IMT-2030(6G)推进组

IMT-2030(6G)Promotion Group

6G 基站与终端协作感知关键技术报告

2025

目录

一、 引言 1

二、 基站与终端协作感知场景与工作模式 2

2.1. 室外场景需求 2

2.1.1. 智慧交通场景 2

2.1.2. 智慧城市场景 2

2.1.3. 数字孪生场景 3

2.2. 室内场景需求 3

2.2.1. 智慧工厂场景 4

2.2.2. 智慧家庭场景 4

2.3. 工作模式 4

2.3.1. 基站发 UE 收 5

2.3.2. UE 发基站收 6

三、 基站与终端协作感知关键技术 8

3.1. 参考信号设计 8

3.1.1. 序列设计 8

3.1.2. 映射设计 12

3.2. 信令交互设计 17

3.2.1. 基本信令交互 17

3.2.2. 非连接态 UE 参与感知的信令交互 22

3.2.3. UE 干扰发现的信令交互 28

3.3. UE 选择与切换设计 30

3.4. 测量量上报设计 31

3.5. 终端节能设计 34

3.6. 冲突避免设计 37

3.6.1. 优先级配置 37

3.6.2. 速率匹配 38

3.6.3. 抢占指示 39

3.6.4. 部分取消 40

3.7. 多 UE 信息融合算法设计 42
3.7.1. 基于 AI 的符号级融合算法 42
3.7.2. 基于降维的信号级融合算法 44
四、 基站与终端协作感知性能评估 46
4.1. 评估指标 46
4.1.1. 检测率与虚警率 46
4.1.2. 水平与垂直位置精度 47
4.1.3. 水平与垂直速度精度 48
4.1.4. 重构精度 49
4.2. 性能评估结果 50
4.2.1. 室外场景性能评估 50
4.2.2. 室内场景性能评估 53
五、 基站与终端协作感知原型验证 57
5.1. 系统模型与协作感知原理 58
5.1.1. 系统模型 58
5.1.2. 协作定位与轨迹追踪原理 59
5.1.3. 协作信息融合方法 60
5.2. 原型系统配置 61
5.3. 原型验证结果 64
六、 总结与展望 68
参考文献 70
贡献单位 72

图目录

图 1　基站发 UE 收工作模式示意图 5
图 2　UE 发基站收工作模式示意图 7
图 3　ZC 序列的恒幅特性示意图 9
图 4　SRS 序列无恒幅特性示意图 9
图 5　改进序列的恒幅特性示意图参考信号设计 11
图 6　不同生成方案下的 CSI-RS 参考信号序列时域维度的自相关性能对比图 12
图 7　多种非均匀参考信号 pattern 13
图 8　互质参考信号设计方案 14
图 9　互质排布方式 3 示例 15
图 10 互质排布方式 4 示例一 15
图 11 互质排布方式 4 示例二 15
图 12 不同互质排布方式测速性能 16
图 13 两级嵌套阵示意图 17
图 14 基站终端协作信令交互总体图 18
图 15 基站发多 UE 收的信令交互流程 19
图 16 UE 发基站收信令交互流程图 21
图 17 触发 idle 态 UE 在 idle 态进行感知操作 23
图 18 触发 idle mode UE 在 connected mode 进行感知操作 24
图 19 触发 idle mode UE 在 inactive mode 进行感知操作 24
图 20 触发 inactive mode UE 在 inactive mode 进行感知操作 25
图 21 基于下行信号的 UE 非连接态感知流程 27
图 22 基于上行信号的 UE 非连接态感知流程 28
图 23 UE 感知干扰发现流程 29
图 24 基于测量进行感知节点选择的方法示意图 30
图 25 DRX on 期间 UE 无法正确接收感知上报配置 36
图 26 通感优先级冲突示意图 37
图 27 PDSCH 通感冲突示意图 38
图 28 PUSCH 通感冲突示意图 39

图 29 资源过度抢占示意图 39
图 30 取消/抢占资源示意图 40
图 31 现有通信上行半静态 PUSCH 和动态下行 PDSCH 冲突示意图 41
图 32 动态感知下行资源与半静态通信上行资源的冲突示意图（情况一） 42
图 33 动态感知下行资源与半静态通信上行资源的冲突示意图（情况二） 42
图 34 基于 VAE 网络的感知信息处理框架 44
图 35 信号级融合检测器处理流程示意图 45
图 36 检测性能对比示意图 46
图 37 检出目标与真实目标配对 47
图 38 多点目标位置精度计算方法 48
图 39 水平和垂直速度精度 49
图 40 室外场景仿真示意图 51
图 41 室外感知节点部署示意图 51
图 42 室外场景基站终端协作感知结果 52
图 43 基站-终端协作感知的性能评估结果 53
图 44 Indoor room 场景网络拓扑 53
图 45 Indoor room 场景目标定位性能 56
图 46 基站 UE 协作 CoMP 示意图(a)室外场景(b)室内场景 57
图 47 实验 1 的多节点协作轨迹追踪样机照片及场景 62
图 48 实验 2 的多节点协作轨迹追踪样机布局示意图 63
图 49 实验 1 配置下多 UE 协作轨迹追踪实测结果示例 64
图 50 实验 2 配置下多 UE 协作轨迹追踪实测结果 65
图 51 实验 2 配置下不同轨迹追踪方法的估计误差 CDF 66

表目录

表 1 不同融合层级的上报测量量对比 32
表 2 室外仿真参数表 51
表 3 室内场景感知仿真参数配置 54
表 4 不同信号资源映射方案检测性能及开销对比 56
表 5 可以用于评价感知可靠性/置信度的指标类型 60
表 6 轨迹追踪样机系统部分参数配置 63

一、 引言

网络化协作通信感知一体化（ISAC）作为 ISAC 的进阶技术，正在成为第六代移动信息网络中不可或缺的范式。与传统的 ISAC 相比，网络化协作 ISAC 主要有以下四个突出的技术特征[1]：一是网络使能：依托大规模部署的移动通信网络，感知信息得以高效传输和智能处理、感知节点得以随时接入和动态成簇；二是深度集成：通信和感知两大功能在软硬件设施上实现集成与内生；三是协同合作：多节点、多频段和多模态的感知结果可以进行融合，以实现优势互补；四是节点泛在：无论是基站、终端等网络节点，还是各类传感器，都可以作为感知节点来实现泛在的感知。基于以上技术特征，网络化协作 ISAC 有望帮助网络实现从“可感知”到“高质量通感网”的跃迁，进而成为推动“万物互联”向“智能互联”转型的关键力量。

基站与终端协作感知是网络化协作 ISAC 技术中的一种重要的工作模式，相比于基站间协作和终端间协作，基站与终端协作感知的核心优势在于它能够有效结合基站与终端各自的资源优势，形成优势互补，从而以更灵活、更低成本的方式扩展感知覆盖范围并提升系统可靠性[2]。具体来说，基站通常具备更强的计算能力和更广的覆盖视角，但部署密度有限；而终端数量庞大、分布广泛，但单设备能力受限。基站与终端协作感知允许基站选择合适的终端（例如，在空间上更靠近被感知目标的终端）作为辅助感知节点。这些终端无需与基站存在直接的视距连接，仅需与被感知目标（如无人机）保持视距即可参与感知过程。这种模式使得当基站与感知目标之间因建筑物遮挡等原因没有直射径信号时，系统依然能够通过终端节点有效感知目标，从而显著弥补了单基站或纯基站间协作可能存在的覆盖盲区。同时，相比于主要依赖终端之间相互协作的方案，基站与终端协作感知在基站的统一协调下，能提供更稳定的网络连接和更强的计算支持，提升了感知任务的协同效率和可靠性。因此，基站与终端协作感知成为一种在不过度增加基础设施部署成本的前提下，增强网络整体感知能力的高效路径。

当前，3GPP 已完成 Release 19 通感信道建模的标准化。2025 年，3GPP 6G 标准化也正式开启，通感一体的研究进入了新的阶段[3]。基站与终端协作

感知作为通感一体技术的重要方向，需对其关键技术进行研究，为后续的标准化做好技术储备。因此，本报告作为 IMT-2030（6G）推进组首个聚焦基站与终端协作感知的技术报告，首先对协作场景与工作模式进行了分析，然后聚焦多节点协作场景的空口技术、协作算法、性能评估、原型验证等进行了多方面深入的研究，旨在为后续工作提供指引，推动业界对针对基站与终端协作感知开展技术研究和评估验证，促进 6G 通感一体的标准制定。

二、 基站与终端协作感知场景与工作模式

2.1. 室外场景需求

基站与终端协作感知在室外场景的应用需求主要体现在智慧交通、智慧低空、智慧城市等领域，其核心需求包括高精度感知、广域覆盖、实时响应及多业务协同。

2.1.1. 智慧交通场景

智慧交通场景需实时监测车辆、行人、非机动车等目标的位置、速度及轨迹，以预防交通事故（如逆行、超速）或道路入侵（如动物闯入）。此时，采用基站与终端（如车载终端、路边单元（RSU）等）的协作，能够提升对上述目标的检测概率，辅助自动驾驶[4]。同时，扫描道路周边建筑、障碍物等环境特征，支持数字孪生和动态路径规划。例如，基站与终端的协作能够利用广泛分布的终端补充基站盲区数据，实现复杂路口的三维重构。此场景存在两大技术挑战：一是非视距（NLOS）频发，城市多径效应需通过多端信号融合（如虚拟孔径技术）降低 NLOS 带来的感知误差，广泛分布的终端在抑制和利用 NLOS 以提高视距（LOS）径概率方面具有优势；二是实时性要求高，需优化资源调度算法，确保感知数据与通信业务共享空口资源时的低时延。

2.1.2. 智慧城市场景

智慧城市场景需要实现气象监测与灾害预警等功能。气象监测对于许多智慧城市应用场景来说十分重要，例如水利设施设计、农业、天气预报、气

候建模等。传统的气象监测通过建立气象雷达网来预报和监测天气，一方面雷达网络部署成本高，而且低空（特别是低于200米高度）覆盖能力差。无线电波在大气中传播时，其强度会被大气成分减弱，如果遇到雨天，由降雨造成的额外衰减会增加传播路径损耗。可以利用基站广覆盖特性，通过基站发送感知信号，终端（UE）接收降水粒子散射的回波信号，可以实时探测大气中的降水强度、分布、类型及风场结构，提升区域气象预警精度[5]。典型灾害包括：山体滑坡、洪水、路面或者房屋塌陷、落石、积水、积雪等。灾害预警可以通过终端（例如：IoT设备）感知局部地质变化（例如：山体滑坡或洪水场景中），再由基站整合数据实现大范围风险评估；或者基站直接感知局部地质变化(例如:路面或者房屋塌陷、落石、积水或者积雪场景中),融合相邻基站和终端的数据，提升区域灾害预警精度。此场景存在三大技术挑战，一是能效优化：终端需按需唤醒感知模块（如事件触发式上报），降低能耗；二是数据融合：异构终端的数据需统一坐标系校准，避免时间戳异步；三是多节点同步：基站和终端之间的双基或者多基感知测量需要保证同步。

2.1.3. 数字孪生场景

环境重构是实现数字孪生的重要使能技术。基站需要利用电磁波对周围环境进行探测，通过反射、散射等信道特征提取感知目标的外形、朝向等特征，例如获得环境目标的电磁点云图像。此时，感知目标可能不再是单一的目标，而是包含楼宇，树木，车辆等环境中的物体。通过对周围环境的重建，能够精确的掌握环境中的信道变化，从而更好的支撑数字孪生、辅助通信效率和速率提升。然而，现实环境物体繁多复杂，单基站环境重构性能受到遮挡物等影响性能受限，易出现盲区。在无线网络环境中，终端无处不在的随机分布在小区的空间环境中，利用基站与终端的协作感知能有效的弥补上述不足[6]。例如，基站与小区中多个终端发送参考信号，由于终端空间位置不同，基站利用终端反馈的测量信号融合完成环境物体的感知。同时，基站与终端协作感知也存在众多挑战，如收发同步，终端节点选择，干扰协调等。

2.2. 室内场景需求

基站与终端协作感知在室内场景的应用需求主要体现在智慧工厂、智慧家庭、智慧医疗等领域，其核心需求包括感知数据实时性、可靠性及多模态设备协同。

2.2.1. 智慧工厂场景

在资产管理方面，工厂需实时追踪人员、设备、物料的位置（如厘米级精度），以优化生产调度和防止越界操作。例如通过操作设备如机械臂对操作目标的精确感知，实现更高效的智能生产制造。此时，机器人等智能自动化设备可作为感知终端，主动上报传感器数据，来补偿信号遮挡区域的误差[7]。在安全监控方面，基站需实时检测人员违规行为（如滞留危险区域）或设备异常状态。基站与摄像头、终端等感知设备联动，对人、自动导航车（AGV）、智能生产线机器人进行定位跟踪与入侵检测，避免碰撞或对危险区域的入侵，能够提高异常报警的实时性和准确率。此场景存在两大技术挑战：一是工厂环境复杂，设备、物料堆放及金属结构易造成信号遮挡，导致定位误差增大；二是不同模态感知数据的时空同步与联合校准较为困难。

2.2.2. 智慧家庭场景

在环境自适应控制方面，根据人员位置和活动状态（如睡眠、离家）自动调节灯光、温湿度。家庭基站与终端（如智能手环）协作，通过蓝牙信标实现房间级定位。AI 预测用户行为习惯，结合终端运动传感器数据优化控制策略。在安防与紧急响应方面的需求是，老人跌倒检测或入侵警报需高可靠性。终端（如穿戴设备）及时感知老人姿态变化，并通过短时延上报数据给基站，基站便可联动家庭网关启动视频验证并通知紧急联系人。此外，基站也可以协调终端收发感知信号，提升跌倒检测或入侵警报的可靠性、降低反馈时延。在多设备协同方面，智能家电需无缝协作（如空调与空气净化器）。存在的技术挑战是，此场景存在两大技术挑战：一是家庭环境墙体、家具、人体均为高反射体，容易“跨房误判”；二是当多家电同时同地收发感知数据时，彼此频段重叠、时隙随机，会导致丢包或延迟。

2.3. 工作模式

基站与终端协作感知的工作模式分为两种，一是基站发 UE 收的下行感知模式，二是 UE 发基站收的上行感知模式。

2.3.1. 基站发 UE 收

在基站发 UE 收的下行感知模式下，基站是感知发送端，UE 是感知接收端。根据协作感知时收发节点的数量，又可细分为单基站发单 UE 收、多基站发单 UE 收、单基站发多 UE 收、多基站发多 UE 收四种类别，如图 1 所示。

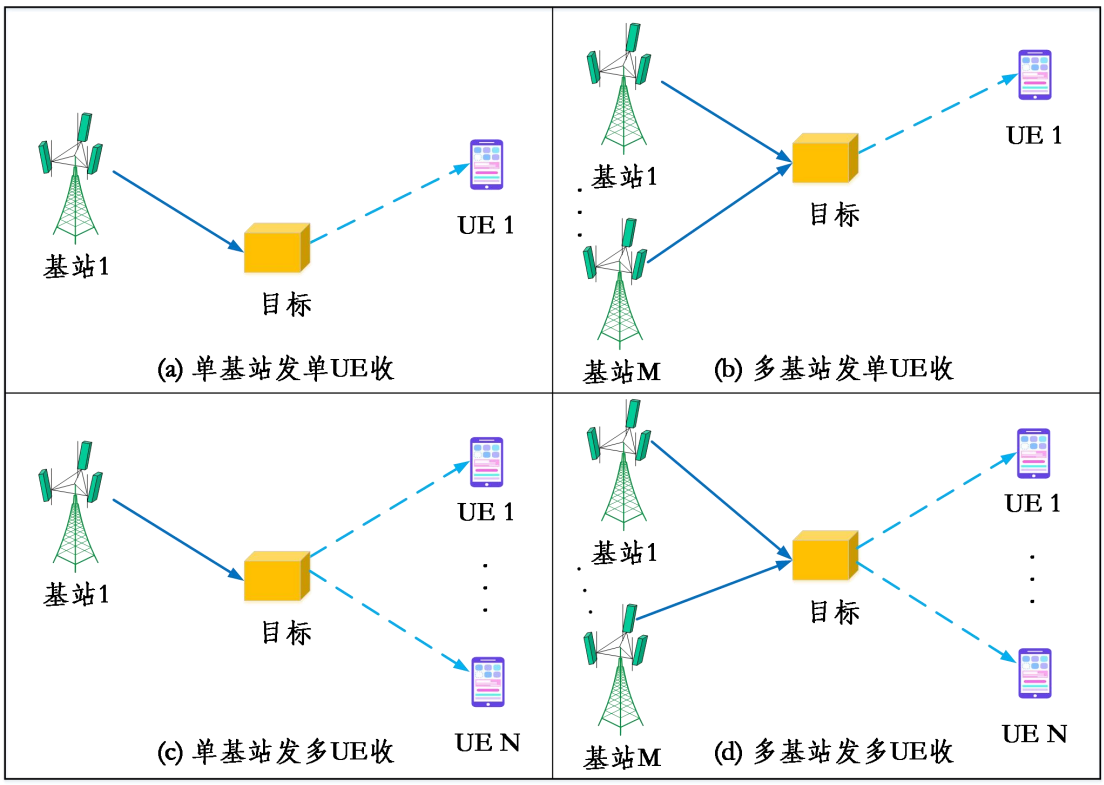


图 1 基站发 UE 收工作模式示意图

该模式主要关注的关键技术包括测角、UE 选择、下行感知信号设计、感知测量量上报等。

在到达角测量技术方面，不同类型的 UE 能力不同。如果是传统 UE（如手机），由于尺寸受限，其天线数目有限，此时在 UE 侧进行测角，会产生比较大的测角误差。由于 6G 终端的多样性，例如车辆等都可以是执行感知任务的终端，因此可以在这些设备上进行感知性能优化设计。首先，这些终端的设备相对手机的尺寸是有优势的，可以对天线进行设计，支持测角功能。其次，对于在高速公路上行进的车辆，其轨迹相对比较固定，那么就可以结合虚拟孔径技术来增强测

角能力。另外，基站可以配置发送多端口的感知信号，测量离开角，这样角度测量不会受限于 UE 的天线尺寸等能力。

在 UE 选择方面，存在两种感知需求：一是特定区域的感知，二是特定 UE 周围的感知。对于第一种需求，感知区域是静态的，较长时间不会发生变化，比如特定区域的 UAV 入侵检测，此时需要选择合适的 UE 参与到感知中，UE 的位置就是一个特别重要的筛选条件。对于第二种需求，UE 的位置可能会发生变化，此时需要先对 UE 进行定位，再参与感知。

在下行参考信号设计方面，通信的现有下行参考信号例如 CSI-RS、PRS 等基于 Gold 序列的通信下行参考信号可以复用来进行感知。CSI-RS 功能强大，具有波束管理、CSI 测量、时频偏跟踪、RRM 测量、移动性管理等用途。CSI-RS 的配置由基站配置并通过 RRC 信令下发。PRS 主要用于定位，配置是由位置管理功能（LMF）通知，且 PRS 可由服务小区和邻小区发送，UE 端可测量多个小区/TRP 发送的 PRS 以得到测量结果，例如 RSRP，DL-TDOA 等。为了支持协作感知时的信息融合可以设计多个基站发送或感知信号。另外还可以基于各种下行参考信号进行时域和频域上的扩展，以及使用占用额外时域和频域资源的专门感知参考信号。

在感知测量上报方面，一般根据数据融合方式的不同分为原始数据级上报、点云/轨迹级上报以及结果级上报，越接近原始信号的感知数据量越大，但精度也越高。因此，需要设计适合 UE 上报的机制和数据信息。另外，测量上报的时机也需要进一步设计。频繁上报能够提升感知可靠性，但也会为终端的能耗带来挑战，因此在测量上报时如何兼顾周期和非周期的上报方式，如何兼顾精度/可靠性与节能，也是需要创新设计的。

2.3.2. UE 发基站收

在 UE 发基站收的上行感知模式下，UE 是感知发送端，基站是感知接收端。同样，根据协作感知时收发节点的数量，又可细分为单 UE 发单基站收、多 UE 发单基站收、单 UE 发多基站收、多 UE 发多基站收四种类别，如图 2 所示。

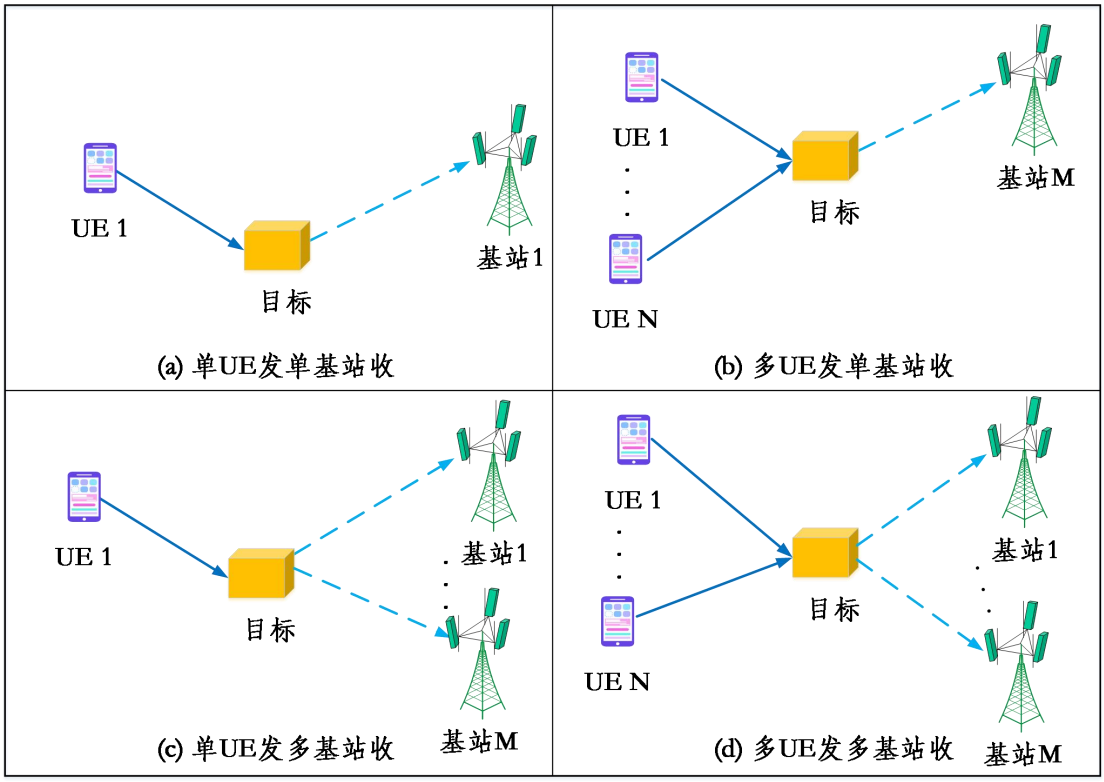


图 2 UE 发基站收工作模式示意图

UE 发基站收的感知面临着发送功率限制、上行波形和信号序列选择等问题。

解决发送功率限制的方法有三种。一是动态功率控制与智能调度：这是基础且关键的技术。基站会根据实时的信道条件、路径损耗和业务优先级，动态调整 UE 的发射功率。例如，通过开环、闭环、外环功率控制相结合的方式，实现精确的功率分配，避免无效功率消耗。同时，智能资源调度器会为 UE 分配合适的时频资源，避免在高路损条件下进行大功率发射，从而提升能效。二是硬件与射频增强：从硬件层面提升效率是根本途径。这包括采用更高效的多天线技术（如波束成形），将能量集中指向基站，等效于增强了信号强度。同时，提升基站的接收机灵敏度，使其能够在更弱的信号下正确解码，从而允许 UE 以更低的功率工作。三是先进的功率管理策略：在复杂场景（如载波聚合（CA）或双连接（DC））下，UE 需要智能地管理总功率。这包括在功率受限时，根据预设规则（如信道重要性、数据优先级）在不同载波或信道间进行功率分配或共享。3GPP 在新标准中也持续引入如高功率终端、功率余量上报增强等机制，以提升功率控制的效率和透明度。

