situational awareness of airborne targets and environmental states; we explore sensing-driven mobility management and coverage enhancement mechanisms, addressing computing resource allocation through trajectory planning, beam management, multi-node handover, task scheduling, and joint communication-sensing-computing optimization, thereby empowering communication decision-making and closing the control loop; targeting security threats such as covert access, malicious jamming, and eavesdropping, we investigate sensing-driven security management protocols and leverage novel aerial platforms equipped with reconfigurable intelligent surfaces and movable antenna arrays to enhance system robustness and future scalability. Finally, we outline promising future directions, including the construction of environmental-channel knowledge bases using generative artificial intelligence, the deep closed-loop collaborative mechanisms for large-scale drone swarms, and robustness enhancement against feature extraction challenges and jamming in complex low-altitude electromagnetic environments. This review aims to provide theoretical support and technical insights for the sustainable development of the low-altitude economy.

Keywords: low-altitude economy; integrated sensing and communications; channel modeling; low-altitude target sensing; three-dimensional communication coverage

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2024YFE0200103); National Natural Science Foundation of China (No.U25A20392, No.62301156, No.62522107, No.62331023); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20230818)

0 引言

在全球新一轮科技革命与产业变革加速演进的格局下,低空经济已成为各国培育未来竞争力的战略必争领域。我国正加快推进新型工业化、建设数字中国与现代化产业体系,党中央、国务院高度重视低空经济战略价值,将其作为培育新质生产力、打造经济增长新引擎的关键抓手。2024年《政府工作报告》明确提出“积极打造低空经济等新增长引擎”^[1],2025年党的二十届四中全会更在战略规划层面作出具体部署,明确提出“打造新兴支柱产业,加快包括低空经济在内的战略性新兴产业集群发展”,并指出这一举措将催生出数个万亿元级甚至更大规模的市场^[2],为低空经济从“战略布局”向“集群化、规模化发展”提供了清晰路径。据预测,至2030年,低空经济市场规模将突破数千亿美元,低空空域的商业化应用将成为全球经济的重要组成部分。

通信感知一体化作为国际电信联盟2023年明确的6G六大典型应用场景之一^[3],虽为通信与感知融合提供了关键技术方向^[4-5],但现有技术未针对低空高动态、高密度的独特场景展开专项优化。当前以地面用户为核心的5G-A网络,在低空覆盖、三维移动性管理、高精度感知等方面存在显著局限,无法满足低空经济中无人机群协作、任务执行与精准控制等多维需求,难以适配低空应用场景的拓展与无人机数量的增长^[6-8],亟须探索面向低空经济的通感一体化系统架构与关键技术,以支撑低空经济应用的高效协同与任务执行。

面向低空经济的通感一体化系统架构总体包含三种研究路径(见表1),空天地一体化系统架构通过综合利用空中、地面和天基平台的优势,能够提供广域覆盖、增强网络可靠性与安全性,并具有灵活性和快速部署的优势^[9,12-14];通感算控一体化系统架构通

过将感知、计算、控制功能与移动通信网络深度融合,实现实时、精准的智能决策和控制,提升数据流动效率、降低系统延迟,并提高网络响应速度和服务质量,适用于低空环境中多任务协调和动态适配^[10, 13, 15-16];通感导监管融合系统架构将感知、导航和监管功能与移动通信基础设施深度融合,实现对低空飞行器及其活动的全程监管,通过精准定位、信息

共享和动态调整,增强系统可靠性和监管效率,能够应对复杂的法规和运行环境^[11, 13, 16]。综上所述,为了实现低空网络的全面覆盖和低空任务的高效管理,需要深度融合空中、地面、天基平台及移动通信网络的优势,构建通信、感知、计算、控制闭环,推动通信、导航、感知与监管的高效协同,从而提升系统的综合性能和管理能力。

表1 面向低空经济的通感一体化系统架构综述文献总结

Table 1 Summary of survey papers on ISAC system architectures for the low-altitude economy

参考文献	发表年月	空天地一体化	通感算控一体化	通感导监管融合	核心贡献
文献[9]	2023-07	√			提出单层与多层组合场景的航天航空一体化网络
文献[10]	2024-12		√		综述6G空天地一体化无线网络中通信与计算技术
文献[11]	2025-09			√	提出融合通信、导航、感知与管理的低空智联网络架构
文献[12]	2025-09	√			提出基于天基、空基与地基系统协同的三层定位、导航、授时协作架构
文献[13]	2025-10	√	√	√	提出克服低空密集干扰和网络攻击的低空网络架构
文献[14]	2025-12	√			提出以低空空域与低空飞行器为中心的空天地一体化架构
文献[15]	2026-01		√		提出面向控制的低空无线网络架构
文献[16]	—		√	√	提出无缝融合通信、感知、计算、控制与空中交通管理的低空无线网络架构

在使能技术层面,现有综述文章围绕低空核心痛点展开讨论(见表2),包括复杂环境遮挡与覆盖连续性受限、三维密集部署下的强干扰耦合与频谱共存难题、能量受限与任务负载驱动的资源与性能权衡、开放空域下的对抗安全威胁与可信保障需求等。文献[17]系统阐述无人机在通感一体化组网中作为基站、中继、终端的多重角色;文献[18]探讨了面向低空智联网的多源数据统一表征与融合方法;文献[19]从空口机理与关键挑战出发,归纳通感一体化空口的四大核心问题,包括目标探测、干扰管理、感通覆盖不匹

配、空地协同与切换,并给出对应解决方案;文献[20-21]强调把智能超表面作为塑造传播环境与延长续航的核心手段;文献[20, 22]聚焦通信机密性等低空关键技术;文献[23]从通算融合与资源编排角度讨论低空智能通信与算力网络的双向赋能。综上所述,现有综述论文将空口技术、协同组网与安全韧性作为解决问题的技术抓手,并提出了一些具体的技术方案,但仍主要集中于各个零散的技术点,缺乏一个系统化、整体性的解决框架,尚未形成完整的技术体系。

表2 面向低空经济的通感一体化关键技术综述文献总结

Table 2 Summary of survey papers on key enabling technologies for ISAC in the low-altitude economy

参考文献	发表年月	核心贡献
文献[17]	2025-04	系统阐述无人机在通感一体化组网中扮演基站/中继/终端等多重角色
文献[18]	2025-05	探讨面向低空智联网的多源数据统一表征与融合方法
文献[19]	2025-09	针对通感一体化空口核心挑战归纳现有解决方案
文献[20]	2025-12	深度聚焦隐蔽通信等低空关键技术
文献[21]	2025-12	深度聚焦智能超表面引入无人机网络的高能效可靠通信方案
文献[22]	2026-01	重点探讨以抗窃听与身份认证为核心的保密通信方案
文献[23]	—	重点探讨低空智能通信与算力网络的协同方案

现有综述文献多以通用低空经济应用为背景进行讨论,面向具体任务的系统指标刻画相对有限。文献[24]面向低空智能交通展开研究,详细梳理系统架构、基础设施与关键技术三方面研究现状与挑战,提出基于信息物理系统分层的低空智能交通架构。文献[25]主要面向农业应用系统回顾了2012~2025年

全球研究进展,覆盖作物监测、精准作业、采收与空中运输等典型场景,揭示当前技术面临自主感知与路径规划能力不足、载荷平台通用性有限、设备接口标准缺失,以及恶劣天气下的续航、通信与运行稳定性等挑战,并指出未来应聚焦轻量化多功能载荷、智能作业控制、模块化标准化集成,并构建卫星-无人机-

地面协同感知与决策体系。总体而言,面向具体场景的综述论文为任务驱动的指标体系提供了更清晰的锚点,亟需针对更多典型低空经济应用场景,将覆盖连续性、时延可靠性、感知分辨率与安全监管等需求与具体应用闭环对齐。

目前,针对低空经济场景下通感一体化系统的需求、架构、关键技术和挑战仍缺乏系统性的综述,限制了对该领域发展趋势的全面理解。本文将系统综述面向低空经济的通感一体化系统架构与关键技术的最新进展。首先,探讨低空经济的典型应用场景及其性能需求;进而,深入探讨低空通感一体化系统架构、信道建模、低空感知关键技术,以及感知驱动的移动性管理、通信覆盖增强、计算资源分配、安全管理和新兴空中载体等关键技术;最后,本文提出未来研究方向,包括基于生成式人工智能(Artificial Intelli-

gence, AI)的环境-信道知识库构建、面向大规模无人机群的深度闭环协同机理、低空复杂电磁环境下的特征提取与抗干扰鲁棒性增强等,展望了面向低空经济的通感一体化技术发展趋势。

1 典型应用场景及性能需求

低空经济需要对地面上1 000 m的低空空域进行立体覆盖,当前,低空经济重点聚焦300 m以下非管制类空域业务场景,如图1所示。其中,120~300 m的空域场景以行业级无人机为主,主要应用于干线物流和城市管理等领域;120 m以下空域场景以消费级无人机为主,主要满足航拍和外卖配送等消费需求^[26]。这些场景不仅对无人机的飞行控制、任务执行能力提出要求,更对支撑其运行的通信与感知系统提出了极高的性能需求(见表3)。

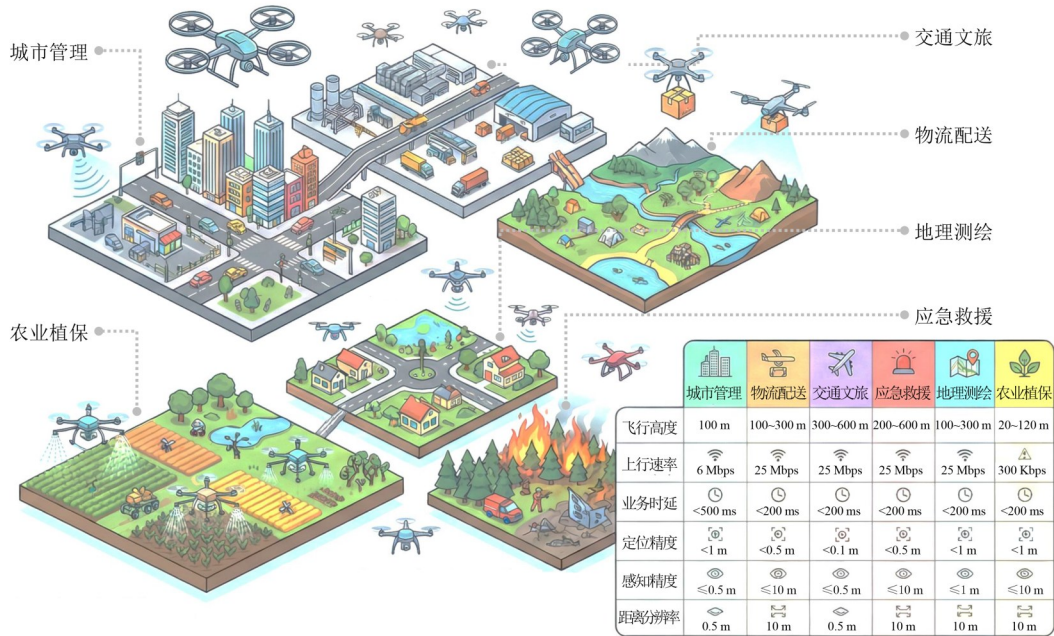


图1 低空经济典型应用场景示意图
Figure 1 Illustration of typical application scenarios for the low-altitude economy

