

6G 通感一体化关键技术和标准发展



6G Integrated Sensing and Communication: Key Technologies and Standardization Development

向际鹰/Xiang Jiying^{1,2}, 蒋创新/Jiang Chuangxin^{1,2},
高音/Gao Yin^{1,2}, 许进/Xu Jin^{1,2}, 刘峻琛/Liu Junchen^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055)
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI:10.12142/ZTETJ.202601004

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260225.1717.013>

网络出版日期: 2026-02-25

收稿日期: 2025-12-16

摘要: 系统研究了6G通感一体化 (ISAC) 的关键技术与标准化进展, 重点围绕通感用例场景、信道建模、网络架构与协议流程、物理层感知信号设计、感知和通信及定位融合等展开讨论, 分析了包括无人机感知在内的感知用例的社会价值与技术需求。在信道模型方面, 介绍了基于3GPP R19框架的感知目标信道与背景信道联合建模方法, 并结合雷达散射截面 (RCS) 动态特性与环境散射特性, 描述了兼顾通信与感知的统一信道模型。进一步地, 探讨了感知网络架构、流程与物理层安全, 对比了6种感知模式的适用性, 并给出了感知参考信号的方案。最后, 提出了感知辅助通信与定位、AI融合的技术路径, 通过跨网元信息交互实现资源调度优化与感知精度提升。研究成果为6G通感一体化的标准化与产业化落地提供了理论支撑与实践参考。

关键词: 6G; 通感一体化; 信道模型; 感知网络架构; 参考信号

Abstract: This paper systematically investigates the key technologies and standardization progress of integrated sensing and communication (ISAC) in 6G, with a focus on sensing-use case scenarios, channel modeling, network architecture and protocol procedures, physical-layer sensing signal design, as well as the integration of sensing with communication and positioning. The social value and technical requirements of sensing use cases, including unmanned aerial vehicle sensing, are analyzed. In terms of channel modeling, based on the 3GPP Release 19 framework, a joint modeling approach for target and background channels supporting sensing functionality is introduced. By incorporating radar cross section (RCS) dynamic characteristics and environmental scattering properties, a unified channel model that accommodates both communication and sensing is described. Furthermore, this paper explores the sensing network architecture and procedures, compares the applicability of six sensing schemes, and proposes sensing reference signal designs. Finally, a technical pathway for sensing-assisted communication and positioning fusion is proposed, which enhances resource scheduling optimization and sensing accuracy through cross-network-element information interaction. The research findings provide theoretical support and practical guidance for the standardization and industrial implementation of 6G ISAC.

Keywords: 6G; integrated sensing and communication; channel model; sensing-aware network architecture; reference signal

引用格式: 向际鹰, 蒋创新, 高音, 等. 6G通感一体化关键技术和标准发展 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(1): 13-23. DOI: 10.12142/ZTETJ.202601004

Citation: Xiang J Y, Jiang C X, Gao Y, et al. 6G integrated sensing and communication: key technologies and standardization development [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(1): 13-23. DOI: 10.12142/ZTETJ.202601004

随着6G网络向智能化、泛在化与绿色化方向演进, 通感一体化 (ISAC) 作为突破传统通信与雷达系统分离架构的核心技术, 已成为全球学术界与工业界的研究热点。该技术通过共享硬件资源与频谱资源, 实现通信与感知功能 (SF) 的深度融合, 在提升整体频谱效率的同时, 为低空经

济、智能交通、工业互联网、智慧城市等应用场景提供高精度环境感知能力。当前, 研究机构与企业正从理论创新、系统架构设计及标准化推进等多维度展开攻关。

在国际领域, 欧盟“数字罗盘”计划与美国联邦通信委员会 (FCC) 均将ISAC列为6G关键技术优先级项目, ISAC

也成为国际电信联盟为6G制定的六大应用场景之一^[1]。例如,欧盟资助的INTEGRATE项目专注于联合通信和传感网络的理论、算法和架构基础。与此同时,电气电子工程师学会(IEEE)与第3代合作伙伴计划(3GPP)等标准组织已启动相关标准规范制定工作,国际电信联盟也开始研究如何对ISAC场景和技术进行量化评估^[2]。

早在2021年,中国IMT-2030(6G)推进组就成立了ISAC子组,推动ISAC技术的研究,陆续发布了多项研究成果^[3-4]。并且在同一年,IMT-2030(6G)推进组就开展了ISAC测试工作,实施目标检测、环境重构、微形变、呼吸检测等场景的测试,极大地推动了产业上下游发展。目前相关技术已经在5G-A产品中得到初步应用。

本文聚焦6G通感一体的核心技术挑战与标准化进展,从场景需求、信道建模、网络架构与协议流程、物理层感知设计,以及感知通信定位融合等展开系统性研究。首先,基于3GPP SA1与无线接入网(RAN)侧发展,识别并定义覆盖空域、水域、地面与城市设施等高优先级通感用例;其次,介绍3GPP在R19所确定的融合通信与感知特性的信道模型框架,通过目标雷达散射截面(RCS)动态建模与背景环境分层表征,解决多径干扰与场景适配问题;进一步地,提出RAN侧感知网络架构,结合6类感知模式与3种感知计算方法(用户设备(UE)、基站、SF侧),构建低时延、高鲁棒性的感知流程,并给出对于感知物理层安全方案的初步探索;另外,设计物理层感知信号以达到远距离覆盖要求;最后,探索感知与定位、通信、AI的协同机制,通过跨网元信息交互实现通信谱效与感知性能的提升。本文旨在为6G ISAC的标准化推进与产业应用提供理论依据与技术路线图。

1 通感技术用例场景与信道模型

1.1 通感用例

通感一体已被纳入IMT-2030的核心使用场景之一,将在6G阶段从5G-A的既有探索走向规模化与产业化落地。结合3GPP SA1已达成的阶段性成果、RAN侧研究关注点与学术界的研究热点^[5-7],本节列举几类优先级高、具备明确社会与产业价值的用例,主要包括无人机、车辆、行人、自动导引车(AGV)以及船只等目标的检测与追踪,基础设施的坍塌监测与健康监测,环境重构以及数字孪生^[8]。

1) 无人机感知:在低空经济与公共安全双重背景下,面向城市上空、近郊与厂区园区的低空无人机目标感知成为刚需。6G网络侧感知在不依赖额外专网雷达的前提下,按

需覆盖重点空域,识别并跟踪无人机的存在、方位与运动趋势。典型使用场景包括:对禁飞或限飞区域的越界发现与动态告警;在物流与巡检业务中,为监管部门与运营平台提供基于网络的航迹连续性保障;在密集建筑遮挡的城市峡谷环境中,辅助实现冲突探测与空域调度。与传统单点雷达相比,网络内生感知具备连续覆盖、易部署和可与通信业务协同的优势,有利于提升监测的可靠性与成本效益,并降低对终端侧专用传感器的依赖。

2) 车辆和行人检测/AGV检测:类似无人机检测,对行人、车辆以及室内工厂AGV进行感知也有助于提高公共安全。

3) 船舶检测:面向近海岸和港区水域,对大小型船舶进行检测、分类与轨迹更新,是智慧港口、海事监管与海上救援的重要能力。在能见度受限(雾、雨)或海况复杂(风浪、强反射杂波)的条件下,6G网络基于通感一体可提供全天候的目标发现与状态更新,支撑航道安全疏导、违章闯入告警、应急搜救定位与环境监测。在港航物流侧,实时掌握船舶靠离泊动态与泊位周边态势,有助于提升调度效率与吞吐能力;在公共安全侧,对无标识或异常航迹目标的早期识别与预警,有助于风险前置与应急联动,带来显著社会效益。