对于上行波形和信号序列选择，目前 3GPP 支持 OFDM 和 DFT-S-OFDM 两

种波形。对于 OFDM，参考信号仍然采用的是 Gold 序列，如 DMRS。其他参考信号，如 SRS 采用的是 ZC 序列。对于未来的感知，最好也是能复用或者增强现有的参考信号，这样既能降低开销又能提供感知能力。所以还是有两种选择: Gold 序列或 ZC 序列。相比较而言，Gold 序列复用能力更好，但是，Gold 序列峰均比略差于 ZC 序列。ZC 序列的截断序列不再保持 ZC 特性，但其本身的相关性也更好。因此，有必要对两种序列进行改进，使之更适用于作为上行感知参考信号的生成序列。

三、 基站与终端协作感知关键技术

3.1. 参考信号设计

3.1.1. 序列设计

对于基站终端协作感知系统，感知参考信号序列的设计是其中一项重要研究内容。一种简单的方式是完全复用现有的通信参考信号来实现感知功能，例如 5G NR 通信系统中的 CSI-RS 或 SRS 等。NR 系统中的参考信号所使用的基础序列主要有 ZC 序列和 Gold 伪随机序列。在本节中，3.1.1.1 小节主要针对基于 ZC 序列的上行 SRS 参考信号进行增强设计，而 3.1.1.2 小节主要针对基于 Gold 序列的下行 CSI-RS 参考信号进行增强设计。

3.1.1.1.恒模序列设计

ZC 序列具有恒幅特性，如图 3 所示，且 ZC 序列的离散傅里叶变换仍然是一种 ZC 序列，因此，ZC 序列的功率峰均比（PAPR）较低。ZC 序列具有良好的自相关特性和互相关特性，与其循环移位后的序列的相关值为零，不同根序列之间的循环互相关很低，M_{ZC} 为 ZC 序列的长度。而且，ZC 序列具有较高的多普勒容忍能力，即具有较好的抗频偏特性，对于高速目标反射的高多普勒频移回波信号也有较好的检测性能。

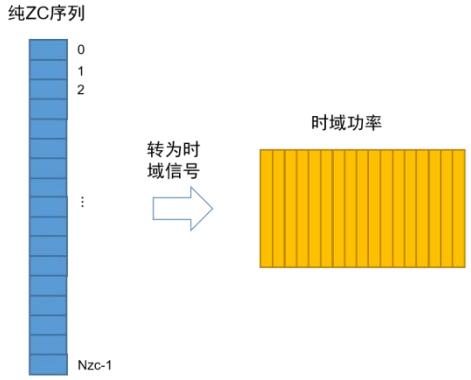


图 3 ZC 序列的恒幅特性示意图

虽然 ZC 序列具有恒幅特性，但由于 SRS 实际使用的序列长度 M_{ZC} 会大于实际的根序列长度 N_{ZC}，且存在相位循环移位项 $e^{j\alpha n}$，使得实际的 SRS 序列不再具有恒幅特性，如图 4 所示。

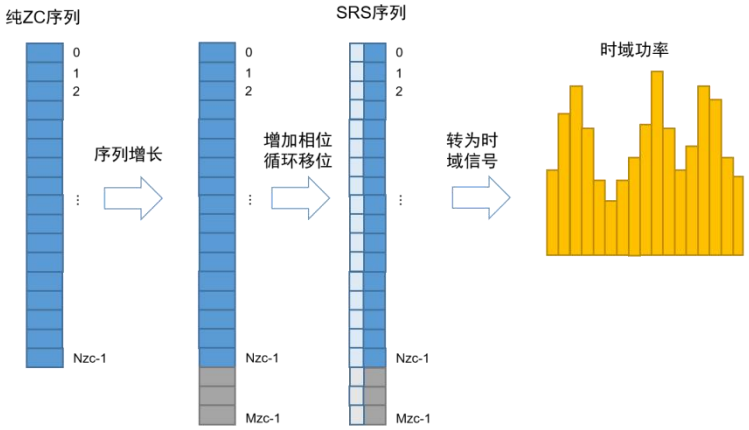


图 4 SRS 序列无恒幅特性示意图

若感知系统复用现用通信系统的 SRS 序列，由于时域上功率不均衡，会出现较高的 PAPR。发送 PAPR 较高的信号对功率放大器的要求很高，需要发送端的功率放大器具有严格的线性区域才能保证信号不失真，一旦超出线性区域范围或线性特性不理想，就会出现信号失真的情况，从而极大地影响感知性能。

针对上述问题，本小节提出一种改进的 SRS 序列生成方法，用作感知参考信号序列，改进后的 SRS 序列具有较好的自相关和互相关特性，且极低的峰均功率比 PAPR。具体方案如下:

第一步：参考 SRS 不跳频的序列生成方式，产生基序列；

感知参考信号基序列生成公式如下：

$$r^{(p_i)}(n,l') = r_u^{(\alpha_i)}(n) \tag{1}$$

$$0 \le n \le M_{sc}^{SENRS} - 1 \tag{2}$$

$$l' \in \{0,1,\ldots,N_{symb}^{SENRS} - 1\} \tag{3}$$

其中，M_{sc}^{SENRS}为感知参考信号频域上占用的子载波数目，N_{symb}^{SENRS}为感知参考信号时域上占用的 OFDM 符号数目，感知参考信号支持多端口发送，p_i为感知参考信号的第 i 个端口号，α_i为端口p_i对应的相位循环移位。进一步，

$$r_u^{(\alpha)}(n) = e^{j\alpha n}\bar{r}_u(n), \quad 0 \le n < M_{SC}^{SENRS} \tag{4}$$

$$\bar{r}_u(n) = x_u(n \bmod N_{ZC}) \tag{5}$$

$$x_u(m) = e^{-j\frac{\pi um(m+1)}{N_{ZC}}} \tag{6}$$

其中N_{ZC}是小于M_{sc}^{SENRS}的最大质数，为根序列长度。

产生的感知参考信号基序列$r^{(p_i)}(n,l')$，其实际感知参考信号序列长度大于根序列长度，且存在相位循环移位项，不同的天线端口使用不同的相位循环移位。此时的基序列不是纯的 ZC 序列，不具有恒幅特性。

第二步：对基序列做离散傅里叶变换（DFT），得到最终的感知参考信号序列。

假设第一步中生成的基序列为$r^{(p_i)}(m,l')$，本步骤中对第一步中生成的感知参考信号基序列$r^{(p_i)}(m,l')$做 M 点的 DFT 变换，得到最终的感知参考信号序列：

$$y^{(p_i)}(n,l') = \frac{1}{\sqrt{M_{sc}^{SENRS}}}\sum_{k=0}^{M_{sc}^{SENRS}-1} r^{(p_i)}(k,l') \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{M_{sc}^{SENRS}}} \tag{7}$$

$$0 \le n < M,\ l' \in \{0,1,\ldots,N_{symb}^{SENRS} - 1\} \tag{8}$$

其中，感知参考信号序列长度 M 等于频域上感知参考信号占用的子载波数目，N_{symb}^{SENRS}为时域上感知参考信号占用的 OFDM 符号数目。

不再具有恒幅特性的序列做 DFT 后再使用，使得实际使用的参考信号序列又具有恒幅特性，如图 5 所示。

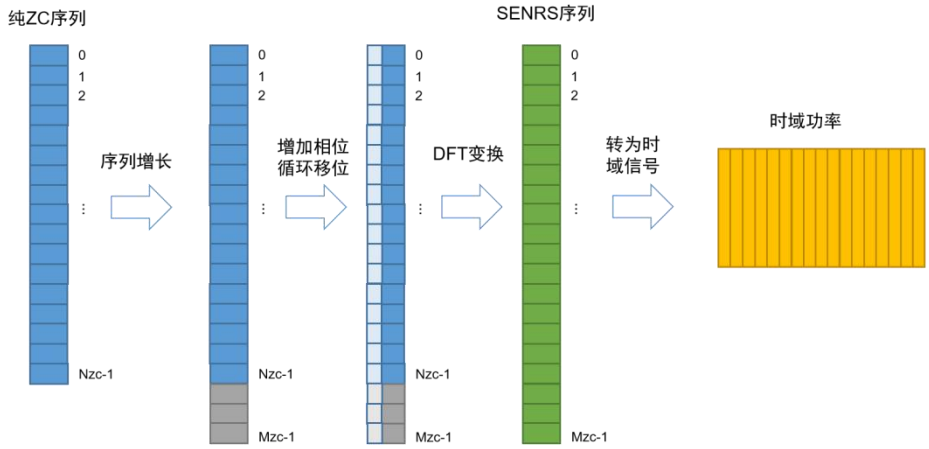


图 5 改进序列的恒幅特性示意图参考信号设计

值得一提的是，由于改进后的 SRS 序列在用户之间和端口之间的序列正交性并没有受影响，因此仍可用于通信的 sounding，只要双方协同好序列生成的规则即可。

3.1.1.2.时域相关性增强设计

CSI-RS 序列所使用的基础序列是 Gold 伪随机序列，Gold 伪随机序列具有良好的自相关和互相关特性，即自相关函数在序列偏移为 0 时归一化相关峰值为 1，在其他序列偏移时归一化相关峰值接近于 0；而不同的 Gold 伪随机序列之间的互相关函数为所有序列偏移时归一化相关峰值都比较小。

通信系统中序列设计通常仅考虑时域或频域维度序列特性，而感知数据处理通常需要联合多个符号或多个时隙，同时考虑序列的时域和频域维度特性。例如对于采用频域序列生成和映射的通信参考信号，多个 OFDM 符号对应的时域自相关旁瓣较高，考虑对不同 OFDM 符号承载的序列采用时域维度相位调制的方式改善其时域自相关特性。

本小节提出两种改进的 CSI-RS 序列生成方法，改进后的 CSI-RS 序列在频域和时域维度都具有较好的自相关和互相关特性，更适用于感知系统，能

够在复杂信道条件下更好地实现测距和测速算法，提升感知性能。

（1）假设每个感知相干处理时间内包含 M 个 OFDM 符号，每个符号承载长度为 N 的感知信号序列，可以表示为

$$x_m = [x_m(0), x_m(1), \cdots, x_m(N-1)]^T \quad , 0 \le m \le M-1 \tag{9}$$

采用具有良好自相关特性和互相关特性的序列 $u = [u(0), u(1), \cdots, u(M-1)]$ 对不同 OFDM 符号承载的参考信号序列进行整体相位调制得到

$$z(n, m) = x_m(n) \cdot u(m) \ , 0 \le m \le M-1 \ , 0 \le n \le N-1 \tag{10}$$

改进后的信号设计由于是对不同符号承载的参考信号序列进行整体相位调制，其频域维度序列特性没有改变，但时域维度序列特性得到了改善。

（2）考虑到在不同的无线帧中相同位置 OFDM 符号上的 CSI-RS 序列是完全重复的，这是引入周期性出现的时域相关性高旁瓣的原因之一。在生成频域维度 CSI-RS 序列的 Gold 序列的初始值时，引入系统帧号参数，使得不同帧的 CSI-RS 序列不同。

新旧方案下的 CSI-RS 参考信号序列时域维度的自相关性能图如图 6 所示。可以看出，相对于现有方案，改进的 CSI-RS 参考信号序列生成方案，能够保证 CSI-RS 参考信号序列时域维度自相关在序列偏移为 0 时归一化相关峰值仍为 1，而在其他序列偏移处的相关峰都有明显减弱。

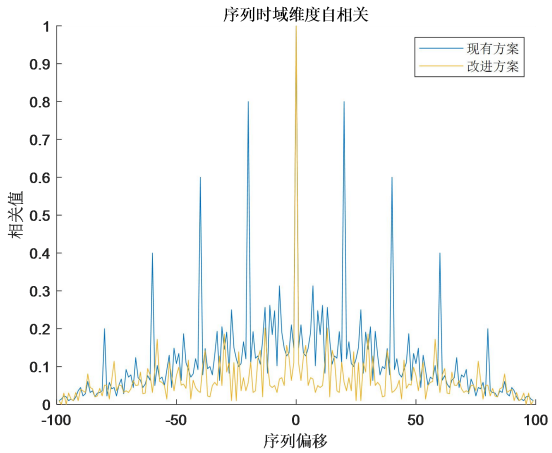


图 6 不同生成方案下的 CSI-RS 参考信号序列时域维度的自相关性能对比图

3.1.2. 映射设计

通感一体化系统中为了同时测距和测速，且满足距离分辨率和速度分辨率的需求，感知信号通常需要在频域上占用较大的带宽、在时域上占用较大的时长；为了满足最大无模糊距离和最大无模糊速度的要求，感知信号的频域间隔和时域间隔需要足够小，因此感知参考信号所占用的频域资源和时域资源较多，资源开销较大。除了传统的均匀参考信号映射，可进行非均匀感知信号设计，能够克服上述不足，实现满足感知性能的同时节省开销。

3.1.2.1.基于多参考信号嵌套的非均匀映射

非均匀参考信号，例如图 7 所示的“L”型、“U”型、“□”、“V”型、“X”型等，与均匀参考信号相比，能够在测距测速的同时，尽量降低信号资源开销。以图 7 中的“L”型为例，该图样包含连续的若干个子载波和连续的若干个符号，以保证最大无模糊距离/速度最大；并占用大跨度的带宽和符号长度，以保证距离/速度分辨率最小。与占用全部子载波和符号的均匀参考信号相比，节省了资源开销。但是现有的参考信号信令配置实现复杂，信令开销大。为了配置非均匀参考信号图样，并且节省时频资源和信令配置资源，需设计一种非均匀参考信号图样配置方式。具体地，可以利用现有 NR 多种参考信号图样（pattern）的天然非均匀特点，设计两级嵌套配置方式，将第二级参考信号嵌套进第一级参考信号图样中。例如，可通过将现有 PRS 定位参考信号图样嵌套进 CSI-RS 信号图样的方式，实现非均匀参考信号的配置。

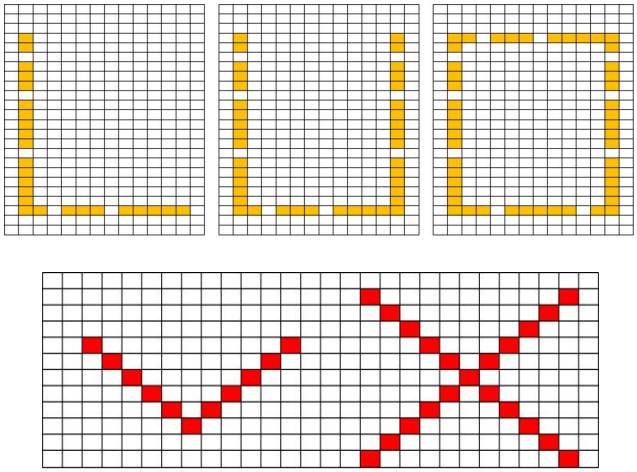


图 7 多种非均匀参考信号 pattern

3.1.2.2 基于互质的非均匀映射

感知性能受感知信号参数的影响，例如，基于 OFDM 等间隔信号排布推导出最大无模糊距离以及最大无模糊速度，可以看出感知信号频域间隔越小，距离无模糊范围越大，感知信号的发送周期越短，速度无模糊范围越大。为满足远距离高速度场景的感知性能，感知信号需要占用大量的资源开销占用，这样就会损失通信性能。采用互质间隔的感知信号设计方法能够克服上述不足，然而针对非均匀间隔的感知信号，传统的快速傅里叶变换（FFT）不再适用，势必会引入复杂度大大增加的接收算法，如何设计一种互质感知信号排布使得其存在低复杂度的接收方案便于工程实现是一个亟待解决的问题。

一种可实现的互质感知信号设计方案如图 8 所示，即在共同得到一个感知结果的一组感知信号内存在至少两个子组感知信号，子组内感知信号间隔是均匀的，子组间感知信号间隔是互质的。两个子组的感知信号可以采用或顺序或重叠的排布。

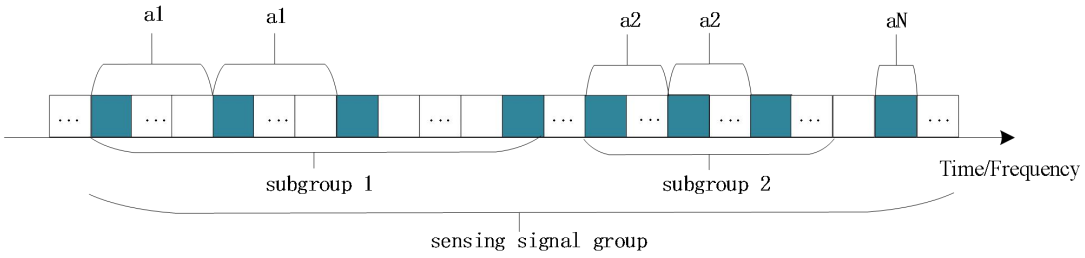


图 8 互质参考信号设计方案

以时域设计方案为例，对比不同感知信号排布性能，。

排布方式 1，1000 个时隙中感知信号连续排布，每个时隙均配置感知信号，感知信号个数为 1000;

排布方式 2，1000 个时隙中，以 5 为间隔等间隔排布，感知信号个数为 200;

排布方式 3（顺序排布），1000 个时隙中，共同获得一个感知结果的一组感知信号中包括两个子组分别为 3 和 7 为间隔等间隔排布的感知信号，每组感知信号个数均为 100，首先在时域上均匀排布 100 个以 3 为间隔的感知信号，在最后一个感知信号之后以 7 为间隔排布 100 个感知信号，从而构成

两个子组感知信号的顺序排布。

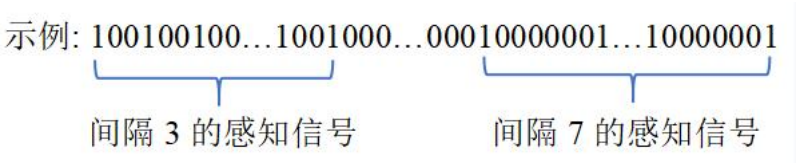


图 9 互质排布方式 3 示例

其中，1 表示该时隙传输感知信号，0 表示该时隙无感知信号传输

排布方式 4（重叠排布），1000 个时隙中，同获得一个感知结果的一组感知信号中包括两个子组感知信号，两个子组感知信号在时域或频域范围内完全或部分重叠，例如间隔为 3 和 7 的两个子组感知信号以相同的起点开始排布。

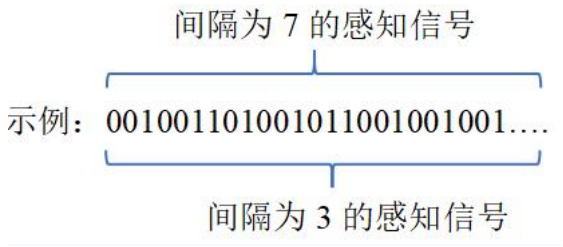


图 10 互质排布方式 4 示例一

典型地，重叠排布中存在一种嵌套排布的方式，第一子组感知信号以 100 为间隔均匀排布，感知信号个数为 10，第二子组感知信号以 1 为间隔均匀的连续的排布，感知信号个数为 20，注意到，1 与任何数都互质，是互质间隔的一种典型选择方式，所述第二子组感知信号排列于第一子组感知信号的一个或多个信号间隔内，称其为嵌套排布。

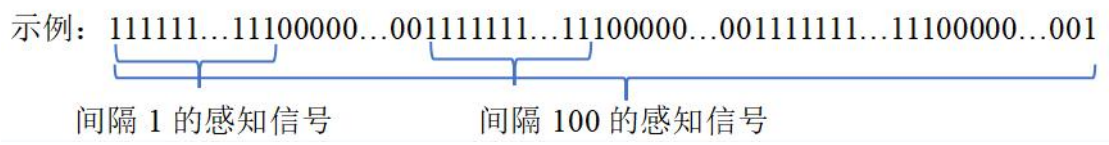
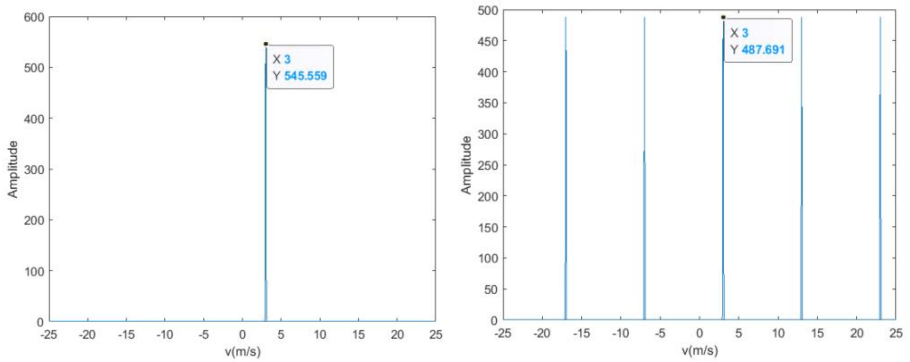


图 11 互质排布方式 4 示例二

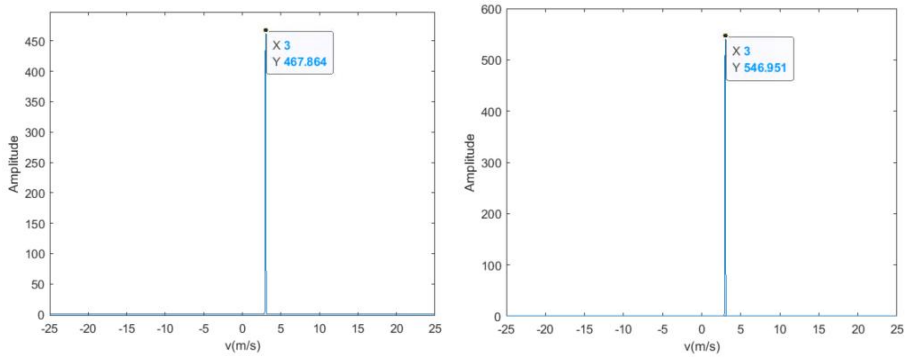
对比上述各种排布方式，测速性能如图 12 所示。可以看到排布方式 1 的无模糊速度范围为 50m/s，均匀等间隔的排布方式 2 会使得无模糊速度范围减少为 10m/s，此时在相同范围进行搜索会出现多个样值难以区分，无法

