

面向低空广域立体覆盖的ISAC理论与关键技术



Integrated Sensing and Communication for Low-Altitude Wide-Area Stereoscopic Coverage: Theory and Key Technologies

何其原/He Qiyuan, 杨日艳/Yang Riyan, 谢磊/Xie Lei

(东南大学, 中国 南京 211189)
(Southeast University, Nanjing 211189, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602002

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.tn.20260421.1901.002>

网络出版日期: 2026-04-22

收稿日期: 2026-01-15

摘要: 围绕低空经济驱动下的广域立体覆盖需求, 概述了通信感知一体化 (ISAC) 在低空物联网中的理论与技术进展。首先, 从低空广域立体覆盖需求出发, 分析低空场景下通信随机性与感知确定性的内在冲突, 引入随机矩阵理论 (RMT) 确立通感性能的理论边界。随后, 结合低空场景传播特性, 重点分析多站协同感知、可重构智能表面 (RIS)、可移动天线 (MA)、空间-极化域联合优化, 以及安全、隐私与可信监管等关键技术。本研究旨在为构建高可靠、高精度的智能化低空物联网提供坚实的理论支撑与技术路径。

关键词: 低空经济; 广域立体覆盖; 通信感知一体化; 随机矩阵理论; 空间自由度

Abstract: Driven by the low-altitude economy, the demand for wide-area stereoscopic coverage has grown rapidly. This paper reviews the theoretical and technological advancements of integrated sensing and communication (ISAC) in low-altitude intelligent networks. First, driven by the demands of such coverage, the inherent conflict between communication randomness and sensing determinism in low-altitude scenarios is analyzed. Random matrix theory (RMT) is then introduced to establish the theoretical performance boundaries of ISAC. Subsequently, given the propagation characteristics of low-altitude environments, this paper emphatically analyzes the operational mechanisms and development trends of critical technologies, including cooperative sensing, reconfigurable intelligent surfaces (RIS), movable antennas (MA), joint optimization of spatial-polarization domain, and security, privacy and trusted regulation. Finally, this paper aims to provide robust theoretical support and technical pathways for constructing highly reliable, high-precision, intelligent low-altitude networks.

Keywords: low-altitude economy; wide-area stereoscopic coverage; integrated sensing and communication; random matrix theory; spatial degrees of freedom

引用格式: 何其原, 杨日艳, 谢磊. 面向低空广域立体覆盖的ISAC理论与关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 3-8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602002

Citation: He Q Y, Yang R Y, Xie L. Integrated sensing and communication for low-altitude wide-area stereoscopic coverage: theory and key technologies [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 3-8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602002

1 低空ISAC的机遇与挑战

回顾移动通信技术的发展历程, 从第1代模拟通信到第5代移动通信, 其核心设计理念始终围绕服务地面用户展开。无论是基站选址、天线下倾角设置, 还是覆盖增强与干扰协调机制, 其优化对象本质上都是地面终端。这种二维平面的设计思维, 在过去几十年间极大地推动了人类社会的数字化进程。然而, 随着低空经济的蓬勃发展和无人机技术

的成熟, 人类的活动空间与服务边界正加速向低空领域延伸^[1]。低空应用场景的爆发式增长催生了无线通信系统对广域立体覆盖的迫切需求, 如图1所示。

1.1 低空经济驱动下的机遇

在低空经济快速发展的背景下, 低空空域正逐步成为承载物流配送、城市巡检、应急救援、公共安全和载人交通等多类业务的重要空间。低空物联网作为面向低空空域运行管理、飞行安全监管、业务数据承载以及航迹协同控制的新型基础设施, 正在依托新一代移动通信技术, 向“通信、感

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62501143); 江苏省基础研究计划 (自然科学基金项目) (BK20251332)



图1 广域立体覆盖范式示意图

知、智能、计算、控制”深度融合的一体化网络体系演进^[2]。与传统蜂窝网络不同，低空物联网不仅需要为合作飞行器提供稳定的控制、遥测和业务回传链路，还需要对“黑飞”无人机等非合作目标进行主动发现、识别与持续跟踪^[3]。因此，它不仅是信息传输平台，更是低空空域感知与安全监管的重要基础设施^[4]。

