



XXXX

5G-A通感融合互助及性能增强技术研究

董君宇, 潘都, 高松涛, 张琪璇, 曹阳阳, 于一鸣, 刘晓晴
(中国移动设计院无线所, 北京 100080)

摘要: 通信感知一体化 (ISAC) 作为 5G-Advanced (5G-A) 体系中最具辨识度与变革潜力的关键技术之一, 正为移动通信网络注入全新活力, 有力支撑低空经济等新兴业务与场景的成熟与发展。面向未来技术演进, 通信与感知能力将实现从资源共享到功能互助、深度协同的跨越, 突破传统能力边界, 构建“连接+感知”一体化的综合信息基础设施。聚焦通感融合互助机制与感知性能增强技术两大方向, 系统剖析当前 5G-A 通感一体化面临的核心挑战, 并从精准探测、干扰控制、通信辅助感知、感知辅助通信等维度提出一系列创新方法与发展路径, 为后续技术研究与实践部署提供理论支撑与工程参考。

关键词: 通信感知一体化; 通感互助; 感知性能增强; 组网; 干扰控制

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.29

0 引言

5G-Advanced (5G-A) 已成为推动通信能力纵深发展、拓展垂直行业应用的关键阶段。通信感知一体化 (integrated sensing and communication, ISAC, 简称通感一体化) 技术通过实现通信与感知功能的深度融合与资源复用, 不仅可大幅提升系统效率, 也为构建具备内生感知能力的新型网络基础设施奠定了技术基础。当前, 基于 4.9 GHz 频段的通感一体化技术已开展多项外场验证, 初步展现出在低空经济、低空安防、航道管理等场景的应用潜力。然而, 系统在实际部署中仍面临通信与感知资源竞争、多站干扰难以协同、感知精度受限、异构模式融合复杂度高等挑战。

为应对上述问题, 本文围绕感知性能增强与通感融合互助两大主线, 系统探讨帧结构优化、

波束管理、干扰控制、资源动态调度等关键技术, 并进一步从网络架构演进角度分析多站协作与融合感知的未来方向。本文通过理论分析与技术展望, 为 5G-A 通感一体化技术的标准化、产品化与商用化提供有益借鉴。

1 感知性能增强技术

1.1 精准探测

为提升感知系统的探测精度与覆盖能力, 本节重点研究感知资源优化与波束管理策略, 提出在 20% 资源配置下的高效帧结构设计 with 确认波束机制, 以增强复杂环境下的目标识别与跟踪性能。

1.1.1 20% 感知资源

现有 10% 资源帧结构仅将 D0、D5 时隙的前 7 个符号用于感知。根据外场测试, 当前产业通用的 64 通道收发、64 通道发 128 通道收、128 通道

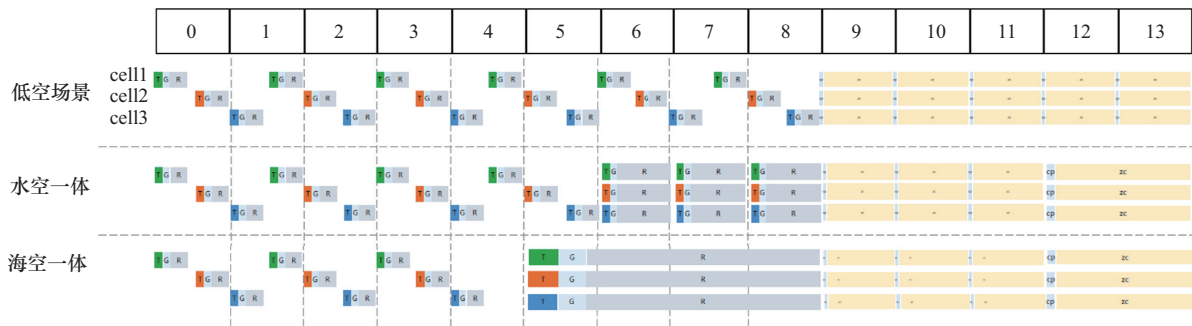


图1 20%资源感知帧结构

收发3款基站设备，感知位置精度可达11~20 m，平均虚警率、平均漏检率低于5%。但当前部分场景对成本敏感，而且对虚警率、位置精度提出了更高要求，考虑5G通信终端符号级调度的支持度仍不成熟，难以充分利用后7个通信符号，因此本文提出将D0、D5全部14个符号用于感知。

