



XXXX

通信感知一体化：理论基础、技术应用

张军, 孙洪智, 王保松, 孙志刚, 冯晓冬, 苗立松
(吉林省信息化建设促进中心, 吉林 长春 130033)

摘要: 通信感知一体化 (ISAC) 作为 6G 关键愿景, 旨在通过频谱与硬件的深度共享实现通信与感知融合。本文以该领域十大核心挑战为驱动, 沿理论 - 技术 - 应用主线展开综述。理论层面, 从信息论与估计论联合视角, 利用容量-失真函数与克拉美罗界刻画性能折衷, 构建多维权衡分析框架。技术层面, 系统梳理波形设计谱系, 评估基于 5G 新空口感知的非理想因素与现有对策局限, 并综述接收端超分辨率处理进展; 进而围绕可重构智能超表面、无人机集群、毫米波/太赫兹与稀疏 MIMO 等使能技术, 揭示其通过补盲、信道耦合调控与突破孔径极限等机制应对核心挑战的效能, 同时评述各技术的现实境遇与瓶颈。网络层面, 分析感知移动网络架构及由干扰管理向干扰利用的范式转变, 探讨跨层协议与资源管理新需求。最后, 将方案下沉至低空经济、车联网与智慧工厂进行闭环验证, 并对理论难题、硬件瓶颈与标准化方向作出前瞻展望。

关键词: 通信感知一体化; 第六代移动通信系统; 波形设计; 可重构智能表面

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.

Integrated Sensing and Communication: Theoretical Foundations and Technological Applications

ZHANG Jun, WANG Baosong, PAN Weiwei, FENG Xiaodong, SUN Zhigang, SUN Hongzhi
Jilin Province Informatization Construction Promotion Center, Changchun 130033, China

Abstract: Integrated Sensing and Communication (ISAC), as a key vision for 6G, aims to fuse communication and sensing through deep sharing of spectrum and hardware. Driven by the ten core challenges in this field, this paper presents a systematic survey along the theory - technology - application thread. At the theoretical level, from a joint information-theoretic and estimation-theoretic perspective, the capacity - distortion function and the Cramér - Rao bound are employed to characterize the fundamental performance trade-off, and a multi-dimensional trade-off analysis framework is constructed. At the technical level, the lineage of waveform design methodologies is systematically reviewed; the non-ideal factors and limitations of existing countermeasures for sensing with 5G New Radio signals are assessed, and recent advances in receiver-side super-resolution processing are summarized. Furthermore, enabling technologies including reconfigurable intelligent surfaces, unmanned aerial vehicle swarms, millimeter-wave/terahertz, and sparse MIMO are explored, revealing their efficacy in addressing core challenges through mechanisms such as blind-spot compensation, channel coupling control, and breaking aperture limits, while their practical opportunities



and bottlenecks are discussed. At the network level, the architecture of perceptive mobile networks and the paradigm shift from interference management to interference exploitation are analyzed, and the new requirements for cross-layer protocols and resource management are examined. Finally, the proposed solutions are deployed in three typical scenarios—low-altitude economy, Internet of Vehicles, and smart factories—for closed-loop validation, and a forward-looking outlook is provided on the theoretical challenges, hardware bottlenecks, and standardization directions that remain to be tackled.

Key words: Integrated Sensing and Communication, sixth-generation mobile communication, waveform design, reconfigurable intelligent surface

1 引言

1.1 研究背景与意义

当前, 第五代移动通信系统(5G)在全球范围内的大规模商用部署已趋于成熟, 学术界与工业界的研究目光正转向第六代移动通信系统(6G)。相较于5G聚焦的增强型移动宽带(eMBB)、海量机器类通信(mMTC)和超可靠低延迟通信(URLLC)三大场景, 6G旨在构建一个万物智联、数字孪生的沉浸式世界, 其终极目标在于实现物理世界与数字世界的无缝深度耦合[1-3]。在此宏观框架下, 无线网络将超越传统的数据传输管道角色, 演进为一个能够自主感知物理环境、精确重构数字世界并深度理解用户意图的复杂智能平台。国际电信联盟(ITU)在其《面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》中, 已将通信感知一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)列为6G的六大典型应用场景之一, 标志着感知功能将从辅助地位上升为网络的核心内生能力[1,3]。

ISAC的基本设计思想在于将传统上独立演进的无线通信与雷达感知功能进行系统级融合。通过共享频谱、硬件平台以及信号处理模块, 这一技术范式旨在达成双重功能协同, 从而在缓解频谱资源竞争的同时, 显著降低终端设备的体积、重量与功耗, 整体提升系统的资源利用效率[4,1]。从技术演进的内在逻辑审视, 毫米波频段与大规模MIMO技术的普及, 使得通信基站与相

控阵雷达在硬件架构与信号处理层面形成了高度的技术同源性, 这为ISAC的诞生奠定了坚实的物理基础。

1.2 现有研究综述与本文定位

随着ISAC研究热度的持续升温, 学术界已涌现出多篇具有重要影响力的高质量综述。Sturm和Wiesbeck[6]的工作主要聚焦于OFDM波形在雷达与通信融合中的设计, 开创性地提出RadCom概念; Liu等[1]在2022年的奠基性文献对ISAC的背景、性能权衡、波形设计和信号处理进行了全面论述, 提出了集成增益与协调增益的概念框架; Liu等[7]专注ISAC的基本性能极限, 揭示了感知精度与通信速率之间的根本性矛盾; Gonzalez-Prelcic等[2]则从6G系统设计的宏观视角探讨了高频段、智能超表面等使能技术的潜力。为直观体现上述文献的侧重点及本文的定位, 表1从核心侧重、相对不足及本文补充三个维度进行了对比。

尽管上述综述各有侧重, 但普遍存在两个共性问题: 其一, 对ISAC面临的系统性挑战缺乏贯穿始终的论述主线; 其二, 对各项使能技术如何协同解决特定挑战的分析深度不足。现有综述多采用技术罗列而非问题驱动的叙事方式, 这导致读者难以把握不同技术之间的逻辑联系与演进路径

本文试图以Lu等[8]提出的ISAC十大核心挑战作为贯穿全文的问题驱动框架, 沿理论-技术-网络-应用的主线, 力图在以下方面形成独特贡

表1 本文与代表性ISAC综述的对比

文献	核心侧重	相对不足	本文补充
Liu et al. [1]	提出集成增益/协调增益框架，系统论述性能权衡、波形与信号处理。	综述状态集中于2021年前后；缺乏对3GPP/IEEE标准新动向、AI原生方案及端到端实测验证的更新。	纳入2023—2026年7月的标准化最新进展、AI/深度强化学习应用，并补充典型场景的实测闭环验证。
Gonzalez-Prelcic et al. [2]	从6G宏观系统设计出发，探讨高频段、RIS等使能技术潜力。	属愿景导向及方法示例型综述；对详尽算法分类、完整标准化条款、硬件平台横评及开源数据集覆盖有限。	不仅剖析使能技术，更建立“方法—指标—数据—硬件—成熟度”的全链条证据。
Sturm & Wiesbeck [6]	聚焦OFDM波形与雷达通信融合的物理层设计，奠定RadCom概念基础。	以雷达中心式物理层为主；未涉及6G蜂窝网络架构、跨层协议及标准化。	将单一波形设计扩展至网络协同、跨层资源管理及标准化演进。
Liu et al. [7]	专注信息论极限，揭示通信速率与感知精度的根本性矛盾。	侧重于理论性能边界的刻画；缺乏将理论矛盾映射至具体硬件损伤、工程落地挑战的系统性分析。	将理论极限（CRB/容量-失真）与第2章理论计算、第4章硬件性能（非理想因素）相串联，构建理论到工程的联系。
Lu et al. [8]	提出ISAC十大核心挑战，挑战导向性强、覆盖面广。	侧重开放问题的提出；在产业原型验证、各技术成熟度的定量对比、安全隐私的具体策略层面有待加强。	以十大核心挑战为主线，同时将挑战下沉到实际场景进行量化。

献：第一，以十大核心挑战为主线，使每一个技术方案的提出都能与其试图解决的具体挑战形成明确的对应关系；第二，强调使能技术的协同融合而非孤立阐述；第三，将方案下沉至低空经济、车联网与智慧工厂等典型场景进行验证，形成从理论到实践的完整链路。

1.3 研究框架

为了系统且有层次地组织后续内容，本文引入Lu等[8]提出的ISAC十大核心挑战作为逻辑框架。这些挑战构成一个从基础理论层、物理层、系统层、网络层到应用层的层次化难题体系。表2给出了十大核心挑战的层次化分类及其与本文章节的对应关系。。

这一组织方式旨在形成一条从为何难到如何解再到解决得如何的完整逻辑链条。需要强调的是，十大挑战并非相互独立的平行问题，而是形成了一个层层递进、相互制约的体系。例如，信息论极限的突破依赖于物理层波形设计的创新，而物理层技术的可行与否又受制于时钟同步精度和硬件实现能力。因此，本文在后续论述中，将注重揭示不同挑战之间的耦合关系，避免将其视为孤立的技术难题。