4) 基础设施坍塌监测(地陷/滑坡/沉降等):针对公路、乡村道路、边坡、堤坝与农田等分布广且维护难的区域,6G通感能够对突发性塌陷、滑坡、地表异常位移等情况进行快速发现与定位。使用场景包括:高速与国省干线的路基安全监测与临时交通管制支撑;农田与水利设施的灾害早告警;地震次生灾害的巡检辅助等。当异常形变或坍塌迹象被检测到时,网络可快速向管理单位回传位置与时间信息,并联动现有的告警体系实现分级处置。相较传统依赖人工或稀疏传感器的方案,网络化感知具备“面+点”结合的覆盖优势,能够以更低的边际成本提升广域监测能力与响应时效。

5) 环境重构以及数字孪生:通过融合网络全域的感知数据(如终端与物体的高精度位置、速度、反射特性以及周围环境状态信息),构建并持续更新一个数字化的虚拟环境镜像。这一孪生环境不仅精确还原了物理世界的几何布局、障碍物分布及移动态势,还能预测视距(LoS)与非视距(NLoS)链路的动态变化。基于这一统一的环境上下文,网络能够实现前瞻性的资源调度与智能控制,例如:在切换过程中,依据预测的UE轨迹和环境遮挡状态,提前为目标基站配置最优波束集,大幅减少测量开销和切换时延;在链路阻塞前,主动激活反射路径或调整波束方向,保持连接可靠性。数字孪生体由此成为连接感知与通信的智能中枢,实现了从被动响应到主动优化的跨越,显著提升系统在高速移动和复杂环境下的频谱效率、能源效率及用户体验。

此外，人体健康检测、姿势识别等其他用例也得到了广泛关注，需要利用微多普勒特性提前感知目标细微运动信息。

上述用例覆盖“空—海—地—城”多域的关键场景，共同体现了6G通感一体“以网络为平台”的价值主线：通过连续覆盖与可运营的感知能力，提升公共安全与产业运行效率，并为多源信息融合与智能化运维奠定基础。上述场景在3GPP SA1 TR 22.870与RAN侧研究中均已获得关注或采纳，具备标准推进与产业落地的共同基础。

1.2 通感信道模型

感知信道建模是通信与感知技术的核心研究内容，其目标是建立既能满足通信需求，又能支持SF的信道模型框架。这一模型旨在实现通信与感知功能的深度融合，使得网络在传输数据的同时，能够通过无线信号实现对环境和目标的感知。3GPP在R19中提出了感知信道模型的设计框架，基于传统的通信信道模型进行扩展，增加了目标建模和环境建模的部分，力求全面覆盖典型感知场景中的信道特性^[9]。

传统的通信信道模型主要用于描述信号在发射机和接收机之间的传播特性，而SF则需要关注信号与环境中的目标或障碍物的交互过程，包括反射、散射和衍射等现象。因此，感知信道模型被设计为通信信道的扩展版本。它由目标信道与背景信道共同构建，整体表达形式为：

$$H_{\text{ISAC}} = H_{\text{target}} + H_{\text{background}} \quad (1),$$

其中， H_{ISAC} 表示通感信道， H_{target} 表示目标信道，包括所有被感知目标影响的传播路径； $H_{\text{background}}$ 表示背景信道，包括除了目标信道外的其他传播路径。

1.2.1 目标模型

目标信道建模的目的是描述感知信号在目标物体上的反射路径。每个感知目标都可以被看作一个或多个散射点。信号通过第一链路从发射机传播到目标，再通过第二链路从目标传播到接收机。为了精确描述这种传播过程，R19阶段深入研究了典型目标（无人机、车辆、人体、AGV）的RCS模型。

RCS模型与视角、目标尺寸、目标材质等多方面因素相关，可以将其建模成3个部分：

$$\sigma_{\text{RCS}} = \sigma_M \sigma_D \sigma_S \quad (2),$$

其中， σ_M 是大尺度的RCS建模，对于每个散射点是一个确定性的值， $\sigma_D \sigma_S$ 是小尺度的RCS建模， σ_D 可以是1，或者是和角度相关的值， σ_S 服从对数正态分布，均值与方差分

别为 $\mu_{\sigma_{s,\text{dB}}}$ 和 $\sigma_{\sigma_{s,\text{dB}}}$ ，满足公式(3)：

$$\mu_{\sigma_{s,\text{dB}}} = \frac{-\ln(10)}{20} \sigma_{\sigma_{s,\text{dB}}}^2 \quad (3)。$$

RCS建模方式会随着目标建模的散射点不同而有所不同，通常有两种建模方法：第一种是将目标建模成单散射点，并且 σ_D 的值固定为1和角度无关，如小尺寸的无人机或人；第二种是将RCS建模为单个或者多个散射点，并且每个散射点的 σ_D 与角度相关，如车辆、AGV等。

• 对于第一种RCS建模方式， σ_D 在入射角与散射角相同的情况下取值固定为1， σ_M 是自发自收RCS的线性值的均值， $10\lg(\sigma_M \sigma_D)$ 的取值可以表示为 $\sigma_{\text{MD,dB}}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s)$ 。 $\sigma_{\text{MD,dB}}$ 和确定性的入射角度 (θ_i, ϕ_i) 以及散射角度 (θ_s, ϕ_s) 相关：

$$\sigma_{\text{MD,dB}}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) = \max\left(10\lg(\sigma_M) - 3\sin\left(\frac{\beta}{2}\right), \sigma_{\text{FS}}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s)\right) \quad (4),$$

其中， $\beta \in [0^\circ, 180^\circ]$ ，是入射角和反射角平面内的双站角， $\sigma_{\text{FS}}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s)$ 表征前向散射的影响。

• 对于第二种RCS建模方式， σ_D 的取值依赖于入射角与散射角。这种建模方式下， $10\lg(\sigma_M \sigma_D)$ ，记为 $\sigma_{\text{MD,dB}}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s)$ ，是由入射角 (θ_i, ϕ_i) 以及散射角 (θ_s, ϕ_s) 确定的：

$$\sigma_{\text{MD,dB}}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s) = \max\left(G_{\text{max}} - \min\left\{-\left(\sigma_{\text{dB}}^V(\theta) + \sigma_{\text{dB}}^H(\phi)\right), \sigma_{\text{max}}\right\} - k_1 \sin\left(\frac{k_2 \beta}{2}\right) + 5\log_{10}\left(\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)\right), G_{\text{max}} - \sigma_{\text{max}}, \sigma_{\text{FS}}(\theta_i, \phi_i, \theta_s, \phi_s)\right) \quad (5),$$

其中， (θ, ϕ) 是入射和反射径的等分线的天顶角与水平角， $\sigma_{\text{dB}}^V(\theta)$ 和 $\sigma_{\text{dB}}^H(\phi)$ 分别定义为：

$$\sigma_{\text{dB}}^V(\theta) = -\min\left\{12\left(\frac{\theta - \theta_{\text{center}}}{\theta_{3\text{dB}}}\right)^2, \sigma_{\text{max}}\right\} \quad (6),$$

$$\sigma_{\text{dB}}^H(\phi) = -\min\left\{12\left(\frac{\phi - \phi_{\text{center}}}{\phi_{3\text{dB}}}\right)^2, \sigma_{\text{max}}\right\} \quad (7)。$$

