

# 通感低空覆盖关键技术与组网



## Key Technologies and Networking in ISAC for Low-Altitude Coverage

林旭/LIN Xu, 刘涛/LIU Tao, 张诗壮/ZHANG Shizhuang,  
施嵘/SHI Rong

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250313.0955.002.html>

网络出版日期: 2025-03-13

收稿日期: 2024-12-20

**摘要:** 通感一体化 (ISAC) 技术深度融合通信与感知能力, 将在重点低空区域实现通信与感知的无缝覆盖。为充分发挥面向低空经济的 ISAC 系统的潜力, 需要重点研究低空覆盖下通感一体化的关键技术与组网技术。系统阐述了波束成形与波束跟踪技术、人工智能 (AI) 赋能的 ISAC 技术、通信感知相互辅助增强技术、基于智能反射面 (IRS) 的 ISAC 技术, 以及通感一体化组网技术等。这些关键技术与组网技术, 能够有效提升低空覆盖场景下的 ISAC 系统的性能。

**关键词:** 通感一体化; 低空覆盖; 人工智能; 智能反射面; 通感一体化组网

**Abstract:** Integrated sensing and communication (ISAC) technology deeply integrates communication and sensing capabilities, and is anticipated to attain seamless communication and sensing coverage for critical low-altitude areas. To fully exploit the potential of ISAC systems oriented towards the low-altitude economy, it is necessary to focus on the key technologies and networking technologies. Beamforming and beam tracking technologies, artificial intelligence (AI)-empowered ISAC technologies, mutual assistance and enhancement between communication and sensing technologies, ISAC technologies based on intelligent reflecting surfaces (IRS), and ISAC networking technologies are systematically described. These key technologies and networking technologies can effectively improve the performance of the ISAC system in low-altitude coverage scenarios.

**Keywords:** ISAC; low-altitude coverage; AI; IRS; ISAC networking

**引用格式:** 林旭, 刘涛, 张诗壮, 等. 通感低空覆盖关键技术与组网 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 53-57. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501009

**Citation:** LIN X, LIU T, ZHANG S Z, et al. Key technologies and networking in ISAC for low-altitude coverage [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 53-57. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501009

## 1 通感低空覆盖场景

### 1.1 低空经济热潮

低空经济以低空空域资源为基石, 目前已在多个领域掀起发展热潮。2021年, 低空经济的概念首次被写入国家规划。2024年12月27日, 国家发展和改革委员会宣布成立低空经济发展司。可以预见, 低空经济将在中国迎来更加明晰的未来战略规划和政策引导。

技术驱动是低空经济发展的重要推动力和根本保障<sup>[1]</sup>。无人机技术、人工智能 (AI) 技术等都是其发展的强劲动力。其中, 通感一体化 (ISAC) 技术作为信息化技术的关键代表, 在传统基站通信功能的基础上附加上了感知能力, 可用于航迹监测、低空安防等, 已成为业界公认的关键技术。

### 1.2 关键应用场景

通感一体化是未来通信系统的一个重要方向<sup>[2-4]</sup>, 有机

结合了感知与通信的功能, 使得网络不仅仅传递信息, 还能够实时感知环境和用户状态, 为低空覆盖各种应用场景提供更为智能的服务。如图1所示, 为了保障低空覆盖场景的应用, 通感一体化系统中的通信与感知功能需要实现融合协作。中兴通讯推出的低频以及高频毫米波的通感一体化基站兼具通信和感知功能, 采用了连续波和脉冲波组合的感知结构设计以及大张角的大规模天线阵列设计, 可满足低空全覆盖的要求, 助力低空场景的应用。

低空覆盖下无人机的可靠通信能力是低空通信的重要保障<sup>[5]</sup>, 其适用于外卖快递、医疗冷链、巡查巡检和应急救援等多种应用场景。低时延通信可保障飞行状态的实时上报。通感基站需要提供低空大面积连续覆盖, 保证通信链路稳定可靠, 满足边缘速率要求<sup>[6]</sup>。