如图1所示，基于“先脉冲波后连续波”“增大脉冲波接收窗长度”“对齐不同场景感知波形”三大原则，全新设计低空、水空一体、海空一体帧结构。具体地，低空场景采用6个脉冲波（P）与5个连续波（C）组合（6P5C），水空与海空场景则根据感知对象差异分别配置不同的波形比例。理论分析表明，该结构可使感知性能提升约1.7 dB，感知覆盖半径由1.2 km扩展至1.5 km，显著增强了系统对远距离、弱反射目标的探测能力。

1.1.2 确认波束

在城市道路环境中，虽然通感基站感知波束主瓣对空来感知无人机等目标，但由于车辆等目标反射截面积（radar cross-section, RCS）较无人机更大，其通过基站旁瓣接收到的回波能量显著高于无人机目标，在淹没无人机感知信号的同时，会出现低空镜像的虚假目标，导致虚警率恶化。对此，在20%感知资源下，设计低开销的对地确认波束，对可能引起虚警的目标进行二次确认（如图2所示），以过滤虚假目标。

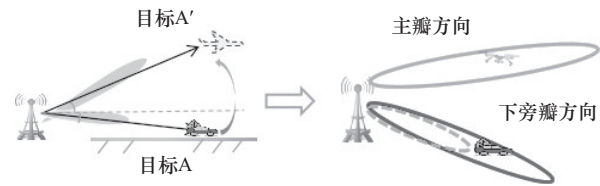


图2 确认波束示意图

确认波束的实现原理是通过几何关联与功率差异进行目标校验：感知波束与确认波束保持测速和测距相同信号参数，而测角为固定角度关系，当感知波束与确认波束接收到的目标回波能量存在差值时，如 $P(\text{确认波束}) > P(\text{感知波束})$ ，则存在虚警目标。根据理论分析，确认波束产生的开销约为2%~5%，打开确认波束功能后，由地面目标导致的虚警预期可减少60%以上，有效降低了城市环境中车辆杂波的影响。

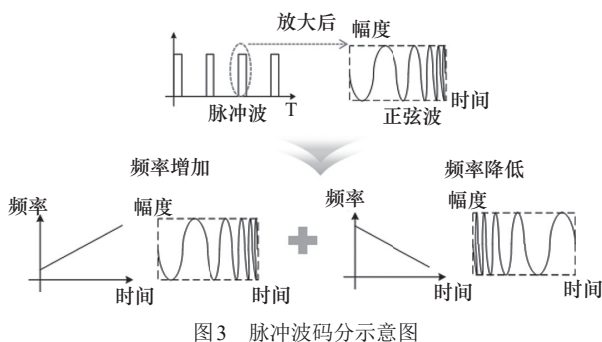
1.2 干扰控制

随着通感一体化基站部署规模的扩大，站间干扰成为制约系统性能的关键因素。本节从波形设计与资源调度两个层面出发，探讨有效的干扰抑制方法。

4.9 GHz通感一体采用连续波、脉冲波两种波形，由于脉冲波发射功率大、覆盖更远，组网场景中主要考虑站点小区之间的脉冲波干扰。以19站2圈蜂窝组网，站间距900 m、总带宽100 MHz为例进行理论分析，采用时频梳分干扰控制技术后，单位感知栅格内的感知干扰抬升还剩余约3 dB待解决。对此，本文创新提出基于正负斜率的码分技术，进一步降低站间干扰，提升