1.2.2 背景模型

背景信道的设计遵循“在既有通信场景信道之上，提取不受感知目标影响的多径成分”的原则。它的作用是在“目标通道”之外，提供环境本底的散射与传播贡献，使得最终

的通感信道等于各目标通道之和再叠加一个背景通道。

对收发端同址的传输接收点 (TRP) /UE 单基地感知模式, 将接收机虚拟成参考点 (RP), 它们与同址点之间的二维距离和高度来自 Gamma 分布, 共 3 个参考点, 且方位分布保持相隔 120°, 以覆盖环境的主方位; 随后分别以 “Tx↔RP” 为链路, 按通信场景模型独立生成 3 条 NLOS 子信道, 并施加各自的路径损耗与阴影衰落, 最后把 3 条子信道线性叠加为总的背景通道。这样做可以用 3 个方位稳定的代表性路径来“采样”环境散射, 既不过度依赖某一偶然簇, 又能覆盖典型方向性的稳健背景。在单基地背景构造中, 参考点的高度与距离分布按场景 (UMi/UMa/RMa/InH/InF 及空地无人机扩展) 给出了不同的 Gamma 参数, 使得背景时延、角度与功率分布随频段与场景变化。如图 1 所示, 虚拟参考点的方法可以沿用既有通信信道模型产生过程, 拟合结果和射线追踪 (RT) 的效果非常匹配^[10-12]。

对于双基地中任意分离的 TRP - UE、UE - UE、TRP - TRP 等模式, 背景信道不使用参考点拼接, 而是直接按目标通信场景的标准快衰落流程生成整条通道。同样地, 绝对时延也直接复用对应场景的绝对时延模型 (例如 RMa/UMa/UMi/InH/InF 的表格参数)。

综上所述, 背景信道模型和目标模型的本质区别在于背景信道是静态的, 而目标信道建模时会在小尺度信道的建模中复用 TR 38.901 信道模型中多普勒项的建模。故在目前 5G-A 通感系统级仿真中, 业界普遍采用了不同形式的动目标显示 (MTI) 算法来抑制背景信道的影响, 并使用二维恒虚警 (CFAR) 算法识别非零频多普勒附近的感知目标。该流程覆盖了目前的 5G-A 用例中的全部的无人机、AGV、车辆、行人的动态目标感知场景。对于 6G 中新涌现的其他感

知用例, 例如静态目标的路面塌方检测等, 则尚未被目前 TR 38.901 中的信道模型所覆盖。未来如果需要 6G 更多的感知用例继续仿真评估, 3GPP 信道模型可以进一步增强。

2 感知网络架构与协议流程

2.1 感知模式与方法

通感一体化的感知模式分为 6 种, 如图 2 所示。在模式 A (即基站单基地模式) 中, 其工作方式与雷达非常相似, 单一节点既发射感知信号, 也通过感知目标接收反射信号。在模式 B (即基站双基地模式) 中, RAN 基站 A 发射感知信

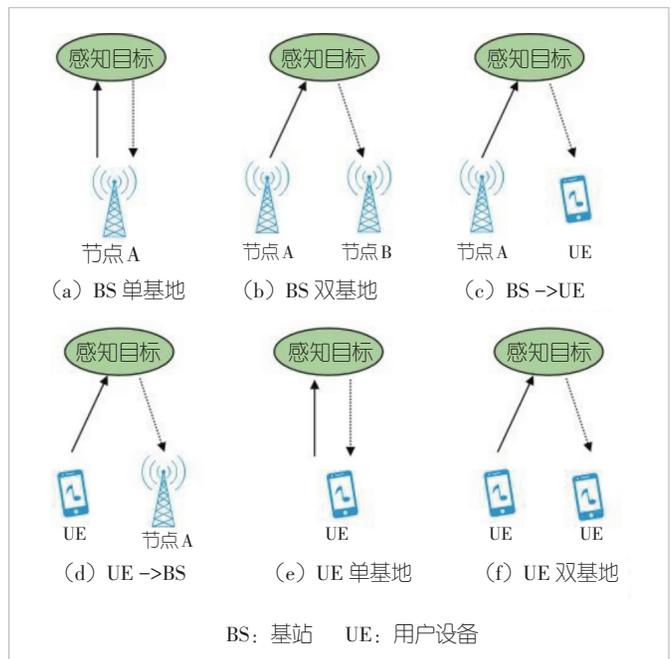


图 2 6 种感知模式

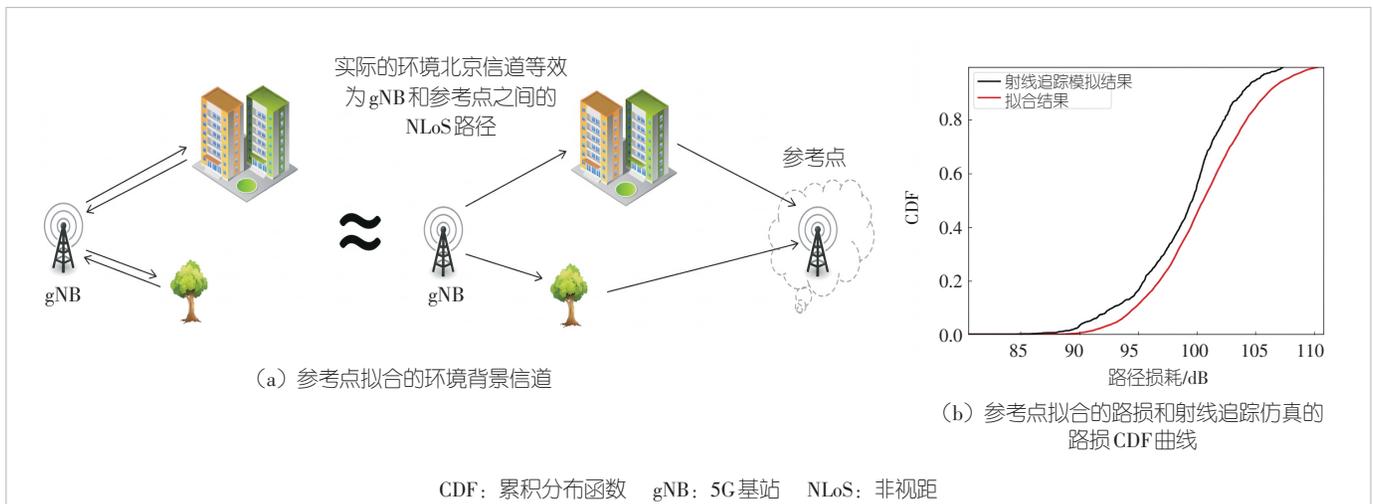


图 1 基于参考点的单基地感知模式下的背景信道

号，RAN基站B接收反射信号。在模式C中，其工作方式与当前5G下行链路测量相同，RAN节点发射感知信号，UE接收反射信号。在模式D中，其工作方式与当前5G上行链路测量相同，UE发射感知信号，RAN节点接收反射信号。在模式E和F中，它们分别与模式A和模式B的工作方式类似，区别在于将基站（BS）替换为UE。

对于感知方法，其可行性取决于UE、BS和SF的计算资源、软硬件能力。有3种通用感知方法可以使用：

感知方法1：基于UE的感知，即UE执行感知结果计算。例如，UE可接收感知参考信号，并据此识别不同的人体手势；随后，若需上报，UE可将感知结果发送至SF。

感知方法2：基于BS的感知，即BS执行感知结果计算。例如，BS可接收感知参考信号并检测是否有无人机入侵，若有则计算其位置；随后，BS可将无人机位置上报至SF。

感知方法3：基于SF的感知，即SF执行感知结果计算。例如，BS或UE仅向SF上报中间测量元素（如时间、角度等），随后，SF收集所有结果并进一步计算最终感知结果。

6G系统可根据计算资源分布，以及对应的感知场景需求，支持这3种方法。例如，在无人机入侵检测场景中，若某基站（可能连接多个传输节点）具备计算无人机位置或轨迹，并准确识别无人机的能力，则可快速完成测量与计算，并将结果上报SF，以降低时延并减轻SF负担。