1.4 基本概念

根据文献[1]的定义，ISAC是一种旨在将感知与通信功能集成于单一系统的设计方法学与相应使能技术的集合，其核心价值可量化为集成增

表2 ISAC十大核心挑战与章节关系

层次	编号	内容	对应章节
理论基础层	1	ISAC系统的信息论极限	第2章
理论基础层	2	感知数据与通信信道状态信息的内在关联度	第2章
理论基础层	3	如何定量刻画集成增益与协调增益	第2章
物理层与系统层	4	双站和分布式部署中的时钟同步与相位偏移问题	第3章
物理层与系统层	5	现有波形设计与帕累托最优边界的距离	第3章
物理层与系统层	6	有限资源约束下对密集目标的超分辨感知	第3、4章
网络架构层	7	未来感知网络的潜在蜂窝架构	第5章
网络架构层	8	跨层资源管理方案与协议设计	第5章
应用与安全层	9	ISAC应用中的安全与隐私保障	第6、7章
应用与安全层	10	高精度多目标多任务识别	第6章



益与协调增益两类。集成增益通过频谱、硬件平台和波形的深度共享，避免为通信与感知分别建设独立系统，从而提升频谱效率和能量效率并降低部署成本[4,1]。协调增益则通过感知辅助通信和通信辅助感知的相互促进，产生协同效应。例如，在车联网场景中，路侧单元可利用雷达回波感知车辆的运动状态，并据此预测未来的最优通信波束方向，从而大幅降低波束对准的时延和信令开销[1]。协调增益的产生高度依赖于通信信道与感知信道之间的耦合程度：耦合越强，潜在的协同增益越大。这一认识将贯穿本文后续的技术讨论，并构成多项使能技术的理论基础。图1给出了ISAC系统核心概念与增益机制的示意。

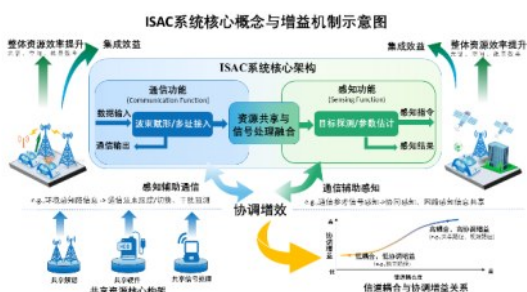


图1 ISAC系统核心概念与增益机制

1.5 本章小结

尽管当前的理论研究已为ISAC描绘了性能边界，但在实际工程中，射频非理想特性、多径效应以及晶振频偏等硬件损伤将对上述理论边界产生显著的拉伸效应；同时，标准化进程的滞后与安全隐私保护的缺失，仍是制约ISAC从理论走向大规模商用的关键屏障。这些问题将在后续章节中深入剖析。

2 通信感知一体化的理论基础

在构建了ISAC的研究背景与核心框架后，本章将深入探讨其底层性能边界。本章重点回应挑战一（ISAC系统的信息论极限）、挑战二（感知数据与CSI的内在关联度）和挑战三（集成增

益与协调增益的量化）。我们将从性能指标体系出发，利用I-MMSE公式、容量-失真函数以及克拉美罗界（CRB）等理论工具，剖析通信与感知在资源分配上的根本性矛盾，从而为后续章节的物理层波形优化和网络协同设计提供理论依据。

2.1 性能指标体系

ISAC系统的设计优化需要一个能兼容通信与感知双功能的综合性能指标体系。理解两类指标迥异的物理内涵与数学表达，是进行任何联合优化的前提[1]。

感知性能度量可按任务层次划分为检测、估计与识别三类。检测任务的核心指标为检测概率与虚警概率，通常由奈曼-皮尔逊准则下的接收机工作特性（ROC）曲线来刻画[1,7]。估计任务旨在从含噪观测中提取目标的连续参数（如时延、到达角、多普勒频移），其核心度量是均方误差（MSE）及其理论下界——克拉美罗界（CRB）。识别任务则用于目标属性或行为分类，常以识别准确率作为评价标准[8]。通信性能度量主要从效率和可靠性两个维度进行衡量，频谱效率（bps/Hz）和信道容量是效率指标的核心，误码率（BER）和中断概率则是可靠性指标的代表[1]。由于通信性能属于信息论范畴，而感知性能属于估计论范畴，直接在统一框架下分析ISAC系统的性能极限具有较大挑战。目前学界已建立两种关键的理论联系。其一，I-MMSE公式建立了一种重要的微分关系，即在加性高斯白噪声信道中，输入输出互信息 $I(X; Y)$ 与最小均方误差（MMSE）满足：

$$\frac{d}{d\text{SNR}} I(X; Y) = \frac{1}{2} \text{MMSE}(I)$$

该公式揭示了一个反直觉但关键的物理关系：最大化互信息的最优通信输入信号（高斯分布信号）同时也会最大化MMSE，这意味着对通信最优的信号，从感知测距的角度来看却是性能最差的。这一发现构成了波形联合设计研究的重

要理论动机。

容量-失真函数 $C(D)$ 提供了一种更具操作性的统一分析工具[1,9]。该函数定义为：在满足平均失真约束 D 的条件下，系统可实现的最大通信速率。考虑一个点对点 ISAC 信道，发射机需在向接收机发送消息的同时，通过回波估计信道状态。在一个简化高斯信道模型中，通过将总功率 P 划分为用于通信的 ρP 和用于感知的 $(1-\rho)P$ ，可得可达的速率-失真帕累托边界。该参数方程可表示为：

$$R(\rho) = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\rho P}{\sigma_n^2} \right) \quad (2) \quad D(\rho) = \sigma_H^2 - \frac{(1-\rho)P\sigma_H^4}{\sigma_n^2 + (1-\rho)P\sigma_H^2} \quad (3)$$

其中 $\rho \in [0, 1]$ 为功率分配系数。当 $\rho=0$ 时，全部功率用于信道估计，可得最小感知失真，但通信速率为零；当 $\rho=1$ 时，全部功率用于数据传输，可得最大通信速率，但信道状态完全不可知。该框架为量化集成增益与协调增益提供了基础工具。

2.2 信息论与性能权衡

探究 ISAC 系统的信息论极限是回应挑战一的核心内容。在单站雷达场景中，发射机无法预先获知目标所在信道的状态，必须从带有延迟的回波中同时进行信道估计与信息传输，这在信息论上可建模为带有广义反馈的信道。对于多址接入信道（MAC）和广播信道（BC）等多用户场景，其内外界容量-失真区域已获得初步建立。研究表明，利用块马尔可夫编码和反向解码等高级编码技术，可利用回波反馈实现用户间信息协作，在同等感知失真下，和速率可提升约 15% 至 20%[1]。然而需指出的是，对于绝大多数复杂的多用户 ISAC 信道，其精确的最优容量-失真区域仍是一个核心理论难题，现有内界和外界之间往往存在显著的性能差距。缩小这一差距是信息

论领域亟待解决的重要挑战。

除了信息论层面的宏观权衡，通信与感知在物理层还存在对特定资源的直接竞争。一个极具代表性的案例是多天线 ISAC 系统中目标估计与多用户通信在空间自由度上的权衡[9]。考虑一个配置 M 根发射天线的基站，同时服务于 K 个单天线用户并检测一个点目标。为使目标响应矩阵能够被无偏估计，发射波形样本协方差矩阵必须满秩（秩为 M ）。然而，在传统 MISO 下行通信中，为了消除多用户干扰，波形的秩通常受限于服务用户数 K （ $K \ll M$ ）。这一冲突迫使设计者必须在波形中注入至少 $M-K$ 个不含通信信息的感知探测流以补充矩阵秩[21]。以 $M=64, K=8$ 的典型配置为例，这意味着约 87.5% 的空间自由度需被分配给感知功能，通信的多用户复用能力受到严重制约。单纯依赖增加天线数来弥补自由度损失的策略并非可持续的路径，需要探索稀疏阵列、多波束协同等新的自由度扩展方法。

通信与感知在空间路径资源上的偏好也存在根本分歧。通信系统乐于利用环境中丰富的多径分量以获得分集和复用增益，而感知系统则视非视距（NLoS）路径为杂波，需进行抑制才能清晰检测视距（LoS）目标。无线信道的这种空间稀疏性与富散射特性，对通信与感知分别具有截然不同的价值，构成了 ISAC 系统设计中一个持续存在的内在矛盾。

2.3 克拉美罗界分析

克拉美罗界是分析 ISAC 系统感知性能极限、揭示物理层资源如何影响精度的核心理论工具[7]。对于典型的多输入多输出雷达系统，目标参数（如时延 τ 、到达角 θ 和多普勒频移 f_d ）的 CRB 可以被统一表示为：

$$\text{CRB}(\cdot) \propto \frac{1}{\text{SNR} \cdot N_T N_R \cdot B_{\text{eff}}^2 \cdot T_{\text{eff}} \cdot (\sigma_T^2 + \sigma_R^2)} \quad (4)$$