准确得到速度，而采用顺序排布和嵌套排布的互质信号设计方法均会在与等间隔排布相同的感知信号个数下能够达到排布方式 1 的无模糊速度范围，即满足感知性能的同时节省信道开销。

上述四种排布方式的对比在以下仿真条件下进行：载频 3GHz，子载波间隔 15kHz，时隙间隔 1ms，时域范围 1000 个 slot，真实速度为 3m/s。采用 MUSIC 算法进行速度测量，MUSIC 算法以 0.1m/s 步长在[-25m/s, 25m/s]的范围内进行搜索，使得谱函数最大的即为速度的测量值。



（a）排布方式 1（b）排布方式 2



（c）排布方式 3（d）排布方式 4

图 12 不同互质排布方式测速性能

3.1.2.3 基于嵌套阵的非均匀映射

最基本的嵌套阵由两个均匀线阵串联构成[8][9]，内层均匀线阵的阵元为数 M_1、阵元间距为λ/2，外层均匀线阵的阵元数为 M_2、阵元间距为 $(M_1+1)\lambda/2$。由嵌套阵构成的差分协同阵列中相同元素数目较多，具有一定冗余和自由度损失。图 13 给出一个典型的两级嵌套阵示例，其中 $M_1=M_2=3$。可以很直观地看出，嵌套阵方法能够以较少的阵元数构造出较大的虚拟阵列，且虚拟阵列中的阵元均匀且连续排列。另外，通过嵌套阵构造的虚拟阵列中各个阵元

的位置比较方便数学表示，有利于后续信号处理。

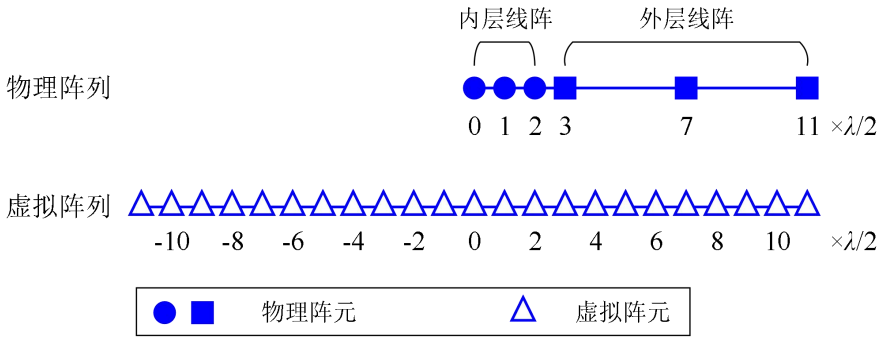


图 13 两级嵌套阵示意图

在 ISAC 系统中的感知信号的时频资源分配中应用差分协同阵列方法时，频域的子载波和时域的 OFDM 符号可以类比于差分协同阵列中的天线阵元，对应地，能够利用差分协同阵列通过较少的子载波或 OFDM 符号实现满足特定分辨率和最大不模糊测量要求的时延估计或多普勒估计。

3.2. 信令交互设计

3.2.1. 基本信令交互

引入终端设备参与感知服务后，则需要对 UE、gNB 和感知功能（SF）、接入与移动性管理功能（AMF）之间的信令交互和感知控制消息进行设计。用于感知服务控制的信令，应至少包含如下功能的信令：感知服务请求信令，服务请求可能来自于高层网元、SF 自身、gNB、或 UE，在当前框架下，可考虑由 SF 汇总感知请求，而后转发给感知服务 gNB 或 UE 节点；感知测量信号配置，用于告知感测信号的时、频、空域资源位置，以及测量行为等信息；感知上报配置，用于控制感知结果上报的时频资源以及上报量等信息；感知请求响应/结果上报消息，用于测量方向对端传输感知服务的测量结果。

对于基站和终端协作感知的基本流程，可以按照如下框架展开设计，其中包含了上述提及的一些需要交互的信令，如图 14 所示：

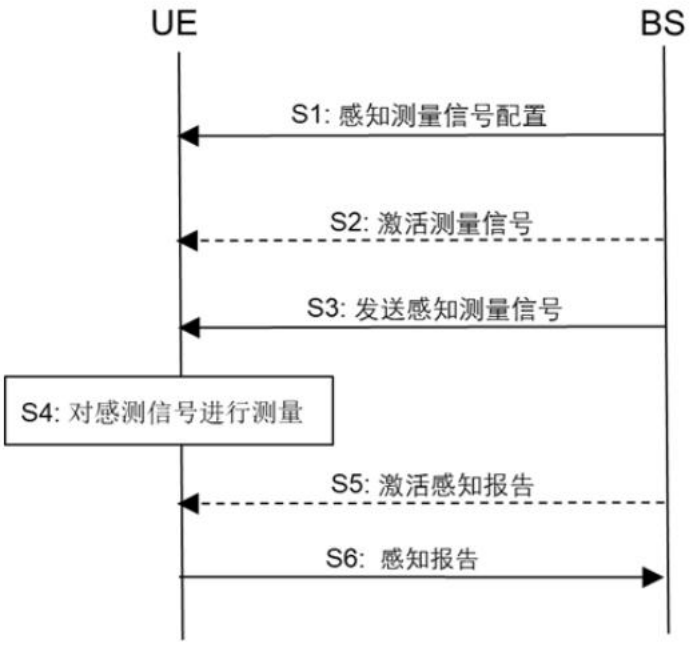


图 14 基站终端协作信令交互总体图

此外，还可能包含一些其它功能的控制信令，比如感知测量的激活信令、去激活信令、测量反馈等等。

多点协作感知至少包括两条感知链路之间的协作，当然也可以包括多于两条感知链路之间的协作。本小节仅以两条链路之间的协作给出协作流程示意图，当然，所述流程去掉一条链路间的信令流程即可简化为双基模式感知流程，而且也可以增加链路，扩展到多条感知链路之间的协作。本节根据参与协作的感知链路不同，给出基站发 UE 收以及 UE 发基站收情况下的协作感知的流程。

3.2.1.1 基站发 UE 收信令交互

为简单起见，本小节只考虑 UE A 和 UE B 属于同一个基站 A 的情况。如果 UE A 和 UE B 跨基站，比如 UE A 属于基站 A，UE B 属于基站 B，可能涉及基站间协调的过程，此时的交互流程如图 15 所示。

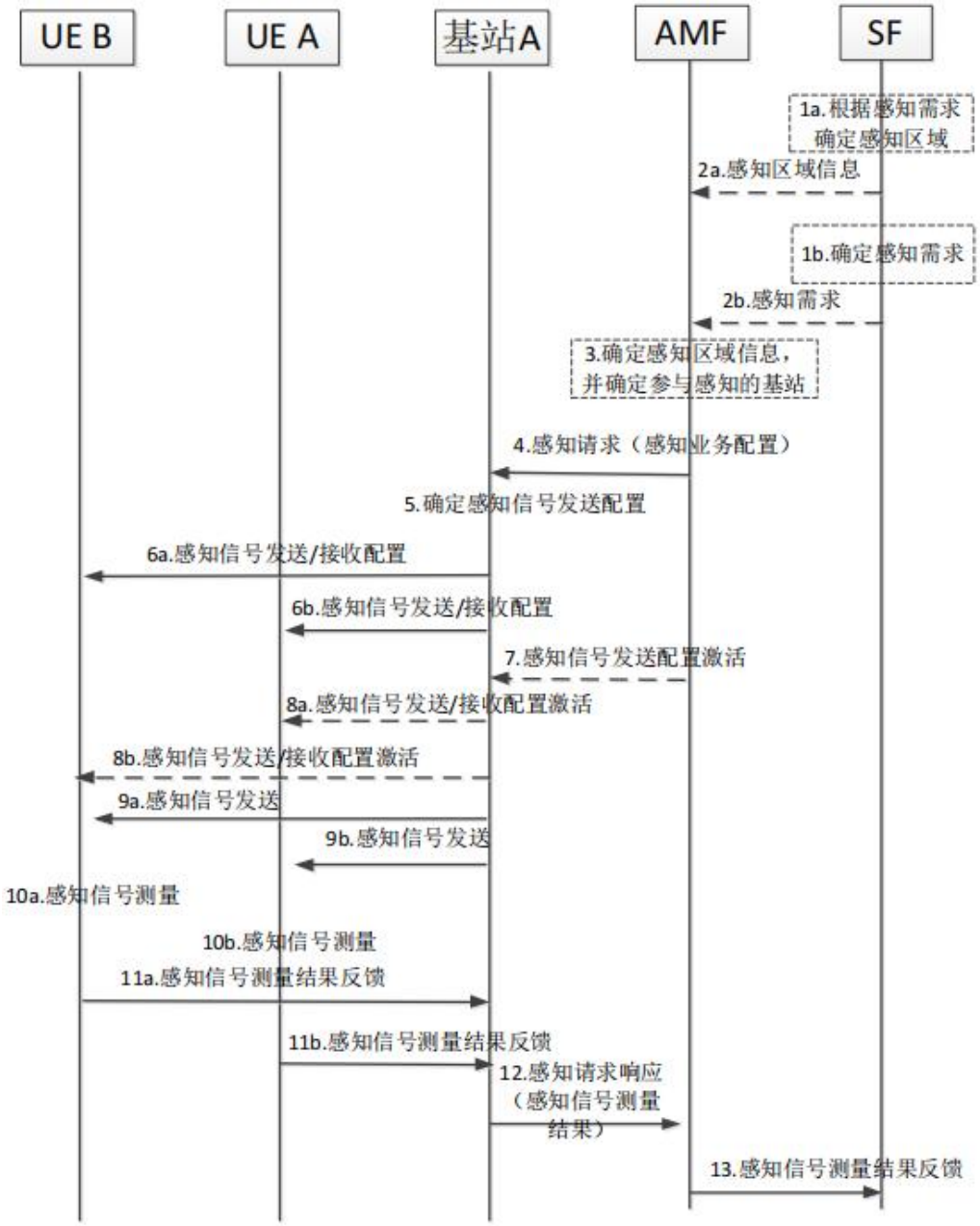


图 15 基站发多 UE 收的信令交互流程

步骤 1、2、3：需要根据感知业务需求，确定感知区域，从而确定参与感知的基站。这个过程：

a)可以由 SF 确定，如果 SF 确定感知区域，那么，SF 可以选择执行感知业务的 AMF，并把确定的感知区域信息发送给 AMF。

b)可以由 AMF 确定，SF 直接把感知需求发送给 AMF，由 AMF 确定感知区域。最终，AMF 根据获得的感知区域，确定参与感知的基站，比如为基站 A。

步骤 4: AMF 向基站 A 发送感知请求，其中包括感知业务需求相关的参数。

步骤 5、6: 基站 A 接收感知请求，根据感知业务相关的参数确定感知信号的发送配置，并确定参与感知的终端设备为 UE A 和 UE B，然后，把确定的感知信号发送相关的配置发送给 UE A 和 UE B

步骤 7: AMF 可以基站 A 发送感知配置激活指示，让基站 A 启动感知信号发送

步骤 8、9: 基站 A 可以向 UE A 和 UE B 发送感知配置激活指示，让 UE A 和 UE B 执行感知信号接收（测量），并发送感知信号

步骤 10、11: UE A 和 UE B 执行感知测量，并把测量的结果反馈给基站 A

步骤 12: 基站 A 把测量结果反馈给 AMF

步骤 13: AMF 把感知信号测量结果反馈给 SF

AMF 可以执行相关的操作，终止本次感知过程。

感知信号测量结果也可以通过 UPF 向 SF 转发，或者直接向 SF 发送。

流程中的信令也可以直接在 SF 和基站之间流转（直接在 SF 和基站之间流转，或者通过 AMF 在 SF 和基站之间流转）。比如，感知请求。

3.2.1.2 UE 发基站收信令交互

UE 发基站收时的信令交互流程如图 16 所示。

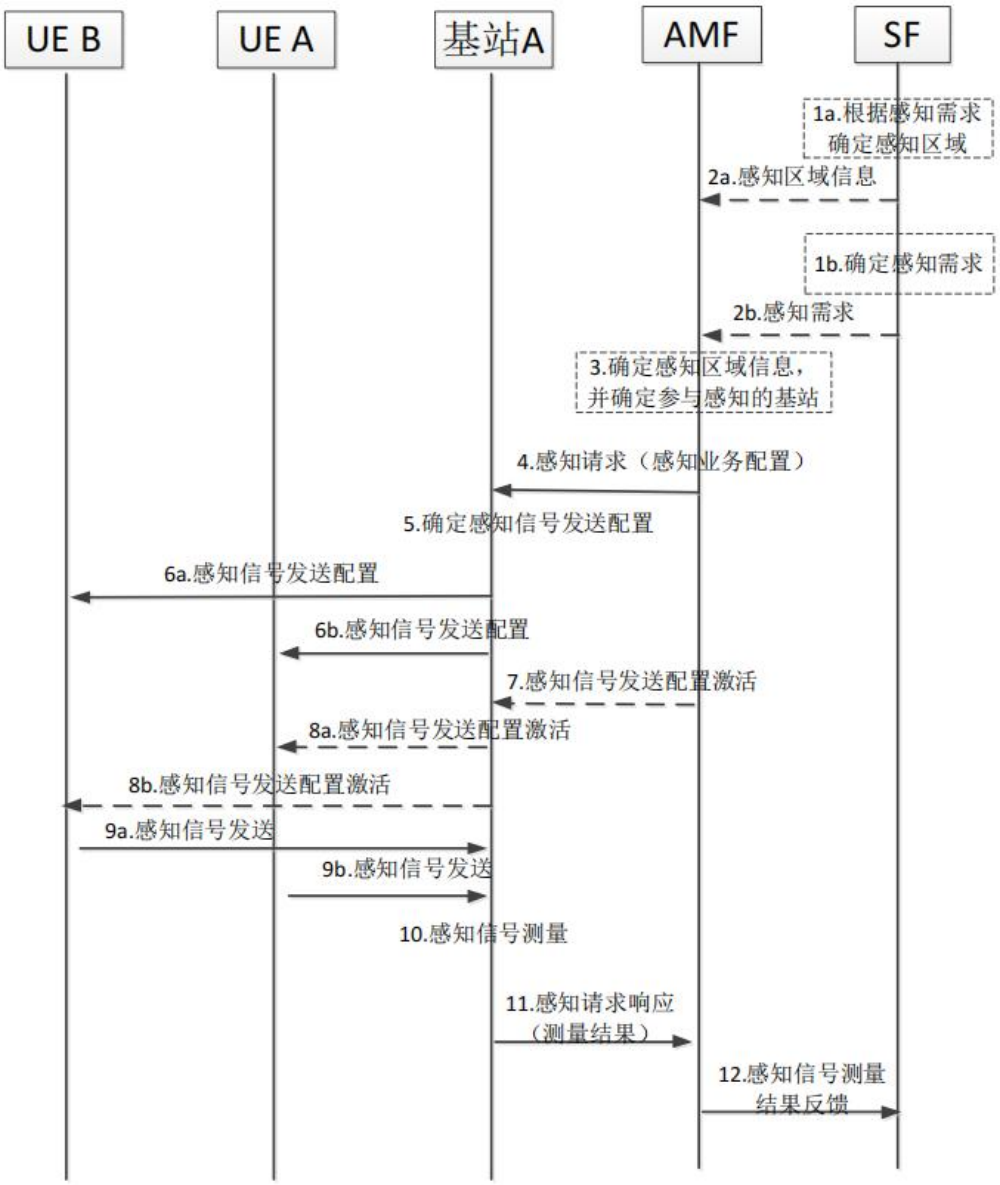


图 16 UE 发基站收信令交互流程图

步骤 1、2、3：需要根据感知业务需求，确定感知区域，从而确定参与感知的基站。这个过程：

a)可以由 SF 确定，如果 SF 确定感知区域，那么，SF 可以选择执行感知业务的 AMF，并把确定的感知区域信息发送给选择的 AMF。

b)可以由 AMF 确定，SF 直接把感知需求发送给 AMF，由 AMF 确定感知区域。最终，AMF 根据获得的感知区域，确定参与感知的基站，比如为基站 A

步骤 4：AMF 向基站 A 发送感知请求，其中包括感知业务需求相关的参

数。

步骤 5、6: 基站 A 接收感知请求，根据感知业务相关的参数确定感知信号的发送配置，并确定参与感知的终端设备为 UE A 和 UE B，然后，把确定的感知信号发送相关的配置发送给 UE A 和 UE B。

步骤 7: AMF 可以向基站 A 发送感知配置激活指示，让基站 A 启动感知信号接收（测量）。

步骤 8: 基站 A 可以向 UE A 和 UE B 发送感知配置激活指示，让 UE A 和 UE B 执行感知信号发送。

步骤 9: UE A 和 UE B 发送感知信号。

步骤 10、11: 基站 A 执行感知测量，并把测量结果反馈给 AMF。

步骤 12: AMF 把感知信号测量结果反馈给 SF。AMF 可以执行相关的操作，终止本次感知过程。或者流程中的信令（比如感知请求）也可以直接在 SF 和基站之间流转（直接在 SF 和基站之间流转，或者通过 AMF 在 SF 和基站之间流转）。

3.2.2. 非连接态 UE 参与感知的信令交互

3.2.2.1 触发非连接态 UE 参与感知

在 UE 参与的感知业务过程中，可能通信数据传输需求很低，如果 UE 能支持非连接态下的感知操作，对 UE 降低功耗是很有意义的。比如利用基站发 UE 收的下行感知信号进行呼吸和入侵检测，利用 UE 发基站收的上行感知信号做环境重构，以及利用感知信号辅助非连接态下的通信操作等，都需要支持非连接态 UE 进行感知操作。

触发非连接态 UE 参与感知包含四种可能的方法: 触发空闲态(idle mode) UE 在 idle mode 进行感知操作; 触发 idle mode UE 在连接态(connected mode) 进行感知操作；触发 idle mode UE 在非激活态（inactive mode）进行感知操作；触发 inactive mode UE 在 inactive mode 进行感知操作。

（1）触发 idle mode UE 在 idle mode 进行感知操作

如图 17 所示，UE 在初始接入后上报感知能力和位置信息，网络存储记

录这些 UE 的信息。当有感知任务时，网络挑选 UE 并配置具体的感知业务需求和感知信号资源信息。如果 UE 有能力完成该感知业务，直接启动感知操作。该流程 UE 一直处于 idle mode。

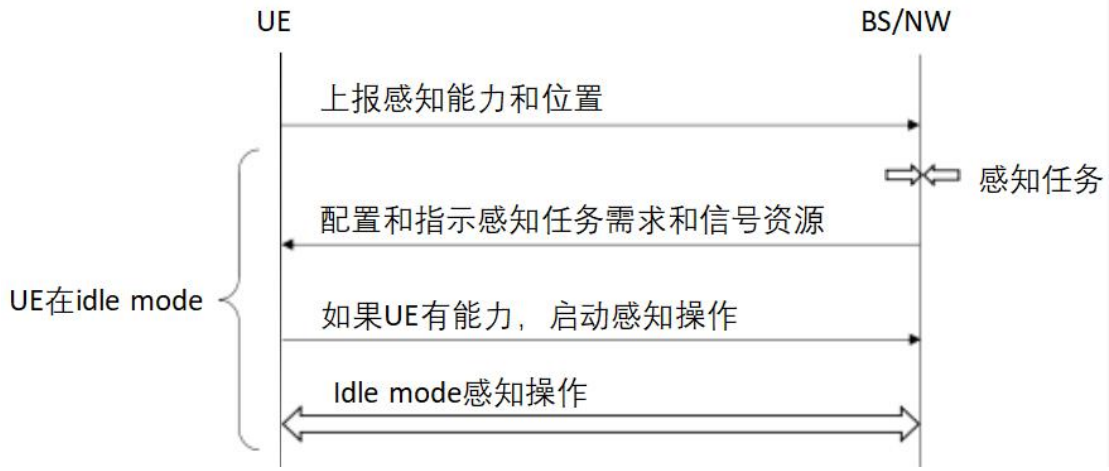


图 17 触发 idle 态 UE 在 idle 态进行感知操作

该方法需要解决的关键问题包括两个：一是可能需要为感知定义专门的 UE 类型或能力类型，如有感知能力且位置固定（或能保证一段时间内位置固定）的感知终端设备。例如，此类型 UE 开机时上报类型、能力和位置等信息，网络根据其能力和位置进行挑选和触发，并且可以为其配置专门的感知信号。二是如何在 idle mode 通过系统消息块（SIB）和 paging 配置和指示感知业务需求以及感知信号和资源配置的具体信息。比如通过 SIB 配置候选的感知业务需求及感知信号和资源，然后通过 paging 指示当前感知业务的具体需求和信号配置。

（2）触发 idle mode UE 在 connected mode 进行感知操作

如图 18 所示，当有感知业务需求时，网络对一定区域内的 idle mode UE 进行通知，通知消息中包含感知业务的基本需求。UE 收到通知消息后进行初步判断，如果有能力则发起随机接入上报感知能力和位置信息，网络根据这些信息选择 UE，并对其进行具体的感知业务内容和需求以及信号配置。UE 收到配置信息后，进入 connected mode 并开始进行相关的感知操作。

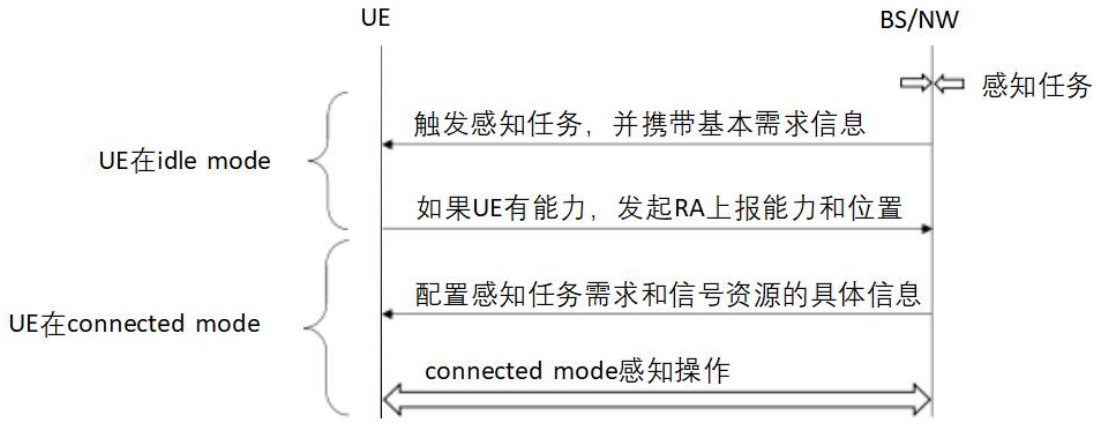


图 18 触发 idle mode UE 在 connected mode 进行感知操作

该方法需要解决的关键问题是需要在 idle mode 通过系统消息（如 SIB）和 paging 配置和指示感知业务的基本需求。例如，可以将感知业务需求划分为基本信息和具体信息两部分，其中基本信息可供 UE 初步判断是否有能力进行相关业务。

（3）触发 idle mode UE 在 inactive mode 进行感知操作

如图 19 所示，感知触发和配置的步骤与（2）相同，只是 UE 在 connected mode 收到配置信息后，如果没有通信数据业务则进入 inactive mode，并继续或开始进行相关感知操作。