2.2 RAN架构

对于ISAC网络结构设计，从RAN侧来看，如图3所示，未来标准化的架构单元包括SF、RAN节点（主要指基站）以及终端用户（UE）。进一步地，SF还可以将控制面与用户

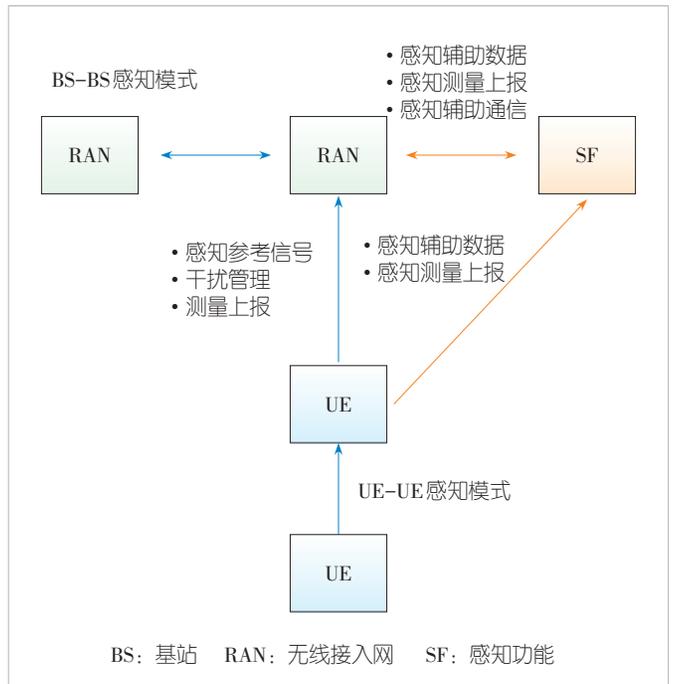


图3 基于参考点的单基地感知模式下的背景信道

面分离。这种设计非常典型，特别是针对由核心网触发感知服务的使用场景。

2.3 感知流程

主要的感知流程包括：首先基站或者UE向SF上报其配置或能力信息，包括支持哪些感知模式、感知信号接收能力等参数；接着SF或者UE或者基站发起感知测量请求；然后SF向基站或者UE提供感知辅助信息，比如感知区域（如图4所示）以及潜在感知目标的特征信息；对于有UE参与

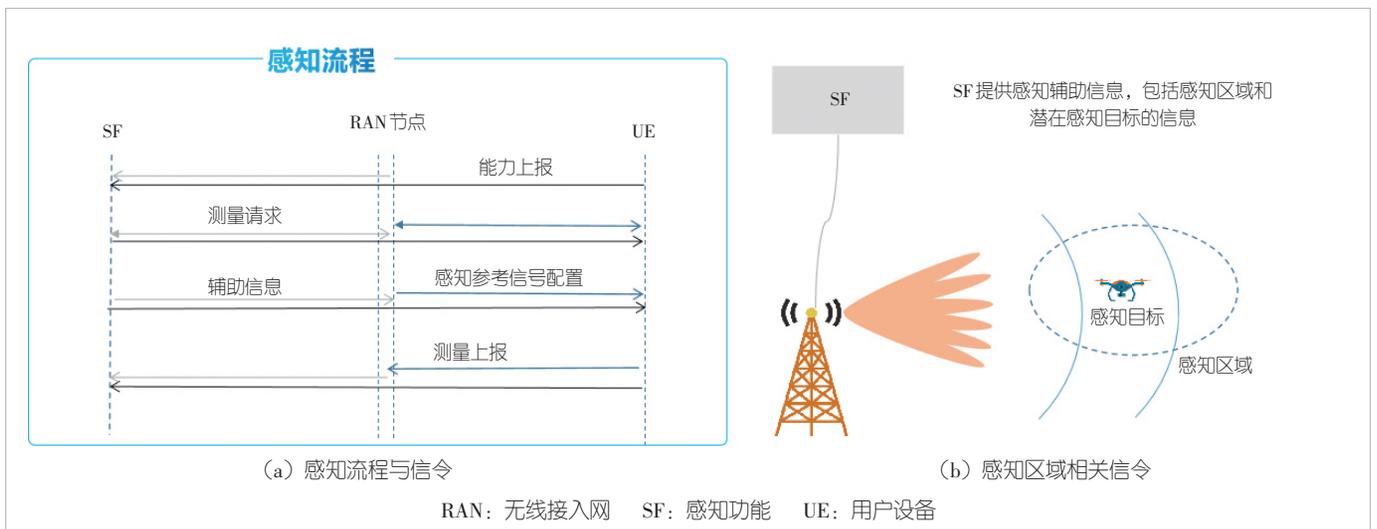


图4 通感知流程

的感知模式，随后基站需要向UE配置感知参考信号；最后测量节点需要将测量结果上报，比如UE上报测量结果给基站或者SF，或者基站上报测量结果给SF。

总体而言，根据参与感知的不同网络元素，感知信令交互标准化至少分为3类：SF与BS信令交互、SF与UE信令交互、BS与UE信令交互。综上所述，为支持基站单基地感知模式、BS双基地感知模式、BS发UE收感知模式、UE发BS收等感知模式，表1所示信息交互流程是6G感知模式研究的重点。

2.4 感知物理层安全

通信系统主要是“把数据送到目标接收者”，而ISAC的感知部分会主动发射可被环境反射/散射的波形，并基于回波估计距离、角度、速度、姿态、微多普勒等。但感知反射信号回波不来自“授权目标”，也来自非目标用户与其携带物、人体、车辆等。这使得ISAC的隐私面更接近“传感器网络+位置服务+侧信道”，而不仅是传统无线链路保密。这就需要从物理层设计上，将隐私安全作为设计目标之一。

首先，感知测量结果的上报与暴露应当限制在授权的网元中，且某个网元或第三方节点请求感知测量结果时，网络设计应当仅传递其需求且必要的感知结果，避免与请求的感知目标不相关的感知结果或涉及用户隐私的感知结果的暴露。除此之外，物理层发送感知参考信号时，应当在满足感知/通信关键绩效指标（KPI）的前提下，确保感知参考信号的发送与测量限制在请求的感知区域中，而对非感知区域施加功率上限、波束方向等参数上的约束，对禁止感知区域控制感知参考信号的发送。对于第三方被动接收的情况，应该增加非授权第三方接收并解调感知参考信号的难度，例如给参考信号额外附加循环移位、时域附加伪随机相位等方案。如图5所示，以感知参考信号在时域附加伪随机系数为例，虽然感知参考信号的序列本身可能会由于感知对于低峰均功率比（PAPR）、大覆盖的需求而数量受限，导致其容易被监听，但是时域上的随机系数可以使得攻击者难以关联时域上的多次观测而提升感知结果的置信度，无法在多普勒域进行处理，也无法利用动目标显示算法分离感知目标和背景杂

波。这样，非授权的第三方接收机无法从接收到的感知参考信号中有效区分感知目标并获得准确的位置、速度估计。

3 感知信号设计

在NR中，研究者们为多种用途引入了各种参考信号（RS），例如：信道状态信息参考信号（CSI-RS）用于信道状态信息测量和波束管理，跟踪用的CSI-RS（也称追踪参考信号（TRS））用于获取时间和频率跟踪，相位跟踪参考信号（PTRS）用于相位噪声和多普勒效应估计，定位参考信号（PRS）用于定位测量，探测参考信号（SRS）用于上行信道测量。这些参考信号主要是基站和UE之间的发送测量。如果能沿用到6G，这些参考信号仍然可以用于感知。