组网感知性能。

如图3所示，线性调频脉冲（linear frequency modulation, LFM）波单一矩形方波包络放大后，是频率正向增加的正弦波。在现有波形基础上，新增频率负向降低的正弦波，实现组网干扰控制自由度提升，即对于A发A收组网和同时、同频的小区之间，能够采用不同脉冲波形进行区分。针对采用不同码分的两个小区，在相邻频道泄漏比（adjacent channel leakage ratio, ACLR）可以提供 16 dB 增益的前提下，组网干扰抑制约为 2 dB。由于本小区与邻小区采用不同码分波形配置，本小区可以区分目标回波信号或邻小区干扰信号，进而改善“自发他收”导致的虚警率。



2 通感融合互助技术

2.1 通信辅助感知

通信系统可通过资源共享与信号复用，以较低开销显著提升感知性能。本节重点介绍精准打孔、波束管理与波束跟踪3项关键技术，阐述通信如何主动赋能感知。

2.1.1 精准打孔

通感一体基站与传统通信基站之间存在同频时隙干扰，目前主要采用时隙打孔方式，即周边 10 km 范围内地面通信站在感知时隙静默，实现通信对感知的干扰避让。然而，该方式可能会使所选范围内低干扰、无干扰小区被打孔，导致通信资源浪费。因此，本文创新提出基于干扰溯

源、动态筛选的精准打孔方案，可在保障感知性能的前提下，最大限度地降低对通信用户体验的影响。

如图4所示，精准打孔方案涉及通信小区与通感小区的信号收发与协作，具体步骤如下。

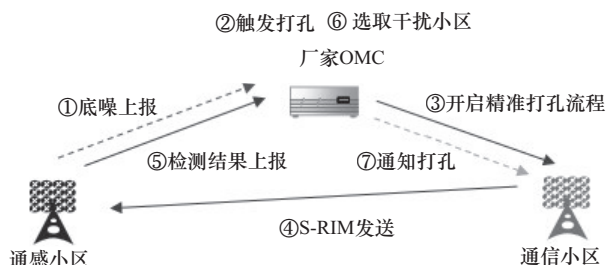


图4 精准打孔流程示意图

- 通感小区向网管 OMC 上报感知时隙底噪。
- 当底噪大于预设干扰门限 -110 dBm/RB 时，触发精准打孔流程。
- 网管 OMC 通知通信小区和通感小区开启打孔流程。
- 通信小区随后依次发送带有基站 ID 的参考信号 S-RIM。
- 通感小区检测所有通信小区的参考信号功率后上报至 OMC。
- 网管 OMC 可获取通信小区的干扰大小、负荷水平等信息，选取干扰小区。具体分为3个步骤：第一，根据干扰强度排序，对高干扰的通信小区打孔；第二，对于剩余小区，考虑到多个小区叠加可能也会产生干扰影响，因此优先对低负荷（如 PRB 利用率低于 30%）且干扰相对更大（感知底噪 $\in [-110, -115]$ dBm/RB）的小区打孔；第三，最后所有不打孔的小区同时发送 S-RIM 信号，确认可满足感知性能需求，否则重复第二步，继续扩大打孔范围，直到满足要求。
- 网管 OMC 确定所有的干扰通信小区，通知这些小区进行打孔。



精准打孔方案通过轮询干扰溯源检测出单个高干扰的小区，并通过动态筛选迭代选择出多个低负荷但叠加高干扰的小区。相较于传统固定打孔方式，精准打孔可减少约30%的打孔扇区数量。未来，通过测量小区更细粒度的干扰信息，可实现波束级打孔，能进一步降低对通信网络的影响。

需要补充说明的是，精准打孔与大气波导均采用RIM参考信号，但由于干扰范围与帧结构不同，精准打孔无法复用大气波导空口交互机制，如图5所示，大气波导主要监测30~300 km内的干扰，而精准打孔主要监测30 km内的干扰；大气波导是小区之间的双向干扰，而精准打孔是通信单向干扰。表1总结了两种类型干扰的特点和差异。