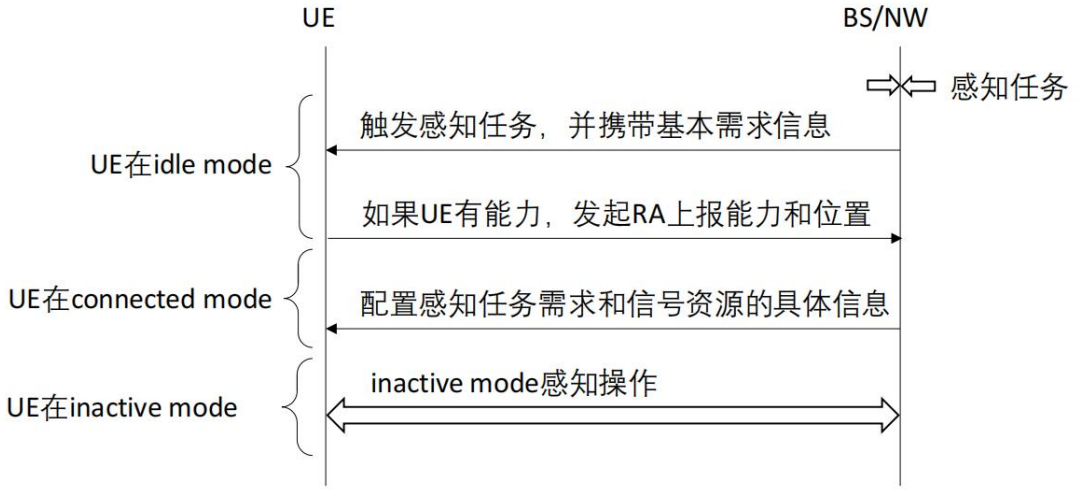


图 19 触发 idle mode UE 在 inactive mode 进行感知操作

该方法需要解决的关键问题是如何在 UE 进入 inactive mode 前对其进行感知业务的配置以及感知信号的配置。比如在 RRC release 信息中携带信息，

指示 UE 继续或开始进行相关感知操作。

（4）触发 inactive mode UE 在 inactive mode 进行感知操作

如图 20 所示，UE 在 connected mode 上报感知能力和位置信息。网络确认并配置 UE 为候选感知设备，UE 收到信息后进入感知业务等待状态。如果没有通信数据业务，UE 进入 inactive mode 继续等待。当有感知业务时，网络触发 UE 并指示感知业务内容和信号配置的具体信息，UE 收到信息后进行 inactive mode 的感知操作。

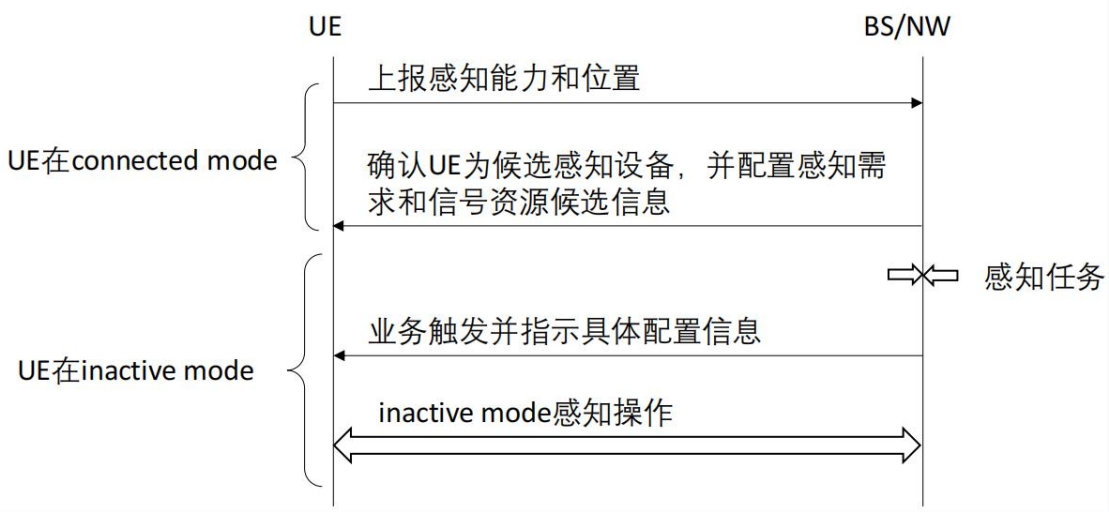


图 20 触发 inactive mode UE 在 inactive mode 进行感知操作

该方法需要解决的关键问题是如何在 connected mode 对 UE 配置（如通过 RRC）感知业务需求和信号资源的候选信息，并在 inactive mode 通过 paging 指示具体配置信息。

3.2.2.2 基于下行信号的非连接态 UE 参与感知

基于下行信号的感知流程主要包括感知能力上报、业务触发及配置，感知信号发送、接收及信号处理，感知数据上报。如果 UE 支持非连接态感知，对应的感知流程如图 21 所示。

（1）感知能力上报、业务触发及配置:

感知业务触发后，根据 UE 上报能力（如支持非连接态下感知信号接收和信号处理），网络可配置 UE 在非连接态下进行感知操作。配置信息包含感知信号配置和感知上报配置等。其中感知信号可以通过 SIB 和

RRC/MAC-CE/DCI/paging 等配置和激活指示。感知上报配置除了包括上报内容和格式等，还需要配置在哪种 RRC 状态以及通过什么渠道进行上报。

（2）感知信号发送、接收及信号处理:

如果当前没有通信数据传输需求，UE 进入非连接态（Idle mode 或 Inactive mode）。基站根据配置进行感知信号的发送，UE 根据配置进行感知信号的接收和数据处理。在 UE 侧，感知操作需要与通信的相关操作联合进行，比如同步、paging 接收以及测量等操作。

（3）感知数据上报:

如果感知数据需要上报，一种方式是 UE 进入 connected mode，根据网络配置进行感知数据的上报，如图 21(a)。这种操作对感知数据量和上报方式（如周期性上报，或事件触发上报）等没有特别要求，但 UE 需要通过随机接入进入 connected mode，需要额外的信令，同时时延也较大。

如果感知数据量比较少，另外一种可能的方式是在 inactive mode 下通过小数据传输（SDT）进行上报，如图 21(b)。可以根据感知数据大小、上报方式和 UE 移动状态等选择基于随机接入的小数据传输（RA-SDT）或基于配置授权的小数据传输（CG-SDT）进行感知数据发送。比如，UE 处于静止状态，感知上报是周期性且数据量固定，可以通过 CG-SDT 的方式进行上报。如果感知上报是事件触发类的，可以通过 RA-SDT 的方式进行上报。

在此过程中如果有通信业务需求，UE 需要进入 connected mode，感知操作需要继续进行，此时感知信号配置和感知数据上报需要依据 connected mode 下的配置。

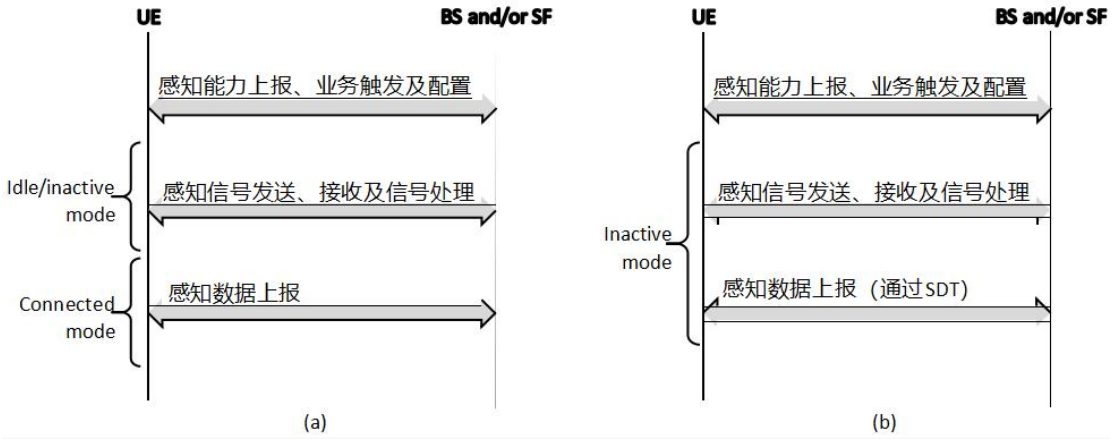


图 21 基于下行信号的 UE 非连接态感知流程

3.2.2.3 基于上行信号的非连接态 UE 参与感知

基于 UE 发基站收的上行信号感知操作同样也需要考虑 UE 非连接态下的流程。对应的感知流程如图 22 所示，主要包含感知能力上报、业务触发及配置，上行感知信号发送。

（1）感知能力上报、业务触发及配置:

与基于下行信号的感知类似，感知业务触发后，根据 UE 上报能力（如支持非连接态下感知信号发送），网络可配置 UE 在非连接态下进行感知操作。配置信息包含上行感知信号的配置以及发送方式等（如周期性或事件触发，以及通过什么渠道进行发送等）。这些信息可以通过 SIB 和 RRC 等进行配置。

（2）感知信号的发送

如果当前没有通信数据传输需求，UE 进入非连接态（Idle mode 或 Inactive mode）。UE 根据配置进行上行感知信号的发送，如图 22(a)。在 UE 侧，需要将感知信号发送和通信相关操作联合进行处理。基站则进行感知信号接收和信号处理。如果这期间有通信数据要传输，UE 进入 connected mode，感知信号发送需要继续进行，这种情况下信号发送方式需要依据 connected mode 下的配置。

对于 inactive mode 有另外一种做法，如图 22(b)，UE 可以通过 SDT 进行上行感知信号的发送。可以根据感知数据大小、上报方式和 UE 移动状态

等选择 RA-SDT 或 CG-SDT 进行感知信号发送。比如，UE 处于静止状态，感知信号是周期性的，可以通过 CG-SDT 的方式进行感知信号发送。

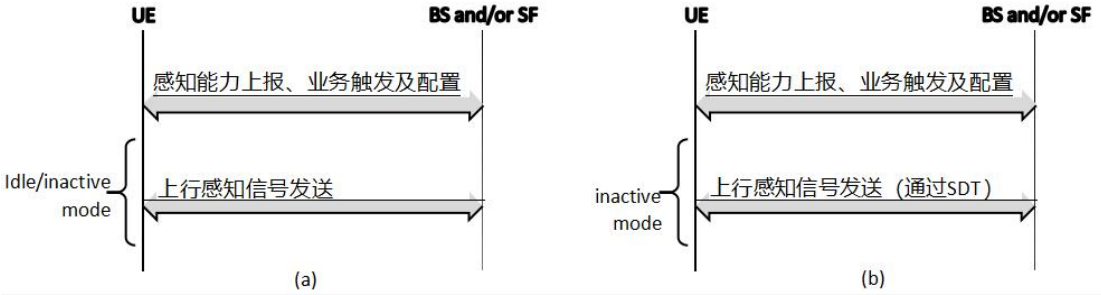


图 22　基于上行信号的 UE 非连接态感知流程

3.2.3. UE 干扰发现的信令交互

在通信感知一体化系统中，不仅通信会对感知产生干扰，感知节点也会对感知节点产生干扰。这种通信与感知之间、感知节点之间的相互干扰，将严重影响感知性能。现有干扰管理方法大多依赖于静态资源分配策略，难以适应通感系统中多变的无线环境。在协作通感场景中，终端、基站、感知节点均可能处于动态移动状态，且通信与感知业务需求也具有时变特性，使得静态干扰控制机制对动态环境适应性差，难以保障服务连续性与性能要求。在 6G 协作通感系统中，网络如何主动发现干扰，并及时调整频谱、波束、调度等参数，是需要解决的关键问题。

为了实现干扰的有效管理，保障感知任务的准确性与连续性，需要对 UE 进行配置，使其能够进行干扰发现并及时上报。在此基础上，进一步实现多节点间的协同干扰管理。在网络侧（如 SF 或基站）引入感知干扰管理功能，对感知终端进行干扰特征检测与上报的配置。依据干扰的方向、类型、强度等关键信息，触发相应的干扰管理策略，从而实现干扰发现、干扰规避以及波束控制等多种响应方式，确保通信与感知任务的可靠性与实时性。终端感知干扰发现主要涉及以下信令交互流程（如图 23 所示）：

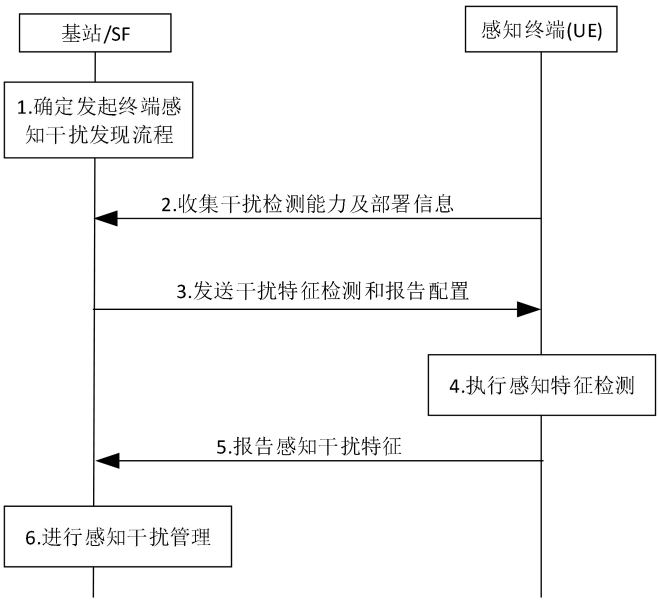


图 23 UE 感知干扰发现流程

步骤 1：由感知干扰管理功能（如基站/SF）根据感知结果、服务类型或优先级，主动发起终端干扰发现流程。例如，当感知回波信号弱，感知信噪比低或接收到高优先级感知服务请求时，基站/SF 将向感知终端发起干扰发现流程。

步骤 2：基站/SF 收集感知终端的干扰检测能力与部署信息，主要包括位置、波束配置、AI 干扰识别能力、设备类型、频段等。这些信息可来自感知接收节点或干扰节点的主动上报，还可从网络（如 AMF/运维管理员（OAM））中查询获取。

步骤 3：基站/SF 配置感知终端进行干扰特征检测，包括干扰检测资源（如潜在干扰节点参考信号）、干扰检测目标（如干扰方向、干扰模式、干扰水平，干扰类型等）、报告触发条件与上报方式。可支持事件触发机制（如感知信噪比下降、干扰噪声水平升高）或周期性检测/按需上报。

步骤 4：感知终端基于配置进行实时干扰检测，包括干扰方向、干扰模式、干扰水平，干扰类型等。

步骤 5：当触发报告事件时，感知终端向基站/SF 上报干扰特征信息。

步骤 6：基站/SF 根据感知终端上报的干扰特征信息和业务需求灵活选择一种或多种干扰管理策略（如干扰抵消、资源重分配、多点协调、波束重构、

感知节点重选等）来提高系统感知性能。

3.3. UE选择与切换设计

当存在小区中多个 UE 均可以提供感知服务时，则需要设计相应的选择和切换感知服务 UE 的规则和流程，可分为 UE 位置已知和 UE 位置未知两种情况来讨论。

当 UE 位置已知的情况下，比如近期触发过该 UE 的定位服务，则可以根据地理位置，设置相应检测距离门限，实现 UE 的选择和切换。而当 UE 未知位置的情形下，则需要在节点选择阶段，先用较少的资源进行一次感知，比如复用通信信号或发送小开销感测信号，通过粗感知的结果，UE 上报与感知相关的测量量，可选的测量量可包括：目标存在性指示、多径分量（MPC）、目标位置估计等。网络侧获取该信息后，即可协助 gNB 或 SF 判断是否选取该

UE 加入正式的感知测量服务，从而完成 UE 选择或切换。即当前阶段，进行感知服务节点选择共具有以下三条主流路径：

a)基于地理位置选择感知节点，如 GNSS 位置、UE 定位信息等；

b)基于信号质量选择感知节点，如 RSRP、SINR 等；

c)基于感知测量选择感知节点。

对于前两种路径，业界已产生了较多的讨论和研究，本文针对第三种路径，给出一种典型的基于感知测量来进行 UE 节点选择的方案，如图 24 所示。其中选择感知节点的依据是基于感知结果进行提供的：



图 24 基于测量进行感知节点选择的方法示意图

感知业务类型也会影响节点选择与切换的流程和条件。感知业务可以分为单一阶段感知和多阶段感知。单一阶段感知只需要执行一种感知操作，比如检测特定范围内目标是否存在（如入侵检测），所有参与感知的 UE 只进

行目标检测操作。而多阶段感知则需要执行多种感知操作，比如目标检测与跟踪和目标参数的粗估计和精估计。参与感知的 UE 有的只进行目标检测，有的则需要同时进行目标检测和跟踪操作。

对于单一阶段感知类型，主要根据 UE 位置、UE 感知能力和基站与 UE 之间通信链路质量等信息来选择 UE，并根据这些信息的变化更新 UE，比如 UE 进入或离开感知区域，UE 感知能力变化等。

对于多阶段感知类型，需要选择和更新每个阶段参与感知的 UE。以目标检测和跟踪为例，需要分别选择参与检测的 UE 和参与跟踪的 UE，参与跟踪的 UE 是从参与检测的 UE 中挑选出来的。参与检测的 UE 主要根据位置、感知能力和链路质量等来选择和更新，与单一阶段感知类似。根据这些 UE 的检测结果和感知能力，再选择和更新参与跟踪的 UE。比如，选择能检测到目标并且具有跟踪能力的 UE，删除不再检测到目标或不再具有跟踪能力的 UE。

另外通信切换也可能会影响感知节点的更新。如果只支持 UE 与服务小区基站的感知链路，UE 发生切换后，原服务小区基站要删除该 UE 节点，感知链路中断。如果支持 UE 与邻小区基站的感知链路，UE 发生切换后，可以继续保留与原服务小区基站的感知链路，只是感知配置和上报等信令要通过新服务小区基站进行。

3.4. 测量量上报设计

多 UE 接收时，信息融合被认为可以获得协作增益，提升感知精度。在这个过程中，各 UE 在哪些情况下需要反馈感知结果，哪些情况下不需要？具体需要反馈什么类型的信息？并且，多个 UE 如何有效地将感知信息反馈至感知服务器，以及每个 UE 如何处理并融合其接收到的感知信息，这些都是需要设计的。由于信息融合具有信号级、符号级和结果级等[10]，那么针对上报配置，可采用两种方式，分别为：

- 配置所有上报信息；
- 配置部分上报信息，其他上报内容由协作收发节点确定，例如坐标

系映射关系由协作接收节点根据自己是否移动自行上报。

在待融合信息上报时，各协作接收节点需将其测量、计算和处理（如有）后 的信息上报至网络侧的融合节点，而针对不同融合等级下上报内容的数据量、格式及坐标系映射关系等都需精细化设计，不同融合等级的上报内容特点如表 1 所示:

表 1 不同融合层级的上报测量量对比

	数据量	多目标与上报信息对应关系	坐标系映射关系
信号级	高	不需要	不需要
符号级	中	可需要，可不需要	收发节点移动时需要
			收发节点静止时不需要
结果级	低	需要	收发节点移动时需要
			收发节点静止时不需要

以下给出一种基站发 UE 收场景下的测量量上报机制。

步骤 1：节点能力注册

具有 ISAC 发射与接收能力的节点（包括基站和 UE）向服务器注册其感知能力。注册信息包括：1)设备标识（如 GPS 标识（GPSI）、订阅永久标识符（SUPI））；2)功能属性（感知发射端或接收端）；3)位置信息（室内/室外、地理坐标）；4)硬件参数（工作频率、带宽、天线数量、增益与孔径）；5) 时间属性（可用于感知的时隙）。通过此步骤，网络可获得节点的基础能力信息，为后续感知任务调度做准备。

步骤 2：感知请求下发

当有移动目标需要感知时，感知服务器接收感知服务请求。请求内容包括：1) 感知服务类型（入侵检测、手势识别、定位、无人机跟踪等）；2) 感知需求/KPI/QoS（速度、测距精度与分辨率、时延、刷新频率、置信度、漏检率、虚警率等）；3) 目标几何位置（卧室、庭院、工厂等）；4) 感知范围与环境（室内/室外、LoS/NLoS、城市/乡村场景）；5) 目标类型与特征（静止或移动、雷达横截面积（RCS）值，如无人机、汽车、行人）。

步骤 3：信道与干扰测量并反馈

感知服务器通知各接收节点执行感知收发节点间的信道测量与干扰测量。各感知接收节点分别回传量测报告，包括距离、分辨率、精度、速度、多普勒、干扰水平（交叉链路干扰、上行干扰、邻区干扰等）及其他关键测量参数。同时，UE 可动态调整感知参数以适应干扰，报告能量消耗与精度权衡，并在必要时进行安全感知评估。

步骤 4: 融合模式选择与阈值配置

服务器根据量测报告，基于信噪干扰比（SINR）计算感知质量，确定发射功率、天线增益、波长、目标 RCS、噪声能量、干扰能量及系统损耗，并决定感知数据融合模式，下发两个关键阈值:

距离敏感相位变化阈值: 距离多普勒算法（RDA）矩阵相邻元素的统计相位差变化，用于度量目标距离特征的稳定性;

速度敏感相位变化阈值: RDA 矩阵相邻元素的统计相位差随时间的变化，用于度量目标速度特征的稳定性。

融合模式根据接收端算力与抗干扰能力决定:

1)若接收节点的算力强、SINR 高，则采用信号级融合;

2)若接收节点的算力弱、干扰强，则采用符号级融合，结合阈值触发的反馈策略，减少无效信息传输。

步骤 5: 阈值下发与感知处理

服务器将距离敏感相位变化阈值和速度敏感相位变化阈值配置下发给感知接收机，用于后续反馈机制选择。

步骤 6: 符号级融合

若在步骤 4 中，服务器通知选择符号级融合方式，那么接收端预处理信号（循环前缀（CP）去除、FFT 解调、参考信号提取、距离补偿、速度补偿），生成距离特征向量与速度特征向量，计算速度敏感相位变化阈值和距离敏感相位变化阈值。

1) 若速度敏感相位变化阈值 低于阈值（速度信息弱），只回传距离向量;

2) 若距离敏感相位变化阈值 低于阈值（距离信息弱），只回传速度向量;

从而大幅降低系统反馈开销，提高实时性。

步骤 7: 信号级融合

若在步骤 4 中，服务器通知选择信号级融合方式，那么接收端直接回传完整的 RDA 映射结果，由服务器进行全局融合。在融合前需进行数据一致性校准与质量评估；融合算法可采用加权格点搜索、卡尔曼滤波、粒子滤波等，能在复杂场景下保证高精度和鲁棒性。

步骤 8: 数据融合与精确估计

无论采用符号级还是信号级融合，最终都由服务器来整合来自多个基站的感知信息:

位置估计: 基于距离格点加权求最大似然点，得到目标精确位置;

速度估计: 基于速度格点加权求最优点，得到目标径向速度。通过这种方式，多基站联合感知可实现高精度定位与测速。

总的来说，该方案的特点体现在以下几方面:

1. 能力注册与服务请求标准化: 通过服务器的统一登记与调度，建立了感知服务的网络级框架。

2. 动态融合模式切换: 引入距离/速度敏感相位变化阈值触发机制，实现符号级与信号级融合的自适应选择。

3. 低开销高效率反馈机制: 通过符号级融合在高干扰场景下有效降低系统反馈负担，同时保证必要的感知精度。

4. 多基站联合高精度感知: 融合格点加权方法提升位置与速度估计精度，并具备实时更新与抗干扰能力。

5. 能量与安全感知优化: 支持不同能耗-精度权衡点选择，并考虑安全感知决策，为 ISAC 系统的可靠性与实用性提供保障。

3.5. 终端节能设计

鉴于 6G 系统感知场景的多样化，随着 6G 终端功能的分化，一个终端既可能接入一个继承于当前 5G 系统的通用的无线接入技术（RAT），又可能接入一个专用于感知业务的独立 RAT。该通用 RAT 系统以保障各个 6G 场景的基本需求为牵引，综合协调资源。而独立 RAT 的资源专为最优化感知功能而配置，通信能力用于辅助感知技术。

无论终端接入哪种 RAT，都面临能量资源受限的问题，如果不能对 ISAC 终端的能耗进行有效控制，不仅加剧温室效应，也会降低终端提供服务的质量。从 LTE 系统开始，3GPP 就开启了对节能的立项研究。节能可以从终端节能和网络节能两个维度来考虑。具体节能方法上，可以从时域、频域、空域和功率域来进行优化设计。ITU 发布的 6G 场景及指标中，依然包括了可持续性的需求，作为 6G 的关键应用场景之一[11]。通信感知一体化在设计应用过程中，也应当遵循能量节约及效率提升的基本原则。因此，有必要研究终端感知节能技术，为 6G ISAC 的商业成功奠定基础。

基于 3GPP 节能相关的标准化研究思路，终端侧节能的优化设计原则如下：

①UE 空闲态和连接态下的感知节能，例如针对感知的非连续接收（DRX）及唤醒信令（WUS）的配置优化。通过这种方式，UE 能够在必要的时间内进行控制信号和感知信号的接收，达到节能的目的。

②定义不同准则或感知事件，区分不同情况下的 UE 感知行为，从而在感知需求较低时适当减少感知业务。例如，UE 对需要持续监测某区域时，感知得到区域内长时间内没有目标出现、消失或移动，则 UE 可以增大对信号的测量间隔，实现电量节约。

③定义感知相关的终端辅助信息上报流程，UE 可以根据当前设备状态，或者当前感知测量结果进行辅助信息上报，建议基站使用合适的配置来继续进行感知。

此外，通感系统的融合程度也影响节能的增益。假如通信和感知融合度较低，如，通信模块和感知模块分别工作时，首先可能从硬件上就会带来额外的能量消耗，且在资源上也需要对通信和感知完全区分。反之，如果通信

和感知融合程度较高，例如通信和感知可以实现信号级别的共用，提升了资源利用效率、协调了通信和感知之间的干扰，由此也可以达到节能增效的目的。

在传统通信系统中，DRX 技术允许终端关闭 PDCCH 的盲检进程，从而降低终端功耗。为了能够正常通信，建立了相关机制，使终端以周期或非周期的方式，根据需要从关闭盲检的“睡眠状态”中“苏醒”，从而检测 DCI。在 ISAC 系统中，考虑到感知和通信信息的上报周期等可能不同，DRX 机制也需要做出调整。

以 ISAC 场景下，UE 周期性接收感知参考信号并完成感知，以非周期方式上报感知信息为例，简述 ISAC 场景下 DRX 的机制更新，如图 25 所示。当 BS 配置进行上报时，UE 基于配置信息实现上报。假设 UE 处于 DRX on 状态，即不检测 PDCCH。此时，BS 配置的上报信息无法为 UE 所接收。

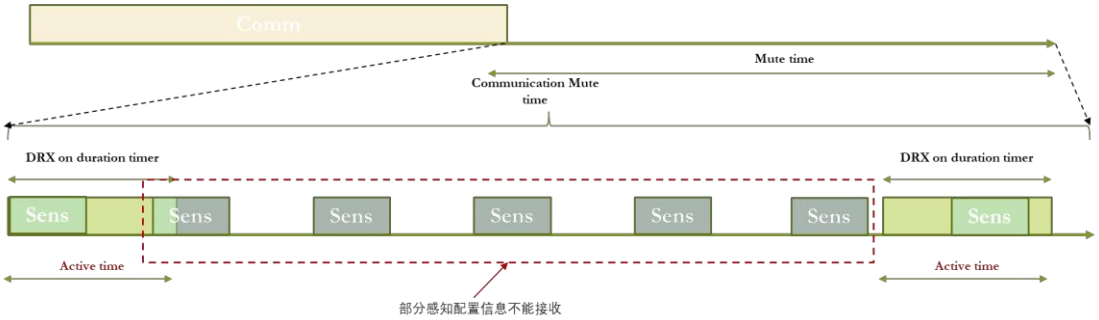


图 25 DRX on 期间 UE 无法正确接收感知上报配置

因此，在每个周期性感知资源持续时间结束后，应配置感知 UE “苏醒”一段时间，以确保接收 PDCCH 信息。

例如，在传统 DRX 中，UE 每个 40ms 苏醒一次，每次苏醒时间 2ms，而感知周期性参考信号的周期是 2ms，则 UE 除维持每 40ms 苏醒 2ms 的原有机制外，每次接收处理感知参考信号后，苏醒一次，时间 200s。

除以上情况外，在发生一下事件时，UE 也应苏醒，从而避免漏检 PDCCH。

- UE 检测到有目标闯入时；
- UE 上报信息，期待 BS 有进一步的配置动作时，例如分配感知资源和指示新的感知上报测量量；

- UE 检测到当前需要调度更多感知资源，或需要 BS 调度更多通信资源以完成上报，发送调度请求后，应保持苏醒状态。

3.6. 冲突避免设计

在基站终端协作通感场景，感知和通信共享上、下行物理资源，可能会发生资源冲突，导致通信或者感知传输失败，需要设计冲突避免机制予以解决。一是引入感知优先级指示，接收端根据感知信号和通信信号的优先级进行处理；二是通过速率匹配技术规避感知占用的资源；三是引入抢占指示，感知对已经调度给通信的资源进行抢占；四是通过终端部分取消的行为规避冲突问题。

3.6.1. 优先级配置

在无线通感系统的协作感知场景中，节点 A 发送感知信号，节点 B 需要同时接收来自节点 A 的感知信号和本小区终端的上行通信信号。由于感知信号和通信信号可能在同一时频资源上传输，导致严重的信号干扰问题，如图 26 所示。由于缺乏对感知任务和通信任务的优先级动态协调机制，无法根据实际业务需求灵活调整资源分配策略，导致高优先级任务可能被低优先级任务阻塞，严重影响系统整体性能。特别是在 6G 通信感知一体化网络中，随着感知业务类型的多样化（如紧急目标检测、常规环境监测等），这种冲突问题变得尤为突出，亟需一种通信参考信号和感知参考信号冲突解决方案。

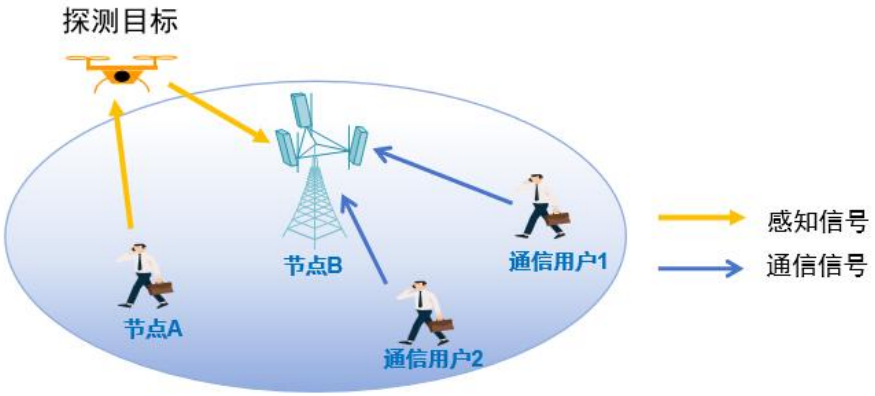


图 26 通感优先级冲突示意图

对此，可以采用一种基于动态优先级管理的冲突解决方法。首先，由控制单元或定位服务器为节点 B 配置感知和通信的优先级，一种是感知比通信

的优先级高，另一种是感知比通信的优先级低。节点 B 同时接收节点 A 的感知信号和节点 B 服务的 UE 的上行通信信号，当感知比通信优先级高时，节点 B 优先处理感知信号；当感知比通信优先级低时，节点 B 优先处理通信信号。

3.6.2. 速率匹配

3.6.2.1 PDSCH 速率匹配

如图 27 所示，发送基站（基站 A）发给终端 A 的 PDSCH 上既需要承载数据，又需要承载用于探测目标的感知信号。对于终端 A 而言，若终端 A 也具有感知需求，则可利用该感知信号进行感知；若终端 A 只有通信需求，那么终端 B 利用该感知参考信号进行感知；不论哪种情况，终端 A 在解调 PDSCH 前，均应刨除感知信号，以提高速率匹配、数据解调的准确性和信号处理的效率。因此，基站应以 RE 粒度向终端 A 通知感知信号的时频位置，并告知终端 A 是否需要在数据处理时避开或刨除感知信号。

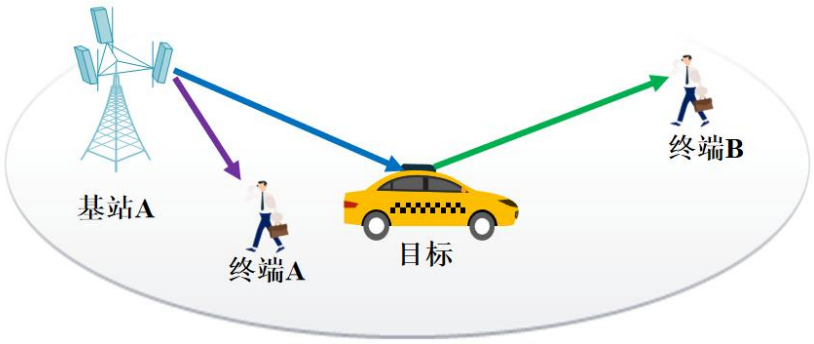


图 27 PDSCH 通感冲突示意图

3.6.2.2 PUSCH 速率匹配

如图 28 所示，节点 B 接收感知回波信号的同时，还会接收到其服务的通信用户 1、2 发送的上行通信信号，上行通信信号与回波信号互干扰。根据链路预算可知，上行通信信号强度、感知回波信号强度功率存在较大差异。特别是中远距探测时，通信信号强度将远大于感知回波信号强度，可能超出接收机模数转换器（ADC）的可用动态范围，导致强度较小的感知回波信号被淹没。然而，现有 NR 上行资源调度配置方式频域仅支持连续 RB 和非连

续 RBG 两种配置方式。为了解决这一问题，可以引入 RB 级及 RE 级冲突避免方案，保障通信数据传输可靠性及感知性能。

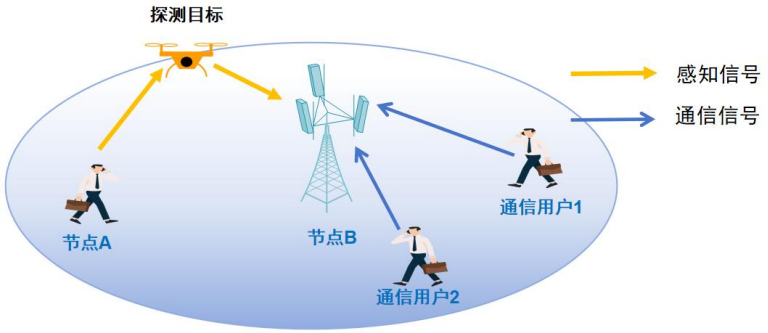


图 28 PUSCH 通感冲突示意图

3.6.3. 抢占指示

通感一体化系统设计时，考虑同时支持通信与感知两种业务。感知与通信的业务优先级、调度时序等存在差异，存在突发的优先级较高的感知业务需抢占或取消已配置给通信的部分资源。由于感知与通信资源配置的差异性，例如通信尽可能以大带宽传输以保证数据传输速率，但对于感知测速等需求来说，感知信号映射具有时域较长、频域较短的特点，频域通常只占用几个或十几个 RB 即可。利用现有的均匀的下行抢占指示（PI）技术至少抢占/取消 BWP/2 资源通信传输，导致非常严重的资源过度抢占问题，如图 29 所示。

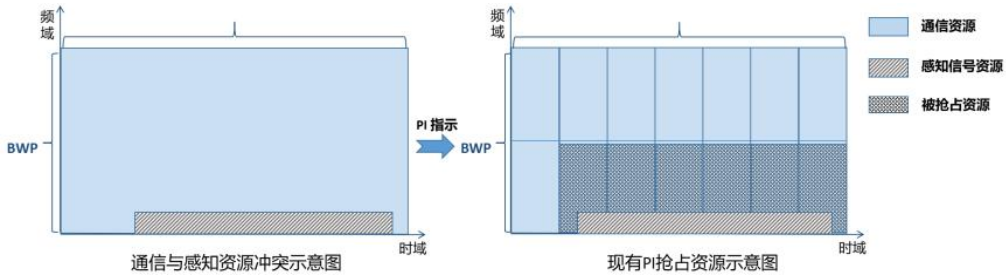
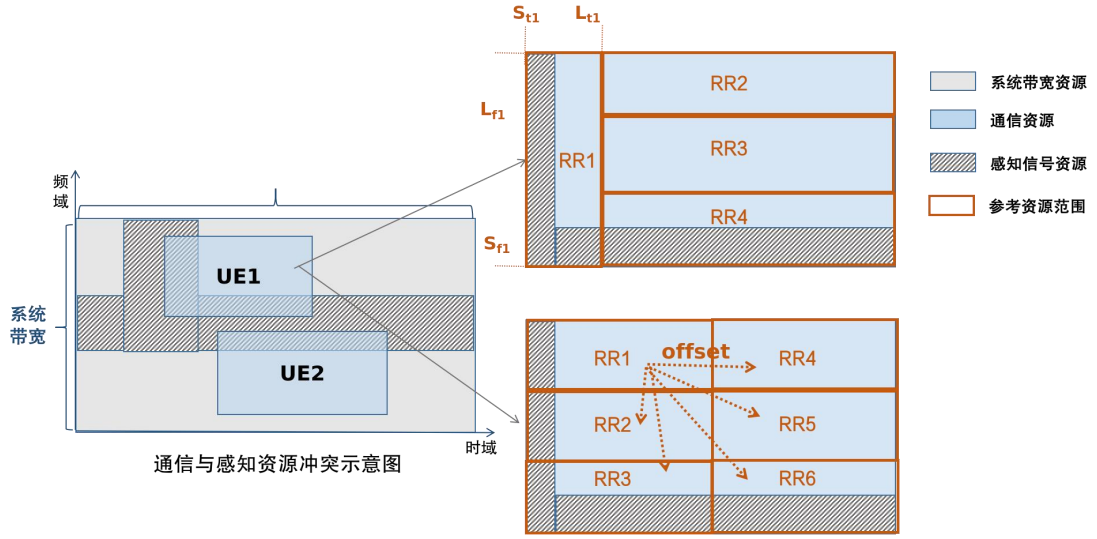


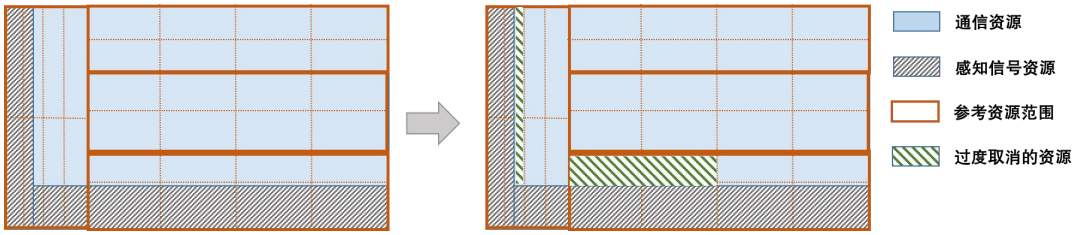
图 29 资源过度抢占示意图

为了解决上述问题，可以采用非均匀分组的抢占及取消增强方案。首先配置多套时频资源范围，其可通过配置多套时、频起始位置和持续长度指示多个连续的时频域资源范围或配置一套时、频域起始位置和持续长度指示信息，并指示时域或频域偏移等方式确定多套非均匀时频资源范围，如图 30（a）所示。进一步针对已确定的多套时频资源范围，增强现有二维时频资源

格划分指示，通过资源范围指示与时频资源格指示同时确定最终要取消或抢占的资源，如图 30（b）所示。最终，通过上述两级资源配置确定抢占或取消的非均匀时频资源。



（a）多套时频资源范围示意图



指示信息｛（**1,0,0,1**）(**1,1,1,1,0,1,0,1**)｝

（b）取消/抢占资源示意图

图 30 取消/抢占资源示意图

3.6.4. 部分取消

对于通信系统而言，当终端某个时隙的一组符号被 RRC 高层参数进行了资源的半静态配置，用于上行发送（SRS、PUSCH、PRACH 等），若此时终端检测到 DCI 调度指示在该组符号的子集中有下行业务（PDSCH、CSI-RS）需要接收。此时终端侧会发生接收动态下行业务与发送半静态上行业务之间的资源冲突问题。NR 协议通过规定终端的行为以避免出现上述冲突问题：即当终端具有部分删除能力时，根据现有协议，终端仅发送位于 Tproc,2 范围之内的 PUSCH 数据，取消 Tproc,2 范围之外的 PUSCH 数据发送，

如图 31 所示。

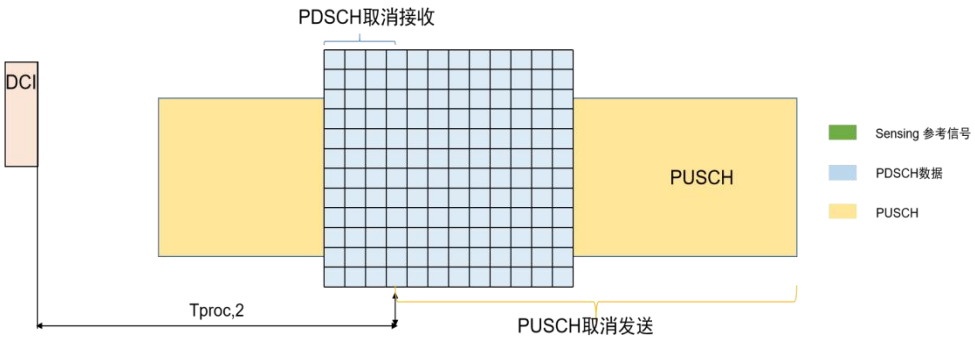


图 31 现有通信上行半静态 PUSCH 和动态下行 PDSCH 冲突示意图

考虑协作感知系统中，A 发 B 收的接收节点是终端时，当终端某个时隙的一组符号被 RRC 高层参数进行了资源的半静态配置，用于上行发送（SRS、PUSCH、PRACH 等），若此时终端被动态调度指示在该组符号的子集中有下行感知业务需要接收，当终端具有部分删除能力时，若感知信号位于 Tproc,2 范围之内，根据现有协议规定需要取消 Tproc,2 范围之内的感知信号接收，容易造成无法感知的问题。所以对于动态的感知下行接收和半静态的通信上行发送，需要重新规定终端行为以避免感知资源与通信资源的冲突。

具体地，根据 PDSCH 中含有 DMRS 的类别，动态感知下行资源与半静态通信上行资源的冲突解决方案可以分为两大类：

情况一（PDSCH 中仅有前置 DMRS）：如图 32 所示，当 DMRS 和感知 RS 中存在一个 RS 位于 Tproc,2 范围之内，终端应以 proc,2 范围之内的这个 RS 的第一个符号作为起始位置进行 PUSCH 的部分取消发送。同时以该位置开始作为 PDSCH 的接收起始位置。

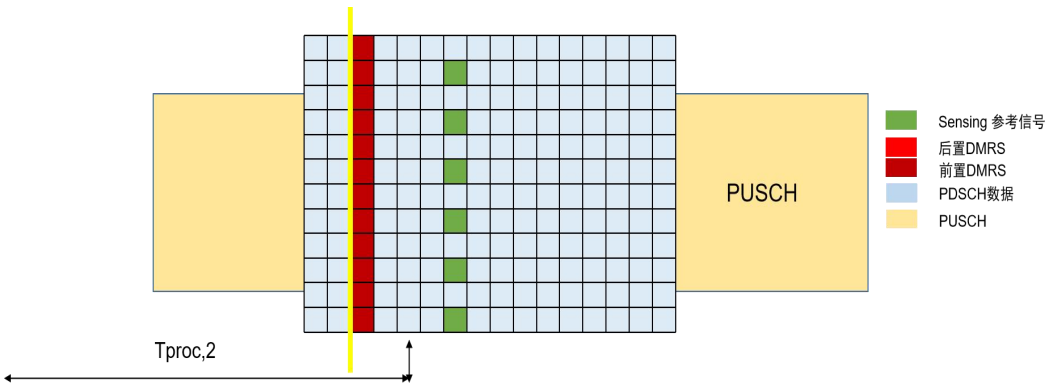


图 32 动态感知下行资源与半静态通信上行资源的冲突示意图（情况一）

情况二（PDSCH 中含有前置和后置 DMRS）：

（a）测距：根据感知 RS 和（前置、后置）DMRS 位于 Tproc,2 范围位置关系，调整终端选择感知接收的范围。与仅有前置 DMRS 处理类似。

（b）测速：如图 33 所示，由感知分辨率要求确定是否可以取消部分感知 RS 的接收，确定 Tproc,2,new 起始位置以及根据（后置）DMRS 是否位于 Tproc,2,new 内的时域位置关系，调整终端终端选择感知接收的范围。

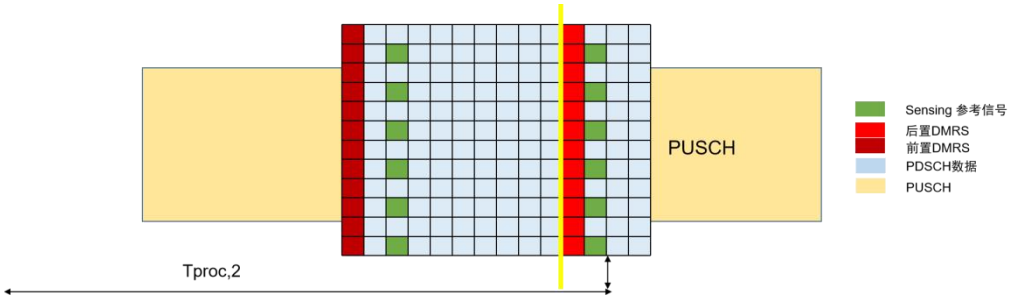


图 33 动态感知下行资源与半静态通信上行资源的冲突示意图（情况二）

3.7. 多UE信息融合算法设计

3.7.1. 基于 AI 的符号级融合算法

本小节提出一种基于协作变分自编码器（VAE）的多 UE 信息融合算法。基站与 UE 协作的 ISAC 网络的关键挑战在于：多个独立 UE 对同一目标产生不同测量结果导致的目标分割问题，这增加了低空飞行目标感知性能提升的难度。为此，本算法融合了基于 VAE 的智能网络框架与分布式 MIMO 雷达技术以实现鲁棒目标感知。通过利用协作式 ISAC 架构的压缩与生成能力，来自多个协作 UE 的原始感知数据经深度神经网络编码为潜在向量，这些潜在表征通过回程链路传输至融合中心后，由生成网络重构扩展目标的空域分布与空间位置。