在城市管理场景中,无人机可用于城市安防、交通监控、违章建筑巡查等任务。这类任务通常要求无人机在复杂城市环境中长时间巡航,实时回传高清视频流,并能够准确识别如车辆、行人、异常行为等特定目标。通信方面需具备高上行带宽、低时延和高可靠性,以支持视频数据的实时传输;感知方面则需具备高精度的目标检测与跟踪能力,能够在多径、遮挡等复杂环境下依然保持稳定的感知性能。此外,城市环境中存在大量的电磁干扰和信号遮挡,通感一体化系统还需具备较强的抗干扰能力和自适应调优机制。

在物流配送场景中,无人机作为“最后一公里”配

送的重要工具,已在多个城市开展试点应用。该场景下,无人机需按照预定航线飞行,准确投递货物,并能够在起飞、降落及飞行过程中规避障碍物、其他飞行器及恶劣天气。通信方面,需支持无人机的实时定位、路径规划与动态调整,确保其按计划完成配送任务;感知方面,则需实现对周边环境的高精度建模与动态障碍物识别,尤其要应对如鸟类、电缆、临时建筑物等低空突发障碍。

在交通文旅场景中,无人机不仅用于巡查与航拍,还可作为景区与城市节点间的短途空中交通工具,承担观光摆渡、接驳通勤与小型货运等任务。该

表3 典型应用场景通信和感知需求指标

Table 3 Key performance indicators for communication and sensing in typical application scenarios

应用场景		城市管理	物流配送	交通文旅	应急救援	地理测绘	农业植保
飞行高度/m		100	100~300	300~600	200~600	100~300	20~120
通信需求指标	上行速率	6 Mbps@4K	25 Mbps@4K	25 Mbps@4K	25 Mbps@4K	25 Mbps@4K	300 Kbps
	下行速率/Kbps	300	300	300	300	300	300
	业务时延/ms	<500	<200	<200	<200	<200	<200
	控制时延/ms	20~100	20~100	<10	<20	20~100	20~100
	定位精度/m	<1	<0.5	<0.1	<0.5	<1	<1
感知需求指标	RCS/m ²	0.01~2	0.01~2	0.01~2	0.01~2	0.01~2	0.01~2
	漏检率	≤5%	≤5%	≤5%	≤5%	≤5%	≤5%
	虚警率	≤5%	≤5%	≤5%	≤5%	≤5%	≤5%
	感知高度/m	100	300	600	600	300	120
	感知速度/(km/h)	≥10	≥10	≥10	≥10	≥10	≥10
	距离分辨率/m	0.5	10	0.5	10	10	10
	感知精度/m	≤0.5	≤10	≤0.5	≤10	≤1	≤10

场景面向公众开放、运行频次高、航线紧贴道路与景区建筑群,安全与秩序要求更高。通信方面需保障无人机与运营平台、低空交通管理系统的持续协同,支持飞行授权、航线调整、队列组织与应急处置;感知方面需对航路及起降区域进行持续探测,识别并规避人员、车辆、鸟群与临时障碍等风险目标,实现安全间隔保持与稳定起降。同时需与起降点、充换电、乘客服务等地面设施联动,形成可运营的空中出行闭环。

在应急救援场景中,灾害监测、搜救支持、物资投送等任务通常时间紧迫、环境复杂,对通感一体化系统的实时性与可靠性提出极高要求。通信方面需在灾害导致的传统通信基础设施损坏的情况下,依然能够提供稳定的应急通信链路,支持无人机与指挥中心之间的语音、视频及数据通信;感知方面则需具备在烟雾、灰尘、夜间等恶劣环境下依然具备有效探测生命迹象、识别受灾区域的能力。此外,应急救援中多无人机协同作业尤为常见,通信系统需支持高效的集群通信与任务分配机制。

在地理测绘场景中,无人机承担着高精度地图绘制等任务。这类任务对感知的精度要求极高,通常需搭载高清相机、激光雷达、合成孔径雷达等高端传感器。通信方面需支持大数据量的实时回传或边缘处理后的结果反馈;感知方面则需实现厘米级定位、毫米级形变检测等高精度感知能力。尤其在交通巡检中,无人机需能够实时识别车辆类型、车速、车道偏离等行为,并对异常事件进行即时报警。

在农业植保场景中,无人机被广泛应用于农药喷洒、作物监测、农田测绘等任务。这类任务通常发生在广阔的农田区域,通信覆盖能力可能面临挑战。无人机需具备长续航能力,并能够在大面积区域内实现

精准作业。农业无人机主要以飞控数据交互为主,通信需求不高,数据量不大,对终端搭载的实时通信模组要求不高,现有的无人机终端通信方案基本可满足要求。未来可能需支持远距离、低功耗的数据传输,确保无人机与地面控制站之间的连接不中断;感知方面则需具备对作物生长状态、病虫害情况的识别能力。

2 主要研究问题

围绕低空通感一体化的规模化应用,研究问题从系统架构统筹到感知能力和通信保障,再到算力资源分配和安全管控逐层展开:首先以系统架构作为统一底座,解决空地多域异构资源的组织与协同;在此基础上,提升低空复杂环境下的目标感知能力;进一步保障高动态场景中的连续通信覆盖与可靠连接;最终面向应用形成端边云协同的算力供给与安全监管闭环,实现可持续、可运营的低空服务体系。

系统架构设计:面向空地多域协同与通感算控融合,设计可扩展、可演进的总体架构与接口机制,明确网络功能分层、能力开放与跨域编排方式,兼顾集中管控与分布自治。重点研究多制式接入与异构节点协同、通感共享资源的统一调度,以及与低空交通管理平台的对接机制,为后续感知、通信与计算能力提供统一承载与协同框架。

低慢小目标感知:在复杂环境遮挡、多径与强干扰条件下,研究低慢小目标的探测、跟踪与识别方法,提升弱目标可检性与轨迹连续性。重点关注多站协同感知、目标与杂波/干扰的可分性增强,以及感知结果与网络侧数据的融合校验,实现稳定可靠的态势感知,并与通信网络侧形成感知、决策、反馈的闭环优化。

高动态连续通信覆盖:针对低空高速机动、频繁

切换与强耦合干扰,研究三维立体覆盖与连续连接保障机制。重点包括面向航线和任务的覆盖预测与主动切换、抗干扰与鲁棒链路自适应,以及多点协同传输与资源共享策略,从而提升链路鲁棒性与服务连续性,为任务执行提供支撑。

面向应用的计算资源分配与安全管理:面向多任务并发与差异化服务质量(Quality of Service, QoS),研究端边云协同的计算资源编排、模型和任务下沉与弹性伸缩机制,保障感知推理、路径规划与业务服务的实时性。同时构建面向开放空域的安全防护、可信接入与运行监管体系,覆盖身份认证、数据可信、异常检测与应急处置等关键环节,支撑规模化运营落地。

3 研究现状

本章针对第2章提炼的主要研究问题,围绕低空通感一体化系统架构与关键技术展开综述,具体组织

方式和内容关系如图2所示。首先,从无人机辅助、卫星辅助及基于O-RAN的系统架构出发,构建低空通感一体化的总体框架,并结合信道建模刻画低空场景中的传播特性,为系统设计提供基础支撑;其次,围绕目标检测、识别、定位、轨迹监视与成像等内容,系统分析低空感知关键技术,形成对空域目标与环境状态的实时获取能力;在此基础上,进一步讨论感知驱动的移动性管理、通信覆盖增强以及计算资源分配问题,通过轨迹规划、波束管理、多站切换、任务调度与通感算协同优化,实现感知信息向通信与控制决策的有效传导;最后,面向隐蔽、干扰对抗及窃听等风险,研究感知驱动的安全管理机制,并结合智能超表面、可移动天线阵列等新型空中载体,提升系统的鲁棒性与演进能力。整体上,各章节相互衔接,体现了低空通感一体化系统从环境感知、信息传输、决策控制到安全保障的闭环运行机制。

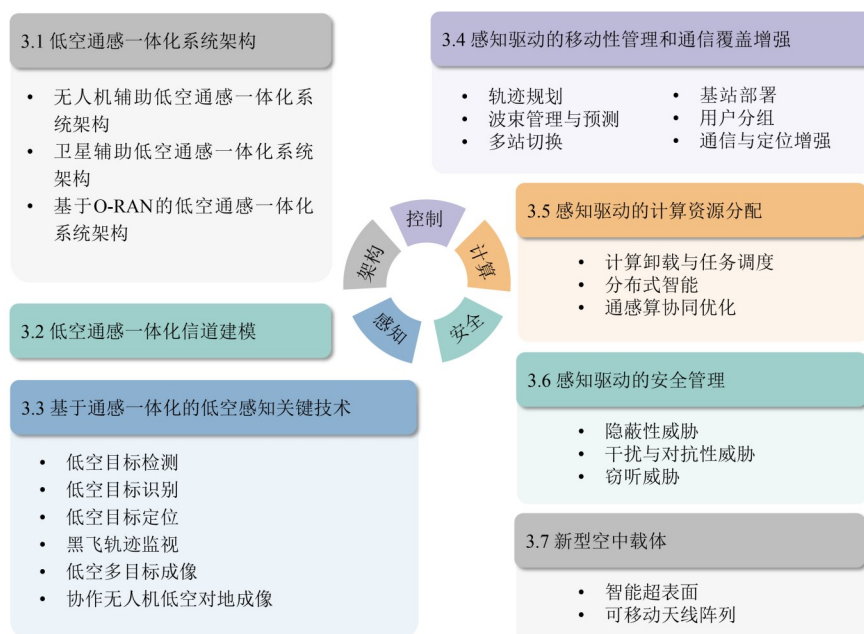


图2 本章组织方式和内容关系图

Figure 2 Structure of the chapter and logical relationships among its sections

3.1 低空通感一体化系统架构

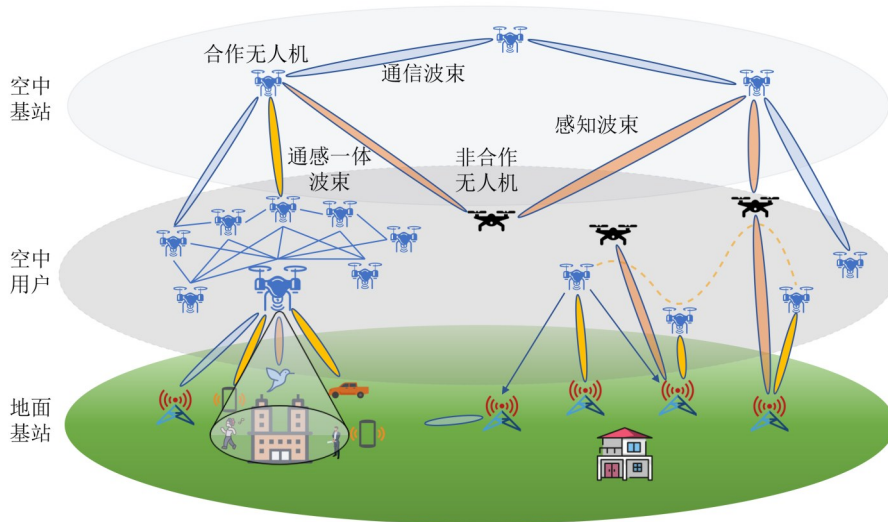
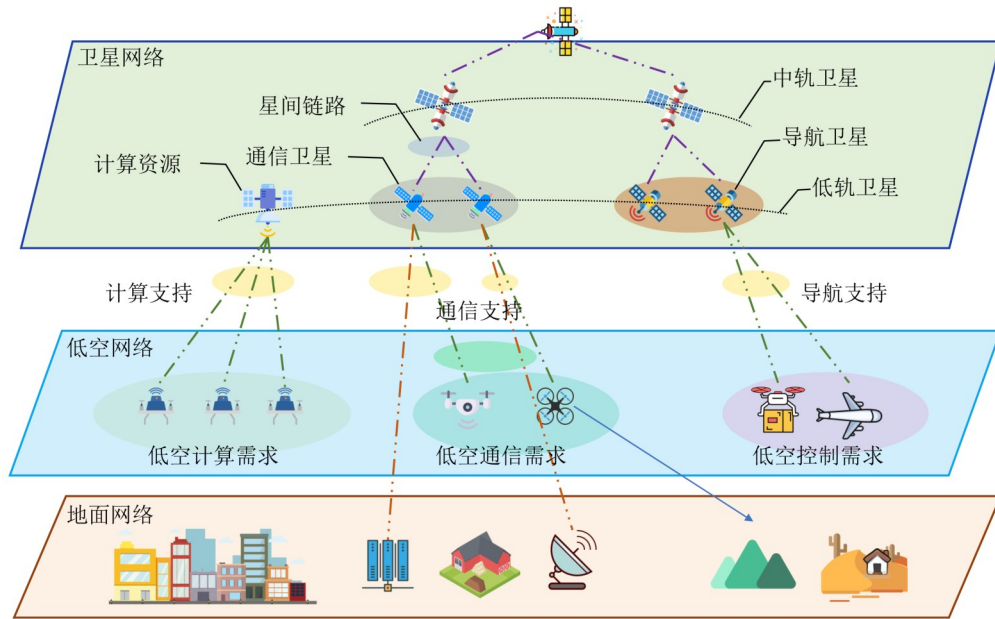
3.1.1 无人机辅助低空通感一体化系统架构