低空安防是低空覆盖需要支持的关键场景之一, 涉及非法入侵检测、无人机航线保护等。无人机非法入侵场景通常发生在无人驾驶航空器管制空域。对此, 通感基站需要对该

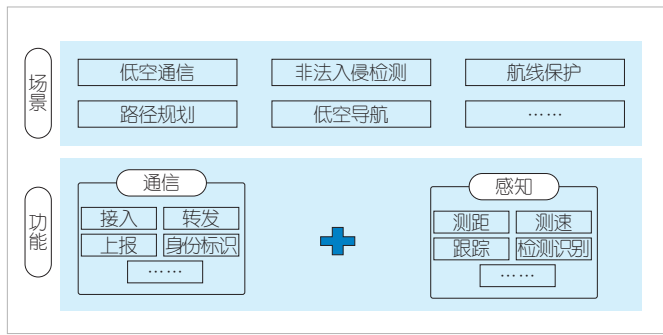


图1 低空覆盖关键应用场景及主要功能示意图

区域进行全覆盖感知，不仅要满足探测距离、探测高度、顶空盲区、感知精度和虚警概率等要求<sup>[6]</sup>，还需要借助探测手段识别飞鸟、不同型号无人机等目标，并对非法飞行进行监测。

针对无人机路径规划和跟踪导航，通感基站会辅助进行无人机三维位置等信息的感知。当无人机在自身导航系统失灵等特殊情况下偏离预设路线或即将发生冲突碰撞时，通感基站及时发挥作用，提供外部感知支持，协助无人机完成路径规划和跟踪导航。

在这些低空应用典型场景中，ISAC系统对低空飞行器和周边环境进行实时信息交互和全面感知，使低空覆盖场景资源配置和经济效率得到优化。这凸显了通感一体化在低空经济中的重要作用。

## 2 低空覆盖关键技术

### 2.1 波束成形与波束跟踪技术

在ISAC系统中，波束成形通过调控波束的方向来对准通信目标或者感知目标，以充分利用空间增益，提升相应性能。低空覆盖关注的无人机目标既有“低、慢、小”的，也有“高、快、大”的。无人机的高移动、自身抖动等特性使得传统的波束成形与跟踪方案难以适用。在满足低空无缝覆盖的前提下，如何克服环境影响并构建稳健波束，以及如何进行精准的波束跟踪设计以实现性能提升，是具有挑战的难题。

由于低空覆盖场景复杂多样并且无人机具有高移动性和高抖动性，加上通感一体化系统需要同时满足通信与感知的性能要求，现有针对地面蜂窝网络的波束成形与波束跟踪技术难以满足其需求。为进一步提升通信与感知性能，需要在现有波束成形与跟踪技术的基础上，对波束成形与波束跟踪技术进行深入研究<sup>[7-9]</sup>。在波束成形与波束跟踪过程中，可以通过超大规模阵列下的模拟数字混合波束扫描来提升通信和感知性能。为满足低空覆盖，减少覆盖区域空洞，高低频场景都可以加密波束。此外，为提升系统性能，也可以对自适应波束成形和波束跟踪算法进行设计。

综上所述，针对低空覆盖通感一体化场景需求以及无人机特性，设计稳健的波束成形与高效的波束跟踪方案，有助于提升面向低空覆盖的通感一体化系统的整体性能。

### 2.2 AI赋能的ISAC技术

AI赋能的通感一体化技术是5G-A/6G网络的关键技术，将大幅提升感知与通信性能<sup>[10-11]</sup>。利用人工智能算法与感知技术，AI赋能的ISAC技术能够高效实时地完成目标检测、识别、跟踪和预测等。其中，系统可以利用AI技术对大量来自通感基站和各种感知设备的感知信息进行实时处理，并对感知对象进行自动识别、分类、动态跟踪和轨迹预测等，从而提高感知的准确性和实时性，如图2所示。AI赋能的协作感知技术能够通过多设备协同感知整合网络中的多源感知信息，并利用智能融合与预处理等方法来提升全局感知能力。通过算法设计和大规模数据训练，对复杂环境中目标识别和分类的鲁棒性将大大增强。

AI算法能够用于通感一体化系统的信道估计、波束成形与波束跟踪算法设计中<sup>[12]</sup>。其中，AI算法可以提升信道估计精度，并辅助快速波束成形与自适应调整，以适应无人机的抖动和信道的变化。更进一步地，AI算法可以进行环境变化预测并辅助完成参数自适应调整。此外，AI算法还可用于通感组网的智能化架构设计，从而提升网络性能。

AI赋能的ISAC技术具有良好的低空覆盖应用前景。AI有助于提升通感一体化系统在复杂环境条件下的感知与通信能力，同时能够为多场景应用提供高效、智能的解决方案。然而，AI赋能通感一体化系统仍面临着许多挑战，例如：