然而，在单基地感知模式下，当BS1发送感知参考信号时，BS1可能同时接收该参考信号以进行感知测量。需要注意的是，基站自发自收模式下，我们发现发射功率的限制主要来自于接收，而非发射端。基站由于需要考虑对UE覆盖的问题，通常发射功率可以做到很大，例如超过49 dBm。但是自发自收模式下如果收发同时，过高的发射功率会立刻由于有限的收发天线隔离度导致接收端天线的低噪声放大器（LNA）进入饱和区产生失真信号，而导致整个正交频分复用（OFDM）符号上的接收结果都产生谐波干扰。由此收发天线的隔离度对发射功率具有额外的限制，导致收发完全同

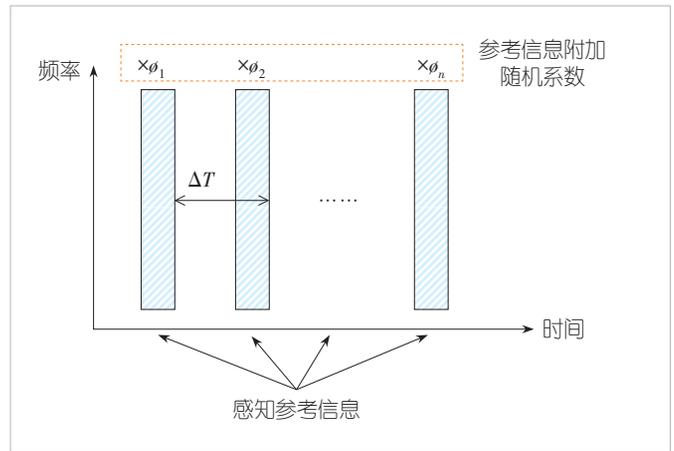


图5 感知参考信号在时域附加随机系数

表1 6G潜在的不同实体间的交互流程

BS与SF之间	SF与UE之间	BS与UE之间
RAN节点信息从BS传输至SF SF向BS发起测量请求并发送辅助信息 BS将测量结果传输至SF	UE能力信息从UE传输至SF SF向UE发起测量请求并发送辅助信息 UE将测量结果传输至SF	UE能力信息从UE传输至BS BS向UE下发RS配置 UE上报测量结果给BS

BS: 基站 RAN: 无线接入网 RS: 参考信号 SF: 感知功能 UE: 用户设备

时的感知模式面临覆盖不足的问题。如图6所示，方案A1可能无法探测远离收发机的目标。这是因为单基地收发机需同时进行发射和接收操作，过高的发射功率会导致严重的自干扰并引发接收机功率饱和。例如，采用基站单基地感知模式进行无人机入侵检测时，最大发射功率可能不得超过30 dBm，以避免接收机饱和。因此，可考虑方案A2，即通过时分复用（TDM）方式分离发射（Tx）和接收（Rx）时段。

例如，发射机可工作 $T_2=2\ \mu\text{s}$ ，当接收天线处于接收状态时，发射机可关闭。换句话说，当接收天线处于接收状态时，发射机关闭以避免发送信号泄露到接收机。为实现图6中所示的方案A2，可在时域生成感知参考信号，即在一个OFDM符号内生成长度较短的脉冲参考信号（脉冲参考信号可以是雷达界经典的线性调频信号（LFM）或者其他峰均比低的参考信号），例如一个OFDM符号包含4 096个采样点，脉冲参考信号只需有100个采样点，假设最大3 312个子载波对应100 MHz带宽。经过4 096点快速傅里叶变换（IFFT）运算后，时域感知参考信号的波形如图7所示。可以看出，该方法均可

为感知检测提供良好的性能保障，同时可实现极低的峰均功率比。需要注意的是，虽然脉冲参考信号的收发模式和现网中基于CP-OFDM的连续感知参考信号不同，但是其整个收发周期依然限制在一个OFDM符号内，发射机可以在完成脉冲参考信号的收发后切换为通信信号的发送。而根据3GPP、ITU等标准组织的讨论进展，在5G-A乃至6G早期版本的系统实现中，感知功能仍将基于某些特定的参考信号进行测量。这部分用于感知的参考信号的时频资源由系统统一专门调配给感知业务，因此脉冲感知参考信号本身不会对通信系统产生影响。而脉冲感知参考信号除了进行感知测量之外，也可以用于诸如移动管理测量、波束测量、CSI测量、干扰测量等其他通信用途。图8的系统级仿真也证明了脉冲感知

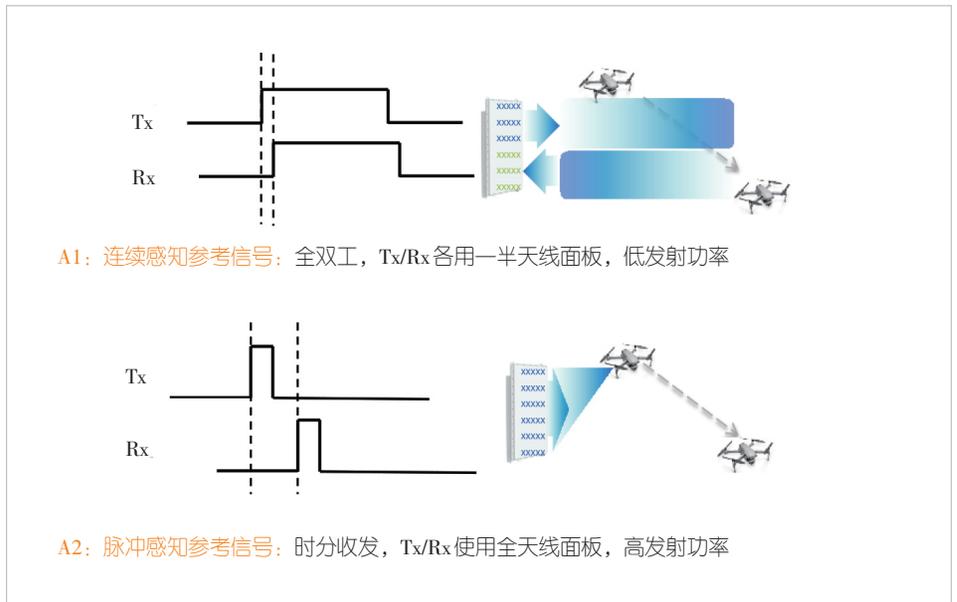


图6 基站单基地感知的不同发射和接收方案

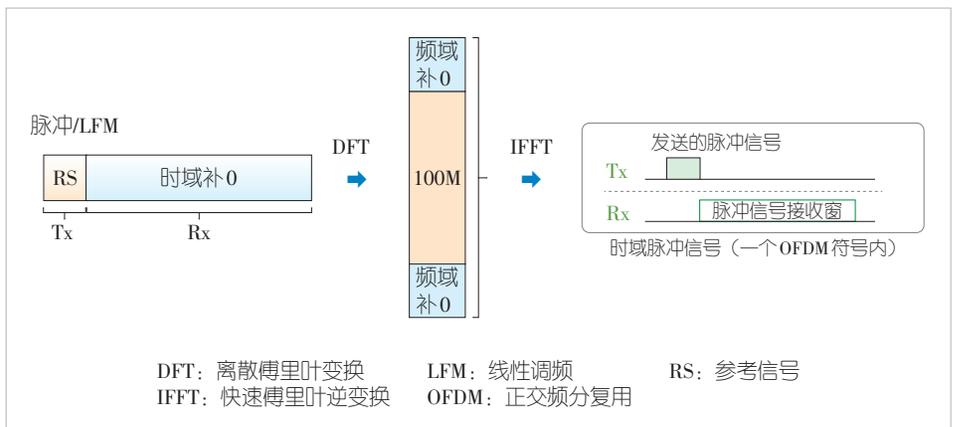


图7 基于DFT-S-OFDM生成的脉冲波

参考信号在用于通信测量用途的参考信号接收功率（RSRP）测量、小区选择正确率上也具备和传统基于CP-OFDM的连续参考信号CSI-RS近似的性能。因此，脉冲感知参考信号也可以与其他候选参考信号一样，作为6G通信系统的参考信号用于通信。从这两个角度说，引入脉冲感知参考信号并不导致通信性能的下降，其取决于网络给感知用途分配的时频资源，而非参考信号设计。