在此过程中，通信感知一体化技术（ISAC）展现出天然优势，并有望成为支撑低空广域立体覆盖的关键技术路径。一方面，现有蜂窝网络基站分布广、部署密度高，为低空目标感知提供了可直接复用的基础设施。由多个基站构成的感知网络能对低空目标实现连续覆盖和多视角观测，从而提升目标检测、定位与跟踪的鲁棒性^[5]。另一方面，感知过程中获取的信道状态、目标位置和速度等信息，又可以反向服务通信系统，用于波束对准、资源调度、链路预测以及切换优化，从而提升低空通信链路的稳定性和效率^[6]。对于高速移动无人机、复杂航迹任务以及动态空域环境而言，这种通感互助机制尤为重要。与此同时，通信侧的导频、反馈和协同状态信息也可为感知提供参考与增益，使系统在服务合作目标的同时，具备对非合作目标的监管能力。正因为如此，ISAC在低空场景中不仅具备“连得上”的功能，也承担“看得见、管得住”的职责，这与低空物联网的实际需求高度契合^[7]。

可以预见，ISAC技术将成为低空物联网部署的重要支撑，可应用于如图2所示的智慧生活、智慧工业等场景中，具有重要的理论研究意义和实际应用价值^[8]。

1.2 面向广域立体覆盖的挑战

尽管ISAC为低空网络带来了新的发展机遇，但将传统地面蜂窝网络演进为面向低空广域立体覆盖的ISAC系统，仍面临两大挑战：

1) 理论维度的性能极限表征

通信追求信息熵最大化，倾向于使用随机信号；而感知追求检测稳定性，倾向于使用具有理想自相关特性的确定性信号。在ISAC系统中，同一发射波形必须同时服务于通信与感知，两者之间存在内在冲突。进一步地，在短时感知和有限快拍条件下，随机通信符号导致样本协方差矩阵本身具有随机性，使得感知性能会随发射数据序列变化而波动。这给低空ISAC系统设计带来挑战。如何定义并量化“随机性-确定性”权衡下的理论性能极限，特别是在利用数学工具确立通感性能解析边界方面，仍需深入研究。

2) 物理维度的空间信道重构

低空环境不仅存在传统地面通信中的路径损耗、阴影衰落和多径效应，还伴随有三维散射体、强镜面反射、动态背景杂波和目标机动性增强等特征。传统固定阵列的空间结构有限，难以适配复杂低空传播环境。因此，如何通过新型阵列架构释放额外空间自由度，是低空ISAC领域的重要研究方向。

本文将从理论性能衡量与物理空间重构两个维度展开，旨在为构建高可靠、高精度的智能化低空网络提供理论支撑与技术参考。

2 面向低空广域立体覆盖的ISAC理论

2.1 数学模型

在大规模ISAC系统中，发射信号通常具有高维随机结构。随机矩阵理论（RMT）能够刻画这些高维随机矩阵在大维度极限下的谱分布、特征值行为与确定性等效，从而将依赖瞬时随机实现的性能指标转化为可解析的统计规律。

设发射信号矩阵为：

$$\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N_t \times L}, \tag{1}$$

其中， N_t 表示发射天线数， L 表示观测长度或快拍数。若符



图2 低空ISAC技术的应用场景示例

号序列为独立同分布随机变量，则样本协方差矩阵可表示为：

$$S = \frac{1}{L} \mathbf{X}\mathbf{X}^H \quad (2).$$

当 $N_r, L \rightarrow \infty$ 且 $N_r/L \rightarrow c \in (0, \infty)$ 时， S 的特征值分布在一定条件下将收敛到确定性极限。这为分析大规模随机信号系统提供了理论基础。

对于通信链路，其信道容量表达式为：

$$R_c = \log \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_c^2} \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H \right) \quad (3),$$

其中， \mathbf{H} 为通信信道矩阵， \mathbf{Q} 为发射协方差矩阵， σ_c^2 为通信噪声功率。

对于感知链路，可写为：

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{G}\mathbf{X} + \mathbf{N}_s \quad (4),$$