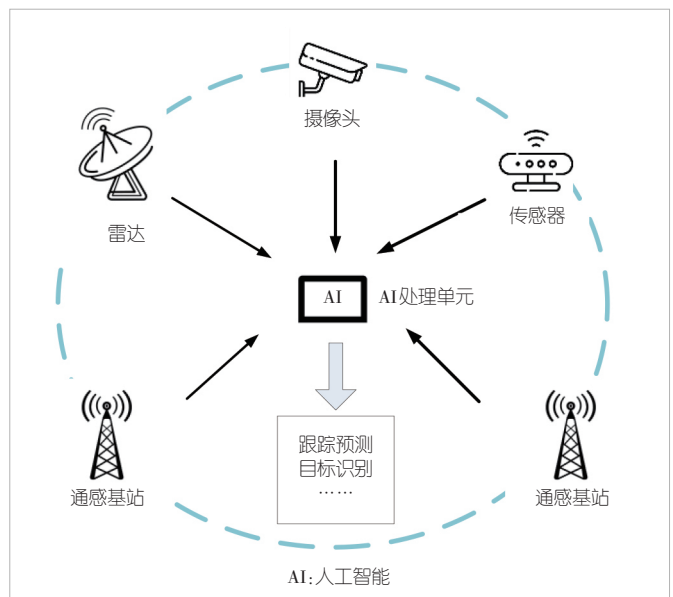


图2 AI赋能的通感一体化技术

需要设计低复杂度的AI算法来减轻算力资源负担<sup>[13]</sup>；在动态复杂环境下，需要保证AI算法具有稳定的自适应能力；在通感一体化系统的应用过程中，数据传输安全和感知任务隐私保护也需要予以考虑。

综上所述，AI赋能的ISAC技术通过加强感知数据分析处理能力、提高信道估计精度、优化波束成形与跟踪、实现环境预测自适应以及优化组网架构等，使得低空覆盖的通感一体化系统的感知、通信性能以及智能化水平得到明显改善。

### 2.3 通信与感知相互辅助增强技术

在通感一体化系统中，通信与感知的融合不仅包括硬件、信号、频谱等的共享，还包括两者功能的融合促进与辅助增强。高速可靠的通信能力为感知数据的汇聚和传输提供保障，而感知能力也可以反哺通信，提升通信性能。

在低空覆盖ISAC系统中，可利用通信网络来支持多通感基站协同感知。如图3所示，各通感基站可相互分享感知结果，并尝试对周边环境进行联合感知，形成统一的认知，显著提高定位、轨迹跟踪的效果。同时，通感基站通过对无人机、环境的感知可辅助提升通信的性能<sup>[14]</sup>。其中，利用感知到的环境及无人机的位置、姿态等信息，可辅助估计更精准的通信信道，提升通信系统容量。另外，感知也可以辅助通信进行无线资源管理。具体地，感知可以辅助通信进行波束自适应调整，利用感知信息来完成波束成形方案的设计。例如，当环境中没有无人机时，系统不发送低空同步信号块（SSB）波束；当基站感知到无人机时，系统根据无人机的位置选择合适的波束发送SSB和业务信息。

在低空覆盖通感一体化系统中，如何进一步结合波束成形、AI、波形设计等技术，有效发挥通信与感知相互辅助增强功能，是ISAC系统不断演进、充分融合的重要方向。

### 2.4 基于智能反射面的ISAC技术

智能反射面（IRS）作为6G的关键核心技术之一，通过在环境中部署可编程的反射元件来调控无线信号的传播，能

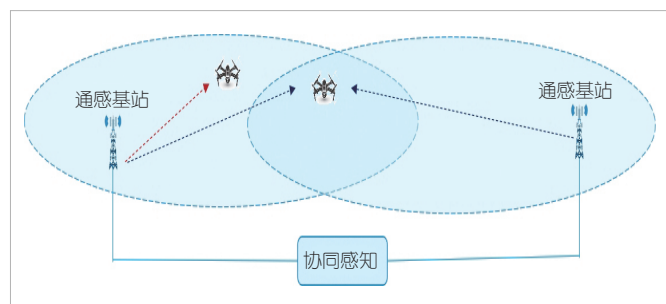


图3 通信辅助完成协同感知

够有效改善无线通信系统的性能<sup>[15]</sup>。在通信系统中应用IRS，能有效改善信号传播环境，减少传统信道中的衰减、干扰和遮挡影响。IRS结合ISAC系统能够有效提升感知性能<sup>[16]</sup>。如图4所示，借助IRS对入射信号进行动态调控（如幅度、相位控制等），可改善信道环境，增强通信链路质量，同时能够扩大感知覆盖范围，提高对无人机目标的感知精度<sup>[17]</sup>。