目前，基站单基地感知模式应用前景较好，但很多场景对覆盖距离提出了更高要求。如图9所示，受无人机飞行高度过高与基站天线倾角的限制，BS0无法检测到其头顶上的无人机。此时更优的方案是让BS1负责该区域的感知任务。然而，由于无人机与BS1之间距离较远，从BS1发射的参考信号需要具备较大的覆盖范围。为实现这一目标，图8

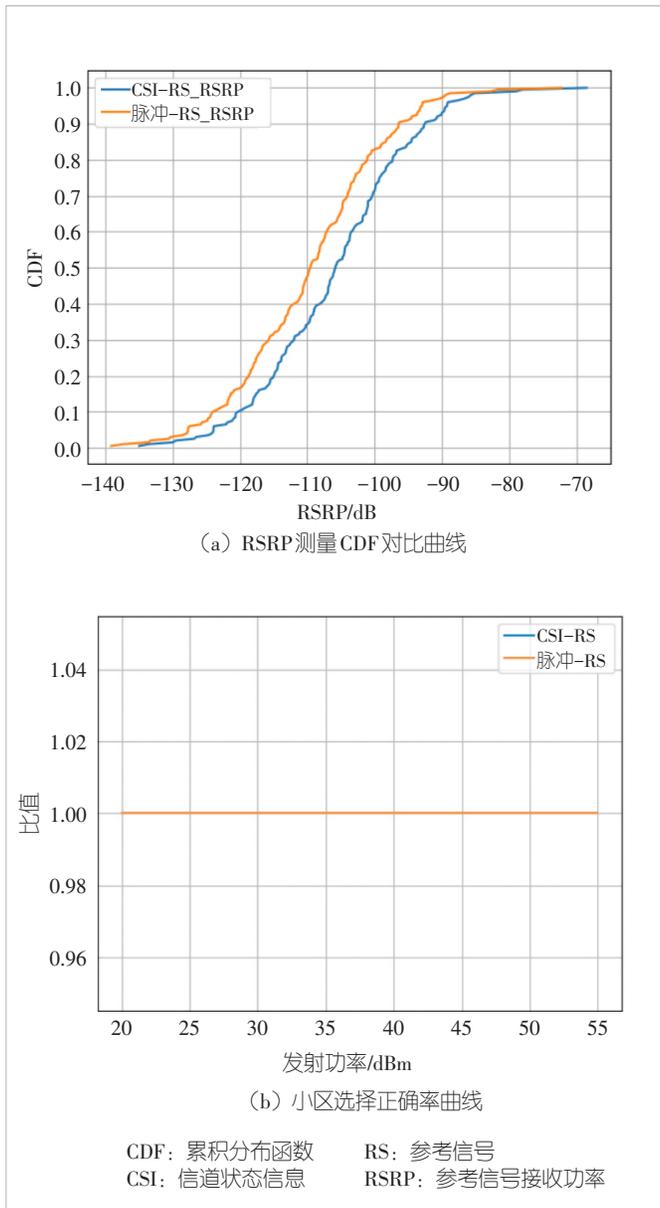


图8 脉冲感知参考信号和CSI-RS参考信号的通信测量性能对比

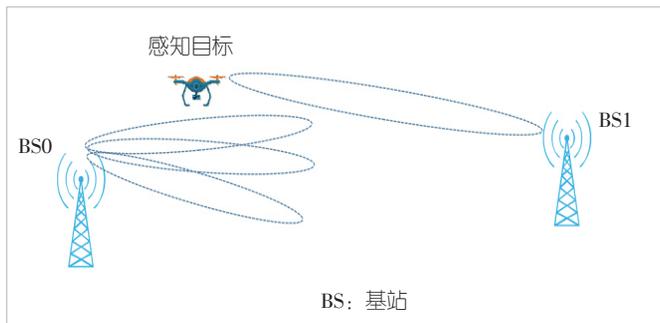


图9 感知参考信号需要更大覆盖范围

所示的脉冲参考信号就是一种很好的选择^[13]。

图10和表2提供了脉冲参考信号的仿真结果。图10显

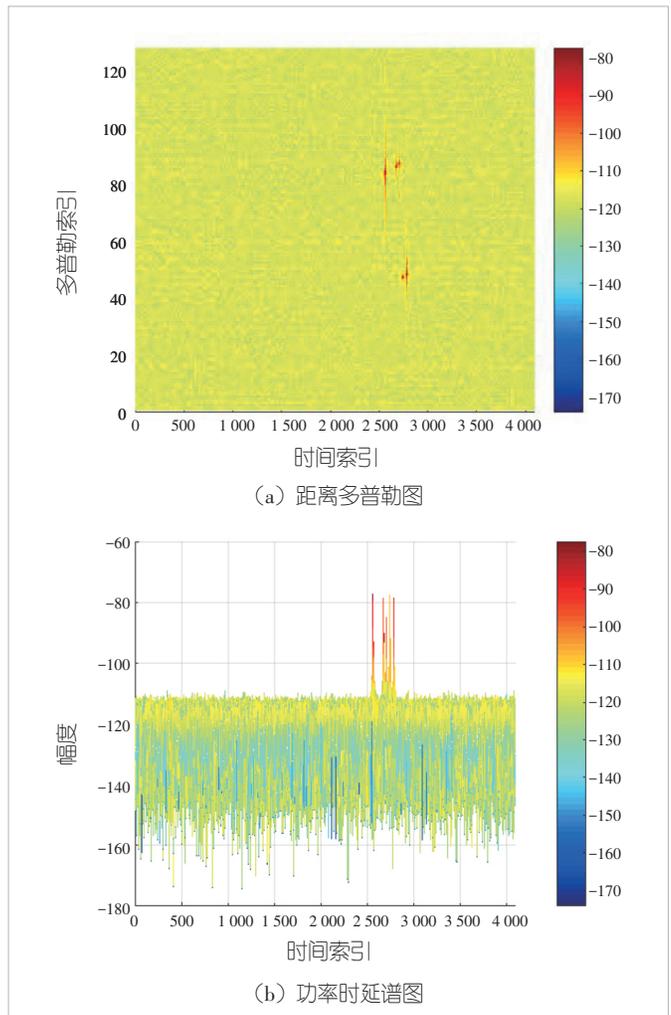


图10 感知目标离自发感知基站距离大于300 m的检测情况

示,即使目标很远,在距离-多普勒(RD)图上也能检测出目标(图中红色部分显示检测目标的功率大于背景噪声和杂波)。表2给出了系统级仿真结果,即使在RMa场景下,站间距为1 732 m时,感知精度也可以满足3GPP SA1提出的需求。

在低空场景中,基于实际测量,单站最远感知距离可达1.5 km^[14]。在海洋场景中,采用新型帧结构新技术可实现海域感知20 km的技术突破^[15]。为了提高系统效率,如果能将单基站感知模式下的参考信号配置告知UE,则UE也可基于相同的参考信号执行感知测量,以提升参考信号资源利用率。换句话说,相同参考信号既用于基站自发感知模式也用于基站发UE收模式,且双方的测量结果均可用于计算最终感知结果,以提升感知精度。