考虑一个基站终端协作感知系统，该系统由一个发送基站、多个接收 UE 以及一个集中式融合中心构成。发送基站发射雷达信号，信号在传播过程中与第k个扩展目标相互作用，散射信号随后被处于分布式多基地配置下的第k个 Rx UE 接收，从而确保空间覆盖的全面性并提高感知精度。

VAE 网络的两大主要功能——信号压缩与重建，与协作感知的需求高度契合[12]。在协作感知场景中，压缩后的感知数据需要通过回程链路回传至融合中心。为实现这一目标，VAE 的编码器网络独立部署于每个 UE，而解码器网络则设置在融合中心。这种架构充分利用了 VAE 的压缩能力，在降低回程数据容量的同时，还在不同基站的感知数据之间建立了隐式的关联。

如图 34 所示，第 k 个接收 UE 在其编码器网络中，通过学习条件高斯分布的参数，将输入数据 $y'_{k,l} \in \mathbb{R}^d$ 映射到一个概率化的潜在空间，从而生成近似分布 $q_k(y_{k,l}|z,\Theta)$。在训练完 VAE 后，我们将编码器的输出——从潜在空间中采样得到的向量——作为输入，送入一个回归模型。为保证输入的一致性，对该采样向量进行基于最大范数的归一化处理。该回归模型的目标是学习散射点所在范围和角度参数的上下界。真实值向量定义如下：

$$\beta = \begin{pmatrix} r_{lb} \\ r_{ub} \\ \phi_{lb} \\ \phi_{ub} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \min\limits_{l=1,\dots,L} r_l \\ \max\limits_{l=1,\dots,L} r_l \\ \min\limits_{l=1,\dots,L} \phi_l \\ \max\limits_{l=1,\dots,L} \phi_l \end{pmatrix} \tag{11}$$

该回归模型为一个全连接神经网络，采用 ReLU 激活函数，最后一层使用恒等函数。与用于降维的 VAE 编码器不同，该网络的各层维度逐步增大，以便从输入数据中提取更多信息。该网络通过有监督的方式进行训练，以最小化输出与真实值向量之间的损失函数：

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\beta, \hat{\beta}) = &\left|R_a - \hat{R_a}\right|^2 + |\Delta R - \Delta\hat{R}|^2 \\ &+ \left|\phi_a - \hat{\phi_a}\right|^2 + |\Delta\phi - \Delta\hat{\phi}|^2 \end{aligned} \tag{12}$$

其中，$R_a = \frac{r_{lb}+r_{ub}}{2}$，$\Delta R = r_{ub} - r_{lb}$，$\phi_a$ 和 $\Delta\phi$ 的定义与之类似。该回归模块通过对潜在表征的进一步解析，实现了对目标关键几何参数（如距离和角度范围）的精准估计，为后续的目标定位、跟踪以及环境感知提供了可靠的先验信息

支撑。结合 VAE 的特征提取与压缩能力，整个系统在保证信息完整性与感知精度的同时，有效降低了回程链路的通信负担，提升了分布式多 UE 信息融合的整体效能与可扩展性[13]。

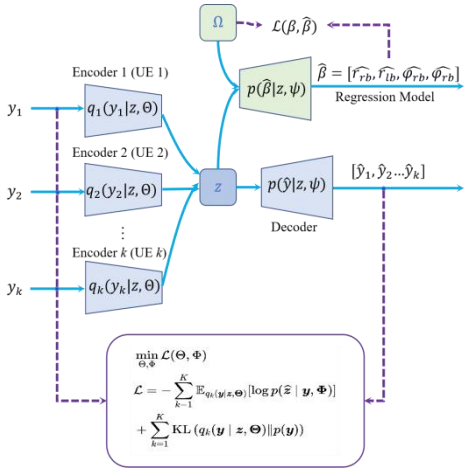


图 34 基于 VAE 网络的感知信息处理框架

3.7.2. 基于降维的信号级融合算法

信号级融合因其能够最大化利用原始观测信息，在理论上可获得最优的协作感知性能。然而，在基站与终端协作的实际场景中，尤其是在室外低空飞行物检测等应用中，信号级融合面临着严峻的非理想因素挑战。由于基站和多个终端在地理位置上的分散布局，对同一目标的观测几何角度差异巨大，加之无人机等目标自身的 RCS 随姿态剧烈起伏，导致各协作节点接收到的回波信号在相关性和 SNR 上存在显著差异。传统相参融合（CF）方法在回波信号失相关时性能会急剧恶化，而非相参融合（NCF）方法虽对相关性不敏感，却因丢弃了相位信息而导致性能损失，且两者均未有效解决多链路 SNR 差异带来的融合效率问题[14]。

为应对上述挑战，本节提出一种基于降维的信号级融合检测算法，旨在充分利用上下行协作的潜力，同时有效抑制回波去相关和 SNR 起伏带来的负面影响。该算法的核心思想是设计一个独特的降维矩阵 **U**，对多节点接收的原始信号 **r** 进行线性变换，以实现统计意义上的“去相关”和“信噪比均衡”双重目标。算法基于似然比检验（LRT）构建统一的检测框架，其关键在于利用信号协方差矩阵的特征分解，如图 35 所示。具体而言，算法通过将多

路接收信号投影到由空间相关矩阵特征向量构成的正交基上，实现各协作链路回波信号的解耦。随后，利用与各正交分量对应的特征值对信号进行加权，该权重正比于信号分量的能量，从而自适应地为来自高 SNR 链路的信号分量赋予更高的权重，抑制低 SNR 链路的噪声影响。

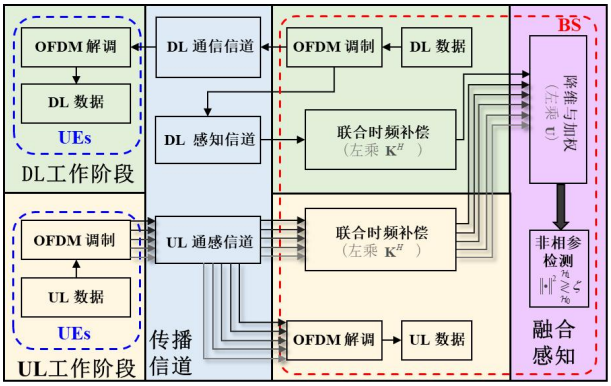


图 35 信号级融合检测器处理流程示意图

首先，基站汇集来自自身下行感知链路原始回波信号向量 $\mathbf{r}^{DL}$ 和 Q 个协作终端上行感知链路的原始回波信号向量 $\mathbf{r}_q^{UL}$，$q=1,...,Q$，并整合为向量 $\mathbf{r}=\left[\mathbf{r}^{DL}\quad \mathbf{r}_1^{UL}\quad \cdots\quad \mathbf{r}_1^{DL}\right]$。随后，通过乘以一个联合时频补偿矩阵 $\mathbf{K}$，对各链路信号的多普勒频移和时延进行初步对齐。接下来是最为关键的降维与加权步骤：将对齐后的信号与精心设计的降维矩阵 $\mathbf{U}$ 相乘。该矩阵 $\mathbf{U}$ 不仅能实现信号的去相关和 SNR 均衡，还能有效降低后续处理的计算复杂度。最后，对变换后的信号向量进行能量检测（即计算其二范数的平方），得到最终的检测统计量 $T(\mathbf{r})$，并与判决门限比较，完成目标有无的判决。这一过程可等效于在一个经过优化的变换域上，对多路信号执行高效的非相干融合。最终检测器表达式为 $T(\mathbf{r})=\|\mathbf{U}\mathbf{K}^H\mathbf{r}\|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \zeta$。

图 36 所示的仿真结果表明，该算法在多种非理想条件下均表现出卓越的鲁棒性。在协作节点间回波相关性从完全相关（$\rho=1$）变化到完全不相关（$\rho=0$）的全过程中，该算法的检测概率始终显著优于传统的相参融合与非相参融合方法。特别地，随着协作终端数量的增加，该算法的性能能够持续稳定提升，不会像相参融合方法那样因节点增多导致的回波失相关加剧而出现性能饱和瓶颈。这种鲁棒的性能提升，使其尤其适用于室外低空飞行物检

测等动态、复杂的协作感知场景，为应对 RCS 波动和多径效应等非理想因素提供了一种高效、可靠的信号级融合解决方案。

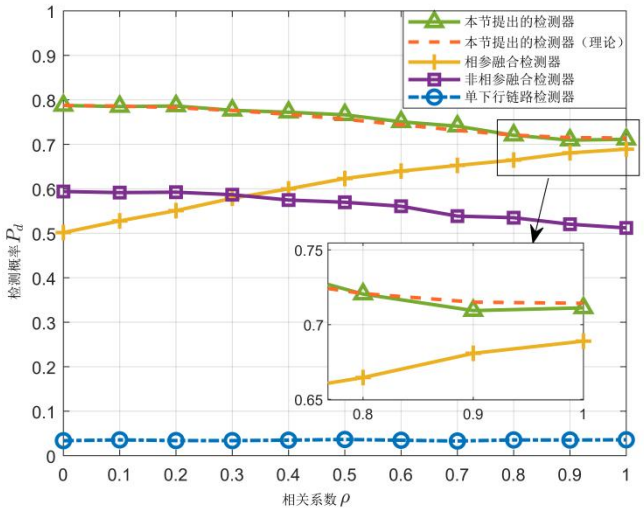


图 36 检测性能对比示意图

四、 基站与终端协作感知性能评估

4.1. 评估指标

4.1.1. 检测率与虚警率

检测率指感知目标真实存在情况下正确检测的概率。虚警率指感知目标不存在情况下检测到目标的概率。

在一次仿真(drop)中，需先通过感知算法将真实目标与检出目标一一配对，如图 37 所示。完成配对后，检测率和虚警率可定义为：

- 检测率：检出的目标数据与真实目标数目的比例；
- 虚警率：检出目标减去真实目标数目与真实目标的比例。

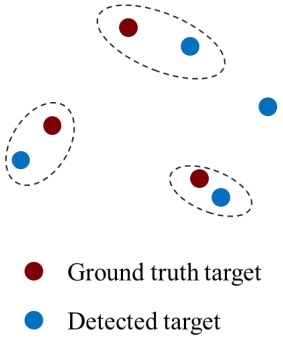


图 37 检出目标与真实目标配对

计算公式为:

$$P_{检测率}=\begin{cases}\frac{N_{detected}}{N_{truth}}, & N_{detected}\le N_{truth}\\ 100\% , & N_{detected}>N_{truth}\end{cases} \tag{13}$$

$$P_{虚警率}=\begin{cases}0\% , & N_{detected}\le N_{truth}\\ \frac{N_{detected}-N_{truth}}{N_{truth}}, & N_{detected}>N_{truth}\end{cases} \tag{14}$$

其中$N_{detected}$ 为检出目标的数目，N_{truth} 为真实目标的数目。多次仿真后，通过获取累计分布函数(CDF)，采取 50%和 90%置信度取值做为最终评价结果。

4.1.2. 水平与垂直位置精度

位置精度定义为目标的真实位置与估计位置的 3D 距离。进一步的，位置精度可分解为水平位置精度和垂直位置精度，计算公式如下:

$$位置精度_{水平}=\left|P_H^{GT}-P_H^{est}\right| \tag{15}$$

$$位置精度_{垂直}=\left|P_V^{GT}-P_V^{est}\right| \tag{16}$$

其中 P_H^{GT} and P_H^{est} 为感知目标的真实水平位置和估计水平位置，可用三维坐标的 x-y 平面坐标表示。 P_V^{GT} and P_V^{est} 表示感知目标的真实垂直位置和估计垂直位置，可用三维坐标的 z 平面坐标表示。

多次仿真后，获取 CDF，取 50%和 90%置信度值作为系统仿真统计评价结果。

进一步的，当感知目标建模为多点目标时，目标的真实位置为所有散射

点位置的平均结果。因此，计算公式为：

$$Localization\ accuracy_H = \left|\frac{1}{K}\sum_i P_H^{GT}{}_i - \frac{1}{N}\sum_j P_H^{est}{}_j\right| \tag{17}$$

$$Localization\ accuracy_V = \left|\frac{1}{K}\sum_i P_V^{GT}{}_i - \frac{1}{N}\sum_j P_V^{est}{}_j\right| \tag{18}$$

其中，K 为真实目标散射体数目，N 为估计目标的散射点数目。在一次仿真中，感知算法对每个散射点进行一一配对，如图 38 所示。位置精度计算只针对匹配完成的目标进行计算，漏检和虚警散射点不计入位置精度。

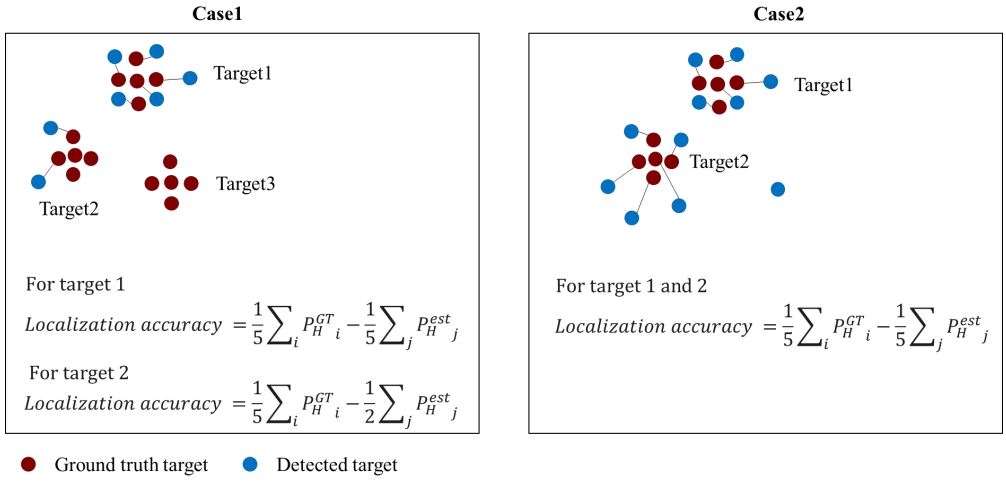


图 38 多点目标位置精度计算方法

4.1.3. 水平与垂直速度精度

参考 TS 23.032 标准文档[15]，速度精度表示为由速度方向和速度幅值组成的矢量，进一步的，速度精度可分解为水平速度精度和垂直速度精度。

- 水平速度矢量：水平速度矢量表示为 x-y 平面的方向矢量，其方向定义为参考方向（如 x 轴）的顺时针旋转方向，幅度表示水平速度大小。
- 垂直速度矢量：垂直速度矢量表示为 z 平面的方向矢量。其方向定义为 z 轴方向，幅度表示垂直速度大小。

速度精度定义为真实速度矢量和估计速度矢量的差矢量的幅值，计算公式如下：

$$水平速度精度 = \left|V_{x,y}^{GT} - V_{x,y}^{est}\right| \tag{19}$$

$$垂直速度精度 = \left|V_z^{GT} - V_z^{est}\right| \tag{20}$$

其中，$V_{x,y}^{GT}$ 和 $V_{x,y}^{est}$ 表示水平方向真实速度矢量和估计速度矢量。V_z^{GT} 和 V_z^{est} 表示垂直方向真实速度矢量和估计速度矢量，如图 39 所示。

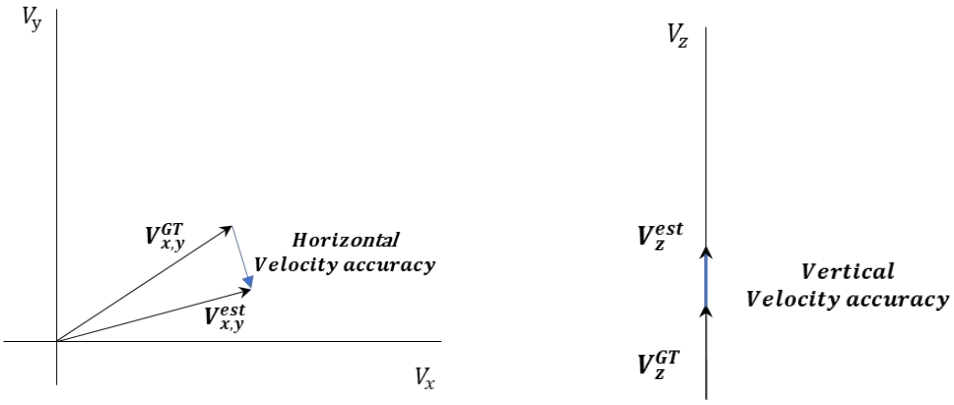


图 39 水平和垂直速度精度

多次仿真后，获取 CDF，取 50%和 90%置信度值作为系统仿真统计评价结果。

4.1.4. 重构精度

重构感知应用一般在目标探测之后，即完成初步的目标探测后再对该目标进行高精度的重构感知应用。因此，重构是建立在在目标探测成功后的进阶感知能力。

相比位置精度，环境目标重构精度不再是单个位置点坐标的误差比较，而是真实目标点集和重构点集之间的误差比较。

在传统数据集误差比较中，均方根误差（RMSE）和绝对均值误差（MAE）可作为典型的误差比较准则。当真实数据集合与估计数据集合中每个点的误差较为相似时，RMSE 和 MAE 的结果也较为相似，均能准确的评估集合的误差水平。然而，当估计数据集合中存在部分误差较大的数据点时，RMSE 将给与更大的误差权重，即 RMSE 准则对集合所有点的误差给予了权重，对大误差更加敏感。而 MAE 则对所有误差点予以相同的权重，对大误差不敏感。

在环境重构的应用中，重构目标为物体的外观形状，少量的大误差点会

导致形状轮廓的变化，因此，RMSE 准则更适合用于评估环境重构精度误差。

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{N}}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}} (\mathrm{y}_i^{true} - \mathrm{y}_i^{est})^2} \tag{21}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{\mathrm{N}}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N}} |\mathrm{y}_i^{true} - \mathrm{y}_i^{est}| \tag{22}$$

如何获得环境目标的真值是环境重构精度评估需要进一步研究的问题。在无线网络中，基站操纵无线电波通过传播信道与环境物体作用，形成信道多径被终端接收，从而探测环境物体。在这一过程当中，利用高能量的反射径进行重构是有效的感知手段。在 3GPP 通感信道模型中，建筑墙体作为环境目标可生成镜面反射径，该反射径与墙体的反射点则形成无线电波传播的真实点集。在一次仿真中，通过在场景中撒放终端用户，生成基站与用户的镜面反射径，得到环境目标的点集。

感知算法需生成 N 个点的重构点集，与真实点集进行一一匹配，计算重构精度如下:

$$\text{重构精度} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{N_p}}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{N_p}} (\mathrm{P^{GT}_i} - \mathrm{P^{est}_i})^2} \tag{23}$$

其中， $\mathrm{P^{GT}_i}$ 和$\mathrm{P^{est}_i}$ 代表第 i 个真实数据点与估计数据点，$\mathrm{N_p}$为点集中点的个数。

多次仿真后，通过获取 CDF，采取 50%和 90%置信度取值做为最终评价结果。

4.2. 性能评估结果

4.2.1. 室外场景性能评估

4.2.1.1 仿真场景

3GPP R19 ISAC 信道已确定信道模型所使用的场景和用例[16]。我们在如图 40 所示的 Urban Grid 场景中，进行了车辆检测任务的仿真评估和验证，仿真的场景遵循 TR 37.885 中的城市栅格几何[17]，场景中共有 9 栋建筑（图中绿色区块），中间有 4 条车道，车道宽度为 3.5m，建筑可延伸为 413m*230m*20m 的 3D 尺寸。

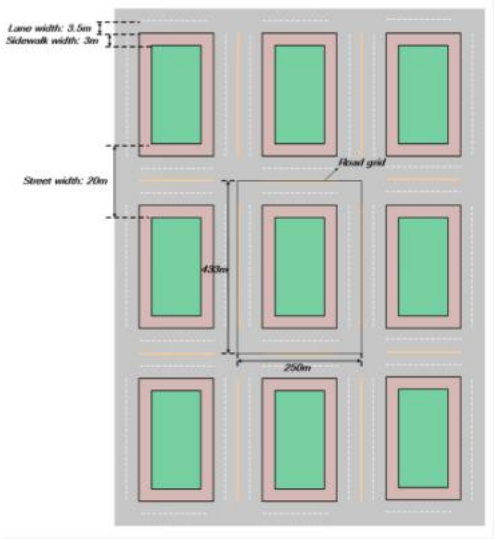


图 40 室外场景仿真示意图

在该场景中，共部署了 18 个基站，144 个终端设备，进行下行感知服务。场景中的车道上共存在 27 辆车辆目标，作为感知性能评估的对象。感知节点和感知目标的部署如图 41 所示：

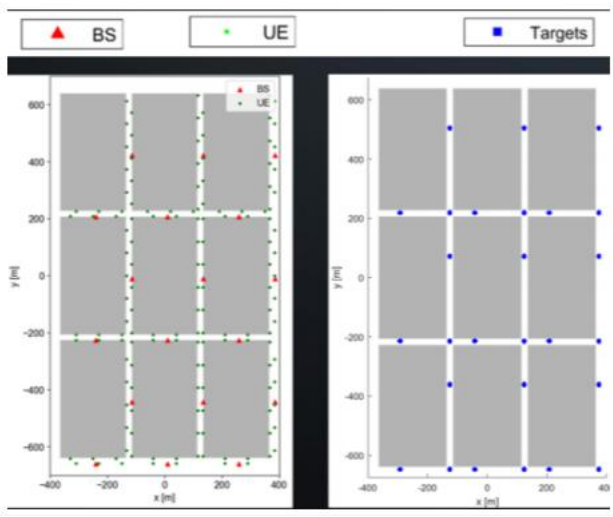


图 41 室外感知节点部署示意图

4.2.1.2 仿真条件

按照如表 2 所示的参数以及 R19 ISAC 信道模型的信道生成规则进行信道生成和感知重构：站间距设置为 250m，中心频点 7GHz，带宽为 400MHz，天线阵列为 32V16H，天线发射功率为 49dBm，UE 接收阵列为 4V2H，车辆假设沿车道方向行驶，速度为 60km/h。

表 2 室外仿真参数表

参数	配置
场景	依据 TR 37.885，Urban grid，ISD=250m
频段	U6G 频段
带宽	400MHz
基站天线数	水平 16，垂直 32
基站发送功率	49dBm
UE 天线数	水平 2，垂直 4
UE 发送功率	23dBm
目标速度	60Km/h