其中， N_T 和 N_R 分别为发射/接收天线数， B_{eff} 为有效带宽， T_{eff} 为相干积累时间， σ_T^2 和 σ_R^2 分别为



发射与接收阵列孔径的样本方差[7]。该统一表达式揭示了影响感知精度的五大物理资源：功率（信噪比）、空间（天线数与孔径）、时间（积累时间）、频率（带宽）以及几何结构（阵列孔径分布）。任何旨在提升感知精度的技术，其本质都可归结为对这五种资源中一种或多种的增强，这为ISAC系统的跨资源调度奠定了理论基础。如图2所示，克拉美罗界与系统资源的性能权衡直观地反映了系统资源对感知精度的综合影响。

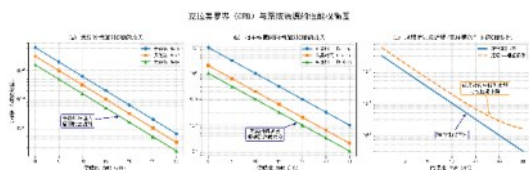


图2 克拉美罗界与系统资源的性能权衡

对于基于到达时间的定位系统，其等效费舍尔信息矩阵（EFIM）可分解为各锚节点贡献的加权和[7]。该分解揭示了多径环境对定位精度的双重影响。首先，如果缺乏对NLoS路径延迟偏差的先验信息，NLoS信号对EFIM的贡献完全为零，这意味着NLoS信号不仅无法提供有用信息，还可能在检测中引发虚警。其次，首径与其后多径分量在时间上的可分离性至关重要，重叠越严重，从首径中提取精确距离信息就越困难。实测数据显示，当多径重叠程度从10%增加至50%时，定位均方根误差可能恶化2至3倍。这一洞见直接为挑战六（超分辨率感知）提供了明确的技术路径：使用超大带宽的毫米波或太赫兹信号，可从物理层面根本缓解多径叠加导致的精度退化。

最后，从信道耦合的角度看，文献[1]通过简化的MISO模型证明，最优发射波束赋形向量必然位于通信信道导向矢量与感知信道导向矢量张成的子空间内。当二者完全对齐（强耦合）时，几乎不存在性能权衡；当二者正交（弱耦合）时，权衡则极为剧烈。这一发现表明，协调增益

的高度与通信、感知信道的耦合度直接挂钩，并对挑战二（CSI关联度）和挑战三（量化增益）做出了直接回应。

2.4 本章小结

ISAC系统的信息论极限和感知性能上界，从根本上取决于通信与感知在功率、空间、时间等资源上的分配博弈，且该矛盾受制于信道实际耦合特性。当前理论边界多基于理想假设，在实际工程中，多径干涉、射频非理想特性及硬件频偏将导致帕累托边界显著收缩。如何通过波形设计逼近理论边界并保持稳健性，是下一章的核心议题。

3 波形设计与信号处理

理论层面的剖析揭示了通信与感知在资源竞争上的硬约束，且该约束受信道实际环境的显著影响。要逼近第二章中建立的理论边界，必须依赖物理层波形设计与接收端信号处理算法的精准配合。本章聚焦于挑战四（双站和分布式部署中的时钟同步与相位偏移问题）、挑战五（现有波形设计与帕累托最优边界的距离）以及挑战六（有限资源约束下对密集目标的超分辨感知）。我们将系统梳理波形设计的方法学演进，评估基于5G NR信号的感知实践，并探讨先进接收端处理算法如何从物理层缓解上述瓶颈。

3.1 波形设计分类

根据集成方式与设计自由度的不同，ISAC波形设计方法可以系统性地划分为非重叠资源分配与全统一波形两大流派[1,10]。每一类方法都有其适用的场景和固有的性能边界。图3展示了ISAC波形设计方法的分类体系。

非重叠资源分配通过将通信和感知信号在时域、频域、空域或码域上进行正交划分，彻底避免互干扰[1]。其最大优势是与现有通信标准高度兼容，被视为ISAC走向商用的早期可行方案。时分方案利用5G NR帧结构中的同步信号块进行

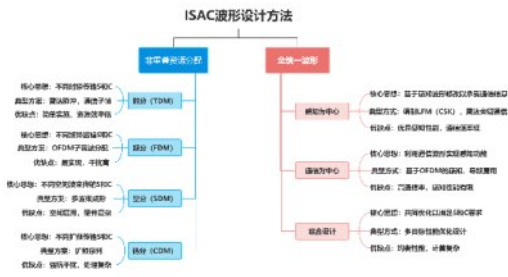


图3 ISAC波形设计方法分类体系图

感知[11-12]，但刷新率受限，难以支持高速目标的连续跟踪；频分方案为感知预留的子载波会永久性地降低频谱利用率；空分方案利用多天线将感知波形投影到通信信道的零空间，但设计自由度高度受限。总体而言，非重叠资源分配是一种保守但可靠的策略，可作为渐进过渡方案。

全统一波形采用更彻底的设计思路，旨在通过单一波形同时服务于两项功能以获取最大集成增益[1,6]。该流派细分为三类：以感知为中心的设计（如在 FMCW 或索引调制波形中嵌入信息），其通信速率受限于脉冲重复频率，通常不超过 10Mbps；以通信为中心的设计（直接利用 OFDM 等标准波形），虽落地潜力大，但面临高峰均功率比（PAPR）和多普勒敏感性挑战；联合设计方法则是当前的研究热点，旨在从零构建能灵活权衡双性能的波形。

如 2.1 节容量-失真函数所示，通信与感知存在根本性的资源权衡。为逼近这一理论边界，一个经典的联合设计可被建模为加权的多目标优化问题：

$$\min_{\mathbf{X}} (1-\rho) \|\mathbf{H}_c \mathbf{X} - \mathbf{S}\|_{\mathbf{F}}^2 + \rho \|\mathbf{X} - \mathbf{X}_{\text{rad}}\|_{\mathbf{F}}^2 \quad (5)$$

其中 $\mathbf{X}$ 为发射波形矩阵， $\mathbf{H}_c$ 为通信信道矩阵， $\mathbf{S}$ 为期望通信符号， $\mathbf{X}_{\text{rad}}$ 为理想感知波形， $\rho \in [0, 1]$ 为权衡因子。扫描 ρ 的取值可获得一条平滑的通信-感知性能帕累托曲线[10]。然而，必须指出的是，尽管联合设计在数学上能够实现性能折衷，其所得到的性能曲线目前仅能被视为一条

当前工程的可达边界。对于复杂的 MIMO-OFDM 系统，精确刻画其真正的理论极限边界仍是一个数学上的开放难题。此外，求解公式(5)通常依赖复杂的迭代算法（如内点法），在 64 天线、12 子载波的典型配置下，单次求解耗时可达数百毫秒，这与通信系统毫秒级的调度周期存在数量级差距。现有的优化工作普遍忽略了发射机非线性失真、恒模约束以及量化误差等现实硬件限制，这正是理论最优与工程可实现最优之间目前最显著的差距。未来的研究需致力于开发基于流形优化或深度展开网络的低复杂度次优解法，以缩小这一差距。

3.2 基于 5G NR 信号的感知

利用利用现网中已大规模部署的 5G NR 信号进行感知，是 ISAC 从理论走向低成本商用的务实路径，也是回应挑战四（时钟同步）和挑战六（超分辨感知）的关键领域[9,13-14]。5G NR 标准中的 SSB、CSI-RS、DMRS 等参考信号，在自相关特性、带宽覆盖及时频密度上各有侧重，业界已探索出利用 DMRS 解速度模糊、CSI-RS 提距离精度的组合策略。

然而，直接利用 NR 信号进行感知面临三重严峻的工程挑战：**首先**，参考信号在时频资源上的非均匀、不规则分布，若直接进行 2D-FFT 处理会产生扩散函数效应，导致极高的旁瓣。实测结果表明，在仅使用 25% 带宽时，强目标旁瓣可能导致弱目标检测信噪比损失达 10dB 以上。**其次**，DMRS 通常经过预编码，不同资源块上的信号经历不同的等效衰落，无法直接相干合并。针对此问题，文献[9]提出了子带分组算法，有效提升了检测概率。最后，也是最具根本性的挑战——双站与分布式部署中的时钟同步与相位偏移（挑战四）。现有方案多依赖 GPS 或 IEEE1588v2 网络时间协议进行预补偿[9]。但在高速移动场景下（如高铁），接收机晶振频漂可达数十 ppb 量级，测距误差数秒内即可累积至数米；而在隧