其中， \mathbf{G} 为目标散射响应矩阵， \mathbf{N}_s 为感知噪声项。若 \mathbf{X} 为随机矩阵，则常见感知性能指标（如估计误差、感知互信息量和输出信噪比）都将具有随机性，RMT 可用于研究其在大维条件下的渐近行为。

RMT 在 ISAC 中的价值主要体现在 3 个方面：1) 将随机通信波形带来的瞬时性能波动转化为统计平均意义下的可分析规律；2) 为大规模阵列下的感知性能提供确定性等效表达；3) 为通信-感知联合资源分配与系统设计提供可解释的理论基准。

2.2 通信随机性与感知确定性的机理冲突

ISAC 系统要求发射信号兼具信息载体与探测波形的双重角色，这导致了确定性-随机性权衡^[9]。

2.2.1 感知确定性

经典雷达理论中，为了获得良好的检测性能，发射波形的的设计通常遵循严格的约束。例如，为了获得高距离分辨率，波形需要具有大的信号带宽；为了区分不同速度的目标，波形需要具备特定的多普勒敏感性；为了防止强目标掩盖弱目标，波形的自相关函数应当接近冲激函数，具有极低的旁瓣电平。同时，雷达信号处理高度依赖发射波形的先验已知性，以实现匹配滤波增益的最大化。

2.2.2 通信随机性

通信的本质是传递信息。根据香农信息论，承载信息量越大的信号，其不确定性越高，统计特性越接近于高斯白噪声。当这种携带随机数据的通信波形被用于感知探测时，会

引入新的问题。每次发射的符号序列都是随机变化的，这导致波形的时域包络和频谱结构不再固定。这种随机性直接破坏了信号的相干性。在雷达信号处理中，通常利用匹配滤波器来提取目标回波。当使用随机波形进行匹配滤波时，其输出的模糊函数在距离-多普勒平面上不再呈现规整的冲激响应形态，而是会出现剧烈起伏的、随机分布的高电平旁瓣。这些由通信数据随机性引起的旁瓣，在物理上并不代表真实的目标，但其影响不可忽略。传统的雷达信号处理方法，在面对这种具有统计随机性的旁瓣时往往失效。

2.3 基于通信信号的感知性能极限分析

为了度量随机通信信号驱动下的平均感知性能，已有研究提出了遍历线性最小均方误差 (ELMMSE) 概念^[10]。设目标参数为 $\boldsymbol{\theta}$ ，基于观测 \mathbf{Y}_s 的线性估计为 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ ，则其均方误差为：

$$\text{MSE} = \mathbb{E} \left\| \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}} \right\|^2 \quad (5).$$

当发射信号 \mathbf{X} 为随机变量时，可进一步在 \mathbf{X} 的统计意义下取期望，定义遍历误差指标。该类指标能够反映系统在不同通信数据激励下的平均感知能力，而非仅针对某一次固定数据块的瞬时结果。该研究初步验证了在有限快照条件下，忽略通信数据随机性将导致对感知能力的过度理想化评估。

感知互信息量 (SMI) 是近年来用于度量随机信号条件下感知性能的重要指标之一^[11]。其基本思想是：接收回波观测中包含了多少关于目标散射响应的信息。对于已知发射信号 \mathbf{X} 的线性高斯回波模型，感知互信息定义为：

$$I_s = I(\mathbf{G}; \mathbf{Y}_s | \mathbf{X}) \quad (6).$$

SMI 表示在已知发射信号条件下，观测 \mathbf{Y}_s 对目标响应 \mathbf{G} 所消除的不确定性大小。若进一步假设 $\text{vec}(\mathbf{G}) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_c)$ ，则在线性高斯条件下，互信息可写为：

$$\bar{I}_s = \mathbb{E}_{\mathbf{X}}(I_s) = \mathbb{E}_{\mathbf{X}} \left(\log \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_s^2} \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{X}) \mathbf{R}_c \boldsymbol{\Phi}^H(\mathbf{X}) \right) \right) \quad (7),$$