4.2.1.3 仿真评估结果

通过双基感知重构算法，从感测信号径中获取感知重构结果，最终获取基站-终端协作感知的重构结果以及感知 KPI 评估结果如图 42、图 43 所示：

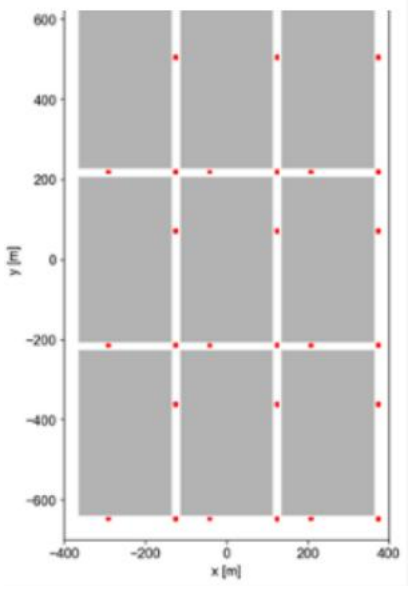


图 42 室外场景基站终端协作感知结果

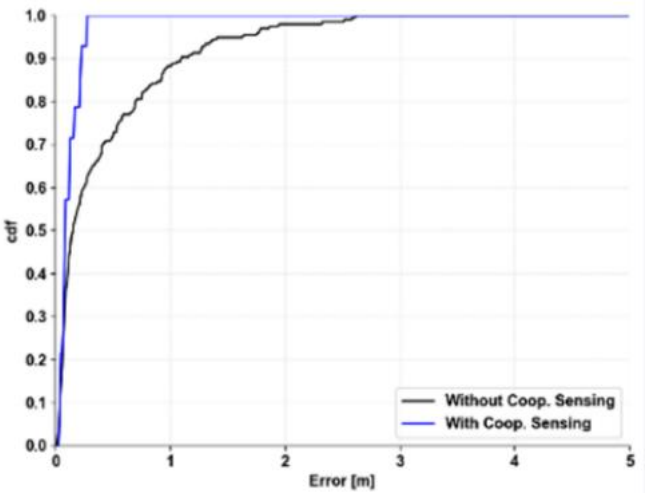


图 43 基站-终端协作感知的性能评估结果

从图 42、图 43 中可以看到，在引入基站-终端协作感知的情况下，对于感知精度评估，取 90% CDF 的误差值作为精度评估 KPI，则协作感知前和协作感知后的感知精度分别为 1.08m 和 0.23m。可见，基站与终端协作感知可以显著提升感知性能，提高感知精度。

4.2.2. 室内场景性能评估

4.2.2.1 仿真场景

室内感知场景可以分为室内办公（indoor office），室内工厂（indoor factory）以及室内家居（indoor room）这 3 个场景，下面以 indoor room 为例说明室内感知场景的网路拓扑与仿真参数配置。

参考 3GPP TR 38.808 的 indoor-B 场景[18]，在 20mx20m 的矩形室内空间内，部署 1-2 个 TRP，随机部署若干个终端（可选）和若干个感知目标。网络拓扑示意如图 44 所示，相比于 indoor office 场景，indoor room 缩小的空间更适合于建模 smart home 用例的信号传播和干扰环境。

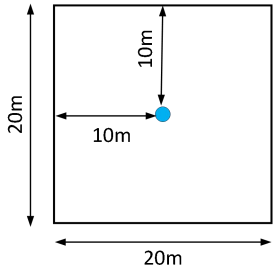


图 44 Indoor room 场景网络拓扑

4.2.2.2 仿真条件

具体的仿真假设如表 3 所示。

表 3 室内场景感知仿真参数配置

参数		取值
场景		Indoor Room
感知发射器和接收器属性		TRP 天线配置: (M,N,P,Mg,Ng)=(4,4,2,1,1),(dH,dV)=(0.5,0.5)λ +45°,-45°polarization UE 天线配置: (M,N,P,Mg,Ng)=(2,2,1,1,1),(dH,dV)=(0.5,0.5)λ
感知模式		TRP 发 UE 收下行感知
感知目标属性	RCS	$10\lg(\sigma_M) = -1.37$ dBsm，$10\lg(\sigma_D) = 0$ dB， $\sigma_{\sigma_{S_dB}} = -1.37$ dB
	3D 移动	水平速度：3km/h
	3D 分布	水平均匀分布，高度 1.5m，3 个/感知区域，感知目标间最小距离为 1m
	运动方向	随机
感知区域		整个网络拓扑区域
频段		低频 4GHz 频段
子载波间隔		30KHz

仿真带宽	100MHz
基站天线高度	3m
基站发射功率	24dBm
基站阵子天线增益	5dBi
基站噪声系数	5dB
UE 天线高度	1m
UE 发射功率	23dBm
UE 噪声系数	9dB
UE 个数	1 个、3 个或 5 个/感知区域
噪声功率谱密度	-174dBm/Hz
感知资源	CSI-RS，1 OFDM symbol/slot，273RB，频域密度为 3
相干处理时间	160 个 OFDM 符号
目标信道类型	LOS+LOS，LOS+NLOS，NLOS+LOS，NLOS+NLOS

4.2.2.3 仿真评估结果

室内感知场景仿真中总试验次数为 100 次，每次试验随机撒放 3 个感知目标，分别采用 1 TRP 发 1 UE 收、1 TRP 发 3 UE 收，以及 1 TRP 发 5 UE 收三种感知模式。当采用多 UE 接收时，对多个 TRP-UE 的感知链路进行数据级融合处理，即对各个 UE 计算的感知目标位置信息进行融合，得到最终的感知结果。图 45 给出了不同感知模式下室内人定位的误差统计结果。

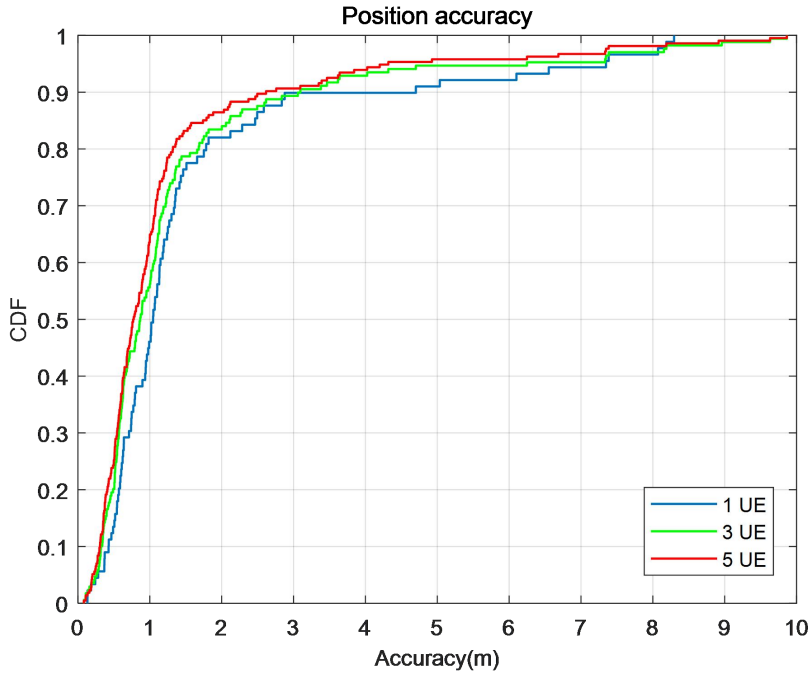


图 45 Indoor room 场景目标定位性能

表 4 给出了不同感知模式下目标检测性能对比结果。

表 4 不同信号资源映射方案检测性能及开销对比

感知模式	1 TRP 发 1 UE 收	1 TRP 发 3 UE 收	1 TRP 发 5 UE 收
实际目标个数	300		
检测到的目标个数	90	183	235
正确检测到的目标个数	89	169	214
虚警概率	0.0111	0.0765	0.0894
漏检概率	0.7033	0.4367	0.2867

可以看出，采用多 UE 协作感知时，目标定位精度以及目标检测概率相对于单 UE 感知均有一定提升。室内感知场景中，各个信号传播链路均存在一定 NLOS 概率，NLOS 链路的存在对目标定位性能产生严重影响；另一方

面，由于目标以及 UE 撒放的随机性，一些目标到收发设备的距离较远，或相对于接收设备的角度较偏，均有可能影响对该目标的检测和定位性能。采用多 UE 协作感知，增加了存在相对于同一目标的 LOS 传播路径的可能性，并且提供了更近的观测距离和更多的观测角度，因此能够有效提升感知性能。

协作感知仿真评估中，除了仿真参数配置、接收端处理算法之外，感知结果与真值的匹配，虚警目标的判断等感知结果统计方法对最终性能同样存在影响。因此，后续还需要进一步明确和统一仿真评估方法。

五、 基站与终端协作感知原型验证

多个 UE 协作感知，有利于充分利用 UE 数量多、可移动、分布广，且物理空间上更贴近用户侧的优势，能够与 BS 感知互为补充，构建无缝的通感一体化网络。图 46 给出蜂窝网络下的多点协作（CoMP）感知和通信一体化场景示意图。室外场景下，室外宏基站或者微基站能够与环境中的多个 UE 构成无线感知网络，多个 UE 协作完成室外移动目标（例如车辆）的感知（测速、测距、定位、轨迹追踪等）；室内场景下，室内小基站与多个 UE 协作，完成对室内目标（例如行人、宠物）生命体征检测、定位/轨迹追踪等感知业务。

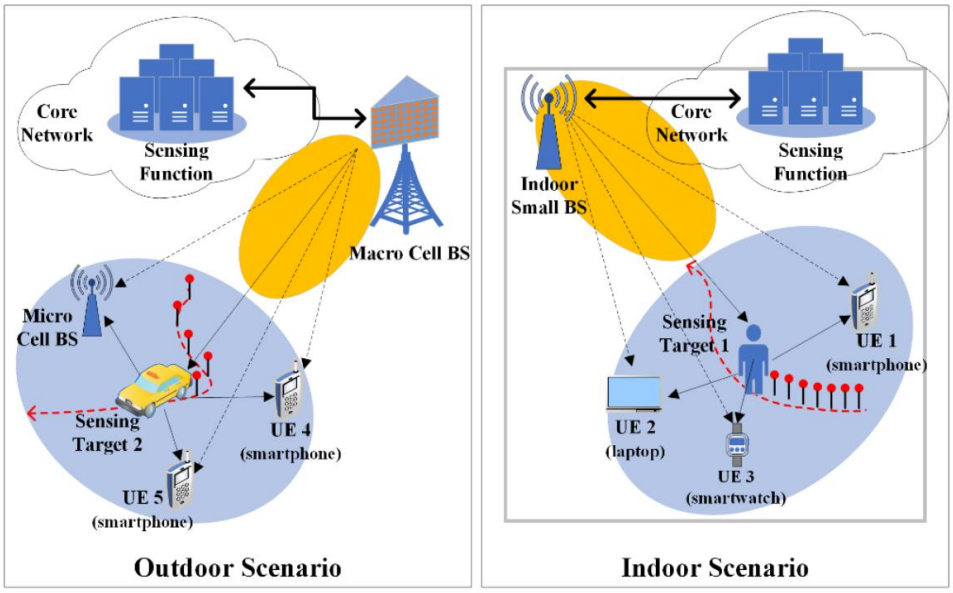


图 46 基站 UE 协作 CoMP 示意图(a)室外场景(b)室内场景

由于 UE 种类繁多，不同的 UE 之间感知能力也存在差异。一些低功耗 UE,包括智能手表和智能眼镜等,一般只配备数量很少的天线(一根或两根),这种情况下角度测量并不可靠。此外 UE 角度测量还有一个难点是面板朝向不固定,需要依靠 UE 自身配备的陀螺仪等传感器完成自身面板朝向的测量,才能得到真实的角度结果。相比之下时延、多普勒测量更容易实现，单个天线即可完成测量。从网络资源调度的角度，不同 UE 执行感知或通感一体化业务时占用不同的频域、时域资源，或者只使用自身部分天线端口资源。UE 只进行时延、多普勒、角度测量的其中一种或两种，网络需要基于多个 UE 上报的不同感知测量量，经过感知融合处理，获得最终感知结果。

在本章中，我们考虑多 UE 的协作通感。基于三台通用软件无线电外设（USRP），验证了 A 发 B 收感知模式下，利用多个 UE 基于不同感知测量量（包括 doppler、delay、angle）的移动物体轨迹追踪的可行性。具体地，我们使用 2 个 8 通道的 USRP 来模拟 2 个不同位置的 UE。为了验证不同感知能力（或者分配不同感知资源）的多个 UE 协作感知的性能，我们对比了基于多普勒（Doppler-based）、基于时延（Delay-based）、基于角度（Angle-based）、基于角度和时延（Angle-delay-based）方法的轨迹追踪效果。此外，还评估了基于上述不同方法得到的轨迹的加权融合（数据级融合）的轨迹估计性能。针对实测结果，我们给出初步的分析和结论。

5.1. 系统模型与协作感知原理

5.1.1. 系统模型

考虑 OFDM 系统，假设多 UE 协作感知系统中至少存在 1 个 BS 以及 $N(N\geq 2)$个 UE。考虑由于 BS 和 UE 之间的时钟不同步引起的本振频率偏移（CFO），$f_{\mathrm{o}}(t)$，和定时偏移（TO），$\tau_{\mathrm{o}}(t)$，以及由于基站和/或用户设备的硬件不完美引起的时变随机相位偏移 $\beta_{\mathrm{o}}(t)$，BS 与第 n 个 UE 间的频域信道传输函数（以下称为信道状态信息（CSI））为可以表示如下[19]

$$\mathbf{H}^n\left(f,t\right)=e^{j\beta_o(t)}\sum_{l=1}^{L}\alpha_l^n e^{-j2\pi f\left(\tau_l^n+\tau_o(t)\right)}e^{j2\pi\left(f_{d,l}^n+f_o(t)\right)t}\boldsymbol{c}_2\left(\varphi_{l,2}^n,\theta_{l,2}^n\right)\boldsymbol{c}_1\left(\varphi_{l,1}^n,\theta_{l,1}^n\right)^T. \quad (24)$$

其中 L 为多径总数，α_l^n 为第 l 条径的复振幅，τ_l^n 为时延，$f_{\mathrm{d},l}^n$ 为多普勒频率，$\boldsymbol{c}_p, p=1,2$ 分别是发射和接收阵列的导向矢量，$\varphi_{l,p}^n, p=1,2$ 分别是出发方位角和到达方位角，$\theta_{l,p}^n, p=1,2$ 分别是出发俯仰和到达俯仰角。假设第 $q, q\in\{1,2,3,\ldots,L\}$ 条径为 BS 到感知目标（ST）再到第 n 个 UE 的径（ST 反射径），借助高精度参数估计算法，例如多重信号分类（MUSIC）算法等，可以得到该多径的时延 τ_q^n、多普勒频率 $f_{\mathrm{d},q}^n$、到达方位角 $\varphi_{q,2}^n$ 和到达俯仰角 $\theta_{q,2}^n$ 等。基于 N 个 UE 的上述参数可以进一步得到 ST 的位置坐标和轨迹在样机中我们使用基于参考径的非理想因素消除方法[20][21]，可以得到较好的 CFO、TO 和随机相位抑制效果。对于环境相关的非理想因素，例如 RCS 波动、信道衰落、多径干扰，我们使用了包括可靠估计决策和感知节点动态切换的节点调度策略[19]。对于可靠估计判决，只有随时间连续平滑变化的参数估计结果才会被认为是可靠的估计，并可用于后续的轨迹计算。

5.1.2. 协作定位与轨迹追踪原理

Doppler-based 轨迹追踪的基本原理可以概括为：将感知目标速度分解为沿反射径的径向分量和切向分量。$N\left(N\geq 2\right)$个处于不同位置的 UE 可以测量目标反射径的 doppler，正比于动态反射径的径向速度之和（即动态反射径长度的变化速度）。基于这 N 个 doppler 测量值，结合基站和 UE 的位置坐标，可以计算得到目标的运动速度大小和方向，进而实现目标轨迹追踪。

Delay-based 轨迹追踪的基本原理可以概括为：感知目标的位于基站与不同 UE 为焦点形成的椭圆上，$N\left(N\geq 2\right)$个不同椭圆的交点即为感知目标位置，对感知目标连续多次定位则可实现对目标的轨迹追踪。

Angle-based 轨迹追踪的基本原理可以概括为：$N\left(N\geq 2\right)$个 UE 同时测量感知目标反射径的到达角，基于 $N\left(N\geq 2\right)$个 UE 的位置坐标以及所述反射径

的到达角，可以确定$N(N\geq 2)$个直线，感知目标位于该$N(N\geq 2)$个直线的交点上，对感知目标连续多次定位则可实现对目标的轨迹追踪。

Angle-delay-based 轨迹追踪的基本原理可以概括为：通过基站和 UE 双基地感知可对感知目标反射径同时进行时延和到达角/离开角测量。基于时延测量结果和基站、UE 的位置坐标，可以确定以基站和 UE 为焦点的椭圆，基于角度测量结果和 UE 位置坐标，可以确定一条经过 UE 的直线，而直线与椭圆的即为感知目标位置，对感知目标连续多次定位则可实现对目标的轨迹追踪。

5.1.3. 协作信息融合方法

在多 UE 协作感知中，不同 UE 根据自身能力不同，进行不同类型的感知测量量测量，感知融合节点或者网络基于这些 UE 反馈的感知测量量，使用不同方法，例如上述 doppler-based、delay-based、angle-based、angle-delay-based 方法，针对特定一个感知目标可以获得多个估计轨迹。对多个估计轨迹进行融合，有利于提升感知精度（即降低轨迹估计误差）。另一方面，由于实际目标（例如行人）运动具有一定的随机性，在某些时段，受到环境非理想因素的影响，对于部分感知节点可能无法获得准确的测量值，进而无法得到有效的轨迹估计，造成轨迹中断。此时，可以通过其他感知节点/其他方法估计得到的轨迹进行轨迹补全，有效解决轨迹中断/残缺的问题，提高了轨迹追踪的可靠性。

轨迹融合的一种简单有效的方法是加权融合，即对不同的轨迹坐标进行加权平均。一般地，对于感知能力越强，或者感知分辨率越高，或者感知 SNR 越高的节点，感知结果的可靠性/置信度越高，它们获得的估计轨迹的权重也应越高。感知可靠性/置信度可以通过表 5 的一些指标/因素确定。

表 5 可以用于评价感知可靠性/置信度的指标类型

类型	特征	解释
第 1 类	根据功率类指标	基于感知目标关联径的接收功率相关指标、干

	确定	扰和噪声功率相关指标、感知SINR/SNR/SIR/RSRQ相关指标至少一项确定;
第2类	根据历史感知测量量测量值的统计结果确定	在指定时间范围内,或者指定感知测量次数下,基于所对应的感知测量量测量值的统计值与预设条件的关系确定;
第3类	根据感知节点能力和物理状态确定	基于感知节点能力信息、感知节点物理状态信息至少一项确定。所述感知节点能力信息包括感知节点用于感知的时频资源pattern、时域和/或频域感知资源间隔和跨度、感知天线端口数等;感知节点物理状态信息包括感知节点的位置、天线阵列朝向信息、运动信息等;
第4类	根据硬件非理想因素确定	基于感知节点非理想因素信息(主要为硬件非理想因素相关的信息)确定,其中感知节点与硬件非理想因素相关的信息包括时钟晶振信息、锁相环信息等;
……	……	……

在本样机中,采用上述表4的第2类指标,即根据历史感知测量量测量值的统计结果确定各个估计轨迹的融合权重。具体地,历史感知测量量的统计结果,可以是历史一段时间内测量值符合预设条件的样本数目,或者比例。

5.2. 原型系统配置

我们设计了一个基于USRP硬件的多节点(节点数≥2)的移动目标轨迹追踪系统,用于验证多UE协作感知与通信一体化,如图47(a)所示。该原型系统由3个8通道的USRP组成。1个USRP用作发射端(Tx)模拟BS,另2个用作接收端(Rx)模拟多个UE。我们使用1个金属球作为感知目标,金属球被固定在机械导轨上往复直线运动。考虑下行通信,BS只使用1个发射天线端口,另外2个USRP的8个接收天线端口分别连接1个8天线阵

元的线性阵列，模拟 2 个具备 8 阵元 ULA 的 UE。我们设计了 2 组实验。

在实验 1 中，设置了 2 种 case，如图 47(b)所示，在 case 1 中，UE 2（Rx 2）部署在环境的西侧，天线面板朝向东侧；case 2 中，UE 2（Rx 2）部署在北侧，天线面板朝向南侧。两种 case 中 UE 1（Rx 1）部署位置不变，部署在北侧，天线面板朝向南侧。UE 的天线面板朝向角度如图 47(b)中所标注。

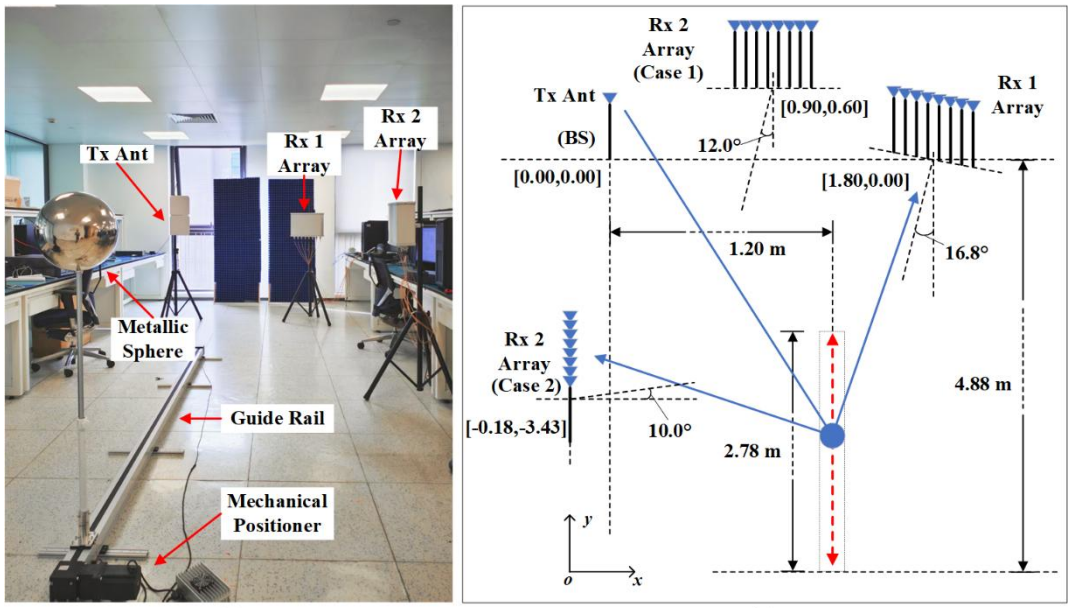


图 47 实验 1 的多节点协作轨迹追踪样机照片及场景 (a)样机系统照片 (b)2 种 case 下的布局示意图

在实验 2 中，UE 2（Rx 2）位置保持与实验 1 的 case 2 相同。在该实验中，我们多次改变导轨朝向，让金属球产生不同的空间运动轨迹，以检验不同运动路线下的轨迹追踪性能。具体导轨摆放位置如图 48 所示。