道、地下车库等卫星信号完全拒止的环境下,传统GPS同步方案完全失效。

如何设计对时钟异步具有内在稳健性的感知算法,如何解决跨参考信号非相干累积带来的融合损失,仍缺乏深入的系统性研究。这不仅是工程瓶颈,更直接制约了NR感知向大规模应用的转化。

3.3 接收信号处理

在ISAC接收机中,下行通信符号的解调与目标回波的参数提取在同一时频资源上重叠,产生复杂的相互干扰。先进接收机设计的关键在于如何从混合信号中高质量、高分辨率地提取目标参数,从而突破由带宽和积累时间决定的经典傅里叶分辨率极限,直击挑战六[8-9]。

文献[9]中提出的基于迭代串行干扰消除的参数提取算法(又称CLEAN算法)是解决此问题的有效方案。其流程可描述为一个迭代的检测-估计-重建-消除循环:首先在时延-多普勒平面上通过峰值搜索找到当前最强目标;接着通过网格迭代细化精确估计目标参数,超越经典分辨率极限;然后重建全部信号贡献并从残差中减去。在5.9GHz车联网信道的实测中,该算法在仅使用25%无线帧资源的条件下,依然能有效检测非视距区域的行人和车辆,定位误差中位数低于0.8m[9]。但需注意的是,CLEAN算法在处理密集目标时,误差传播效应会导致后续迭代精度下降,实际可靠分辨的目标数通常不超过5~7个。

另一类重要的超分辨感知方法是基于压缩感知理论的稀疏重构算法[1]。该类方法将信道或目标建模为高度稀疏的恢复问题,利用少数物理路径的稀疏先验,能以远低于奈奎斯特采样率的测量值实现高精度参数估计。在雷达干扰远强于通信信号的场景中,稀疏重构算法能将雷达干扰显式建模为稀疏分量并与通信信号联合迭代恢复,从而在完成通信解调的同时将雷达干扰作为副产品重建并消除。数值仿真结果表明,在雷达干扰

功率高出通信信号10dB时,稀疏重构算法仍可实现接近无干扰时的误码率性能。然而,这类算法对稀疏度的准确估计高度依赖环境先验,计算复杂度较高,同样制约了其在实时系统中的直接应用。

3.4 本章小结

尽管联合波形设计与超分辨算法已在理论上逼近了帕累托边界,但现实工程中依然面临时钟同步精度不足、算法实时性差、非理想硬件损伤等关键羁绊。这些物理层局限,需要借助更前沿的使能技术从环境重塑(如RIS)或阵列物理孔径(如稀疏MIMO)层面加以根本性突破。

4 关键赋能技术

前文的探讨表明,仅依赖传统基站架构和波形级优化的ISAC系统,在面对高频段覆盖盲区、高度动态环境的适应性,以及由固有物理孔径带来的分辨率极限等问题时,仍会展现出天然的局限性。为突破上述物理瓶颈,本章将深入剖析可重构智能超表面(RIS)、无人机(UAV)以及毫米波/太赫兹与稀疏MIMO等前沿使能技术。这些技术通过主动调控传播信道耦合度、动态重构感知拓扑以及突破传统阵列物理孔径,分别对挑战二(感知数据与CSI的关联度)、挑战四(时钟同步与相位偏移)、挑战六(有限资源约束下的超分辨感知)及挑战十(高精度多目标多任务识别)给出了直接且深入的回应。值得注意的是,这些技术并非彼此孤立,而是可以形成深度的协同效应,例如RIS可为UAV提供地面覆盖补盲,而稀疏MIMO则可为RIS的反射链路提供更高的角度分辨率,这种协同潜力将是未来研究的重要方向。

4.1 可重构智能超表面

RIS是一种由大量亚波长尺度的可编程电磁单元构成的二维平面阵列,通过智能控制器可动态调控入射电磁波的相位、幅度乃至极化方式。

RIS 对 ISAC 系统的贡献,远不止于增强信号覆盖这一表层功能,更在于其对无线传播环境的智能重塑能力。如图4所示,RIS辅助ISAC系统通过建立虚拟视距链路解决高频段覆盖盲区问题。

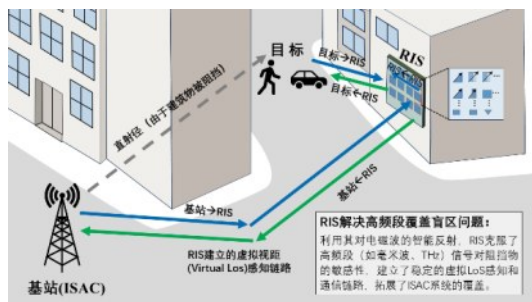


图4 RIS辅助ISAC系统工作示意图

RIS首要的角色是充当智能反射镜以解决高频段下的覆盖盲区问题[15-16]。在典型的毫米波城市环境中,目标极易被建筑物遮挡而处于非视距区域。通过将RIS部署于建筑物外立面等有利位置,可在基站和遮挡目标之间建立可控的虚拟视距链路。如第2.3节中CRB统一表达式所示,系统感知精度与有效信噪比、天线孔径等资源强相关。通过联合优化基站发射预编码和RIS反射系数,可有效提升回波信号的信噪比。在目标被完全遮挡的极端场景下,有RIS辅助的系统相比无RIS系统,其CRB可降低超过30dB[17]。以28GHz毫米波系统为例,在基站到RIS距离50m、RIS到目标距离10m的条件下,使用128单元的RIS可使角度估计误差从无RIS时的 5° 以上降低至 0.3° 以下。

RIS更深层的理论价值在于对通信与感知信道耦合度的主动调控[15]。在第2.3节中已指出,协调增益的高度依赖于通信与感知信道的耦合程度。在传统系统中,耦合度完全由被动的、随机的传播环境决定。RIS的引入使得环境变得部分可控:通过精心设计反射系数矩阵,RIS可对无线信道施加子空间旋转与子空间扩展两种操作。前者能将原本几乎正交的通信与感知信道子空间

旋转至有一定交叠的状态,人为创造强相关性;后者则为两者提供额外的可控传播路径。在通信与感知信道天然处于弱耦合的场景下,RIS带来的性能增益最为显著,可使协调增益提高约40%至60%。这种主动干预信道内在结构的能力,为环境辅助的ISAC新范式提供了可能。

然而,必须正视无源RIS所面临的乘性衰落问题[18-19]。由于信号历经基站-RIS-目标的级联链路,其强度是两段路径损耗的乘积,最终到达接收机的反射信号极为微弱。尽管主动RIS通过在反射单元中集成有源功率放大器,理论上可提供超过30dB的雷达输出信噪比增益,但这并非没有代价:其内部放大器会引入额外的非线性失真和热噪声,且单元功耗显著增加(约10~20dBm量级)[18]。因此,在净增益、功耗与信号保真度之间是否存在可持续的工程平衡,仍需在大规模外场试验中予以验证,而非仅停留在仿真层面。此外,大规模RIS的控制信令开销、单元制造公差以及实际部署中的角度选择性等问题,都是短期内制约商用化的现实障碍。RIS的成熟路径很可能是一个渐进过程:先从无源RIS的覆盖补盲场景切入,待有源器件工艺成熟后再逐步引入主动RIS以应对更复杂的信道环境。

4.2 无人机

除地面基础设施外,无人机凭借其高机动性、部署灵活性以及易获得空地视距链路的天然优势,成为ISAC系统的理想空中平台[20-21]。UAV-ISAC系统能灵活、有效地应对挑战八(动态资源管理)的需求,并直接为低空经济等应用提供技术支撑。

在UAV-ISAC网络中,无人机可根据任务需求灵活扮演空中基站、终端或中继等多种角色[21]。其最核心的优势在于利用ISAC的感知能力实现高度自主智能。通过实时感知地面用户分布、信道状态及潜在物理威胁,UAV可动态优化三维飞行轨迹与波束赋形方向。例如,在应急通



信任任务中, 无人机集群可通过 ISAC 信号感知并搜索受困用户热点区域, 自主规划路径飞往目标上空盘旋, 实现按需弹性覆盖, 这种感知驱动的部署策略可使网络吞吐量提升 30% 至 50%[20]。如图 5 所示, 多无人机 ISAC 网络通过协同感知生成完整的低空态势图。

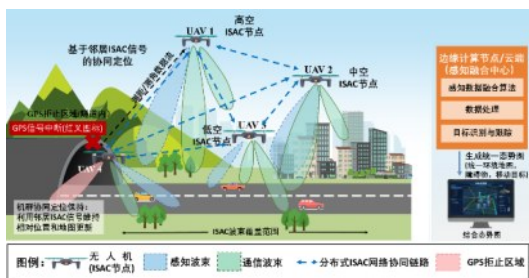


图5 多无人机 ISAC 网络协同感知架构图

单架无人机的感知范围和数据处理能力十分有限, 在多目标共存或有遮挡的复杂场景中此缺陷尤为突出。将多架无人机组网可实现强大的网络化协同感知, 这是应对挑战十(多目标识别和数据关联困难)的关键方案。各 UAV 从不同高度和视角获取数据, 通过高可靠 ISAC 链路汇聚后, 在边缘或云端进行信号级/信息级融合, 可生成完整的低空态势图。实验数据证实, 即使在单架无人机飞入隧道导致自身 GPS 信号完全失效的极端情况下, 通过机群协同感知与通信中继, 整个系统依然能保持对自身及目标位置的高精度态势感知, 相对定位误差可保持在 0.5m 以内[20]。这为 GNSS 拒止环境下的自主导航提供了重要技术储备。