低空无人机在未来无线网络中预计将发挥重要作用^[27],既可作为空中基站,也可作为连接到蜂窝网络的空中用户。尽管大多数现有研究主要集中在地面二维通信和感知技术上,作为空中平台的无人机为设计三维空地通感一体化网络提供了新的自由度。文献[28]指出,无人机在蜂窝连接的通感一体化网络中扮演了感知目标和空中锚点的双重角色,提出无人机辅助低空通感一体化系统架构,如图3所示,并

进一步探讨了三维通感一体化覆盖问题以及无人机电网络的特定挑战。

3.1.2 卫星辅助低空通感一体化系统架构

为解决卫星辅助低空经济网络中路径损失和高动态性带来的挑战,以及偏远地区通信覆盖问题,已有研究^[29]提出了包括分布式卫星多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)、分布式低空飞行器MIMO和双时间尺度优化方案的系统架构,如图4所示。通过分布式卫星MIMO技术,显著降低了传输功率需求并延长了服务时长。分布式低空飞行

图3 无人机辅助低空通感一体化系统架构^[28]Figure 3 Architecture of a UAV-assisted ISAC system for low-altitude scenarios^[28]图4 卫星辅助低空通感一体化系统架构^[29]Figure 4 Architecture of a satellite-assisted ISAC system for low-altitude scenarios^[29]

器 MIMO 提升了低空飞行器与卫星间的通信能力,双时间尺度优化方案则在性能和控制信令开销之间实现了平衡,提升了系统的通信效率和可操作性。此外,低地球轨道卫星、高空平台站和无人机组成的变革性 6G 连接基础设施,通过分层网络有效结合上述技术优势,为低空经济网络提供了强有力的支撑^[30-31]。

3.1.3 基于 O-RAN 的低空通感一体化系统架构

尽管基于无人机的物流与应急响应等低空经济应用正日益受到关注,但在需要高实时性和情境感知能力的空中节点编排场景下,这些任务的协同仍面临

基础性挑战,同时,AI 在低空经济任务中的集成也尚不充分。文献[32]提出了一种基于开放无线接入网络 (Open Radio Access Network, O-RAN) 的低空经济框架,如图 5 所示,该框架通过解耦的 RAN 架构、开放接口和 RAN 智能控制器之间的协作,促进了闭环 AI 优化和任务关键操作。通过语义感知 rApp 的评估,验证了架构的可行性和性能,其中 rApp 作为地形解释器,为强化学习驱动的 xApp 提供语义指导,支持低空经济蜂群节点的实时轨迹规划。此外,文章还调研了可用于低空经济研究的无人机测试平台,并探讨了关键研究挑战与标准化需求。

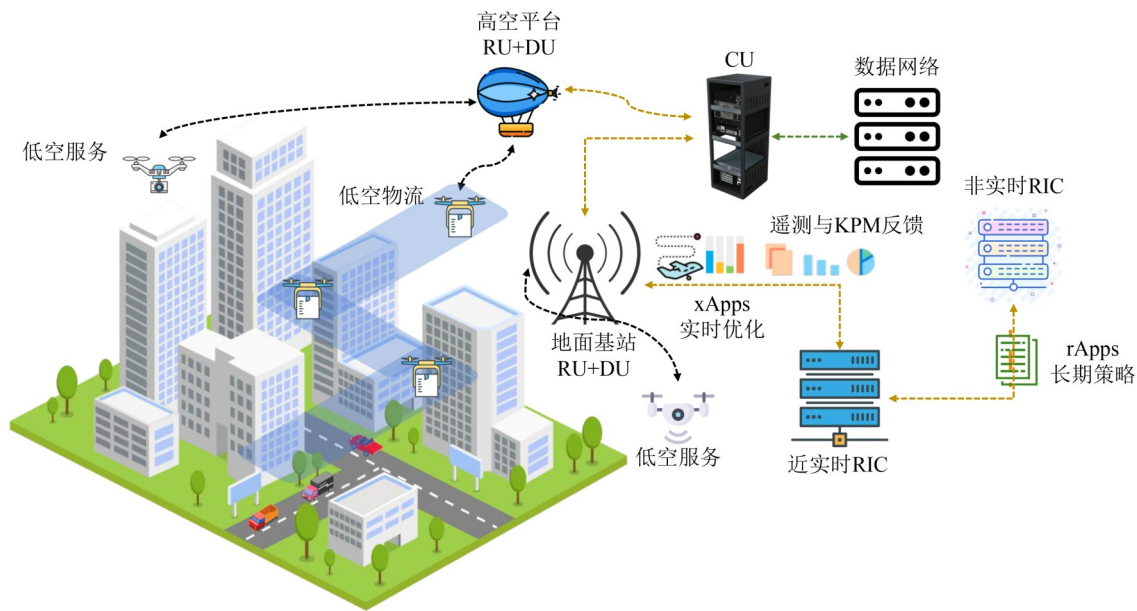


图5 基于O-RAN的低空通感一体化系统架构^[32]
Figure 5 Architecture of an O-RAN-based ISAC system for low-altitude scenarios^[32]

3.2 低空通感一体化信道建模

现有低空通感信道建模工作主要集中在无人机空地通信信道建模^[33-36],通感一体化信道建模实测研究工作较少^[37-38](见表4)。文献[33]系统综述了无人机空地信道建模的研究进展,讨论了无人机机动性和尺寸对路径损耗和衰落等信道特性的影响,探讨了基于随机模型和确定性模型的信道建模方法。文献[37]针对15 GHz和28 GHz频段下的无人机单站感知信道进行测量,研究了感知水平距离、垂直高度差和目标雷达散射截面对路径损耗的影响,发现了无人机目标信道和背景信道的低耦合特性,建立了无人机感知目

标信道路径损耗与距离模型,支撑了3GPP标准化研究。文献[38]提出了面向通感一体化动静态物体的确定性信道模型,适用于低空三维空间的城市场景。该模型考虑了两种类型的物体导向信道,即静态背景信道(如建筑物)和动态信道(如汽车和无人机)。框架结合了在4 GHz频段基于无人机和地面车辆测量的数据,此外,无人机还拍摄了测量区域照片,用于生成物体导向的三维模型以应用射线追踪技术。基于这些信道测量数据,并通过射线追踪技术,准确校准并验证了所考虑区域的电磁参数。进而,从动态信道中去背景信道,实验结果表明,物体的角度和距离信息可以被精确估算。

表4 低空通感一体化信道测量与建模文献总结

Table 4 Summary of survey papers on channel measurement and modeling for low-altitude ISAC systems

参考文献	发表年月	探测信号	工作频率	工作带宽	建模方法
文献[34]	2023-09	窄带连续波	2.4 GHz 5.9 GHz	—	空对地通信信道测量,建立空对地通信中遮挡视距和非视距场景路径模型
文献[37]	2024-09	—	15 GHz 28 GHz	3 GHz	单站感知信道测量,建立无人机感知目标信道路径损耗与距离模型
文献[35]	2025-04	OFDM	4.9 GHz	100 MHz	空对地双站通感信道仿真,建立基于几何的随机信道模型
文献[38]	2025-09	—	4 GHz	20 MHz	基于实测校准射线追踪技术建立面向通感一体化动静态目标的确定性信道模型
文献[36]	—	OFDM	2.61 GHz	18 MHz	空对地通信信道测量,揭示无人机几何运动对大尺度功率变化、几何特征、莱斯K因子、时延扩展等信道特性的影响

综上所述,现有低空通感一体化信道测量研究主要集中在单一频段、固定高度及简单飞行轨迹等受限场景,缺乏覆盖跨频段、跨场景以及大规模无人机高

度与速度动态变化的系统化测量数据集。这在一定程度上限制了相关研究在复杂环境中的应用能力。在建模方面,尽管已有统计模型与几何模型被提出,

但多数模型仍基于环境静止或理想散射体分布的假设,未能充分刻画实际环境中的动态变化对信道特性的影响。因此,针对低空环境中信道的非平稳性与时变特性进行建模,仍然面临严峻挑战。同时,现有模型在融合实测数据与仿真参数方面能力有限,导致模型精度不高且适用性不足。此外,随着低空节点的日益密集,电磁干扰问题愈发突出,而当前研究普遍缺乏对电磁干扰的精细化建模。通过对电磁干扰特征进行提取,可作为基础手段实现高精度干扰分析,对保障通感一体化系统的稳定运行具有重要意义^[39]。针对上述问题,未来研究可从以下几个方向展开:一是结合实时三维环境重建技术,利用多源信息融合方法,从三维环境模型中反演通感一体化信道特征,以提升建模精度并加深对复杂环境信道特性的理解;二是引入生成式AI技术,以弥补实测数据不足的问题,从而进一步提升信道建模的效率与准确性,推动低空通信与感知系统的持续优化与发展。

3.3 基于通感一体化的低空感知关键技术

现有研究在低空通感一体化的感知关键技术方面,主要关注点包括目标检测、识别、定位、成像等(见表5)。低空感知任务通常涵盖了单站感知、多站协作感知等模式。现有研究已在提高感知精度、解决数据关联问题、增强系统实时性等方面取得显著进展,为低空无线网络中的目标监测与管控提供了有效的技术支持和理论依据。

表5 低空感知关键技术文献总结

Table 5 Summary of survey papers on key technologies for low-altitude sensing

感知任务	感知所用信号	感知模式	参考文献
黑飞目标检测	OFDM	基站单站感知	文献[40]
低空对地目标检测	A-MDS-OFDM-IM	无人机单站感知	文献[41]
低空目标识别	OFDM	基站单站感知	文献[42]
低空目标定位	OFDM	基站单站感知	文献[43-45]
	OFDM	基站多站感知	文献[46]
	OFDM	单双站混合感知	文献[47]
黑飞轨迹监视	OFDM	基站单站感知	文献[48]
低空多目标成像	OFDM	基站多站感知	文献[49-50]
低空对地成像	OFDM	无人机单站感知	文献[51-52]