图5 精准打孔与大气波导帧结构位置

2.1.2 波束管理

在通感一体系统中，感知发射机发射感知信号，以感知周边环境的信息，例如目标的位置、速度等。感知信号通常具有特殊的波形和参数，例如，4.9 GHz通感一体自发自收基站采用线性调频脉冲（Linear Frequency Modulation, LFM）波覆盖远端。为减少系统频谱资源的开销，可以考虑复用通信资源来进行感知，例如，基站可以在与终端用户通信时，利用SRS等通信信号完成对目标的感知。然而，由于基站需要获取用户的

参考信息配置，这会显著增加通信开销。对此，可考虑采用通信辅助感知的波束管理方案来解决上述问题。

以自发自收感知模式为例，如图6所示，感知发射机和接收机相互配合，通过在感知区域和LOS径方向生成窄波束，感知接收机可以在这些方向上分别提取回波信号，然后计算它们的比值，以获得相对信道状态信息用于感知。该方案可以使感知接收机在没有参考信号配置等信息的情况下，最大限度复用通信回波信号对目标进行感知，减少资源开销，提高感知精度。

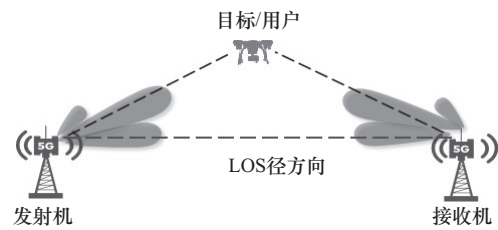


图6 通信辅助感知波束管理示意图

2.1.3 波束跟踪

为了保证基于波束传输的准确性和鲁棒性，基站和终端需要在传输过程中进行相互的波束测量和确认，确保使用正确的波束进行控制和业务信道的传输。现有的波束训练和波束跟踪方法需要基站频繁发送训练序列并进行测量反馈，通信开销过大，且波束跟踪的时效性较差，存在较高的波束失败和通信中断概率。

为解决上述问题，可考虑利用感知结果来辅助波束跟踪。一方面，可以结合定位技术缩小波束扫描范围、缩短波束训练时间；另一方面，可

表1 精准打孔与大气波导干扰对比

对比项	大气波导	精准打孔
影响范围	远端干扰，一般约30~300 km	近端干扰，一般小于30 km
接收位置	共约30个符号，S时隙中两个U符号和后面两个U时隙接收	共3个符号，S时隙中最后一个D符号和两个G符号接收
干扰特征	双向干扰，小区1与小区2之间一般为互相干扰	单向干扰，通信对感知干扰严重，感知对通信干扰无需重点关注
规避方式	扩大Gap，干扰小区D符号静默、或受扰小区U符号静默	干扰通信小区D符号静默

以结合感知技术优化波束发送。尤其是当感知目标同时作为通信节点时，可以通过回波检测获取的感知目标的角度信息、位置信息与运动信息，识别环境中可能存在的遮挡物，进行未来时刻波束预测等。

2.2 感知辅助通信

在实时感知信息和结果的基础上，基于感知辅助的通信决策可以解决传统静态资源分配方式在动态场景下面临的干扰与效率问题，从而显著提升系统性能。本节重点探讨感知信息在干扰控制、覆盖增强两大方向，通过灵活的波束调控与自适应阵面资源管理，充分保障用户体验。

2.2.1 干扰控制

考虑到低空场景视距传输条件，当无人机处于多个小区重叠覆盖区域时，小区间下行信号强度相当，将导致信干噪比（signal to interference plus noise ratio, SINR）下降，严重影响无人机用户速率。对此，本文创新提出感知辅助的通信波束灵活调控技术。