尽管多智能体强化学习在 UAV-ISAC 的实时决策中展现出巨大潜力, 但其在线训练效率、对非平稳低空环境的泛化能力, 以及决策结果的可解释性, 仍是制约其实际部署的核心瓶颈。同时, 机载电池的能量极为有限(典型多旋翼续航约 30 分钟), 严重制约持续服务能力。未来的研究需将物理层信道模型的先验知识与数据驱动的学习算法深度结合, 同时配合高效的无线充电或

能源补给策略, 才能将 UAV-ISAC 的潜力转化为可靠的工程能力。

4.3 毫米波/太赫兹与稀疏多输入多输出

除了空间部署层面的新平台引入, 在信号载频与阵列天线层面的技术演进对 ISAC 同样至关重要。向毫米波(30-300 GHz)乃至太赫兹(0.1-10 THz)频段发展, 以及向稀疏 MIMO 架构的演进, 为系统突破传统感知分辨率极限提供了直接的物理手段。这直接回应了挑战六(超分辨率感知)与挑战十(多目标分辨)[2,22]。

向毫米波/太赫兹频段演进的趋势带来了革命性的机遇。数 GHz 乃至数十 GHz 的连续可用带宽, 是实现厘米级乃至亚厘米级超高精度测距及高分辨率成像的物质基础[2]。利用太赫兹波能探测不同物质独特吸收谱线的特性, ISAC 系统甚至有可能识别被探测物体的具体材质, 极大拓展了感知的信息维度。然而, 太赫兹频段在带来巨大带宽红利的同时, 也面临着大气吸收峰明显、固态功放输出功率极低(通常在毫瓦级)等现实障碍, 短期内难以实现广域覆盖。因此, 太赫兹 ISAC 更可能在短距室内场景(如智慧工厂、数据中心)率先取得突破, 而非宏蜂窝室外场景。

与此同时, 常规频段下的天线架构革新同样引人注目。传统紧凑型均匀阵列受限于阵元间距(半波长), 要获得更高的角度分辨率只能增加物理天线数量, 但这将引发硬件成本与计算复杂度的指数级增长。稀疏 MIMO 技术则另辟蹊径, 通过在给定物理阵元数下将阵元间距有意扩大至数倍波长, 构造出物理口径远大于紧凑阵列的天线阵列, 从而获得极高的角度分辨率[22]。

典型的稀疏阵列设计(如嵌套阵列和互质阵列)的精妙之处在于: 通过非均匀阵元位置部署, 可利用接收信号二阶统计量, 在数学上等效构造一个规模更大且连续的差分联合阵列。例如, 一个仅含 $N_1 + N_2$ 个物理阵元的嵌套阵列, 可产生包含 $O(N_2^2)$ 个虚拟阵元的等效连续虚拟阵

列, 实现了可分辨目标数(自由度)相对于物理阵元数的平方级增长。以 $N_1=3, N_2=5$ 的嵌套阵列为例, 仅用 8 个物理阵元即可获得等效 29 个阵元的虚拟孔径, 可分辨目标数从传统阵列的 7 个提升至 28 个。这仅用少量物理阵元即可分辨远超其物理数量的密集目标, 直接回应了多目标分辨难题。

更大孔径阵列还带来了一个根本性的范式变化: 其瑞利距离被极大地推远, 使得大量在传统通信和雷达中被视为远场的场景落入了近场区域。在近场中, 电磁波等相位面需用精确的球面波模型描述, 相位同时包含了目标的到达角与距离信息。这使得仅利用单基站进行目标的三维定位在理论上成为可能, 彻底打破了传统远场假设下角度与距离必须由多站联合获取的限制。

当然, 稀疏阵列也存在不可忽视的缺陷与挑战。其非均匀排布会引入严重的空间栅瓣, 导致测角出现模糊。目前业界已探索出基于空间统计先验和差分联合阵列特性的专用栅瓣抑制算法, 但这些算法大多对场景先验依赖度高、计算开销大。此外, 近场通信与感知也带来了全新的信号处理挑战: 传统的基于远场平面波假设的波束赋形算法在近场将完全失效, 需要开发基于球面波前模型的精确信道估计算法。从紧凑阵列到稀疏阵列、再到近场感知的技术演进, 虽在根本上拓展了系统感知边界, 但其在波束管理、移动性支持以及复杂环境下的栅瓣消除等方面仍存在大量的理论空白, 值得学术界关注。

4.4 本章小结

RIS 对信道耦合度的主动操控、无人机群的柔性调度, 以及稀疏 MIMO 对近场孔径的扩展, 共同构成了突破传统物理层瓶颈的技术手段。这些使能技术形成了从环境重塑到孔径突破的协同效应。然而, 在实际复杂动态环境下, 理论增益将明显收缩, 将单点革新扩展到全网协同与跨层优化, 需第 5 章的网络架构与资源管理提供支撑。

5 网络架构与资源管理

将 ISAC 技术的潜力从单点链路的性能提升全面扩展至整个网络层面, 需要全新的网络架构设计理念、颠覆性的资源管理范式以及精细化的协议支持。本章将聚焦于挑战七(网络架构)与挑战八(资源管理与协议), 探讨如何构建一个能够高效、鲁棒、可扩展地支持泛在感知服务的未来无线网络。

5.1 感知移动网络

感知移动网络(PMN)的宏大愿景, 是尽可能复用和增强现有蜂窝网络基础设施, 通过深度的软件升级与有限的射频前端硬件强化, 使其平滑演进为一个分布式的、永远在线的传感器网络。在这一愿景中, 每一个基站、射频拉远头乃至用户终端, 均可成为主动或被动的感知节点。为适应从低功耗物联网到高精度自动驾驶等不同场景对性能、功耗和成本的迥异需求, PMN 应支持多种灵活的感知工作模式[1-2]。

下行单站感知模式让基站发射下行信号并接收目标反射的回波, 工作方式类似传统单站雷达。该模式对基站硬件要求最高, 它通常需要在发射高功率信号的同时, 接收由远距离目标反射回来的微弱回波。以 3.5GHz 频段、目标距离 100m、雷达散射截面为 1m^2 为例, 接收信号功率通常较发射功率低约 120dB 以上。这要求基站具备强大的自干扰消除能力, 而全双工技术虽在实验室中已能实现超过 110dB 的自干扰消除, 但将其用于 ISAC 场景时, 还需额外考虑发射与接收方向图之间的空间隔离以及功放非线性干扰分量。因此, 单站模式在实际部署中可能需与半双工或时分模式结合使用。

下行双站感知模式则将发射机和接收机在空间上分离, 令一个基站发射信号, 由另一个地理位置不同的基站进行接收。这巧妙地规避了单站自干扰的巨大难题, 但却引入了跨节点间高精度



时间与频率同步的新问题[9]。任何微小的时钟偏差均会在测距和测速中引入系统性误差。以典型的3GPP蜂窝网络时间同步精度($\pm 1.5\mu\text{s}$)为例,由此产生的测距误差可达约450m,显然无法满足ISAC的高精度需求。因此,双站感知依赖于GPS($\pm 50\text{ns}$)或IEEE 1588v2($\pm 100\text{ns}$)等高精度同步方案,但各方案均有其适用场景与精度局限。

分布式或网络化感知则是PMN的终极演进形态,能够提供最高的感知精度与鲁棒性[1]。在此模式下,多个地理上分散的传输接收点(TRP)同时发射正交或准正交感知信号,并进行联合接收。通过对所有节点采集到的原始信号进行信号级相干联合处理,系统可获得巨大的相干处理增益与空间分集增益。无蜂窝大规模MIMO网络架构,因其天然支持通过前传/回传网络对所有分布式接入点进行联合收发处理,被认为是支撑PMN信号级融合的理想拓扑。如图6所示,感知移动网络架构支持单站、双站及分布式/网络化协同感知模式。

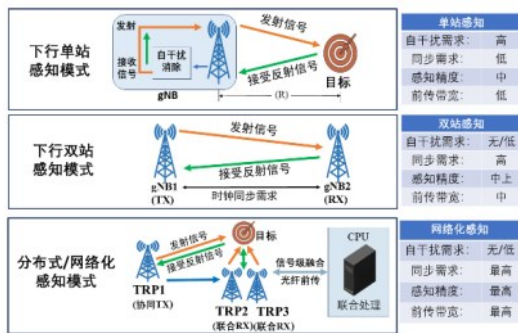


图6 感知移动网络架构

然而必须指出,尽管信号级融合在理论上能获得最大的感知增益,但这种极致性能的提升是以极其高昂的前传容量为代价的。若每个RRH的采样速率为100MHz、量化精度为12bit,单路前传数据速率即达1.2Gbps,对于包含数十个RRH的无蜂窝网络,总前传带宽需求将极为巨大。这