此外,为了进一步提高感知精度,并且提高参考信号资源利用率,新的感知参考信号(例如脉冲波)可以和其他参考信号联合使用。文献[16]采用了级联多种参考信号共同用

表2 利用脉冲参考信号在RMA-无人机场景下的系统级仿真结果

距离精度@90%	水平角度精度@90%	垂直角度精度@90%	速度精度@90%	水平位置精度@90%	垂直位置精度@90%	检测概率	虚警率
1.890 m	0.524°	0.247°	0.467 m/s	6.478 m	3.024 m	96.9%	4.10%

于感知估计的方案。频域高密度且时域低密度的CSI-RS可以提供较高的时延分辨率，而时域高密度且频域低密度的PTRS可以实现较高的多普勒估计精度。两者结合用于感知估计，可以减少感知参考信号开销。但该设计在资源开销极低的情况下，需要采用复杂度相对较高的接收机检测算法，例如需要先在角度-多普勒域进行检测，再通过空时联合处理来获取距离信息^[6]。

对于感知信号的设计，业界已有研究提出利用数据符号实现感知，以更高效地融合通信与感知。然而，由于数据符号在功率、带宽、序列等方面存在不确定性，感知性能很难得到保证。所以，感知参考信号在6G物理层技术中至关重要。除了感知参考信号的序列和图样设计外，6G系统还需进一步研究其功率控制、测量配置等关键问题。

4 通感定位融合

4.1 感知辅助通信

感知和通信相互辅助是通感一体的重要特征。从标准化层面看，感知辅助通信在业界的关注度更高。感知技术可实时监测障碍物、干扰源和移动设备的位置。这有助于通信系统快速调整以避免信号衰减和丢失，从而提高通信可靠性。另外，通过感知用户行为和环境条件，通信系统可动态调整发射功率等参数，减少不必要的能耗并延长电池寿命。这也是环境重构和数字孪生所带来的好处。

然而，SF与基站可能是不同的网络实体，即使感知结果完全由SF侧收集，通信资源实际也由BS分配。为了支持感知辅助通信，BS需要获取感知结果。有两种潜在方案可使BS能够获取感知信息以支持感知辅助通信。

方案1：为减少信令开销并实现感知辅助通信，基站向SF请求特定UE的感知结果以辅助资源调度。经SF认证授权后，感知结果可传递至基站，如图11所示。该方法简单且对RAN空口标准影响最小。然而，若SF位于核心网侧，基站与SF间的通信时延将显著增大。

方案2：如图12所示，为减少信令开销并在基站侧快速获得感知结果，可考虑以下流程：

步骤1：基站向SF或者UE请求与UE相关的感知测量结果。请求信息可包括UE坐标、周围环境感知信息等。

步骤2：SF或者UE执行认证和授权操作，判定是否可

以将UE的感知结果提供给基站。

步骤3：SF或者UE响应基站，明确是否可以提供感知结果。

步骤4：UE直接向基站报告感知结果，实现感知辅助通信的实时性。

4.2 感知与定位融合

在基站和UE参与的感知模式中，UE的定位信息对于确定感知目标的位置至关重要；否则，基站难以选取感知目标对应的无线终端参与感知。从标准化层面看，感知和定位存在诸多共性，包括测量上报元素（坐标、定时、角度、RSRP、时间戳），以及参考信号设计、辅助数据请求、测量

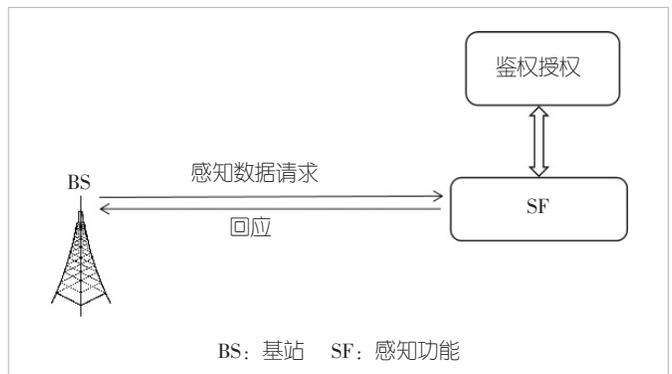


图11 基站从SF获取辅助通信的感知结果

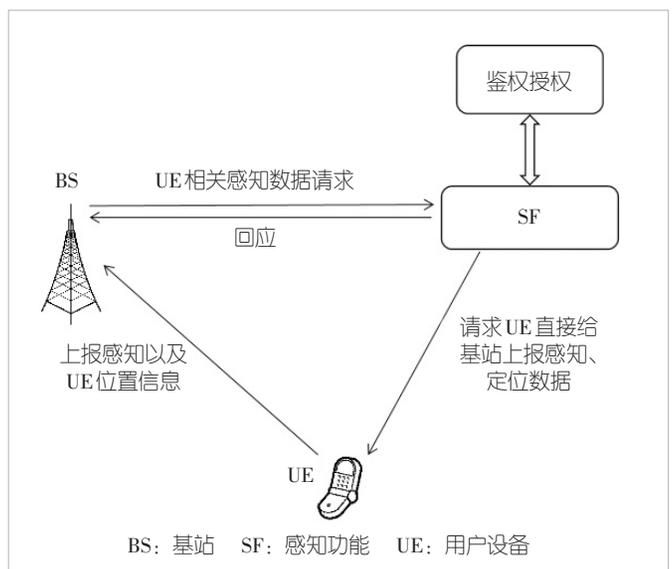


图12 UE在物理层上报辅助通信的感知结果

请求等流程。此外，定位管理功能网元（LMF）掌握用户终端的位置信息，可根据视距链路为SF推荐适合参与感知过程的用户终端。只有当用户终端位置足够精确时，其参与的感知服务才可能输出准确的感知结果。因此，SF与LMF间的信息交互至关重要，典型交互流程为SF向LMF发起请求，LMF向SF提供用户终端位置坐标、参考信号资源配置及测量结果等信息。进一步地，还可以考虑SF和LMF的融合设计，以降低信令传输开销。

5 通感与AI融合

在当前6G的研究讨论中，AI for ISAC和ISAC for AI都是重要的潜在研究方向，二者可并行演进，相互促进^[17-18]。

AI for ISAC更强调使用机器学习来提升感知链路本身的鲁棒性与可部署性，例如：用自监督/对比学习来减少标注依赖，并使用具有高泛化性的网络设计，来应对感知广域场景中雨雾遮挡、非视距（NLoS）与复杂多径对感知结果的影响；利用图神经网络/Transformer进行多感知目标关联与跨站协同跟踪。

ISAC for AI侧重把通信与感知产生的多源数据、信道状态信息及环境表征能力转化为可用于智能体的“世界模型”与任务能力。例如，面向具身智能、车路协同、工业机器人数字孪生等场景，在边缘侧进行多模态融合处理（毫米波/太赫兹雷达感知、视觉、声学等）以形成可推理的场景图与占据栅格；在学习范式上，可探索面向任务的联合源信道编码与“感知-决策-通信”闭环强化学习，使网络能够将通感系统作为感知载体，基于通信与感知多模态数据实现任务的自适应编排与可靠性保障。

总体而言，6G的关键潜力在于把“空口可学习、网络可感知、智能可编排”作为统一目标，将通信能力转化为环境理解与任务执行能力，同时通过AI反向重塑感知与通感融合的性能边界。