如图7所示，在网联无人机场景中，基站通过自身感知能力或站间信息交互获取无人机的实时位置，服务小区保持SSB波束开启，干扰小区则关闭SSB波束，从而有效降低广播信道干扰。注意，传统通信小区大多按照PCI分组，不同组间的小区SSB分时发送，同一组内小区的SSB同时发送。本方案可根据无人机的实时位置，进一步将组内干扰SSB关闭，降低广播信道干扰。基于理论评估，SSB干扰预计降低3~4 dB，速率提升约5%以上。

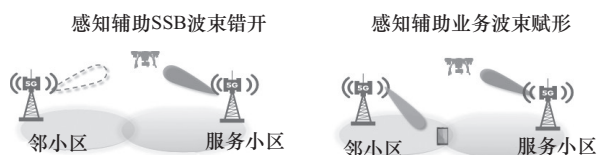


图7 感知辅助通信波束灵活调控示意图

此外，服务小区也可根据感知到的目标位置，自适应调整业务信道波束权值，实现精准业务波束跟踪，进一步保障用户体验，预计用户速率可提升10%以上。

2.2.2 覆盖增强

为实现对空与对地双载波同时发射信号，当前A发A收设备主要采用阵面固定劈裂方式，即将有源天线单元（active antenna unit, AAU）阵列分为两部分，分别服务于地面用户与低空用户。该方案导致对空、对地射频通道资源减半，在一定程度上限制了空地覆盖能力与用户体验。考虑到当前低空业务尚处于发展初期，低空用户规模有限，本文创新提出自适应阵面劈裂方案，基于基站感知能力和小区接入情况判断空地用户分布、动态调整阵面资源配置。

如图8所示，当存在低空用户时，按业务需求采用部分阵面对地、部分阵面对空；当仅有地面用户时，则全阵面对地，最大化硬件利用效率。相较于传统固定劈裂方式，由于对地射频通道资源增加一倍，该方式预计提升覆盖3 dB以上，用户速率提升约10%~20%。

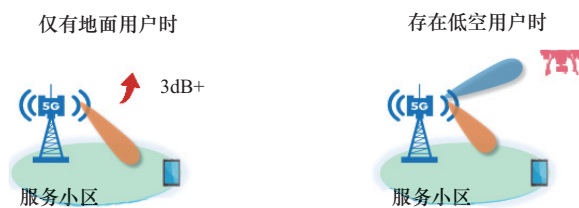


图8 自适应阵面劈裂示意图

3 网络演进

3.1 多站融合

在多站融合方面，当前主要采用轨迹级融合方案，即在感知重叠覆盖区域，通过多站分别感知进行测距、测角并形成轨迹后，进行轨迹融合与去重，该方式较依赖单站测角精度，目标处于覆盖边缘时精度发生恶化。由于多站融合处理难



度与融合信息颗粒度相关，目前产业界主要以轨迹级、特征级数据为基础进行融合。如图9所示，面向未来演进，学术界对融合感知也提出了两种可能的方式：符号级融合、信号级融合。

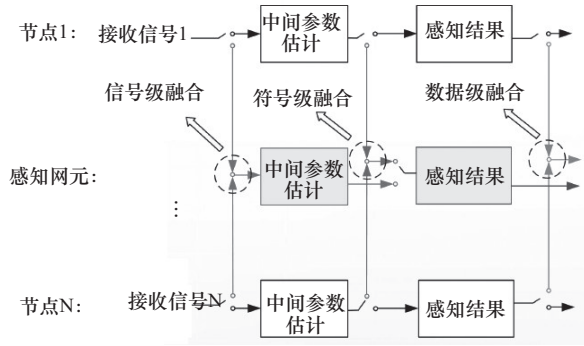


图9 不同协作方式示意图

符号级融合：各个感知站/接收节点对各自接收到的反射信号进行处理，获得时延、角度、多普勒等感知测量值，并将上述测量值及其多维组合发送给服务器进行数据融合。在符号级融合中，接收节点仅将若干个感知测量值发送给感知服务器，传输数据量较小，降低了数据传输开销。理论上来说，如果各个节点上的感知测量值可以达到参数估计的性能上界，那么可以基于此感知测量值和感知测量值的方差设计加权最小二乘的算法，获取最优的性能。而在实际中，感知测量结果的方差并不易获取，因此性能会有所损失。此外，协作接收节点还需要额外上报指示目标的参数，进而完成数据融合。