种理论增益与实际光传输带宽之间的张力,意味着工程实践中难以在所有场景下都采用信号级融合。如何根据感知任务的精度需求和网络资源状况,在信号级融合与信息级融合(仅上报点云数据)之间实现智能选择与无缝动态切换,将是未来网络优化的关键问题。

5.2 从干扰管理到干扰利用

传统蜂窝网络设计的核心策略是尽一切可能抑制同频干扰。然而在PMN语境下,需进行一次根本性的观念转变。来自相邻TRP的下行干扰信号,在照射目标发生反射后,其回波对于本小区的TRP而言,不再是需要抑制的无用噪声,而是承载了目标空间信息的机会照射源。

考虑一个云无线接入网架构,第*i*个RRH接收到的感知信号可表示为:

$$\mathbf{y}_i = \gamma_i \mathbf{G}_{ii} \mathbf{x}_i + \sum_{j \neq i} \gamma_{ij} \mathbf{G}_{ij} \mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i \quad (6)$$

其中第一项为本小区发射信号的回波,第二项求和正是来自所有相邻RRH发射信号经同一目标反射后到达的信号,即传统意义上的干扰。在PMN中,这些信号从不同空间视角提供了对同一目标观测的宝贵机会。若能在中央处理单元通过信号级融合协同利用这些回波,即可获得巨大的空间分集增益。仿真结果表明,4个协作TRP场景下,信号级融合相较于单TRP感知可获得约6dB的等效信噪比增益,定位精度提升2至3倍[1]。

然而,这一干扰利用理念高度依赖于各分布式节点间的时间同步与相位相干性。若跨节点间的时钟偏差无法精确控制在纳秒级,式(6)所示的信号级同相叠加将演变为随机相位相加,从而彻底消除理论上的干扰利用增益。因此,干扰利用不仅是一类信号处理算法问题,本质上更是一个极其严苛的硬件同步工程问题。网络管理者需依托前传网络的时频同步能力,根据实际可用的同步精度等级,在干扰利用与干扰规避之间做出合理的工程取舍。

5.3 跨层资源管理与协议设计

将感知作为一项具有严格、差异化 QoS 需求的基础网络服务，对无线资源管理和协议栈的设计提出了前所未有的新要求。此即挑战八的具体体现[8]。感知请求通常是突发性的，且不同任务的 QoS 需求组合千差万别。例如，高精度测距要求瞬间聚合超大带宽（百 MHz 量级），而粗粒度入侵检测仅需低速率（数 Kbps）、低精度的周期性报告。为高效支撑这种异构、突发性服务，必须依赖跨物理层、MAC 层和网络层的深度协同。

在物理层，需设计能根据上层指令自适应切换的资源分配算法，涵盖功率、带宽、波束、感知波形及感知模式的快速调整。在 MAC 层，需设计全新的信道接入与调度机制，处理通信与感知两类服务请求的优先级仲裁和无冲突调度。例如，可将感知请求寄生于现有通信信令中，设计增强型 RTS/CTS 机制，最小化新增信令开销。在网络层，则需将感知性能指标（如 CRB、检测概率）与通信指标（如速率、时延）一并纳入核心服务质量模型，并以此驱动组网、路由与移动性管理。

但不容忽视的是，当前跨层优化的理论模型大多假设各层协议栈间的信息交互是理想化、零时延的。而在实际 3GPP 协议栈中，物理层的信道测量上报、MAC 层的调度反馈均存在显著的周期性时延。跨层优化在带来理论增益的同时，也引入了复杂的信令交互开销。未来研究需要在优化增益与额外控制面开销之间找到一个理性的工程平衡点。可能的方向包括：基于标准化接口的模块化跨层设计，以及利用人工智能技术实现自适应的跨层策略学习，从而避免完全依赖低层频繁的显式信令交换。

5.4 本章小结

PMN 网络架构的演进不仅涉及硬件部署，更涉及设计哲学的深刻变革——将跨 TRP 的干扰视为机会信号源，将跨层协同作为核心策略。然

而，网络级性能跃升的代价是对前传容量、节点同步精度和信令开销提出了严苛工程要求。这些约束条件，必须在真实产业应用中接受检验，并兼顾安全、隐私与经济效益。

6 典型应用场景

前述章节分别从基础理论、物理层使能技术及网络架构三个维度，剖析了 ISAC 的系统能力与技术瓶颈。然而，任何前沿技术的价值最终需在真实的产业环境中得到检验。本章将选取低空经济、车联网和智慧工厂三个标志性垂直行业，将前文的理论模型与网络设计理念进行工程投射，旨在对挑战九（安全与隐私保障）和挑战十（高精度多目标多任务识别）进行回应。这三个场景分别代表了广域高动态（低空）、高速移动（车联）和高密度严苛（工业）三种典型的 ISAC 服务环境，有助于全面评估 ISAC 技术在不同物理约束下的成熟度与普适性。

6.1 低空经济

低空经济以无人机为核心运营载体，ISAC 技术使多架无人机可形成一个实时协同感知与通信网络，直接回应挑战十中的多目标跟踪与数据关联问题。根据 3GPP 6G 技术报告（TR 22.870）及低空智联研究[26]，低空场景需满足严苛量化指标。通信指标上，6G 系统需支持上行峰值速率 20 Gbps（典型视频监控场景上行 >24 Mbps），端到端通信时延需控制在 10 ms 量级，业务层可靠性目标达 99.999%；系统需支持飞行高度 0 - 3000 m 及 160 km/h 的高速移动。感知与定位指标上，定位精度需达厘米级至毫米级，速度估计误差 ≤ 5 m/s；在无人机运输监管场景中，漏检率需 $\leq 0.1\%$ ，虚警率需 $\leq 1\%$ ，无人机起降场景的感知服务最大时延需 ≤ 500 ms。计算时延方面，网络需具备跨边缘协同计算能力，以支撑群体级多智能体实时决策。

在一个典型多无人机协同跟踪框架中，各无



人机通过 ISAC 链路共享机载多源数据, 即便在单架无人机飞入隧道导致 GPS 信号失效时, 机群协同仍能维持 0.5 m 以内相对定位精度。此外, 无人机群利用 ISAC 信号感知地面热点分布, 在满足相同覆盖率时可减少近七成所需无人机数量。但必须正视, 当前原型系统的组网规模仍限于十余架, 且轻量化加密认证机制与机载能耗预算仍是制约从演示走向规模化运营的核心瓶颈。

6.2 车联网

车联网是 ISAC 技术应用场景最复杂、性能要求最严苛的领域之一, 需同时具备高速通信与高精度感知能力。通信指标方面, V2X 协同感知广播下行速率需达 100 - 300 Mbps, 自动驾驶控制端到端时延 ≤ 1 ms (抖动 ≤ 100 μ s), 通信可靠性 $\geq 99.9999\%$; 单 RSU 并发接入车辆达 80 - 150 台, 感知辅助通信可使信令开销减少 40% - 65%。感知指标方面, 高速场景感知距离 100 - 300 m; 横向定位精度需达 10 - 30 cm, 纵向 0.3 - 1 m, 测速误差 ≤ 0.3 m/s; 非视距 (NLoS) 遮挡车辆检测概率需 $\geq 92\%$, 虚警率 $\leq 3\%$; 系统需同时跟踪 120 - 300 个目标, 感知刷新周期 ≤ 100 ms。计算时延方面, 路侧感知融合处理时延 ≤ 200 ms, 紧急制动闭环时延 ≤ 0.8 ms; 恶劣天气下性能衰减需 $\leq 15\%$ 。

利用 RSU 的 ISAC 感知能力, 可通过卡尔曼滤波预测车辆位置并提前对准通信波束, 将通信中断概率降低约 80%。同时, 车辆接收机可利用下行信号探测弯道后方等 NLoS 障碍物, 文献[9]实测显示检测概率超过 90%, 测距误差中位数约 0.7 m。

值得注意的是, 在该场景下, 感知信号可能暴露车辆位置等敏感信息, 因此挑战九 (安全与隐私) 尤为突出。虽然研究者已开始探索利用 RIS 等手段在感知合法目标的同时抑制信号向窃听者泄露, 仿真表明这可将窃听信噪比降低 10 至 15 dB[16,23]。但这种安全波束设计通常以约 5%