其中， $\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{X})$ 为由发射信号结构决定的等效观测矩阵， σ_s^2 为感知链路噪声功率。感知互信息越大，回波观测中包含的目标信息越丰富，系统对目标参数估计、分类与可辨识的潜在能力就越强。虽然 SMI 不直接等价于检测概率，但在高斯线性模型下，SMI 与估计精度密切相关。文献[11]利用随机矩阵理论推导出单目标场景下感知互信息量的闭合表达式，其性能如图 3 所示。这一理论突破揭示了重要物理意义：尽管瞬时感知性能是随机的，但在大维度极限下，它收敛于一个

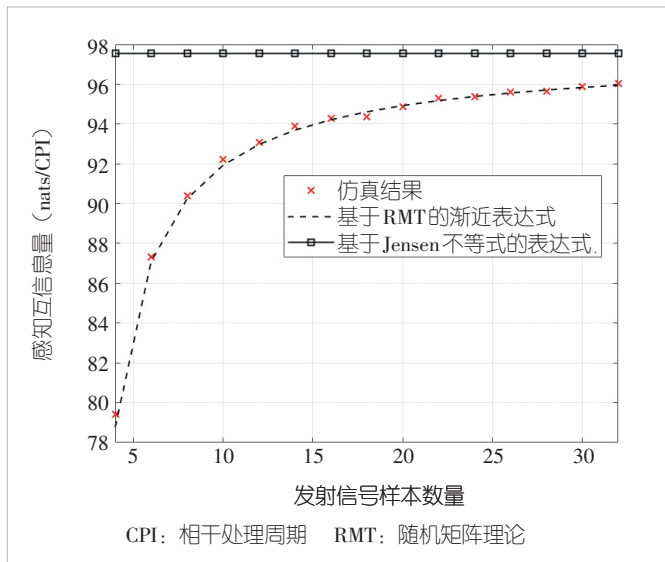


图3 基于高斯通信信号的感知互信息量示意图

确定的值。这为大规模ISAC系统提供了稳定的理论基准，证明了利用随机信号进行高精度感知的可行性。

2.4 低空ISAC中的通信-感知统一指标与性能权衡

ISAC的核心在于如何在同一资源约束下实现通信与感知的协同最优。在理论建模中，通感联合优化常采用如公式(8)所示的形式：

$$\max \alpha f_c + (1 - \alpha) f_s \tag{8}$$

其中， f_c 为通信性能指标， f_s 为感知性能指标， f_c 和 f_s 均转化为最大化形式， $\alpha \in [0,1]$ 为权重系数。对于通信系统，常见性能指标包括：1) 频谱效率/遍历容量：衡量单位带宽内的平均传输能力；2) 误码率：衡量传输准确性；3) 中断概率：衡量链路可靠性；4) 时延与时延抖动：衡量控制链路与时延业务的可达性；5) 覆盖概率：衡量在给定高度与区域内维持链路质量的能力。对于感知系统，常见性能指标包括：1) 检测概率/虚警概率；2) 参数估计均方误差与克拉美罗界(CRB)；3) 输出信杂噪比(SCNR)；4) 感知互信息量；5) 轨迹跟踪误差与目标分辨能力。对于低空场景，上述问题还需叠加目标机动性、三维覆盖、杂波环境和监管安全等约束。

虽然现有研究在复合信号处理方面取得了实质性进展，但当前的评估体系仍面临两个挑战：1) 评价指标的不兼容性：感知指标与通信指标在物理意义与数学形式上缺乏内在一致性；2) 统一理论框架的缺失：现有优化设计多采用约束优化范式，即在单方面性能约束下优化另一方面性能，缺乏能够深度耦合通感本质特征的统一目标函数。

因此，如何突破单一通信或雷达学科的视域局限，通过构建统一的数学模型，形成一套完备且统一的性能衡量体系，是ISAC面临的重要理论挑战。

3 面向低空广域立体覆盖的ISAC关键技术

3.1 多站协同感知

低空广域立体覆盖本质上不是单基站问题，而是多站协同问题。单站感知容易受到遮挡、旁瓣混叠、目标RCS波动与杂波掩蔽的影响，而多站协同可通过多视角观测提升探测概率、定位精度和跟踪连续性。近年来，协同低空ISAC研究重点关注参数估计、数据关联、时空同步和融合架构等问题^[12]。从网络演进角度看，未来低空智能网更接近于由多个地面站点、边缘节点甚至空基节点共同构成的分布式系统。这一方向的难点在于高精度时钟同步、前传/回传约束下的信息压缩、跨站校准、异构观测对齐以及分布式跟踪鲁棒性等。