3.3.1 低空目标检测

随着低空飞行器规模化部署,文献[40]提出了以基站在给定约束下最多能同时检测多少架低空飞行器作为核心能力度量,旨在弥补传统雷达/通信指标,

如速率、信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)、信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)、检测概率、克拉美罗界在表征空域监测与管控能力方面的不足。文献通过将SNR与检测概率作为中间变量,并结合随机几何思想,建立了检测区域内低空飞行器数量与SNR、检测概率之间的关系,给出了SNR与感知容量的闭式表达式。进一步地,研究从理想分离情形扩展到密集/近距离低空飞行器的干扰情形,指出近距离编队中主瓣重叠会引发残余干扰,并在最大比合并和匹配滤波条件下,进一步建立了基于SINR的感知容量模型。此外,文献提出使用改进的5G新空口(New Radio, NR)帧结构来安排感知符号资源,使得理论指标能够适配到可实现的时频资源框架中。仿真结果揭示,当检测目标数量增多时,SINR会逐渐趋近于SNR,性能劣化的主要原因往往是资源稀缺,而非干扰主导。针对通信系统中正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)波形的高峰均功率比和功放非线性等非理想硬件问题,文献[41]提出了一种自适应MDS-coded OFDM新波形,联合优化了误比特率、旁瓣抑制、峰均功率比和检测概率等多个指标。此外,文献还指出,近距和远距目标共存时带来的旁瓣遮蔽挑战以及远距目标的回波峰值可能被近距离目标的旁瓣掩盖,从而导致漏检问题,这本质上要求对旁瓣抑制及波形自相关性进行优化。

3.3.2 低空目标识别

低空空域内目标密集且类型多样,尤其是在1 000 m以下的飞行环境中,多任务飞行活动日益增多,这对监管能力提出了更高的要求,需要同时兼顾对合作目标的有效覆盖以及对非合作目标的监测与识别。在这种环境下,鸟类回波成为主要的非合作目标干扰。由于鸟类回波与无人机回波相似,因此,需要专门的识别机制来有效消除虚警。尽管已有大量的通感一体化工作关注无人机目标的检测、参数估计和跟踪,但这些研究往往忽视了鸟类回波导致的虚警问题。因此,在通感一体化系统中区分无人机与鸟类的必要性变得尤为突出。为了解决这一问题,文献[42]提出了一种结合信号处理与深度学习的低空目标识别方案,旨在区分无人机与鸟类。该方案首先建立了无人机与鸟类的运动方程及回波信号模型,并从回波信号中提取了两类关键特征:集中微多普勒谱与高分辨率距离像。随后,利用卷积神经网络构建了一个双特征融合的低空目标识别网络,以提高识别精度并减少虚警。

3.3.3 低空目标定位

低空目标定位的研究已取得显著进展,主要集中在

在以下几个关键问题和挑战上。首先,低空感知空间广阔,且在角度、速度和距离等维度上,目标之间可能具有较大的相似性。因此,设计超分辨感知算法成为提升定位精度的关键,以克服传统感知技术在高密度目标环境中的局限性,确保能够准确区分相邻目标,避免因空间重叠或相似特征导致的定位误差。文献[43]提出一种新颖的无栅格稀疏贝叶斯学习框架,在可控计算开销下实现联合超分辨多目标检测与高精度参数估计,并验证了所提算法在低空动态杂波环境中的鲁棒性。其次,在多站协作定位系统中,跨站数据的关联与融合存在较大的挑战。由于目标在空间中的动态变化、传感器视角的差异及通信延迟,跨站数据关联容易出现误匹配,进而影响多目标的精确定位。因此,如何有效地进行跨站数据关联,提升多站协作定位系统的准确性,成为亟待解决的问题。文献[44]提出两阶段协作通感一体化框架,先在每个基站侧利用空间平滑的张量分解估计多无人机参数,利用结构减少模糊、提高分辨率。进而,利用以最小生成树为核心的数据关联,用 Pareto 最优方法估计位置,解决协作感知中跨站关联与融合鲁棒性问题。文献[46]进一步将上述工作拓展到双站感知场景,进一步考虑了符号定时偏移和载波频率偏移抑制方法。另外,尽管 5G NR 网络为低空目标定位提供了通信基础,但其同步信号块(Synchronization Signal Block, SSB)等参考信号的时频结构以及带宽资源有限,难以满足低空高精度定位的需求。在低空目标定位中,高精度的时频资源配置是至关重要的,而现有的 5G NR 网络在带宽资源的分配上存在一定的局限性,无法完全支持高精度定位任务。文献[45]提出一种两阶段由粗到细的感知框架:利用标准 5G NR 初始接入信号,如 SSB+Type#0-PDCCH+SIB1,并辅以自定义设计的稀疏导频结构,实现对无人机的高精度感知。最后,尽管低空目标定位对通信吞吐量的要求相对较低,但对于系统的安全运行,周期性控制和状态数据的传输至关重要。特别是在动态环境下,系统需要实时获取目标的状态信息,并进行周期性控制,以确保目标定位的可靠性和安全性。因此,如何在有限的通信资源下实现高效、安全的控制和状态数据传输,是实现低空目标定位系统高效运行的另一大挑战。文献[47]把通信空闲转化为感知机会,提出了一种无人机辅助框架,融合了主动与被动感知以及下行通信,统一来自地面基站(主动感知)和空中中继(被动感知)的回波数据,推导了克拉美罗下界量化三维定位精度。

3.3.4 黑飞轨迹监视

黑飞目标轨迹监视要求实时性和快速响应,在低

空动态环境下面临诸多挑战。首先,低空目标的运动通常是多维且复杂的,涉及距离、角度、速度等多个参数,这些参数需要高精度地估计。其次,多个动态目标的轨迹可能重叠或接近,导致目标轨迹的准确关联和匹配困难。此外,低空目标的运动轨迹易受风速、障碍物等因素影响,运动模型的准确识别和预测存在困难。为应对这些挑战,文献[48]提出相位旋转离散傅里叶变换算法,以精确估计目标的距离、角度、速度等运动参数,有效克服低空目标在复杂环境中的运动跟踪难题。进而,针对多目标数据关联问题,提出位置波门和速度差异最近邻算法,通过匹配目标的相似位置和速度特征,成功解决了低空环境中的目标轨迹关联问题。最后,采用交互式多模型无迹卡尔曼滤波算法,准确识别目标运动模型并预测其未来位置,为低空目标的持续跟踪和精确定位提供了有效的方法。

3.3.5 低空多目标成像

低空多目标成像面临多个挑战。首先,在多站协作中,不同站点的感知结果难以融合,且信道参数的对齐和匹配存在困难。其次,传统压缩感知方法使用的栅格字典常常不适应无人机在空域中的随机空间分布,导致离栅格误差,这一误差在低空监测中尤为普遍且致命。此外,无人机目标在大空域中的稀疏分布使得类别不平衡和漏检风险增加。针对这些挑战,文献[49-50]提出了成像化建模方法,通过在成像域直接重建稀疏目标分布,从而绕开了部分关联困难。为了应对离栅格误差问题,提出了一种物理嵌入学习方法,旨在缓解传统压缩感知方法在离栅格情况下的误差。同时,为了提升对稀疏目标的检测能力,在损失函数设计中引入了在线困难样本挖掘机制,使得网络在训练过程中能够自适应地关注那些与真实标签偏差较大的样本。进一步地,推导了点扩散函数,分析了不同天线配置、子载波设置与分辨率参数对成像性能的影响,从而提供了针对低空多目标成像的优化策略。

3.3.6 协作无人机低空对地成像

传统的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)系统通常采用确定性的雷达波形,这与通感一体化范式不兼容,因为确定性波形会丢弃信号的随机性,无法充分利用通信波形中的随机性,这限制了系统的灵活性和性能。其次,在现有的 5G NR 中,通常仅利用上行导频信号进行感知,如探测参考信号,而忽略了数据符号的潜力,这进一步降低了成像系统的效率。如何有效地利用数据符号进行成像,同时确保成像质量和性能,是低空多目标成像系统的一个关键挑战。为了解决这些问题,文献[51-52]提出了一种面向低空无线网络的数据辅助 OFDM-SAR 成像框架。

该框架通过直接复用原生 OFDM 通信波形中的数据符号进行成像,显著提高了信号的利用率。此外,系统通过引入多种时频域滤波技术,并嵌入随机数据成像流程,有效抑制了数据随机性对成像的负面影响。为了量化成像性能,文献中还提出了参考点目标的归一化均方误差作为可操作的成像性能指标。通过对 5G NR 参数的分析,研究表明,数据辅助成像框架显著优于仅依赖导频的传统成像方法,在成像效率和质量上都有显著提升。

综上所述,尽管低空通感一体化在检测、识别、定位、轨迹监视与成像等方面已取得一定进展,但在复杂动态环境下多目标与异构任务的统一度量体系尚不完善;密集场景中的主瓣重叠、旁瓣遮蔽及电磁干扰问题仍未有效解决;现有识别方法对特定目标依赖较强,在多类型未知目标场景中的泛化能力有限;跨站数据关联误差、同步偏差及通信延迟对定位精度影响显著;系统多依赖导频进行感知,数据符号利用不足,频谱效率有待提升;此外,现有研究多停留在算

法层面,缺乏系统级验证与标准化支撑。针对上述问题,未来研究可重点聚焦于:构建统一的通感性能评估框架,实现资源与任务的协同优化;融合智能波形设计与自适应干扰抑制技术,提升系统鲁棒性;推进通信信号全资源感知机制,实现通感深度融合;加强与 5G-A/6G 系统的协同设计,推动工程验证与标准化进程。

3.4 感知驱动的移动性管理和通信覆盖增强

移动性管理和资源优化是实现低空高效通信和任务执行的关键,然而,面向高动态低空环境和多样化低空任务,如何基于实时感知数据优化移动性管理和资源分配,成为当前面临的重要挑战。感知结果不仅能提供目标位置、飞行路径和环境信息,还能辅助进行波束管理、基站部署和用户分组等优化工作,从而确保无人机在复杂环境下能够高效执行任务,避免过度能量消耗并保持通信稳定。本节探讨通过感知结果优化移动性管理和资源调度的方法(见表 6),以实现系统效能最大化。

表 6 感知驱动的移动性管理和通信覆盖增强技术文献总结

Table 6 Summary of survey papers on sensing-driven mobility management and communication coverage enhancement

任务	优化目标	通信约束	感知约束	移动性约束	参考文献
轨迹规划与波束预测	最大化通信总速率	最大传输功率	感知信噪比	飞行时间、避免碰撞	文献[53]
	最大化通信总速率	最大传输功率	感知区域最小照明功率	最大飞行速度、避免碰撞	文献[54]
	最小化中断容量	最大可容忍中断概率	感知持续时间比率、感知信噪比	最大飞行速度、最小飞行区域	文献[55]
轨迹规划与任务调度	最小化总能量消耗	最大传输功率、最大任务延迟	—	避免碰撞	文献[56]
轨迹规划	最小化完成任务的最大延迟	最大传输功率	图像分辨率	飞行高度、速度、轨迹	文献[57]
	最小化总能量消耗	—	—	飞行高度、速度、时间、空间	文献[58]
波束管理与预测	最大化波束预测准确率	—	模态可靠性、模态特征一致性	—	文献[59]
基站切换	最小化传输延迟并优化无人机追踪精度	传输信噪比	感知覆盖范围	飞行区域	文献[60]
基站部署	最小化系统部署成本	最小接收信号强度、通信连续性、SINR	最小接收信号强度、感知连续性	—	文献[61]
空中节点网络部署	最小化网络部署成本	覆盖率、资源利用率、干扰、QoS	—	—	文献[62]
用户分组	最小化总能量消耗	缓存容量、SINR	—	飞行能量	文献[63]
协作波束成形	最大化网络传输速率	路由拓扑	—	飞行能量、避免碰撞	文献[64]