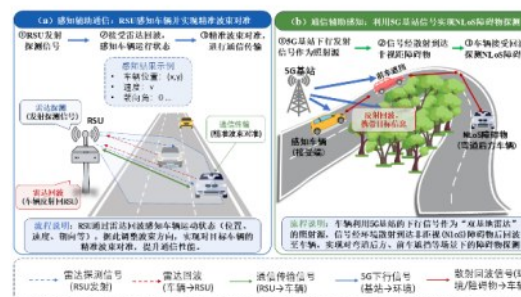


图7 车联网 ISAC 典型应用场景示意图

至 10% 的通信速率下降为代价, 系统设计者需根据实际业务的安全风险等级, 在安全增益与通信性能折损之间做出理性的工程权衡。

6.3 智慧工厂

智慧工厂对无线网络要求极致确定性, ISAC 技术高度契合工业需求。通信指标方面, AGV 控制指令上行速率需 10 - 50 Mbps (高清视觉回传 50 - 200 Mbps); URLLC 端到端确定性时延需 ≤ 1 ms (产线精密控制 ≤ 0.4 ms), 时延抖动需 ≤ 10 μ s, 可靠性需达 99.999999%; 单基站并发服务 AGV 达 180 - 220 台。感知指标方面, AGV 实时定位精度 5G-A 实测为 10 - 30 cm (6G 目标达 1 - 5 cm), 障碍物测距精度 ≤ 5 cm; 室内全场景目标检测概率 $\geq 98\%$, 人员入侵漏检率 $\leq 1\%$; 单基站同时跟踪目标需达 250 - 400 个, 感知扫描周期 ≤ 50 ms。计算与系统时延方面, 基站侧感知数据本地处理时延 ≤ 100 ms, 避障控制闭环总时延 ≤ 0.6 ms; 工业时钟同步精度需 ≤ 1 μ s。商用落地数据显示, 通感一体化方案可使综合 TCO 降低约 36%。

在实际智能车间中, ISAC 基站可同时进行高速控制通信和厘米级实时定位, 将 AGV 协同避障响应时间从传统系统的 50 - 100 ms 缩短至 10 ms 以内。此外, 网络通过实时感知大型移动物, 可提前数十毫秒预判并触发预防性切换, 确保 URLLC 链路零中断。然而, 在复杂金属反射环境下, 载波相位定位易受多径干扰导致误差发散至分米级, 其抗多径鲁棒性及 URLLC 与感知

计算的动态平衡仍需深入验证。

6.4 本章小结

上述三个典型应用场景的闭环分析，证实了 ISAC 在低空、车联和工业领域具备巨大的实用潜能。但实际测试也暴露出大规模机群的同步瓶颈、安全波束带来的通信速率折损，以及工业强反射下的定位算法失效，均构成了理论向产品跨越的核心障碍，也是未来标准化与研究的攻坚方向。

7 挑战与展望

在对 ISAC 进行了从理论、物理层使能、网络架构到三大典型应用场景（低空经济、车联网、智慧工厂）的闭环分析后，现实问题变得尤为清晰：尽管学术研究在理论上描绘了理想的性能边界，但在实际部署中，硬件损伤、复杂环境干扰和标准化碎片化带来的问题，仍使得理论峰值与工程可达值之间存在巨大差距。本章将从理论深化、算法与硬件协同、标准化、安全与隐私四个维度进行前瞻性展望。这四个维度直接呼应了前文提及的挑战一至挑战九，共同构成了从学术研究走向大规模产业落地的完整创新瓶颈图谱。

7.1 理论的深化

当前最紧迫的理论需求，是建立一个能将复杂工程环境纳入考量的、具有实际指导意义的信息论框架。第二章中阐述的容量-失真理论与克拉美罗界（CRB）为分析基本矛盾提供了起点，但其现有模型普遍建立在理想化的高斯信道、完美同步、无硬件损伤的假设之上。

必须解决理论模型与工程现实的脱节问题。第 2.2 节曾指出，空间自由度在通信与感知间存在严重竞争。然而，当前的自由度假定均基于理想化的远场平面波假设。随着第 4.3 节讨论的稀疏 MIMO 和近场感知成为主流，电磁波等相位面需由精确的球面波模型描述。如何将这种近场效

应对 CRB 和信道容量的影响，纳入到系统级帕累托边界的量化中，目前仍缺乏公认的解析模型。此外，如何在理论上同时计入射频非线性、量化噪声和晶振频漂等非理想因素对系统性能界的定量影响，也是一大难题。未来的研究需将鲁棒优化和机会约束规划引入框架，使得系统设计能在存在不确定性因素的情况下，仍可保证基础性能指标，从而定义出真正具有工程意义的感知容量。

7.2 算法与硬件

面对超大规模 MIMO 和近场感知的高维度特性，需要研发全新架构且计算复杂度可接受的信号处理算法。人工智能（尤其是深度强化学习）将在端到端波形优化中扮演变革性角色，但在安全攸关场景中，AI 推理决策的‘黑箱’特征仍是制约其部署的核心障碍，因此可解释 AI 与模型数据联合驱动的方法更具工程落地前景。同时，为了满足超低延迟要求，需将 AI 推理算法下沉至网络边缘。硬件层面，全双工巨大自干扰消除、低成本高精度 RIS 单元的大规模制造以及太赫兹功放效率低下，仍是制约系统走向实用的关键壁垒，从短期看，突破将聚焦于毫米波频段与中型 RIS 阵列，而太赫兹与动态 RIS 的成熟仍需 5 至 10 年。

7.3 标准化

成熟的标准化工作是 ISAC 能够大规模商用的前提。当前，ISAC 的标准化形成了“ITU-R 定愿景与频谱、3GPP 定蜂窝网络端到端、IEEE 定局域感知、ETSI 做前标准研究”的四方分层推进格局，且进展不一。

在 3GPP 方面，蜂窝 ISAC 正从需求研究进入架构定义阶段。Release 18（5G-Advanced 首版）虽已完成定位、波束管理与 AI/ML 等前置能力规范，但未定义完整的端到端 ISAC 闭环。Release 19 的标志性成果是 SA1 的 FS_Sensing 研究，输出 TR 22.837，完成了 Stage 1 层面的用例、业务需



求与 KPI 定义，但这仍属于研究性报告（TR），不直接等同于可实现的设备互通规范。Release 20 迎来了转折点，已启动 TR 23.700-14 的 Stage 2 系统架构研究，工作重心正从“需要什么”转向“网络如何实现”，这一阶段将决定基站、核心网和终端的改造范围与实现边界[27]。

在 IEEE 方面，IEEE 802.11bf-2025 已由 IEEE SA 正式发布，直接修改 802.11 的 MAC/PHY 以支持 WLAN 感知，覆盖 1 - 7.125 GHz 与 45 GHz 以上的频段。这是当前最接近消费级和企业级落地的通感标准，使路由器、手机等存量 Wi-Fi 设备通过固件或芯片升级即可成为感知节点。但其算法输出的一致性与跨厂商语义仍需产业联盟和产品认证补齐[28]。

在 ITU-R 与频谱方面，ITU-R M.2160-0 虽已将 ISAC 列为 IMT-2030 六大使用场景之一，但截至目前，并未分配任何全球统一的“ISAC 专用频段”。WRC-27 正研究 4.4 - 4.8 GHz、7.125 - 8.4 GHz 等候选频段的共享兼容性与技术条件，但在国际共识达成前，ISAC 的频谱部署仍需严格受限与现有通信业务和各国监管规则[29]。此外，ETSI ISG ISAC 正通过用例与信道建模等前标准研究，为上述正式标准组织提供前置输入。

标准化方向对产业的影响是决定性的。3GPP 蜂窝 ISAC 的成熟，将推动运营商从“连接提供商”向“感知能力提供商”转型，形成低空监测、交通流数字孪生等 API 服务，但也面临基站射频同步、硬件升级和感知数据合规的高昂成本压力；IEEE Wi-Fi 感知则推动消费级芯片和固件升级，商业模式以智能家居订阅、跌倒预警等为主，门槛较低、市场响应更快。当前需警惕的核心风险在于：将标准组织的技术报告（TR）误当作商用规范（TS），将导致后续产品接口与设备间无法互通；同时感知信号触发无线电监管限制以及隐私合规问题，也会成为产业规模化商用的关键屏障。

7.4 安全以隐私保护

安全与隐私将是决定 ISAC 技术能否被社会公众广泛信任，并最终实现商业闭环的信任门槛。由于同一无线信号同时承载着用户的私人通信数据和其周围物理环境的信息，信息泄露、被非法监控乃至恶意攻击的风险被成倍放大。

必须确立内生安全的设计理念。未来的研究需摒弃事后补救的思路，将安全与隐私作为不可动摇的核心设计指标贯穿于系统设计的所有层面。

在物理层，需发展基于无线信道特征（如信道指纹）的安全密钥生成方案，并通过人工噪声定向污染窃听信道。如第 6.2 节所揭示，这种安全波束赋形通常会导致约 5% 至 10% 的通信速率折损。如何量化并界定这种安全成本与系统增益之间的帕累托边界，将是未来安全 ISAC 理论的重要课题。在网络层，需设计轻量级、低延迟的加密与接入认证协议，以适应资源受限的物联网设备（如低空无人机）需求。在数据应用层，可引入联邦学习、差分隐私等先进技术，确保原始、高敏感的感知数据不出本地设备，即可完成智能模型的协同训练。唯有将安全设计内化为系统架构的固有要素，而非附加成本，ISAC 技术才具备获得社会信任的基础。