3.2 可重构智能表面

可重构智能表面(RIS)通过调控电磁反射特性，为低空ISAC提供了重塑传播环境的能力。对于采用天线下倾角优化且主要服务地面的现有蜂窝网络而言，RIS将感知与通信能量重新定向到低空区域，能够有效缓解基站仰角覆盖不足、楼宇遮挡和街区盲区问题。另外，有源RIS通过引入放大能力，可在低信号强度场景下增强有效照射能量。近期研究进而提出了RIS辅助协同成像式ISAC网络，并在理论上推导了相应的克拉美罗下界(CRLB)。结果显示，在相同功率约束下，有源RIS较无源RIS具有更好的低空监视能力，在特定仿真设定下可支持约300 m高度目标的有效成像检测^[13]。

不过，RIS在低空场景中的工程应用仍面临若干关键问题，包括级联信道估计难、相位误差和硬件非理想影响大、部署位置优化复杂，以及在高动态场景下控制开销较高等。因此，RIS在低空ISAC中更适合被用作特定盲区补偿、重点区域增强和协同感知辅助技术。

3.3 可移动天线技术

可移动天线技术(MA)的核心思想是将天线位置作为可优化变量，使系统能够在有限物理区域内主动搜索更优空间采样点，从而改变等效信道、增强目标回波、规避强杂波耦合并重构波束形态。在低空场景中，MA的优势尤为明显。首先，低空传播具有强空间非均匀性，不同位置的传播强度、极化特性和干扰耦合差异显著，MA可据此搜索最优的天线物理位置；其次，面对城市低空强反射和多径鬼影，MA可通过位置微调改善目标与杂波的可分离性；最后，在

多用户或多目标场景下, MA 能降低信道相关性, 提高波束灵活度, 为通信容量与感知精度的协同优化提供新自由度。

已有研究表明, MA 使 ISAC 系统在相同射频链条件下获得比固定阵列更高的通感综合性能, 相关工作在特定模型下报告了相对于固定位置天线的显著性能增益^[14]。进一步的前沿方向还包括可旋转天线、位置-朝向联合优化以及 MA 与极化域联合设计等, 它们有望进一步提升低空场景下的波束管理与杂波抑制能力^[15]。

3.4 空间-极化域联合优化

低空环境中的杂波更加复杂, 通常具有特定的极化敏感性(如垂直表面保持垂直极化), 且在空间场中呈现非均匀分布^[16]。建筑物、路面、水面、树冠和金属设施会产生不同极化响应与空间分布。如果仅依赖固定阵列和数字滤波, 系统往往需要在检测概率、虚警控制和复杂度之间进行折中。未来一个重要方向是将阵列位置自由度、极化自由度与结构化波束设计联合起来, 形成空间-极化域联合优化框架^[17]。这种思路适合低慢小目标监管: 通过极化差异初步滤除主背景, 然后利用天线位置或阵列结构搜索残余杂波的空间零陷, 最后结合联合波束赋形提升目标 SCNR。与传统空域优化相比, 这类方法更符合低空场景的物理本质, 也更有希望获得更大的性能提升。

图4展示了多极化天线阵列对于杂波抑制的性能, 相比于固定天线的均匀线阵, 将静止目标的输出信杂噪比提升了约 20 dB。该结果说明, 在检测低速目标时, 特殊的天线布置方式可以增强系统的杂波抑制能力。因此, 与固定天线阵列相比, 天线角度/位置的变化提供了额外的优化空间, 初步验证了利用可移动天线提升杂波抑制性能的可行性。