在图4所示的系统中，IRS可以作为回波信号中继来提供非视距（NLOS）感知功能，扩大了感知覆盖范围，并且增加了额外的感知路径。此外，在IRS辅助下的波束成形与波束跟踪技术可使系统实现对动态无人机的精准定位和跟踪。这有助于IRS赋能的通感一体化系统扩大感知覆盖范围，提高系统的鲁棒性。同时，结合优化算法与强化学习对IRS进行动态配置，可实现ISAC系统中通信与感知性能的联合优化。

具体而言，IRS具有以下优势：一方面，通过精确设计相移矩阵，智能排列的无源反射元件可以独立控制入射信号的相移和幅度，实现对无线信号的灵活调控，为感知提供盲区覆盖并提高感知性能<sup>[17]</sup>；另一方面，IRS能够增强接收信号，抑制干扰，继而提升通信性能<sup>[15]</sup>。这使得IRS技术在低空覆盖场景下具有重要的应用价值。

然而，IRS应用于低空覆盖的通感一体化系统仍面临一些挑战。由于IRS引入额外的空间自由度，波束成形算法需要进行相应的调整优化。如果部署在无人机上，IRS在高动态场景下需要进行频繁的相移矩阵计算，这会带来较高的能耗<sup>[12]</sup>。此外，无人机飞行抖动效应会增加IRS的相移矩阵校正难度<sup>[18]</sup>，影响系统性能的提升。因此，在低空覆盖场景下，我们需要深入研究能耗低、稳定性高的IRS设计方案。

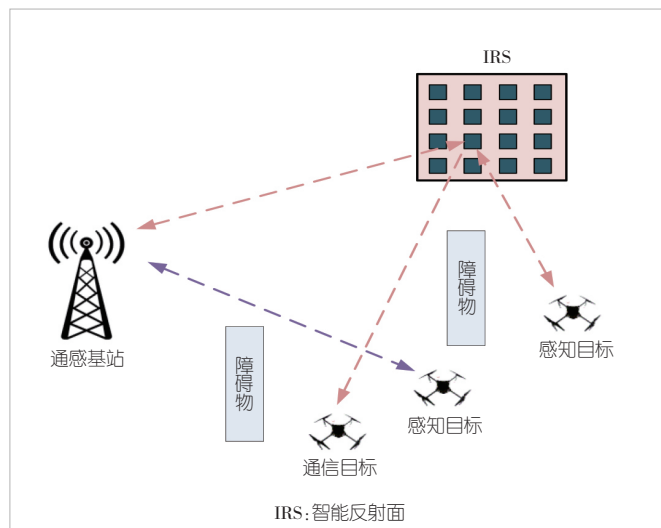


图4 基于IRS的通感一体化系统



### 3 组网技术

#### 3.1 通感一体化组网

为保障低空区域内目标的无缝感知覆盖并突破单站点感知能力的瓶颈，通感一体化组网协同感知已成为发展的趋势。通感一体化组网可以充分利用移动通信系统中的宏微基站站址资源<sup>[19]</sup>，这样能够降低通感一体化的成本，提升感知的组网能力。宏微基站的协同感知方式多种多样，可以通过选择感知节点进行感知结果共享，也可通过多点同时感知来互相补充或合并融合感知数据<sup>[20]</sup>。采用灵活的协同感知方式不仅可以有效提升感知性能，还可以提升网络的服务能力。

宏微基站组网是构建移动通信网络的基础，它通过宏基站和微基站联合组网来保障网络性能<sup>[20]</sup>。在引入感知功能(SF)之后，网络的能力从传统的通信能力转变为结合通信和感知的“双维度能力”。当感知任务比较复杂且单站无法满足要求时，可进行多站协同感知。充分利用各个通感基站的优质能力，补充或者合并融合待处理数据，可以提升协同感知性能。选择合适的感知节点能够进一步提升协同感知性能，其中可以利用AI算法智能选择感知节点。此外，SF支持分布式架构和集中式架构，可满足各类政企客户以及运营商客户的灵活组网场景需求。

不同于传统地面通信，通感一体化组网需要考虑更多的因素<sup>[21]</sup>，例如：复杂多样的感知业务需求、感知网络规划指标、感知信道模型参数以及协同感知的具体形式。要实现通感一体化组网，首先要结合业务需求，明确各项通信网络指标与感知网络指标的具体要求，继而结合具体的低空覆盖应用场景特征，制定合理的组网规划方案。同时，针对不同的感知环境、感知需求以及网络拓扑，设计有效的协同感知方案也是重要的课题。