8 结论

通信感知一体化（ISAC）正驱动无线网络向集自主感知、环境理解与智能决策于一体的综合性平台演进。本文以十大核心挑战为逻辑主线，沿理论-技术-网络-应用四位一体的框架，对 ISAC 领域进行了系统性的综述与分析。

在理论层面，本文揭示了通信速率与感知精度之间存在由频谱、功率及时空自由度等底层资源竞争引发的根本性权衡。基于容量-失真函数和克拉美罗界（CRB）的统一性能分析框架表明，该权衡的剧烈程度高度依赖于通信与感知信

道的耦合特性，而协调增益的产生也正是建立在信道耦合的基础之上。

在物理层与网络架构层面，本文系统梳理了波形设计的方法学演进，指出当前联合波形设计虽可在数学上逼近帕累托边界，但与工程实际中的硬件损伤（如非线性失真、晶振频漂）之间仍存在不可忽视的鸿沟。使能技术方面，可重构智能超表面（RIS）对信道耦合度的主动调控、无人机集群对动态资源的柔性调度、以及稀疏MIMO对近场物理孔径的跨越式扩展，分别从环境重塑与感知维度上突破了传统物理层瓶颈。在网络侧，从干扰管理到干扰利用的范式转变，以及跨层协同机制的设计，为支撑通信与感知双重服务质量提供了可行的网络拓扑与协议基础。

在应用验证层面，将上述方案投射至低空经济、车联网和智慧工厂三大典型场景进行闭环评估，证实了ISAC在动态多目标跟踪、高精度定位及超低延迟控制等方面具备较强的实用潜能。同时，实测分析也暴露出当前理论模型在复杂电磁环境、强反射衰落与非理想同步条件下存在显著偏差，这构成了理论成果向规模化商用转化过程中亟待攻克的核心壁垒。

尽管在统一信息论框架的构建、标准化的国际博弈以及内生安全隐私保护等方面仍面临严峻挑战，但随着无线通信、信号处理、材料科学及人工智能等多学科的深度交叉融合，ISAC技术有望在6G及未来网络中，实现物理世界与数字世界的深度耦合与高效互联。

参考文献：

- [1] Fan Liu, Yuanhao Cui, Christos Masouros, Jie Xu, Tony Xiao Han, and Yonina C. Eldar. "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.
- [2] Nuria González-Precic, Musa Furkan Keskin, Ossi Kaltiokallio, Mikko Valkama, Davide Dardari, and Xiao Shen. "The integrated sensing and communication revolution for 6G: Vision, techniques, and applications"[J]. Proceedings of the IEEE, 2024, 112(7): 676-723.
- [3] 武刚, 崔琪, 刘凡, 等. 6G通信感知一体化技术专题简介[J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55(5): 1253-1254.
- [4] Y. Cui, F. Liu, X. Jing, and J. Mu. "Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: Applications, trends, and challenges"[J]. IEEE Network, 2021, 35(5): 158-167.
- [5] 曾勇, 杨定邦, 李鑫睿, 等. 6G通感一体化: 从传统MIMO到稀疏MIMO[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2025, 64(4): 1-11.
- [6] C. Sturm and W. Wiesbeck. "Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing"[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [7] An Liu, Zhe Huang, Min Li, Yubo Wan, Wenrui Li, and Tony Xiao Han. "A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication"[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 994-1034.
- [8] S. Luet al. "Integrated sensing and communications: Recent advances and ten open challenges"[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(11): 19094-19120.
- [9] N. K. Nataraja, S. Sharma, K. Ali, F. Bai, R. Wang, and A. F. Molisch. "Integrated sensing and communication (ISAC) for vehicles: Bistatic radar with 5G-NR signals"[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, early access, 2024.
- [10] S. D. Liyanaarachchi, T. Riihonen, C. B. Barneto, and M. Valkama. "Joint MIMO communications and sensing with hybrid beamforming architecture and OFDM waveform optimization"[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(2): 1562-1578.
- [11] T. Wild, V. Braun, and H. Viswanathan. "Joint design of communication and sensing for beyond 5G and 6G systems"[J]. IEEE Access, 2021, 9: 30845-30857.
- [12] Q. Zhang, H. Sun, Z. Wei, and Z. Feng. "Sensing and communication integrated system for autonomous driving vehicles"[C]. Proceedings of the IEEE INFOCOM Workshops, 2020: 1278-1279.
- [13] Jian Wang, Neeraj Varshney, Camillo Gentile, Steve Blandino, Jack Chuang, and Nada Golmie. "Integrated sensing and communication: Enabling techniques, applications, tools and data sets"[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(12): 23440-23455.
- [14] S. D. Liyanaarachchi, T. Riihonen, C. B. Barneto, and M. Valkama. "Optimized waveforms for 5G-6G communication with sensing: Theory, simulations and experiments"[J]. IEEE



- Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 8301-8315.
- [15] R. Liu, M. Li, H. Luo, Q. Liu, and A. L. Swindlehurst. "Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: Opportunities, applications, and future directions"[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(1): 50-57.
- [16] Sundeep Prabhakar Chepuri, Nir Shlezinger, Fan Liu, George C. Alexandropoulos, Stefano Buzzi, and Yonina C. Eldar. "Integrated sensing and communications with reconfigurable intelligent surfaces: From signal modeling to processing"[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2023, 40(6): 41-56.
- [17] Q. Zhu, M. Li, R. Liu, and Q. Liu. "Cramér-Rao bound optimization for active RIS-empowered ISAC systems"[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(9): 11722-11736.
- [18] Q. Zhu, M. Li, R. Liu, and Q. Liu. "Joint transceiver beamforming and reflecting design for active RIS-aided ISAC systems"[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(7): 9636-9640.
- [19] K. Zhong, J. Hu, C. Pan, M. Deng, and J. Fang. "Joint waveform and beamforming design for RIS-aided ISAC systems"[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2023, 30: 242-246.
- [20] Y. Zhang, J. Wang, G. Du, J. Chen, J. Wang, and Q. Li. "ISAC-aided UAV swarms: From networked perception to capability evolution"[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(9): 60-66.
- [21] 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.
- [22] J. Chu, Z. Lu, R. Liu, M. Li, and Q. Liu. "Joint beamforming and reflection design for secure RIS-ISAC systems"[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(3): 4471-4475.
- [23] 江怡航, 李晓阳, 朱光旭, 等. 面向低空经济的通信感知一体化网络[J]. 西安电子科技大学学报, 2025, 52(3): 1-11.
- [24] X. Cheng, D. Duan, S. Gao, and L. Yang. "Integrated sensing and communications (ISAC) for vehicular communication networks (VCN)"[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 23441-23451.
- [25] 王洋, 赵海森, 廖希, 等. 面向6G通信感知一体化的亚太赫兹路径损耗测量与建模研究[J]. 通信学报, 2024, 45(11): 184-193.
- [26] 康绍莉, 王可, 秦海超, 等. 面向6G的低空智能网联系统用例研究[J]. 信息通信技术与政策, 2026, 52(4): 2-14.
- [27] 3GPP. Study on Integrated Sensing and Communication; Stage 2 (Release 20): 3GPP TR 23.700-14 V20.0.0[S]. 2026.
- [28] IEEE Standards Association. IEEE 802.11bf-2025: Enhancements for WLAN Sensing[S]. 2025.
- [29] ITU-R. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond: ITU-R M.2160-0[S]. 2023. <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160/en>.

[作者简介]



张军 (1969年—), 男, 软件工程硕士学位, 吉林省信息化建设促进中心正高级工程师、中心主任。研究方向: 无线电通讯。



孙洪智 (1981年4月), 男, 电子与通信工程硕士学位, 吉林省信息化建设促进中心高级工程师, 专技七级。研究方向: 无线电监测、电子工程。



王保松 (1978年—), 男, 电子与通信工程硕士学位, 吉林省信息化建设促进中心高级工程师, 专技六级。研究方向: 无线电监管、无线信号识别分析。



孙志刚 (1981年—), 男, 计算机科学与技术本科学历, 吉林省信息化建设促进中心, 高级工程师, 专技六级。研究方向: 无线电监测、电子工程。



冯晓冬 (1980年—), 男, 学士学位, 吉林省信息化建设促进中心高级工程师, 专技七级。研究方向: 信息化技术与网络安全。



苗立松 (1977年—), 男, 计算机科学与技术本科学历, 吉林省信息化建设促进中心, 高级工程师, 专技六级。研究方向: 无线电监测、通信工程。