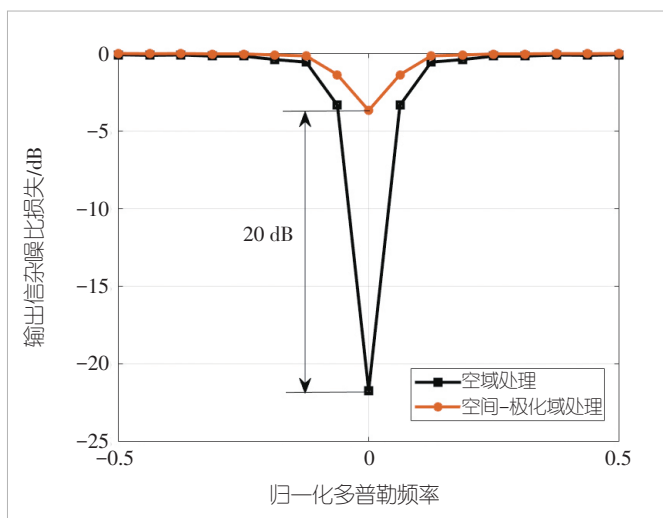


图4 多极化阵列下的杂波抑制性能

3.5 安全、隐私与可信监管

低空 ISAC 直接服务于飞行安全与空域监管, 因此其安全性不是附加问题, 而是系统设计的内生要求^[18]。与传统通信系统相比, ISAC 系统同时承载信息传输和环境认知的功能, 这意味着其一旦受到欺骗、干扰、重放或数据投毒攻击, 影响的不仅是链路质量, 还可能造成对空域态势的错误判断。最新研究已开始关注低空无线网络在信道接入攻击、干扰对抗、身份认证和隐私保护方面的脆弱性。因此, 未来低空 ISAC 系统必须形成物理层抗干扰、网络层可信协作、数据层隐私保护、监管层审计追踪的一体化安全体系。

4 未来研究方向

1) RMT 与 MA 的联合理论建模

现有研究通常关注高维随机信号分析和可移动天线优化, 缺乏统一的数学框架。未来可从位置相关的随机信道矩阵出发, 研究 MA 对特征值分布、确定性等效和通感权衡边界的影响, 进一步建立位置-信道-性能的闭环分析模型。

2) 面向有限维的性能修正

RMT 的多数结论建立在大维极限假设上, 而实际低空系统的天线规模、快拍长度和观测窗口均有限。如何从渐近结果出发, 推导有限维修正项、偏差上/下界和鲁棒设计算法, 是理论走向工程可用的关键。

3) 统一通感指标与跨层优化机制

在当前的低空 ISAC 技术研究中, 通信与感知指标难以统一。未来需要构建兼顾频谱效率、覆盖概率、感知精度、监管安全、时延和能耗的统一目标函数, 并研究其与边缘计算、协同控制和空域管理之间的跨层耦合机制。

4) 面向真实场景的低空传播与杂波测量建模

目前针对低空城市环境的传播和杂波分析相对较多, 而对城郊、农田和机场周边等场景的系统测量和统一数据库仍然不足。未来应加强典型场景下的多频段测量、传播统计建模与公开数据集建设, 为算法评测与系统对比提供统一基准。

5) 向 6G 体系化能力演进

从标准化趋势看, ISAC 正从概念验证逐步转向体系化研究^[19]。这意味着未来低空 ISAC 的研究重点将不再局限于算法层面, 而是转向能否纳入系统架构、接口定义、关键性能指标 (KPI) 体系和工程评估流程。这也将推动低空 ISAC 从理论研究走向实际应用。

5 结束语

本文针对低空广域立体覆盖的需求, 深入剖析了 ISAC 技术面临的理论与技术挑战。面向低空广域立体覆盖的

ISAC, 不是传统通信系统功能的简单叠加, 也不是雷达能力的蜂窝化迁移, 而是面向未来低空物联网的一种新型基础设施形态。其核心任务是通过通信、感知、智能、计算与控制的深度融合, 支撑低空飞行器安全运行、非合作目标监管和空域态势持续认知。从理论上, 低空ISAC的关键在于解决通信随机性与感知确定性之间的深层矛盾, 并借助随机矩阵理论分析理论边界。从物理层看, 低空ISAC的关键在于通过协同多站、可重构智能表面、可移动天线和空间-极化域联合优化等手段重构传播环境和空间自由度, 使系统性能逼近理论边界。可以预见, 未来的低空网络不再只是提供连接的通信网络, 而将演变为兼具环境认知、风险理解、智能决策和安全监管能力的综合性信息基础设施。ISAC将成为这一演进过程中的关键枢纽技术, 并为低空经济的规模化、智能化和可持续发展提供核心支撑。