6 结束语

本研究介绍了6G ISAC技术的核心创新方向与标准化路径，通过定义覆盖“空-海-地-城”的典型场景，明确了通感技术对公共安全与产业效率的赋能价值，基于3GPP信道模型扩展，阐述了动态RCS与背景环境联合建模方法，为跨场景感知性能优化提供了理论基础。感知网络架构与协议设计则明确了未来标准讨论路线。本文提出的物理层感知参考信号的设计方案可以满足远距离覆盖的需求，具备较高的商业部署价值。另外，通信、感知与定位的融合方案仍有待开展系统性研究；未来，还需进一步解决感知辅助通信跨网元

时效交互等关键技术问题。本研究为6G ISAC从标准化探索走向规模化商用奠定了理论基础，有望加速构建智能感知生态。

参考文献

- [1] Liu R Q, Zhang L Y, Li R Y, et al. The ITU vision and framework for 6G: scenarios, capabilities, and enablers [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2025, 20(2): 114–122. DOI: 10.1109/MVT.2025.3532887
- [2] Liu R, Zhang L, Zou M, et al. Evaluating radio interfaces towards 6G: what's new and what's different [J]. IEEE network, 2025, 39(6): 148–154. DOI: 10.1109/MNET.2025.3557403
- [3] IMT2030(6G)推进组. 6G通感一体化空口关键技术研究报告 [R]. 2024
- [4] IMT2030(6G)推进组. 6G通感一体化协作感知关键技术 [R]. 2024
- [5] Liu R Q, Zhang L Y, Mao T Q, et al. Integrated sensing and communication for 6G: motivation, enablers and standardization [C]//Proceedings of IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). IEEE, 2023: 1–6. DOI: 10.1109/ICCCWorkshops57813.2023.10233791
- [6] 3GPP 3GPP TS 22.137 Service requirements for integrated sensing and communication [S]. 2023
- [7] 3GPP TR 22.870 Study on 6G use cases and service requirements [S]. 2024
- [8] Lachvajderová L, Trebuňa M, Kádárová J. Unlocking industry potential: the evolution and impact of digital twins [J]. Acta mechanica slovacica, 2024, 28(1): 46–51. DOI: 10.21496/ams.2024.009
- [9] 3GPP TR 38.901 Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz [S]. 2017
- [10] Lou J P, Liu R Q, Jiang C X, et al. A unified channel model for both communication and sensing in integrated sensing and communication systems [C]//Proceedings of IEEE 98th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Fall). IEEE, 2023: 1–6. DOI: 10.1109/VTC2023-Fall60731.2023.10333766
- [11] Jiang C X, Liu J C, Lou J P, et al. A novel approach to model the scattering environment in channel modeling for integrated sensing and communications [C]//Proceedings of International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). IEEE, 2024: 1809–1813. DOI: 10.1109/IWCMC61514.2024.10592557
- [12] 3GPP R1-2502063 Joint views on mono-static background channel modeling [S]. 2025
- [13] Liu R Q, Jian M N, Chen D W, et al. Integrated sensing and communication based outdoor multi-target detection, tracking, and localization in practical 5G Networks [J]. Intelligent and converged networks, 2023, 4(3): 261–272. DOI: 10.23919/ICN.2023.0021
- [14] C114. 中兴通讯: 数智赋能, 逐梦低空 [EB/OL]. (2024-06-28) [2026-01-06]. <http://www.c114.com.cn/news/127/a1266749.html>
- [15] C114. 20KM! 台州移动联合中兴通讯率先实现超远海域通感一体商用能力验证 [EB/OL]. (2024-12-25) [2026-01-06]. <https://www.c114.com.cn/news/127/a1280824.html>
- [16] Ma Y H, Yuan Z F, Xia S Q, et al. Highly efficient waveform design and hybrid duplex for joint communication and sensing [J]. IEEE Internet of Things journal, 2023, 10(19): 17369–17381. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3274120
- [17] Zhu F H, Wang X Q, Jiang S M, et al. Wireless large AI model: shaping the AI-native future of 6G and beyond [PP/OL]. arXiv (2025-04-20) [2026-01-06]. <https://arxiv.org/abs/2504.14653>

[18] Wang X Q, Zhu F H, Yang Z H, et al. Bridging physical and digital worlds: embodied large AI for future wireless systems [PP/OL]. arXiv(2025-06-30) [2026-01-06]. <https://arxiv.org/abs/2506.24009>

作者简介



向际鹰，中兴通讯股份有限公司首席科学家；先后从事3G、4G、5G、B5G和6G相关研发工作；曾获国家科技进步奖特等奖、二等奖，以及国家技术发明专利奖等，并先后获得中国通信产业技术贡献人物、中华杰出工程师等称号。



蒋创新，中兴通讯股份有限公司通感一体化标准专家，3GPP RAN1 资深代表，移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室专家，担任 ETSI ISAC ISG 信道模型报告人，中国 IMT-2020 通感任务组副组长，曾任 3GPP R18 定位课题的功能负责人；主要从事 4G/5G/6G 无线物理层技术研究和标准推进工作，拥有国际标准提案及重要专利上百项。



高音，中兴通讯股份有限公司标准预研总工，原 3GPP RAN3 主席，CCSA TC624 WG4 副组长，移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室专家，曾任国家重大专项负责人；主要从事 3G/4G/5G/6G 无线网络创新技术研究和标准推进，先后策划并完成多个国际标准立项，担任多个国际标准、技术报告、行业标准报告人，个人递交 3GPP 提案近 700 篇，写入国际标准的重要专利近百族。



许进，中兴通讯股份有限公司无线算法部副部长；主要负责中兴通讯无线通信算法研究及标准化推进工作，研究方向涵盖通信理论、无线接入网技术、通感一体化、人工智能、信道编码与调制以及语义通信等领域。



刘峻琛，中兴通讯股份有限公司通感一体化以及 AI 应用方向研究专家，3GPP RAN1 代表；在 3GPP R19 通感信道建模以及 R20 5G-A 无人机通感仿真建模评估方向贡献突出，在 6G 通感一体化波形以及融合 AI 提升通感能力方面有深入研究。

新增编委介绍



高新波

西安电子科技大学教授、校长，国家级人才入选者，大数据安全教育部工程研究中心主任，现为第十四届全国政协委员，中国科协第十届全国委员会委员，教育部科技委委员、教学指导委员会委员，IEEE

Fellow，中国电子学会、中国计算机学会、中国人工智能学会、中国图像图形学学会会士；主要研究方向为人工智能、机器学习、计算机视觉和模式识别；作为团队负责人入选教育部长江学者创新团队、科技部重点领域创新团队；2020 年获全国创新争先奖，曾获得国家自然科学奖二等奖 1 项、省部级科技一等奖 6 项；主持国家自然科学基金青年科学基金（A 类）等项目 30 余项，发表论文 500 余篇，出版专著、教材 7 部。



苏森

重庆邮电大学教授、校长，重庆人工智能学院院长，智能交互与体验系统文旅部重点实验室主任，教育部人工智能专业建设虚拟教研室主任，兼任教育部虚拟教研室重点领域学科协作组组长、北京通用人工智能学会理事；2005 年入选教育部新世纪优秀人才计划，2017 年入选“万人计划”科技创新领军人才；主要研究方向为可信人工智能、自然语言处理和数据隐私保护；曾获国家科技进步奖二等奖 1 项、中国通信学会科技进步奖一等奖 1 项。

2005 年入选教育部新世纪优秀人才计划，2017 年入选“万人计划”科技创新领军人才；主要研究方向为可信人工智能、自然语言处理和数据隐私保护；曾获国家科技进步奖二等奖 1 项、中国通信学会科技进步奖一等奖 1 项。