3.4.1 轨迹规划

低空无人机的轨迹规划是提高其在面对能量敏感、时延和功耗约束等复杂环境中执行任务效率的关键技术。然而,低空无人机的轨迹规划问题面临着多个挑战,包括能量优化、任务调度、实时性保障等。文献[53]和文献[54]以最大化通信速率或感知性能

为目标。文献[53]通过联合优化地面基站的波束成形和授权无人机的飞行轨迹,最大化了所有无人机的预期通信总速率。在该研究中,轨迹规划不仅考虑了飞行路径的选择,还与基站的波束调度密切相关,确保了系统性能的最优化。文献[54]则针对一组联网的地面基站与多架授权无人机之间的通信与感知问

题,提出了在三维空间中进行轨迹规划。该文考虑了飞行区域内未授权目标的探测,并要求最大化授权无人机的平均总速率。在此过程中,文章设定了多种约束条件,包括目标三维感知区域的最小照明功率、各基站的最大发射功率,以及无人机的飞行约束。该方法旨在实现高效的多无人机协作,同时保证资源和能量的合理分配。文献[56]和文献[65]关注能量消耗与任务调度,强调移动边缘计算场景中的系统效用最大化。文献[56]研究了无人机辅助移动边缘计算系统中的能量敏感任务调度问题,通过基于讨价还价的资源分配和匹配策略,结合多智能体近端策略优化,提出了一种轨迹优化方案,旨在减少系统的整体能量消耗,并提升无人机的系统性能。该方法通过优化资源和能量分配,有效提高了任务执行的能源利用率。文献[65]提出了一个低空无人机辅助移动边缘计算的框架,通过联合优化无人机的轨迹规划、任务卸载分配和无人机队列的能量管理,实现了系统效用的最大化。该框架通过高效的资源调度与能量管理,能够有效地支撑低空无人机在移动边缘计算中的多任务执行,尤其适用于任务负载较重和能量消耗敏感的场景。文献[57]重点优化任务时延与推理效率,提出了一种基于机载视觉语言模型的实时多模态推理方法,结合无人机机动性和通信过程,提出了一种优化策略。在该策略下,无人机能够在满足特定精度约束的前提下,最小化任务时延和功耗。这种方法不仅提升了无人机在低空环境中的智能感知能力,还优化了其能效和时延管理,适用于需要高效感知与通信的任务场景。文献[58]则着重于低空巡检和采集任务,联合优化速度、高度与数据采集顺序。在该场景中,无人机的能量消耗是最紧张的,因此,飞行速度、飞行高度和传感器数据收集顺序是三个高度耦合的决策因素。文献通过优化感知性能、能耗和任务调度的联合优化方法,解决了如走廊巡检等实际应用中的轨迹规划问题。该方法结合不同传感器的传输覆盖范围和感知范围,提供了一种针对低空巡检任务的轨迹优化方案。

3.4.2 波束管理与预测

低空无人机的波束管理与预测是优化其通信性能和感知能力的关键技术,尤其是在复杂的低空飞行环境中,波束管理可以有效提升频谱效率、降低通信干扰,并增强系统的整体可靠性。传统的波束管理方法往往假设固定或静态的信号强度分布,无法适应无人机在不同飞行场景中的动态变化,因此,如何结合无人机的飞行特性和外部环境数据,动态调整波束管理策略,已成为当前研究的重要方向。文献[55]针对无人机跟踪的中断容量最大化问题,提出了一种基

于感知辅助预测波束成形的方案。该方案通过扩展卡尔曼滤波对无人机轨迹进行预测,并结合感知时长占比和目标接收 SNR 优化每个时隙的中断容量。在该方法中,利用二阶泰勒展开近似求解中断概率,有效地刻画了中断容量,发现优化后的预测无人机轨迹往往与基站天线方向保持平行,并且保持非零的最小距离,从而揭示了路径损耗与波束覆盖之间的权衡。这一研究填补了感知辅助波束成形对通信可靠性影响的研究空白,提供了有效的波束管理优化方法。文献[59]则提出了面向多模态波束预测的可靠性感知动态加权方案,该方案克服了传统多模态方法中固定权重带来的问题。在该框架中,结合环境视觉、飞行姿态和地理空间数据,依据不同模态的可靠性动态更新权重,以实现自适应的波束预测。此外,采用跨模态对比学习,将多源表征与波束语义对齐到共享语义空间,从而提升模态间的判别力和鲁棒性。该方法能够有效应对不同飞行场景中的模态不匹配和数据分布漂移问题,显著增强了多模态波束预测的性能和跨场景的泛化能力。文献[64]设计了一种高效且鲁棒的无人机群协同自组织网络,以促进灾后通信。地面设备将数据传输至无人机群,无人机群通过协同波束成形技术形成虚拟天线阵列,并高效中继数据到远程接入点,以最大化网络传输速率。优化过程分为两阶段:第一阶段推导最优流量路由和理论传输速率上限;第二阶段通过优化激励电流权重和部署位置,采用扩散模型驱动的粒子群优化算法求解优化问题。

3.4.3 多站切换

在低空无人机执行任务过程中,常需在多个基站之间进行动态切换,以保障通信与感知性能的连续性与稳定性。然而,多站切换机制面临诸多挑战,包括如何在多基站环境中实现最优切换决策、如何在切换过程中维持信号质量与链路可靠性,以及如何有效避免由切换引发的信号中断与目标跟踪失效等问题。文献[60]提出了一种虚拟感知小区(Virtual Sensing Cell, VSC)的概念,其中一个主基站负责发射感知信号,而两个辅基站共同接收回波。在该方案中,首先利用多重信号分类算法估计无人机的水平角、俯仰角、距离和径向速度,然后通过集中式扩展卡尔曼滤波融合三个基站的估计结果,以区分并跟踪多个无人机目标。在此基础上,文献提出了一种基站切换策略,当无人机飞行在某一 VSC 覆盖范围内时,能够实时从三个基站中选择最优的基站作为新的主基站,从而保证无人机的持续跟踪。此外,当无人机从一个 VSC 飞入另一个 VSC 时,文献进一步提出了一种 VSC 切换策略,确保在切换过程中无人机能够被持续追踪,避免跟踪丢失。该研究为低空无人机的多站切换

提供了一种有效的解决方案,特别是在复杂环境中如何通过切换优化感知和通信质量,并保障飞行任务的顺利进行。

3.4.4 基站部署

低空无人机基站部署是保障通信连续性与感知监管稳定性的关键。然而,传统面向地面用户的部署方法难以适应低空飞行的动态性与空间复杂性。随着低空交通向空中走廊模式演进,基站需沿航路部署,以实现连续覆盖与全域感知,这对有限资源条件下的部署优化提出了更高要求。在此过程中,需在保障通信与感知性能的同时,兼顾成本控制与盲区抑制,并应对复杂信道环境及多站干扰问题。文献[61]提出了一种空域规划与网络部署协同降本的方法,旨在针对低空走廊的基站部署进行优化。该方法将低空走廊建模为连接的立方体段,并在此基础上引入了全域约束,即确保走廊中所有区域的通信与感知覆盖,而不仅仅是热点节点的覆盖。文章通过引入信道知识地图,在离线阶段预测候选站点到走廊各处的信道和覆盖能力,从而支撑先规划再部署的工程逻辑。这种方法有效解决了低空环境中信道非平稳、受遮挡影响大的问题。为了应对大规模的基站部署问题,文献提出了分层粗到细网格分解策略,将大问题拆解为更易处理的小问题,从而实现了高效的优化求解。文献[62]则提出了一种面向低空空智能网络的新型融合式超蜂窝网络架构,以应对低空飞行中通信的动态需求。该架构通过将控制覆盖与业务承载覆盖分离,实现了更灵活且节能的网络运行,特别适合低空环境中的通信需求。文中设计了两种基站,控制基站负责广域信令覆盖,而业务基站可根据实际需求动态启停。通过引入空间信息网络,该方案显著提升了低空环境中的覆盖效率。此外,文中还探讨了AI驱动的无线电地图以及地面基站覆盖的敏捷自适应机制,为低空无人机通信提供了更为高效和灵活的解决方案。

3.4.5 用户分组

无人机作为空中边缘节点,通过无线缓存可有效缓解网络拥塞并降低时延,从而支持大规模用户请求的高效处理。然而,其受限的能量与存储资源使持续提供多样化内容分发服务面临挑战。在此背景下,用户分组成为提升系统性能的关键手段。通过基于用户位置与需求的分组策略,可提高缓存命中率与通信效率,从而优化能效表现。然而,用户分组仍面临若干挑战:用户的动态移动性与需求时变性使传统静态分组方法难以适用;同时,在高密度用户场景下,需在通信覆盖、缓存效率与能量消耗之间实现有效权衡。此外,无人机数量、部署位置及缓存容量等资源

约束进一步限制了优化空间。文献[63]提出通过设计一个多无人机赋能的编码缓存方案来应对上述挑战。首先,文章利用带约束的K均值聚类算法根据用户位置对无人机进行初步部署,并通过轮廓系数评估聚类效果。接着,文章联合优化了编码向量、缓存变量、用户分组和无人机位置,确保在满足通信覆盖和缓存命中要求的同时,最小化系统能量消耗。该方案嵌入了基于投影距离的用户分组方法、半定规划和匹配理论,成功地优化了系统性能。然而,尽管本文提出了有效的优化方案,仍然存在一些遗留问题。首先,由于用户的动态行为,如何实时更新分组和优化策略仍然是一个挑战。其次,随着用户数量和文件库规模的不断扩大,系统的计算复杂度可能会显著增加,这需要进一步优化算法和计算资源管理策略来解决。因此,未来的研究可以集中在如何提高算法的实时性和扩展性,特别是在大规模动态场景中的应用。

3.4.6 通信与定位增强

传统全球导航卫星系统在城市峡谷、室内或森林等复杂场景中容易出现信号遮挡、多径效应和定位漂移,导致无人机导航精度下降,甚至影响任务安全。与此同时,低空无线通信链路面临多径衰落、信号遮挡和干扰等问题,严重制约了无人机与地面基站或其他空中平台的实时数据传输能力。因此,增强低空通信与定位能力不仅是保障无人机安全飞行和任务执行的基础,也是推动低空经济高效运行、实现智能调度与动态管理的关键支撑技术。文献[66]将智能超表面技术与半监督信道图结合应用于低空无人机通信与定位增强,显著降低标注数据需求,同时保持高精度定位和全局几何保真。具体包括,提出了一种智能超表面辅助的低空通信与定位增强系统,通过在关键位置部署多个智能超表面,主动反射基站信号到空中区域,增强无人机可用的信号机会,同时改善多径分量的可控性,从而提升通信信号质量。进而,设计了一种半监督的孪生神经网络构建信道图,将高维信道状态信息映射到无人机坐标空间。通过在损失函数中引入统一流形近似与投影作为全局不相似度约束,同时结合少量标注位置数据,实现局部与全局几何结构的同时保持,避免了传统方法中对多径参数提取和大规模指纹采集的依赖。最后,将信道图方法应用于无人机导航,并开发了从环境建模、数据采集、信号处理到算法实现和评估的端到端仿真平台。通过在复杂城市环境中的Sionna射线追踪仿真验证,该方法在少量标注数据下仍能实现高精度定位。所提方法优于现有指纹识别和无监督信道图方法,并且在视距和非视距条件下均保持稳健性能。