#### 3.2 干扰控制

不同于地面通信，低空覆盖通感基站规模组网会带来额外的感知干扰。这些干扰主要有杂波干扰、自干扰、通信对通信的干扰、通信对感知的干扰以及感知对感知的干扰。其中，通信对感知的干扰包括同频干扰和邻频干扰，感知对感知的干扰如低空小区间组网带来的感知信号间干扰。

在低空覆盖场景下，小区重叠覆盖程度较大，无人机与同频邻区间上下行通信干扰严重。而以用户为中心的无蜂窝大规模MIMO(CF-mMIMO)能有效降低干扰水平<sup>[22]</sup>。CF-mMIMO网络可以协调控制分布式天线节点的信号发射，通过减少传播路径的重叠来抑制低空复杂组网场景下通信对通信的干扰。当通感基站和地面通信基站进行插花组网时，地

面通信基站下行信号的发送会对感知信号的接收产生干扰。针对通信对感知的干扰，可以采用协调规避的方案，即在干扰小区对应时隙/符号上不发任何信号。在通感自发自收模式下，中兴通讯结合连续波和脉冲波的不同优势来提升感知范围，即连续波完成近距离感知，脉冲波完成中远距离感知。此时，感知对感知的干扰主要包括连续波的自干扰、同站扇区间干扰、站间干扰，以及脉冲波的站间干扰等<sup>[21]</sup>。目前，人们主要通过提高设备隔离度来降低自干扰，设计干扰消除算法来削弱干扰影响，以及采用扇区间梳分、站间时分、站间频分等资源分配方式来规避干扰<sup>[21]</sup>。此外，对于环境杂波干扰，也可采用虚警抑制、AI目标识别消除等方法来抑制。

总的来说，对于干扰问题，可以采用干扰协调以及干扰消除技术加以解决。在面向低空覆盖的ISAC系统中，为了实现组网场景下的干扰协调，可以充分考虑时域、频域、空域和码域等多个维度进行正交资源分配<sup>[12]</sup>，以满足不同类型服务和不同场景的需求。同时，还可以通过灵活设计调度方案来进一步降低干扰的影响。干扰消除技术则从一体化波形设计、波束成形以及多点协作<sup>[23]</sup>等方面来削弱干扰信号的影响。在低空组网的背景下，如何充分利用感知资源，引入自适应感知资源分配方案进行干扰协调，并且有效进行干扰消除，甚至在完成干扰识别后利用干扰实现低空绿色经济，是低空覆盖场景的关键问题之一。

### 4 结束语

本文旨在对低空覆盖下通感一体化的关键技术与组网技术展开介绍。首先基于通感一体化，剖析低空经济的主要应用场景，论述通感一体化系统在其中起到的关键作用。随后介绍波束成形与波束跟踪技术、AI赋能的ISAC技术、通信感知相互辅助增强技术，以及基于IRS的ISAC技术。其中，波束成形与波束跟踪技术通过调节大规模天线阵列的波束方向和形状，可有效应对低空环境中的信号衰减和干扰影响，提升系统性能；而AI赋能的ISAC技术将人工智能算法引入数据分析处理环节，可协助实现对目标的实时感知、识别与跟踪等，增强低空覆盖ISAC系统的智能化水平；通信感知相互辅助增强技术凸显了通感一体化系统的技术优势；基于IRS的ISAC技术引入了NLOS自由度，有望进一步提升感知和传输性能。低空经济通感一体化组网通过协同感知提高了通感性能，而组网干扰控制技术可以紧密结合波束成形、AI等关键技术，通过干扰协调、干扰抑制算法等进一步保障低空通感网络在复杂组网环境下的性能。除了以上技术之外，适配低空覆盖场景的通感一体化波形设计、基于虚拟阵列的多天线感知等技术，同样具备较高的研究价值。