参考文献

- [1] 3GPP TR 36.777 Study on enhanced LTE support for aerial vehicles (Release 15) [S]
- [2] 杨婷婷, 黄宁, 孙黎, 等. AI Edge: 面向智能应用的移动信息服务基础设施 [J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55(10): 2637-2642
- [3] 中国信息通信研究院. 2024年低空智联发展研究报告 [R]. 2024
- [4] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges [J]. IEEE communications magazine, 2016, 54(5): 36-42. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7470933
- [5] IMT-2030推进组. 6G通信感知一体化协作感知关键技术前沿报告 [R]. 2024
- [6] Xie L, Song S H, Eldar Y C, et al. Collaborative sensing in perceptive mobile networks: opportunities and challenges [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(1): 16-23. DOI: 10.1109/MWC.005.2200214
- [7] Liu R, Li M, Luo H H, et al. Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: opportunities, applications, and future directions [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(1): 50-57. DOI: 10.1109/mwc.002.2200206
- [8] Mozaffari M, Saad W, Bennis M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2019, 21(3): 2334-2360. DOI: 10.1109/COMST.2019.2902862
- [9] Xiong Y F, Liu F, Cui Y H, et al. On the fundamental tradeoff of integrated sensing and communications under Gaussian channels [J]. IEEE transactions on information theory, 2023, 69(9): 5723-5751. DOI: 10.1109/TIT.2023.3284449
- [10] Lu S H, Liu F, Dong F W, et al. Random ISAC signals deserve dedicated precoding [J]. IEEE transactions on signal processing, 2024, 72: 3453-3469. DOI: 10.1109/TSP.2024.3427373
- [11] Xie L, Liu F, Luo J J, et al. Sensing mutual information with random signals in Gaussian channels [J]. IEEE transactions on communications, 2025, 73(10): 9437-9452. DOI: 10.1109/TCOMM.2025.3564767
- [12] Xie L, Song S H, Letaief K B. Networked sensing with AI-

- empowered interference management: exploiting macro-diversity and array gain in perceptive mobile networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(12): 3863-3877. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3322828
- [13] Chen Z X, Huang Y X, Ji Z Z, et al. RIS-aided cooperative ISAC network for imaging-based low-altitude surveillance [PP/OL]. (2026-01-22)[2026-02-25]. <https://arxiv.org/abs/2601.16033>
- [14] Ma W Y, Zhu L P, Zhang R. Movable antenna enhanced integrated sensing and communication via antenna position optimization [J]. IEEE transactions on signal processing, 2026. DOI: 10.1109/TSP.2026.3674463
- [15] Zheng B X, Ma T T, You C S, et al. Rotatable antenna enabled wireless communication and sensing: opportunities and challenges [J]. IEEE wireless communications, 2025. DOI: 10.1109/MWC.2025.3611919
- [16] Xie L, He Z S, Tong J, et al. Regularized covariance estimation for polarization radar detection in compound Gaussian sea clutter [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2022, 60: 5109416. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3144658
- [17] Zhou Z J, Ding J Z, Zhang R. Polarforming design for movable antenna systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2026, 15: 161-165. DOI: 10.1109/LWC.2025.3622756
- [18] Xie L, Wang P L, Shen G X, et al. Secure communication in MIMOME movable-antenna systems with statistical eavesdropper CSI [PP/OL]. (2026-01-21)[2026-02-25]. <https://arxiv.org/abs/2601.14755>
- [19] 3GPP TR 22. 837 Feasibility study on integrated sensing and communication (Release 19) [S]

作者简介



何其原, 东南大学在读硕士研究生; 主要研究领域为通信感知一体化。



杨日艳, 东南大学在读硕士研究生; 主要研究领域为通信感知一体化。



谢磊, 东南大学副研究员; 主要研究领域为通信感知一体化、无线通信、雷达信号处理、物理层安全和计算机视觉等; 曾入选教育部海外引才专项计划和东南大学-华为“紫金青年学者”, 主持国家自然科学基金青年项目和江苏省自然科学基金青年项目等; 发表论文20余篇。