综上所述,现有研究虽在低空无人机轨迹规划、

波束管理、多站切换及资源协同等方面取得进展,但各子问题多为单一目标优化,缺乏跨层协同框架;对动态环境与复杂干扰的建模能力有限;多站协同与跨节点融合机制仍不完善;同时,算法在大规模场景下面临实时性与可扩展性挑战。针对上述问题,未来研究可聚焦于构建通感算控一体化的协同优化框架,发展面向动态环境的自适应优化方法,强化分布式协同决策机制,并设计低复杂度、高可扩展的算法,以支撑大规模低空网络的高效运行。

3.5 感知驱动的计算资源分配

感知驱动的计算资源管理和任务优化是低空经济和车联网等应用中提升系统效率的关键。在复杂的低空飞行环境中,如何有效地进行计算卸载、资源分配和任务调度,以确保实时性和系统性能,成为亟待解决的问题。针对这些挑战,本文综述了多种创新的优化方法,包括多智能体深度Q网络、空口聚合联邦学习以及基于数字孪生的联合优化框架。

3.5.1 计算卸载与任务调度

由于低空飞行环境中的多样性需求、有限的计算资源和通信带宽,任务卸载和资源调度面临许多挑战。文献[67]提出了一种基于数字孪生的多智能体移动边缘计算框架,该框架实时采集和优化数据,协同无人机处理时延敏感任务。通过联合优化计算资源分配、用户发射功率和资源块分配,文章提出了多智能体深度Q网络算法,显著降低了所有用户的长期平均服务时延。文献[68]提出了多智能体 Actor-Critic 排队框架,结合排队论和强化学习,通过最小化长期时延并最大化吞吐量来优化计算资源的分配。该框架支持实时任务调度与快速自适应,并通过数学证明了算法的收敛性,实验证明了算法的有效性。

3.5.2 分布式智能

分布式智能在低空经济和车联网等应用中至关重要,它通过在多个节点之间共享计算和感知任务,实现了资源的高效利用和决策的智能化。然而,分布式智能面临诸多挑战,包括通信开销高、任务分配不均、系统同步困难以及实时性要求严格。针对这些问题,文献[69]提出了一种多自主低空飞行器赋能的空口聚合联邦学习系统,结合感知、通信和计算的联合优化,通过交替优化下行功率、上行收发机设计和低空飞行器部署位置,显著提升了联邦学习的收敛速度和更新精度。该方法有效降低了通信开销,提高了系统的灵活性和效率,为分布式智能在低空经济环境中的应用提供了创新的解决方案。

3.5.3 通感算协同优化

随着无人机辅助的边缘计算系统的兴起,如何高效地进行计算卸载、资源分配和任务调度,以确保实

时性和系统性能,成为了亟待解决的问题。然而,在复杂的低空环境中,实现高效的通感算资源优化面临诸多挑战,包括高通信开销、资源分配的动态性、异构系统的协调和任务的时延要求等。为应对这些挑战,相关研究提出了多种创新方案:文献[70]通过引入数字孪生技术和多智能体深度Q网络,优化了车联网中的计算卸载与资源分配,显著降低了用户的服务延迟;文献[71]提出了一种基于异步优势 Actor-Critic 的多无人机协同算法,优化了通信、功率和计算资源的分配;文献[72]提出了一种数字孪生辅助的低空移动边缘计算架构,利用 Lyapunov 优化和博弈论策略实现了卫星选择、计算卸载和资源分配的联合优化,有效提升了物联网设备的 QoS。这些研究通过不同的优化策略和技术手段,成功地提高了低空经济应用中通感算协同系统的性能,并在实际场景中展现了较好的可扩展性和鲁棒性。

综上所述,尽管现有研究在计算卸载、分布式智能及通感算协同优化方面取得了一定进展,但仍存在若干不足:一是多数方法依赖集中式或半集中式优化框架,难以适应低空环境中高度动态与分布式的系统特性;二是对通信、计算与感知资源间强耦合关系刻画不足,跨层协同优化能力有限;三是分布式智能方法仍面临通信开销大、收敛速度与稳定性受限等问题。针对上述问题,未来研究可聚焦于发展轻量化、分布式与自适应的通感算协同优化方法,强化跨层资源联合建模与决策机制,引入数据驱动与模型驱动融合策略以提升系统鲁棒性与泛化能力。

3.6 感知驱动的安全管理

现有低空通感一体化安全研究主要面向隐蔽性探测威胁、主动干扰与对抗性攻击、被动窃听与信息泄露威胁等展开,相关文献综述如下。

3.6.1 隐蔽性威胁

随着无人机应用的广泛扩展,如何在存在多个监视者的环境中确保数据传输的隐蔽性,成为保障系统安全和通信质量的关键挑战。此外,任务卸载、感知定位和雷达信号的干扰管理也为隐蔽性设计带来了更高的复杂性。文献[73]通过推导监视者检测错误概率的闭式表达式,提出了一个联合优化通信、感知与计算资源及无人机轨迹的模型,旨在最小化系统能耗并满足隐蔽性、SINR、QoS 和轨迹因果性等约束。通过基于交替优化的算法,有效解决了该问题,并揭示了隐蔽性、感知精度和服务质量之间的权衡关系,为低空经济系统设计提供了重要的指导。

3.6.2 干扰与对抗性威胁

在低空经济的蓬勃发展,反制未经授权的无人机和恶意信道接入攻击成为了保障低空网络安全和

稳定的关键任务。针对这一挑战,文献[74]提出了一种基于双功能 MIMO 蜂窝系统的波束成形联合设计方案,在确保合法用户通信的同时,反制非法无人机。此外,文献[75-76]通过博弈论框架,提出了 Stackelberg 博弈模型,在攻击条件下优化 SINR 和感知数据的信息时效,有效缓解了恶意接入对通感一体化性能的影响。通过设计逆向归纳算法,该方法能够求解多层博弈均衡,最大化各参与方效用,并证明了其存在性与唯一性。

3.6.3 窃听威胁

窃听威胁是一个严重的安全问题,尤其是在存在移动全双工窃听者的情况下,如何在保证通信安全的同时提高安全速率能效成为了关键挑战。窃听者的动态行为和其对通信系统的干扰使得安全速率和能效优化问题变得更加复杂,特别是在无人机轨迹设计、功率分配和人工噪声生成之间存在强耦合关系的情况下,求解该问题面临较高的维度和强非凸性。为了解决这一问题,文献[77]提出了一种基于功率成本因子的双延迟深度确定性策略梯度算法,将博弈论功率分配机制与 TD3 框架结合,成功应对了高维耦合优化问题。文献[78]通过引入波束图误差、保密速率和信息时效作为感知、保密通信与计算的性能指标,构建了一个多目标优化问题。在确保通信保密性和低探测概率的前提下,优化感知精度与计算性能的平衡。

综上所述,现有低空通感一体化安全研究虽取得进展,但仍缺乏统一的多威胁安全框架,对通感算资源的安全耦合建模不充分,且在动态对抗环境下的鲁棒性与实时性有限。未来可聚焦多威胁协同防护机制,发展自适应与鲁棒安全优化方法,并推动低复杂度模型与系统级验证,以提升实际应用能力。

3.7 新型空中载体

在低空经济中,搭载智能超表面和可移动天线阵列的无人机是提升通信性能和灵活性的关键^[79-81]。然而,这些技术面临窃听攻击、信道变化等挑战,如何优化系统性能并确保通信安全成为研究重点。本章将探讨相关研究如何通过创新算法解决这些问题,提升系统的安全性和能效。

3.7.1 智能超表面

文献[82]提出了一种基于机载智能超表面的安全通信方案,将语义通信与通感一体化相结合,通过联合优化无人机轨迹、智能超表面相位调控和频谱分配,最大化保密语义速率并降低能耗。该方法通过引入带权衰减的深度双确定性策略梯度和对偶深度 Q 网络,有效提升了海上通信中的安全性与能效。仿真结果表明,所提方案显著提升了低空海事环境下的综

合性能。在城市低空通信中,文献[83]则探索了通过无人机搭载的智能超表面提升毫米波通信的可达性与鲁棒性,尤其在建筑遮挡导致的视距链路衰减问题中。通过联合优化智能超表面相位调控和无人机轨迹,并结合神经情景控制,采用深度强化学习方法,有效提升了通信系统的传输速率并最小化了无人机的能耗。仿真结果表明,该算法在多个性能指标上优于传统方法。这些研究展示了通过智能超表面和语义通信技术提升低空经济中的通信安全性、可靠性和能效的创新方法。

3.7.2 可移动天线阵列

无人机的高机动性和灵活部署能力使其成为理想的空中可移动天线平台,能够在动态环境中实时调整天线阵列的位置,从而优化信号传输和覆盖。然而,如何高效地在复杂环境中进行天线位置调节、资源分配和信道优化,仍然面临诸多挑战,包括高维非凸优化问题、用户间干扰和天线位置的耦合性等。针对这些问题,文献[84-85]提出了一种基于无人机集群使能的两级可移动天线系统,通过联合优化无人机集群的三维部署位置和可移动天线的位置调节,最大化所有地面用户设备的最小可达速率。该方法有效消除了用户间干扰,并在多用户通信场景中显著提高了通信能力。为求解复杂的非凸优化问题,设计了一种高效的交替优化算法,并通过数值结果验证了该方法的优越性。另外,文献[86]研究了一种基于可移动天线阵列的通感一体化低空平台系统,该系统通过优化信息波束成形与感知波束成形,提高了系统吞吐能力和感知性能。为了解决速率最大化问题,文章提出了一种基于交替优化的求解方法,成功地在保证感知要求的同时,提升了数据速率和波束增益。这些研究展示了通过优化天线位置和资源分配,结合无人机机动性和可移动天线阵列技术,能够有效提升低空经济中通信和感知系统的性能,并为多用户环境中的资源优化提供了创新方案。

4 未来研究方向

基于生成式 AI 的环境-信道知识库构建与动态反演:尽管现有研究已开展了初步的低空通感一体化信道建模,但多局限于特定场景且缺乏大规模、多频段的实测数据支撑。未来可探索利用生成式人工智能^[87-91]构建数字化低空信道知识库。通过扩散模型或生成对抗网络对稀疏实测数据进行增强,实现复杂城市三维环境下信道特征的自动补全与动态反演^[28,92]。该研究路径有望解决低空非平稳时变信道建模难题,实现从传统的统计建模向场景感知自适应建模的跨越,为系统性能评估提供更精准的物理

基础。

面向大规模无人机群的感通算控深度闭环协同机理:目前的通感一体化研究主要聚焦于感知驱动的通信资源分配,尚未充分考虑感知与控制、计算之间的强耦合关系^[31, 93-94]。未来应致力于构建面向低空集群任务的感知、通信、计算、控制四位一体深度融合框架。核心研究点在于定义一套超越传统 QoS 的控制性能指标,研究如何根据无人机群的任务紧急度与轨迹精度需求,实时反馈并调节底层的通感资源分配。这种跨层闭环协同机理将有效解决大规模无人机群在复杂任务执行中的时延与可靠性瓶颈。

低空复杂电磁环境下的特征提取与抗干扰鲁棒性增强:随着低空飞行器密度的增加,同频干扰、多径杂波以及非法无人机的恶意欺骗成为威胁通感一体化系统可靠性的关键因素^[93, 95]。未来研究需突破低空复杂电磁环境下的微弱信号特征提取技术,利用通感一体化信号的感知能力建立实时的频谱态势地图。通过深度学习识别非合作目标的微多普勒特征,并结合智能超表面等技术主动重塑空间电磁环境。这种软硬件协同的抗干扰机制将显著提升系统在极端动态环境下的感知稳健性与通信安全性。