## 致谢

感谢中兴通讯股份有限公司艾星星、李永彪、程巍、李军、李增、马聪等专家对本研究做出的贡献！

## 参考文献

- [1] 夏泳, 田洛. 面向低空经济的空联网络组网关键技术研究综述 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2024, 36(4): 619–632. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.202407020164
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书 [R]. 2021
- [3] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS 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. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [4] 刘光毅, 楼梦婷, 王启星, 等. 面向6G的通信感知一体化架构与关键技术 [J]. 移动通信, 2022, 46(6): 8–16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.002
- [5] MU J S, ZHANG R H, CUI Y H, et al. UAV meets integrated sensing and communication: challenges and future directions [J]. IEEE communications magazine, 2023, 61(5): 62–67. DOI: 10.1109/MCOM.008.2200510
- [6] 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
- [7] ZHAO N, WANG Y L, ZHANG Z B, et al. Joint transmit and receive beamforming design for integrated sensing and communication [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(3): 662–666. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3140093
- [8] CUI Y P, ZHANG Q X, FENG Z Y, et al. Seeing is not always believing: ISAC-assisted predictive beam tracking in multipath channels [J]. IEEE wireless communications letters, 2024, 13(1): 14–18. DOI: 10.1109/LWC.2023.3303949
- [9] ZHANG Y B, LI Q, WANG J J, et al. Toward throughput maximization of integrated sensing and communications enabled predictive beamforming for 6G [J]. IEEE network, 2024, 38(4): 292–300. DOI: 10.1109/MNET.2023.3326067
- [10] WEI Z Q, QU H Y, WANG Y, et al. Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: a survey [J]. IEEE Internet of Things journal, 2023, 10(13): 11068–11092. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3235618
- [11] ZHANG Y F, GAO Z, ZHAO J J, et al. AI empowered channel semantic acquisition for 6G integrated sensing and communication networks [J]. IEEE network, 2024, 38(2): 45–53. DOI: 10.1109/MNET.2024.3354264
- [12] 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
- [13] WU N, JIANG R K, WANG X Y, et al. AI-enhanced integrated sensing and communications: advancements, challenges, and prospects [J]. IEEE communications magazine, 2024, 62(9): 144–150. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300724
- [14] 李佳澎, 张奇勋, 马丁友. 通感一体化中感知辅助通信的发展现状与展望 [J]. 移动通信, 2023, 47(9): 96–100. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230911-0001
- [15] JI B F, HAN Y, LIU S W, et al. Several key technologies for 6G: challenges and opportunities [J]. IEEE communications standards magazine, 2021, 5(2): 44–51. DOI: 10.1109/MCOMSTD.001.2000038
- [16] YU Z Y, REN H, PAN C H, et al. Active RIS-aided ISAC systems: beamforming design and performance analysis [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 72(3): 1578–1595. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3332856
- [17] 夏方昊, 王新奕, 郑重. 智能超表面辅助通信感知一体化 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 58–62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202203010
- [18] 刘晨熙, 马睿, 彭木根. 无人机通信感知一体化: 架构、技术与展望 [J]. 电信科学, 2023, 39(2): 1–9. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023029
- [19] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告(2021年) [R]. 2021
- [20] 刘家祥, 蒋峥, 孙震强, 等. 6G通感一体化组网融合技术 [J]. 移动通信, 2022, 46(5): 56–61. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.009
- [21] 中国移动. 5G-A通感一体典型场景技术解决方案白皮书 [R]. 2024
- [22] ZHENG J K, ZHANG J Y, DU H Y, et al. Mobile cell-free massive MIMO: challenges, solutions, and future directions [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(3): 140–147. DOI: 10.1109/MWC.004.2300043
- [23] 尉志青, 牛阳阳, 王溢, 等. 通信感知一体化干扰管理: 现状与展望 [J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 31–39, 88. DOI: 10.13190/j.jbupt.2022-125

## 作者简介



林旭, 中兴通讯股份有限公司算法部高级系统工程师; 主要研究方向为无线通信信号处理、通信感知一体化等; 发表论文10余篇, 申请专利近20项。



刘涛, 中兴通讯股份有限公司算法部部长; 主要研究方向为5G、5G-A物理层先进赋形算法和接收机技术; 发表论文3篇, 申请专利20余项。



张诗壮, 中兴通讯股份有限公司无线及算力研究院副院长, 教授级高工; 主要研究方向为5G-A、NTN和6G等; 主持完成信源编码、统一移动网络硬件平台、5G大容量基带池等重大项目, 为中国移动通信系统关键技术创新做出了重要贡献; 获2016年国家科技进步奖特等奖1项; 发表论文5篇, 申请专利10余项。



施嵘, 中兴通讯股份有限公司无线及算力研究院院长; 主要研究方向为无线通信、智算等; 主持国家级项目1个、企业级项目15个; 2021年, 获国家科学技术进步奖; 发表论文2篇, 申请专利3项。