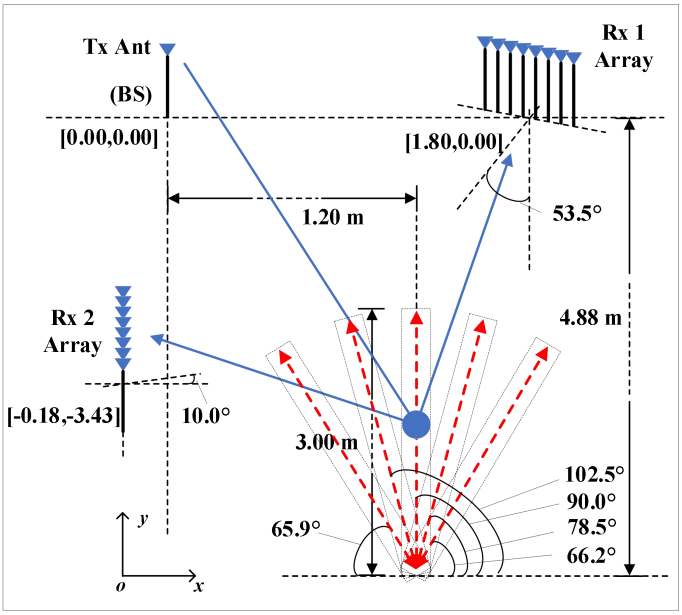


图 48 实验 2 的多节点协作轨迹追踪样机布局示意图

表 5 总结了关于样机的部分硬件配置参数。

表 6 轨迹追踪样机系统部分参数配置

参数	数值
频段	低频 4GHz 频段
系统带宽	400MHz
子载波带宽	120kHz
信号配置	PDSCH-DMRS, with a period of 2ms
发射天线端口数	1
模拟 UE 数	2
接收天线端口数/UE	8
相干累积时间	100ms
位置更新周期	50ms

感知目标	金属球、直径 0.3m

5.3. 原型验证结果

图 49 给出了实验 1 下的 case 1 和 case 2 两种情况 2 个 UE 协作轨迹追踪实测结果。对比两种 case，使用 delay-based 方法的性能差异最大，且 case 2 的效果更好，显示出 UE 接收位置对于 delay-based 方法性能影响较大。相比之下，存在角度测量的方法，包括 angle-based 以及 angle-delay-based 方法，性能相对稳定。整体上看，所有方法都能够对移动目标进行较为准确的轨迹追踪。估计位置与导轨之间偏差主要来自与噪声影响下的参数估计误差，且参数估计误差对噪声的敏感程度与 UE 位置有关。此外，由于金属球存在一定体积（直径 30 cm），在运动过程中其反射点也可能会发生较明显的变化。

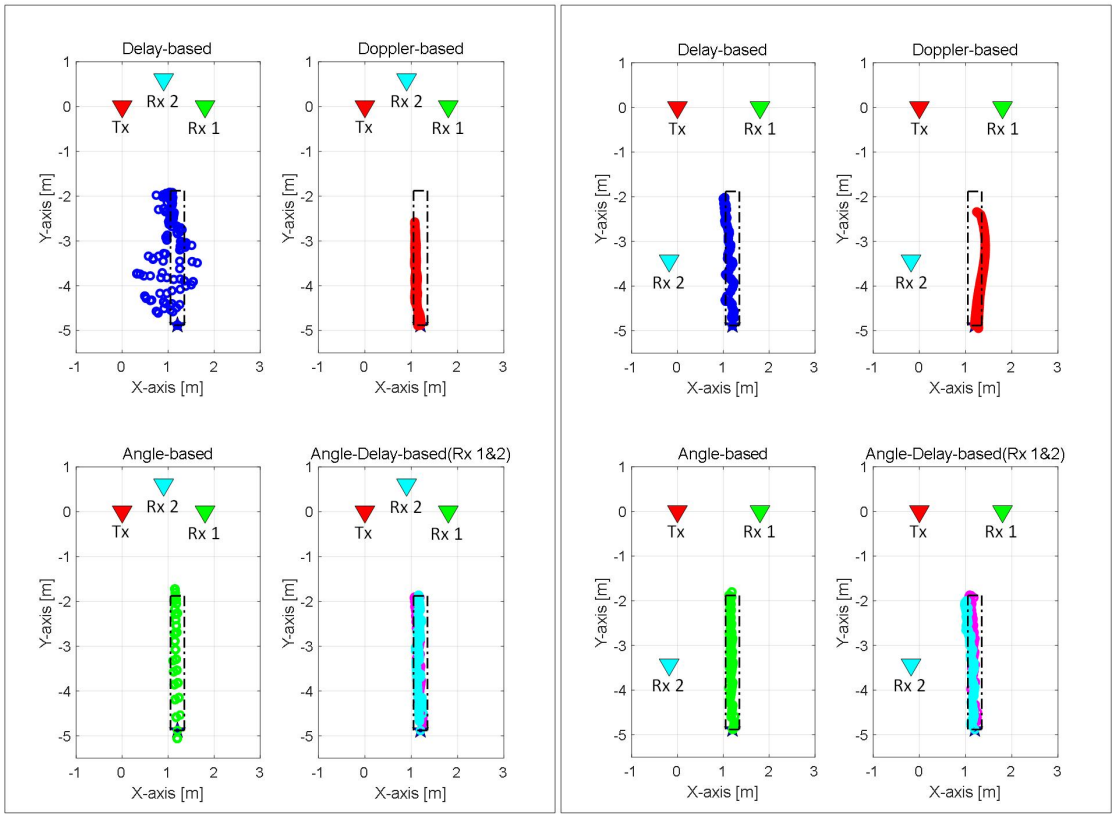


图 49 实验 1 配置下多 UE 协作轨迹追踪实测结果示例，其中黑色虚线框为金属球运动包络 （a） case 1 下不同轨迹追踪方法得到的轨迹 （b） case 2 下不同轨迹追踪方法得到的轨迹

图 50 给出了实验 2 配置下多 UE 协作轨迹追踪实测结果的 3 个示例。在这个配置下，可以使用 delay-based、doppler-based、angle-based、angle-delay-based 方法得到感知目标轨迹。在所有导轨摆放方向的测试中，上述 4 种方法都能较好地实现目标追踪，但是不同方法的精度存在差异。整体看 angle-delay-based 方法的精度和可靠性是 4 种方法中最高的，但是对于 UE 的能力要求也是最高的（需要借助多天线测角，且需要更多的运算量）。注意到，基于上述 4 种方法加权得到的轨迹，与实际轨迹吻合度最高。

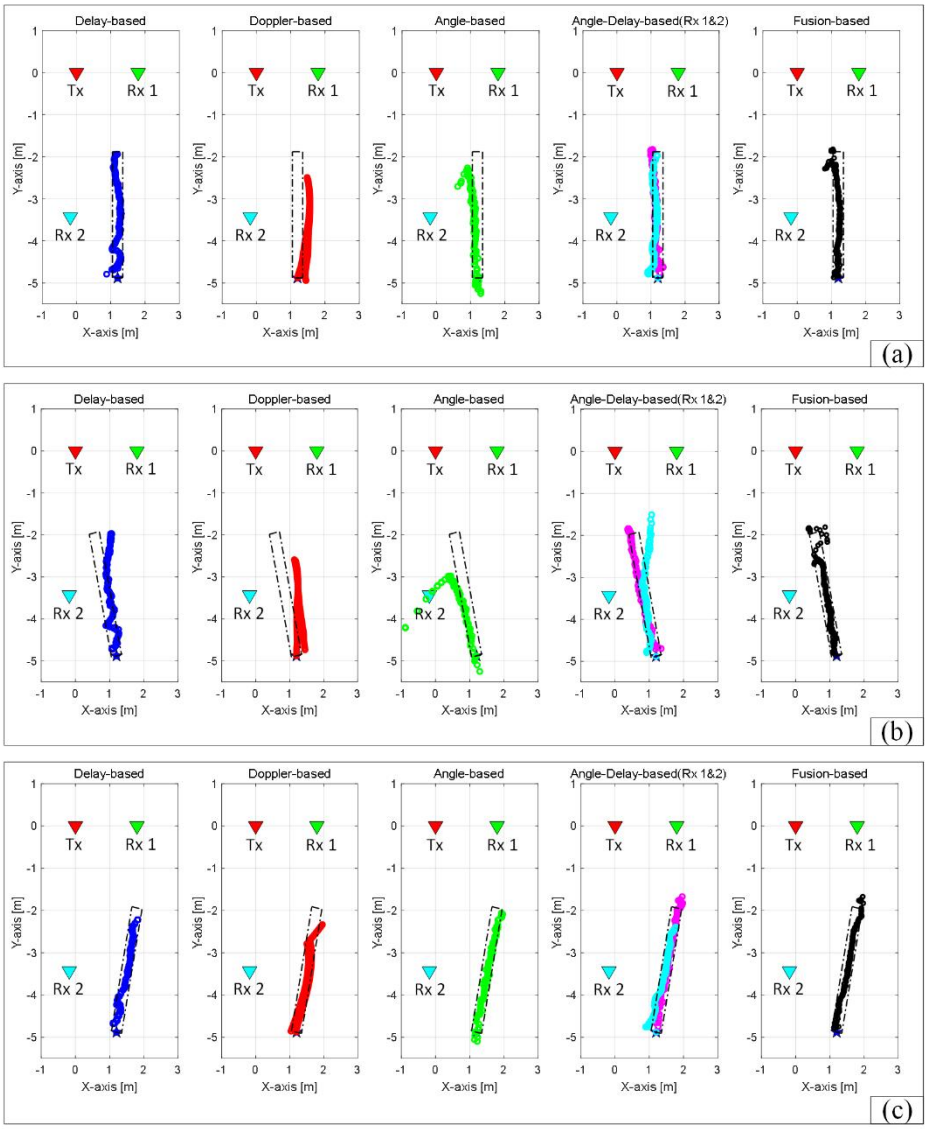


图 50 实验 2 配置下多 UE 协作轨迹追踪实测结果，其中黑色虚线框为金属球运动包络 (a) 导轨夹角为 90° 时不同轨迹追踪方法得到的轨迹 (b) 导轨夹角为 102.5° 时不同轨迹追踪方法得到的轨迹 (c) 导轨夹角为 78.5° 时不同轨迹追踪方法得到的轨迹

为了定量地对上述几种定位和轨迹追踪方法，以及基于它们轨迹的加权融合方法进行性能对比，我们针对单一定位/轨迹追踪方法的所有 5 个测试轨迹的轨迹误差进行了统计。其中，每个轨迹测试 6 组数据，金属球往返 1 次得到的测试数据记为 1 组测试数据。图 51 给出了实验 2 配置下不同轨迹追踪方法，以及融合方法的估计误差 CDF 曲线。

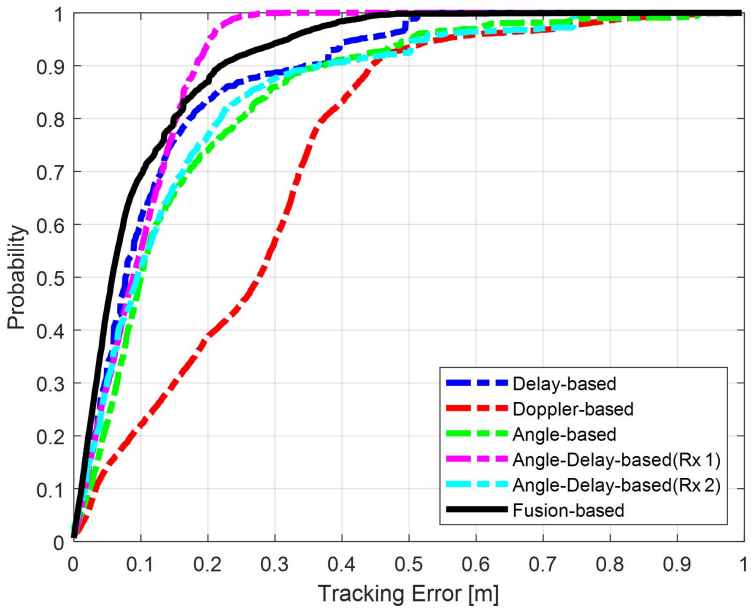


图 51 实验 2 配置下不同轨迹追踪方法的估计误差 CDF

可以观察到，对于 doppler-based 方法，由于在实验 2 中 2 个 UE 与轨迹的相对位置差异较大，仅仅基于这 2 个 UE 的 doppler 测量，精度最差。因为对于 UE 2（Rx 2）来说，由于它接收到的反射径 doppler 较小，甚至在目标运动速度不为 0 的情况下仍可能出现 doppler 接近于 0，参数估计误差较大，最终导致轨迹追踪误差较大。这个结果与实验 1 的现象是一致的，即实验 1 中采用 doppler-based 方法 case 1 相对于 case 2 的估计轨迹与实际轨迹吻合度更高。

对于 delay-based 方法，90%的误差控制在了 0.35 m 以下，接近金属球直径。但应该指出，delay-based 方法的精度同样会受到感知节点位置的影响。在实验 2 的配置下，该方法的精度得到了较好的保证。回顾实验 1，对于 case 1 的配置，采用 delay-based 方法的估计轨迹与真实轨迹的吻合程度明显没有 case 2 配置下的高。可见，在感知节点数量有限的情况下要想获得较好的轨

迹估计精度，doppler-based 方法和 delay-based 方法对感知节点的分布要求存在一定冲突：doppler-based 方法要求有限的感知节点尽可能分布在与感知目标运动方向相对或相背离的一侧，使得感知目标运动导致的所有反射径的 doppler 尽可能显著；而 delay-based 方法则要求感知节点尽可能均匀分布在感知目标的四周。

对于 angle-based 方法以及 angle-delay-based 方法，由于感知节点借助多天线角度测量，两种方法都能获得较高的轨迹估计精度。注意到，UE 1（Rx 1）和 UE 2（Rx 2）即使在硬件能力完全一样的情况下，由于它们部署位置不同，基于 angle-delay-based 方法的轨迹追踪性能也存在差异（观察图 6 紫色和青色曲线）。另一方面，由于是基于 2 个 UE 的角度测量结果进行目标定位，angle-based 方法的精度受限于精度较差的 UE 的角度估计精度，因此该方法的估计误差比 UE 2（Rx 2）基于 angle-delay-based 方法的估计误差略大。对于 UE 2（Rx 2）来说，感知目标运动过程的角度变化范围较大，角度较小和较大区域（即线阵两侧角度区域），角度估计精度下降。此外，对于 UE 2（Rx 2）来说金属球在运动过程中 RCS 变小，导致感知 SNR 降低。上述因素共同造成了 UE 2（Rx 2）基于 angle-delay-based 方法的估计误差要比 UE 1（Rx 1）更大。

值得注意的是，采用融合方法得到的轨迹，估计性能与 UE 1（Rx 1）采用 angle-delay-based 方法性能相当，还会出现更小的轨迹估计误差分布，且性能优于 doppler-based 方法和 delay-based 方法，甚至优于某些位置（UE 2（Rx 2））下的 angle-delay-based 方法。这个结果验证了多节点感知数据级融合对感知性能带来的提升。

本章节介绍了多 UE 协作感知和通信一体化的方案设计与样机验证。首先介绍了基于不同定位/轨迹追踪方法得到的多个轨迹进行轨迹融合的方法，然后介绍了多 UE 协作轨迹追踪样机系统和实测结果。实验表明：

- 基于 delay、doppler、angle 测量的轨迹追踪性能均对 UE 位置较为敏感，且不同方法对位置部署要求不同，网络需要根据感知性能要求、UE 位置、UE 感知能力、上报测量量类型等因素，合理选择参与协作感知的 UE;

- 对基于不同方法得到的轨迹进行加权融合，能够进一步提升轨迹追踪精度。加权融合系数可以根据感知节点相关的信息确定。例如，加权系数可以基于历史测量结果的可靠性/置信度确定。

六、 总结与展望

基站与终端协作通感作为通信感知一体化的重要范式之一，将通过提供种类、数量丰富的终端资源，拓宽通信感知一体化技术的服务范围，有助于实现高精度、立体化、全覆盖的感知，推动移动信息网络从“可感知”到“高质量通感网”的跃迁。

本报告首先分析了基站与终端协作感知的场景需求与工作模式，并在空口关键技术、多终端融合算法、性能评估和样机验证等方面进行研究。具体内容以及后续研究建议包括但不限于:

- 场景与工作模式：本报告分析了基站与终端协作在室外场景和室内场景的应用需求，揭示了由于终端种类的丰富性，可以大大扩展通感一体化技术的服务范围。本报告也详细介绍了基站和终端分别作为感知收发端时的工作模式，并每种模式的优势与挑战进行了分析。未来可进一步将工作模式与具体应用场景绑定，针对每种应用场景，探索最适合的工作模式。
- 关键技术：针对基站与终端协作所面临的空口与算法关键问题，本报告在参考信号设计、信令设计、UE 选择与切换设计、测量量上报设计、终端节能设计、冲突避免设计及信息融合算法等方面都提出具体的技术方案，未来可进一步对所提关键技术进行性能评估和推标准备。
- 性能评估：面向标准化，本报告给出了基站与终端协作模式下的 KPI 定义，并通过系统性能评估，验证了室内和室外场景下，采用多 UE 协作对感知性能的提升作用。未来，随着感知 KPI 的标准化，需要根据标准化进程进一步更新和统一系统评估方法。
- 原型验证：针对基站与终端协作，给出对目标进行轨迹追踪时的原型验证测试结果，探索了多算法融合对追踪性能的提升效果，也揭示了 UE

位置对算法选择的影响作用。未来，将更深入地研究对 UE 位置部署的要求，并指导网络根据感知性能要求、UE 位置、UE 感知能力、上报测量量类型等因素，合理选择参与协作感知的 UE。

基站与终端协作通感一体的研究涵盖场景需求、技术指标制定、关键技术研究、信道建模、性能评估、标准制定、商用部署、生态培育等诸多方面。目前，3GPP 已完成 R19 信道建模的标准化并提交修改建议，2025 年 6 月，3GPP 也已正式开启 6G 标准化。本研究报告中的协作感知场景、空口关键技术、性能评估等，是结合当前业界需求、研究观点、工作组提案讨论所得到，旨在为通感一体的基站与终端协作关键技术研究提供建议、促进共识，为标准制定奠定基础。

未来，随着产学研用各界的不断推进，通信感知一体化任务组将继续对基站与终端协作感知的空口关键技术、性能评估、原型验证等开展更深入的研讨，持续推动通感一体化的标准化、产业化，赋能千行百业。

参考文献

[1] G. Liu, L. Han, R. Xi, et al, “Cooperative Sensing for 6G Mobile Cellular Networks: Feasibility, Performance and Field Trial,” Engineering, 2025.

[2] C.-L. I et al., “Cooperative ISAC: An end-to-end perspective,” IEEE J. Selected Topics Electromag., Ant. Propag., pp. 1–14, 2025

[3] 3GPP, RP-251881 New SID: Study on 6G Radio, 3GPP TSG RAN Meeting #108, Prague, Czech Republic, June 9-13, 2025

[4] Z. Wei, F. Liu, C. Masouros, N. Su and A. P. Petropulu, "Toward Multi-Functional 6G Wireless Networks: Integrating Sensing, Communication, and Security," IEEE Communications Magazine, vol. 60, no. 4, pp. 65-71, April 2022.

[5] M. Eriyadi, S. H. Supangkat and F. Hidayat, "Sensing as a Service Reinvented: A Unified and Sustainable Sensing Framework for Smart X Development," IEEE Access, vol. 13, pp. 65121-65137, 2025.

[6] B. Lu et al., "Deep-Learning-Based Multinode ISAC 4D Environmental Reconstruction With Uplink–Downlink Cooperation," IEEE Internet of Things Journal, vol. 11, no. 24, pp. 39512-39526, 15 Dec.15, 2024.

[7] Y. Cui, F. Liu, X. Jing and J. Mu, "Integrating Sensing and Communications for Ubiquitous IoT: Applications, Trends, and Challenges," in IEEE Network, vol. 35, no. 5, pp. 158-167, Sept. 2021.

[8] P. Pal and P. P. Vaidyanathan, "Nested Arrays: A Novel Approach to Array Processing With Enhanced Degrees of Freedom," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58, no. 8, pp. 4167-4181, Aug. 2010..

[9] P. P. Vaidyanathan and P. Pal, "Sparse Sensing With Co-Prime Samplers and Arrays," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 59, no. 2, pp. 573-586, Feb. 2011.

[10] L. Xie, S. Song, Y. C. Eldar and K. B. Letaief, "Collaborative Sensing in Perceptive Mobile Networks: Opportunities and Challenges," IEEE Wireless Communications, vol. 30, no. 1, pp. 16-23, 2023.

[11] Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond, Recommendation ITU-R M.2160, 2023.

[12] Diederik P. Kingma; Max Welling, An Introduction to Variational Autoencoders , Now Foundations and Trends, 2019.

[13] H. Zhao et al., “Variational autoencoder-based intelligent cooperative intergrated sensing and communicaion system,” in 2025 ICC workshop, Montreal, Canada: IEEE.

[14] H. Gao, B. Zhou, D. Zhou, and Z. Jin, “Performance analysis and experimental study on distributed aperture coherence-synthetic radar,” CIE International Conference on Radar (RADAR), Guangzhou, China, pp. 1-5, 2016.

[15] 3GPP TS 23.032. Universal Geographical Area Description (GAD). Rel. 19, V19.0.0, Sept. 2025

[16] 3GPP R1-2505006. CR to introduce channel model for ISAC. Xiaomi, AT&T, 3GPP TSG RAN WG1#121, May 2025.

[17] 3GPP TR 37.885. Study on evaluation methodology of new Vehicle-to-Everything (V2X) use cases for LTE and NR. Rel. 15, V15.3.0, June 2019

[18] 3GPP TR 38.808. Study on supporting NR from 52.6 GHz to 71 GHz.Rel. 17, V17.0.0, Mar. 2021.

[19] J. Li, B. Chen, S. Ding, J. Yao, D. Jiang, and F. Qin, “Integrated Coordinated Multi-Point Sensing and Communication: Design and Experiment,” 2024 IEEE 25th Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), April 2024, pp. 1–6.

[20] K. Wu, J. A. Zhang, X. Huang, and Y. J. Guo, “A Low-complexity CSI-based WiFi Sensing Scheme for LoS-dominant Scenarios,” ICC 2023-IEEE International Conference on Communications, 2023, pp. 2747–2752.

[21] S. Li, C. Luo, A. Tang, X. Wang, C. Xu, F. Gao, and L. Cai, “Integrating Passive Bistatic Sensing into mmWave B5G/6G Networks: Design and Experiment Measurement,” ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications, May 2023, pp. 1–6.

贡献单位

序号	主要贡献单位
1	中国移动通信有限公司研究院
2	中国信息通信研究院
3	华为技术有限公司
4	中信科移动通信技术股份有限公司
5	西安电子科技大学
6	中兴通讯股份有限公司
7	北京邮电大学
8	维沃移动通信有限公司
9	中国联通研究院
10	中国电信股份有限公司研究院
11	东南大学
12	OPPO广东移动通信有限公司
13	联发科技股份有限公司
14	紫光展锐科技有限公司
15	上海诺基亚贝尔股份有限公司
16	北京小米移动软件有限公司