数据辅助的高性能低空对地成像与环境语义理解:现有的通感融合多侧重于点目标的定位与跟踪,对于大尺度环境的成像识别研究尚处于起步阶段。未来的一个重要方向是研究利用原生通信信号(如 OFDM 信号)进行大范围、高分辨率的对地 SAR 成像。通过引入数据辅助算法消除通信随机数据对成像相干性的影响,并进一步结合计算机视觉技术提取地面路网、航道障碍物等的语义信息。这一方向将使通信终端具备类雷达的环境测绘功能,为低空经济提供精细化的数字孪生底座。

业务连续性导向的感知-通信-交管跨域协议栈重构:在低空空域管理中,感知失效或通信抖动会直接演变为飞安风险^[96]。现有文献缺乏将底层通感参数与上层空中交通管理协议对接的研究。未来需探索重构一套跨层联合容错协议栈,建立感知精度置信度与飞行安全间隔的映射模型。当感知能力受限时,协议栈应能自动触发确定性的冗余通信机制或调整飞行调度优先级,确保在通感失能瞬间,系统仍具备基本的避障与降级运行能力。这一研究对于构建安全可信的低空大脑具有重要的工程实践意义。

5 结束语

本文系统综述了面向低空经济的通感一体化系统架构与关键技术,通过对低空典型场景需求的深度解构,剖析了涵盖系统架构、信道表征及立体覆盖在

内的关键技术体系,探讨了感知驱动的移动性管理、通信覆盖增强、计算资源和安全管理等关键技术及其应用挑战,并提出未来研究方向,展望了面向低空经济的通感一体化技术发展趋势,为低空通感网的标准化构建提供参考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 政府工作报告(第十四届全国人民代表大会第二次会议)[EB/OL]. (2024-03-20)[2026-01-05]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/zys/sjdt/202403/t20240320_1365089.html.
- [2] 中国共产党中央委员会. 中国共产党第二十届中央委员会第四次全体会议公报[EB/OL]. (2025-10-23)[2026-01-05]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202510/content_7045444.htm.
- [3] International Telecommunication Union. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond[EB/OL]. (2025-10-23)[2026-01-05]. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160/en>.
- [4] 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.
- [5] Liu Fan, Cui Yuanhao, Masouros C, et al. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [6] IMT-2030(6G)推进组. 6G 典型场景和关键能力[EB/OL]. (2022-08-22)[2026-01-05]. <https://www.imt2030.org.cn/html/default/zhongwen/xinwendongtai/1561631590004572162.html index=4>.
- [7] IMT-2030(6G)推进组. 6G 无线系统设计原则和典型特征[EB/OL]. (2023-12-06)[2026-01-05]. <https://www.imt2030.org.cn/html/default/zhongwen/xinwendongtai/732311991042777089.html index=4>.
- [8] 王勇, 杨宇森, 曾继民, 等. 低空经济视角下低空科技对低空产业发展的影响[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(10): 1853-1866.
Wang Yong, Yang Yusen, Zeng Jimin, et al. Impact of low-altitude technology on low-altitude industry development from perspective of low-altitude economy[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(10): 1853-1866. (in Chinese)
- [9] Zhou Di, Sheng Min, Li Jiandong, et al. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: A survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys

- & Tutorials, 2023, 25(2): 975-1019.
- [10] Xiao Yue, Ye Ziqiang, Wu Mingming, et al. Space-air-ground integrated wireless networks for 6G: Basics, key technologies, and future trends[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(12): 3327-3354.
- [11] Huang Yuhong, Ding Haiyu, Chen Weiyan, et al. Towards a low-altitude aerial intelligent network: Vision, challenges, and key technologies[J]. *China Communications*, 2025, 22(9): 1-21.
- [12] Lu Mingquan, Yao Zheng, Shen Yuan, et al. Space-air-ground collaborative positioning, navigation and timing architecture and key technologies for low-altitude economy[J]. *China Communications*, 2025, 22(9): 48-80.
- [13] Wang Yixian, Sun Geng, Sun Zemin, et al. Toward realization of low-altitude economy networks: Core architecture, integrated technologies, and future directions[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 11(5): 2788-2820.
- [14] Dong Chao, Wang Ying, Wang Wei, et al. Low-altitude centric space-air-ground integrated network: Evolutions, challenges, and countermeasures[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(23): 50632-50641.
- [15] Jin Haijia, Yuan Weijie, Wu Jun, et al. Advancing the control of low-altitude wireless networks: Architecture, design principles, and future directions[J]. *npj Wireless Technology*, 2026, 2(1): 2.
- [16] Wu Jun, Yang Yaoqi, Yuan Weijie, et al. Low-altitude wireless networks: A comprehensive survey[PP/OL]. V2. arXiv (2025-11-24)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.11607>.
- [17] 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(4): 859-875.
Hu Yanglin, Zhang Tiankui, Li Bo, et al. A survey on UAV-enabled integrated sensing and communication networking and technologies[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(4): 859-875. (in Chinese)
- [18] 董超, 崔灿, 贾子晔, 等. 面向低空智联网的多维信息统一表征技术综述[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(5): 1215-1229.
Dong Chao, Cui Can, Jia Ziye, et al. Survey of unified representation technology of multi-dimensional information for low altitude intelligent network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(5): 1215-1229. (in Chinese)
- [19] Ma Dingyou, Tang Jun, Zhang Qixun, et al. Integrated sensing and communications network design and key technologies for low-altitude economy[J]. *China Communications*, 2025, 22(9): 81-102.
- [20] 朱政宇, 温鑫平, 李兴旺, 等. 面向低空经济的通感一体化关键技术[J]. *电子与信息学报*, 2026, 48(2): 471-486.
Zhu Zhengyu, Wen Xinping, Li Xingwang, et al. An overview on integrated sensing and communication for low altitude economy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2026, 48(2): 471-486. (in Chinese)
- [21] Ahmed M, Soofi A A, Khan F, et al. Toward a sustainable low-altitude economy: A survey of energy-efficient RIS-UAV networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(24): 51951-51975.
- [22] Cai Lingyi, Wang Jiacheng, Zhang Ruichen, et al. Secure physical layer communications for low-altitude economy networking: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2026, 28: 2497-2530.
- [23] Sun Yan, Liu Yinqiu, Guo Shaoyong, et al. A synergy of computing power networks and low-altitude economy intelligent communications: Challenges, design principles, and research directions[PP/OL]. V1. arXiv (2025-09-28)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.23810>.
- [24] Huang Changqing, Fang Shifeng, Wu Hua, et al. Low-altitude intelligent transportation: System architecture, infrastructure, and key technologies[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2024, 42: 100694.
- [25] Yao Weixiang, Liu Changliang, Liu Yuzhou, et al. Unmanned aerial vehicle payload technology applications in agriculture and other low-altitude scenarios: A review[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1721484.
- [26] 未来移动通信论坛, 数字低空工作组. 低空经济场景应用与通信需求白皮书[EB/OL]. (2025-04-15)[2026-01-05]. <https://www.g6gconference.com/upload/file/20250415174470695147.pdf>.
- [27] He Dongxuan, Yuan Weijie, Wu Jun, et al. Ubiquitous UAV communication enabled low-altitude economy: Applications, techniques, and 3GPP's efforts[J]. *IEEE Network*, 2026, 40(1): 115-122.
- [28] Song Yuxuan, Zeng Yong, Yang Yuhang, et al. An overview of cellular ISAC for low-altitude UAV: New opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2025, 63(12): 88-95.
- [29] He Shizhao, Wang Jiacheng, Liang Yingchang, et al. Satellite-assisted low-altitude economy networking: Concepts, applications, and opportunities[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2026, 33(3): 177-186.
- [30] Toka L, Konrad M, Pekar A, et al. Integrating the skies

- for 6G: Techno-economic considerations of LEO, HAPS, and UAV technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(11): 44-51.
- [31] Yuan Weijie, Cui Yuanhao, Wang Jiacheng, et al. From ground to sky: Architectures, applications, and challenges shaping low-altitude wireless networks[PP/OL]. V2. arXiv (2025-06-17)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.12308>.
- [32] Abdalla A S, Marojovic V. Next generation intelligent low-altitude economy deployments: The O-RAN perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2026, 33(1): 20-28.
- [33] Khawaja W, Guvenc I, Matolak D W, et al. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2361-2391.
- [34] Lyu Yue, Wang Wei, Sun Yuzhe, et al. Low-altitude UAV air-to-ground multilink channel modeling and analysis at 2.4 and 5.9 GHz[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(9): 2135-2139.
- [35] Yang Xiaobo, Zhai Daosen, Zhang Ruonan, et al. A geometry-based stochastic channel model for UAV-to-ground integrated sensing and communication scenarios[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(4): 5307-5320.
- [36] Saboor A, Cui Zhuangzhuang, Colpaert A, et al. Trajectory-aware air-to-ground channel characterization for low-altitude UAVs using MaMIMO measurements[PP/OL]. V1. arXiv (2025-10-27)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.23465>.
- [37] 莫清媚, 张宇翔, 刘亚萌, 等. 面向3GPP ISAC标准化的低空无人机场景路径损耗测量与建模[J]. 物联网学报, 2024, 8(3): 16-25.
- Mo Qingmei, Zhang Yuxiang, Liu Yameng, et al. Path loss measurement and modeling for low-altitude UAV scenarios towards 3GPP ISAC standadization[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2024, 8(3): 16-25. (in Chinese)
- [38] Liu Ting, Guan Ke, He Danping, et al. Object-oriented integrated sensing and communications (ISAC) channel modeling for low-altitude 3D spaces[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2026, 44: 805-819.
- [39] Liu Ting, Guan Ke, He Danping, et al. 6G integrated sensing and communications channel modeling: Challenges and opportunities[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2024, 19(2): 31-40.
- [40] Wan Jiahua, Ren Hong, Pan Cunhua, et al. Sensing capacity for integrated sensing and communication systems in low-altitude economy[J]. IEEE Communications Letters, 2025, 29(6): 1240-1244.
- [41] Huang Yiqian, Wu Gang, Yang Ping, et al. An adaptive MDS-coded OFDM waveform for low-altitude ISAC: Design and optimization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2026, 44: 531-544.
- [42] Luo Hongliang, Chu Zhonghua, Zhang Tengyu, et al. AirGuard: UAV and bird recognition scheme for integrated sensing and communications system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2026, 44: 835-848.
- [43] Zhu Keying, Zhou Xingyu, Yang Jie, et al. Super-resolution ISAC receivers: An MCMC-based gridless sparse Bayesian learning approach[PP/OL]. V1. arXiv (2025-11-21)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.17062>.
- [44] Tang Jun, Yu Yiming, Pan Cunhua, et al. Cooperative ISAC-empowered low-altitude economy[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(5): 3837-3853.
- [45] Wu Haisu, Ren Hong, Pan Cunhua, et al. A two-stage ISAC framework for low-altitude economy based on 5G NR signals[PP/OL]. V1. arXiv (2025-11-18)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.14529>.
- [46] Zhang Zhenkun, Xu Yining, Pan Cunhua, et al. Cooperative bistatic ISAC systems for low-altitude economy[PP/OL]. V2. arXiv (2025-11-18)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.18067>.
- [47] Yan Kang, Xiang Luping, Zheng Kang, et al. UAV-Assisted integrated active and passive sensing with communication: A hybrid-SAC approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2026, 75(4): 6323-6334.
- [48] Yan Shaoqiang, Luo Hongliang, Yang Ping, et al. UAV trajectory monitoring for integrated sensing and communications system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2026, 25: 2733-2747.
- [49] Huang Yixuan, Yang Jie, Xia Shuqiang, et al. Learned off-grid imager for low-altitude economy with cooperative ISAC network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2026, 25: 3333-3348.
- [50] Huang Yixuan, Yang Jie, Wen Chaokai, et al. Cooperative ISAC network for off-grid imaging-based low-altitude surveillance[C]//2025 IEEE 101st Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2025: 1-7.
- [51] Du Zhen, Liu Fan, Yang Jie, et al. Integrating low-altitude SAR imaging into UAV data backhaul[PP/OL]. V1.

- arXiv (2025-12-26) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.21937>.
- [52] Zheng Bowen, Liu Fan. Random signal design for joint communication and SAR imaging towards low-altitude economy[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(10): 2662-2666.
- [53] Ye Xiaowen, Mao Yuyi, Yu Xianghao, et al. Integrated sensing and communications for low-altitude economy: A deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2026, 25: 351-367.
- [54] Cheng Gaoyuan, Song Xianxin, Lyu Zhonghao, 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.
- [55] Jiang Yifan, Wu Qingqing, Hui Hongxun, et al. Low-altitude UAV tracking via sensing-assisted predictive beamforming[PP/OL]. V1. arXiv (2025-09-16) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.12698>.
- [56] Wang Zhiying, Chen Jinghui, Sun Gang, et al. Joint energy-efficient task scheduling and trajectory optimization for multi-UAV MEC networks in low-altitude economy[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2026, 12: 3058-3072.
- [57] Li Yang, Zhang Ruichen, Liu Yinqiu, et al. Efficient on-board vision-language inference in UAV-enabled low-altitude economy networks via LLM-enhanced optimization[PP/OL]. V1. arXiv (2025-10-11) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.10028>.
- [58] Wang Yiqian, Huang Jianping, Shan Feng, et al. Optimizing joint speed and altitude schedule for UAV data collection in low-altitude airspace[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2025, 24(12): 13600-13614.
- [59] Li Haojin, Zhang Anbang, Sun Chen, et al. Empower low-altitude economy: A reliability-aware dynamic weighting allocation for multi-modal UAV beam prediction[PP/OL]. V1. arXiv (2025-12-30) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.24324>.
- [60] Zhao Chuanbin, Feng Yuan, Luo Hongliang, et al. Networked ISAC-based UAV tracking and handover toward low-altitude economy[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(9): 7670-7685.
- [61] Li Jiaxuan, Chen Yilong, Liu Fan, et al. Channel knowledge map enabled low-altitude ISAC networks: Joint air corridor planning and base station deployment[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2026, 15: 975-979.
- [62] Zhou Sheng, Xie Bowen, Shen Daohong, et al. Agile coverage for low-altitude aerial intelligent networks: A blended hyper-cellular solution[J]. *China Communications*, 2025, 22(9): 22-36.
- [63] Wei Qing, Li Ruoguang, Bai Wenle, et al. Multi-UAV-enabled energy-efficient data delivery for low-altitude economy: Joint coded caching, user grouping, and UAV deployment[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(14): 27519-27532.
- [64] Zheng Xiaoya, Sun Geng, Li Jiahui, et al. UAV swarm-enabled collaborative post-disaster communications in low altitude economy via a two-stage optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2025, 24(11): 11833-11851.
- [65] Wu Pengfei, Xiao Fu, Sha Chao, et al. Service-oriented segmented trajectory design for low-altitude UAV-assisted MEC networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2026, 25(2): 2027-2044.
- [66] Sun Kexin, Yang Jie, Wen Chaokai, et al. Channel charting for UAV navigation in RIS-assisted ISAC systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Electromagnetics, Antennas and Propagation*, 2025, 1(1): 223-236.
- [67] Hu Bintao, Liu Hengyan, Du Jianbo, et al. MADQN-enhanced computation offloading and resource allocation for 6G low-altitude economy vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2026, 12: 2603-2617.
- [68] Xue Lei, Hu Yuwen, Ye Haichuan, et al. Dynamic task allocation of edge-cloud system for low-altitude economy via multiagent actor-critic-queuing computational framework[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2026, 13(4): 5655-5668.
- [69] Fu Yang, Qin Peng, Tang Guoming, et al. Joint design of sensing, communication, and computation for multi-AAV-enabled over-the-air federated learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(9): 13909-13924.
- [70] Liu Congcong, Zhao Junhui, Li Jiamin, et al. UAV aided integrated sensing, communication and computing: Optimization via federated learning[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2026, 75(4): 6045-6058.
- [71] Hou Peng, Huang Yi, Zhu Hongbin, et al. Distributed DRL-based integrated sensing, communication, and computation in cooperative UAV-enabled intelligent transportation systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(5): 5792-5806.
- [72] He Long, Sun Geng, Sun Zemin, et al. Digital twin-assist-

- ed space-air-ground integrated multi-access edge computing for low-altitude economy: An online decentralized optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2026, 25(3): 4363-4380.
- [73] Mao Weihao, Lu Yang, Ai Bo, et al. Covert communications in MEC-based networked ISAC systems towards low-altitude economy[PP/OL]. V1. arXiv (2025-07-24)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.18194>.
- [74] Li Zhuoran, Gao Zhen, Wang Kuiyu, 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.
- [75] Wang Jiacheng, Zhao Changyuan, Niyato D, et al. Stackelberg game-driven defense for ISAC against channel attacks in low-altitude networks[PP/OL]. V1. arXiv (2025-11-09)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.06359>.
- [76] Wang Jiacheng, He Jialing, Sun Geng, et al. Safeguarding ISAC performance in low-altitude wireless networks under channel access attack[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2026, 21: 3108-3122.
- [77] Liu Fuhao, Mu Junsheng, Xu Wentao, et al. Toward secure and energy-efficient ISAC in low-altitude IoT: A game-theoretic DRL framework with adaptive sensing[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(24): 53202-53214.
- [78] Wang Jiacheng, Zhao Changyuan, He Jialing, et al. Security-aware joint sensing, communication, and computing optimization in low altitude wireless networks[PP/OL]. V1. arXiv (2025-11-03)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.01451>.
- [79] Wang Honghao, Wu Qingqing, Jiang Yifan, et al. Reconfigurable airspace: Synergizing movable antenna and intelligent surface for low-altitude ISAC networks[PP/OL]. V1. arXiv (2025-11-13)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.10310>.
- [80] Li Shuaijun, Tang Jie, Zheng Beixiong, et al. Rotatable antenna system empowered low-altitude economy: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2026, 33(1): 116-123.
- [81] Liu Wenchao, Zhang Xuhui, Wang Chunjie, et al. Fluid antenna systems meet low-altitude wireless networks: Fundamentals, opportunities, and future directions[PP/OL]. V2. arXiv (2025-09-25)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.13250>.
- [82] Liu Shuai, Yang Helin, Du Honglin. Aerial RIS-assisted integrated sensing and semantic communication for low-altitude maritime intelligent networks[C]//2025 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.
- [83] Xie Wenwen, Sun Geng, Liu Bei, et al. Joint optimization of UAV-carried IRS for urban low altitude mmWave communications with deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2026, 25(1): 1381-1397.
- [84] Lu Haiquan, Zeng Yong, Ma Shaodan, et al. Wireless communication for low-altitude economy with UAV swarm enabled two-level movable antenna system[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2026, 25: 16463-16479.
- [85] Lu Haiquan, Zeng Yong, Ma Shaodan, et al. Enabling aerial movable antenna system with UAV swarm for low-altitude economy[C]//2025 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.
- [86] Kuang Ziming, Liu Wenchao, Wang Chunjie, et al. Movable-antenna array empowered ISAC systems for low-altitude economy[C]//2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Piscataway: IEEE, 2024: 776-781.
- [87] Wu Jun, Yuan Weijie, Zhang Xiaoqi, et al. Toward multifunctional LAWNs with ISAC: Opportunities, challenges, and the road ahead[PP/OL]. V1. arXiv (2025-08-24)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.17354>.
- [88] Lyu Zhonghao, Gao Yulan, Chen Junting, et al. Empowering intelligent low-altitude economy with large AI model deployment[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2026, 33(1): 64-72.
- [89] Yang Yaoqi, Chen Yong, Wang Jiacheng, et al. Embodied AI-empowered low altitude economy: Integrated sensing, communications, computation, and control (ISC3) [PP/OL]. V1. arXiv (2024-12-28)[2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19996>.
- [90] Sun Geng, Qi Jia, Zhang Chuang, et al. Generative artificial intelligence for beamforming in low-altitude economy[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2026, 33(4): 117-127.
- [91] Zhao Changyuan, Wang Jiacheng, Zhang Ruichen, et al. Generative AI-enabled wireless communications for robust low-altitude economy networking[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2026, 33(2): 143-151.
- [92] Chen Junting, Li Bowen, Sun Hao, et al. Predictive communications for low-altitude networks[J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2026, 9(3): 25-32.

- [93] Xu Jinpeng, Zhou Lin, Zhang Shuowen, et al. Intelligent foundation model-enabled low-altitude FANETs: Integrating communication, control, sensing, and security[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2026, 9(2): 84-92.
- [94] Sun Yan, Liu Yinqiu, Guo Shaoyong, et al. Toward integrated air-ground computing and communications: A synergy of computing power networks and low-altitude economy network[PP/OL]. V1. arXiv (2025-11-24) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.18720>.
- [95] Song Mengshu, Lin Yijing, Wang Jiacheng, et al. Trustworthy intelligent networks for low-altitude economy[J]. IEEE Communications Magazine, 2025, 63(7): 72-79.
- [96] Jia Ziyue, He Jia, Cui Yuanhao, et al. Hierarchical low-altitude wireless network empowered air traffic management[PP/OL]. V1. arXiv (2025-09-03) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.03386>.

作者简介



杨 杰 女,1993年出生于安徽省六安市。现为东南大学自动化学院讲师、硕士生导师。主要研究方向为通信感知一体化、毫米波通信、人工智能。中国电子学会会员编号:E190030248M。
E-mail: yangjie@seu.edu.cn



袁伟杰 男,1991年出生于四川省达州市。现为南方科技大学自动化与智能制造学院副教授、博士生导师。主要研究方向为通感一体化、车联网、低空无线网络通信、OTFS调制等。中国电子学会会员编号:E190024954M。
E-mail: yuanwj@sustech.edu.cn



刘 凡 男,1992年出生于湖北省潜江市。现为东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为6G无线通信、通信感知一体化、低空无线网络。中国电子学会会员编号:E190022709M。
E-mail: fan.liu@seu.edu.cn



李 潇 女,1982年出生于安徽省蚌埠市。现为东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为智能超表面辅助的移动通信、人工智能在无线通信中的应用等。中国电子学会会员编号:E190028463S。
E-mail: li_xiao@seu.edu.cn



郑 乐 男,1987年出生于河北省石家庄市。现为北京理工大学雷达技术研究院教授、博士生导师。主要研究方向为雷达信号与信息处理、通信感知一体化。
E-mail: le.zheng.cn@gmail.com



金 石 男,1974年出生于安徽省黄山市。现为东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为无线通信、随机矩阵理论和信息论。中国电子学会会员编号:E190009596F。
E-mail: jinshi@seu.edu.cn