信号级融合：各小区将接收的感知信号或原始信道信息加权融合，包括接收信号或信道响应的幅度/相位、IQ数据等。感知站/接收节点对接收信号不进行任何处理，直接将原始信号发送给服务器，服务器按照一定权重进行叠加合并后，再进行优化处理提取感知信息。信号级融合利用了原始信号或信道信息，没有引入额外的信号处理及其带来的误差，因此该方式可以获得全局最优解。然而，由于需要将原始信号发送给服务

器，或者利用相参的方式对发送信号进行校准使其在接收端可以完成相干叠加，信号级融合的流程复杂、占用传输资源多，需要对网络架构、低采样算法进行优化设计。

3.2 多站协作

为了深入探讨通感一体演进过程，3GPP研究并详细定义了6种感知模式^[1]，如图10所示，包括基站自发自收、基站发终端收、基站A发B收等，这些模式提供了全面理解通感一体化标准演进的框架。针对4.9 GHz通感一体技术，当前产业主要支持模式1和模式3，即以基站为锚点实现感知功能。基站自发自收是发射机和接收机共同部署在同一站点上的情况，通过接收本站的回波信号进行感知；基站A发B收是发射机和接收机部署在不同站点的情况，接收机通过接收发射机的回波信号进行感知，对站间同步要求相对更高。



图10 不同协作方式示意图

当前不同收发模式之间各自为营，无法进行协作，在异厂商交界处将产生互干扰，对此，需通过异频或物理隔离方式规避干扰影响。学术界针对不同模式协作也提出了一些观点，如图11、图12所示，提出一种基于合作的自发自收与A发B收的联合感知方案^[2]。该方案以自发自收模式为基础，通过关联自发自收和A发B收感知信息来缓解时偏和载波频偏，并重点解决感知中的异步和天线阵列规模有限导致的感知精度下降问题。

根据仿真结果，基站协作感知可以提升感知精度，且随着基站间时偏和频偏越低，感知精度越高。

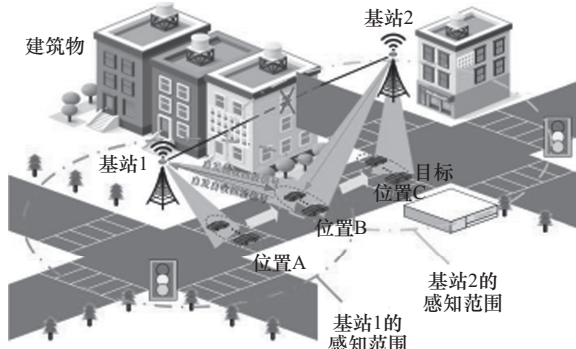


图11 基站协作感知场景

4 结束语

本文系统探讨了5G-A通感一体化在感知性能增强与通感融合互助两个维度的关键技术与发展路径。未来，随着多站融合感知、信号级协作等技术的成熟，通感一体化将进一步向高精度、低开销、强协同方向演进，为6G通感算智一体的发展奠定坚实基础。

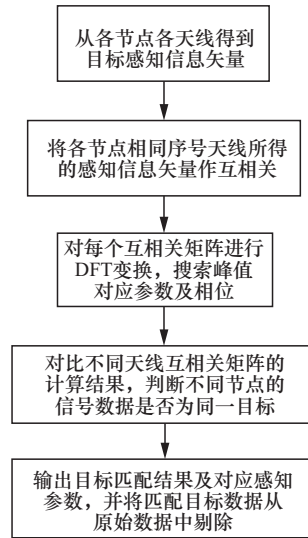


图12 协同感知流程

参考文献:

- [1] 3GPP. Views on ISAC study in Rel-19: TSG RAN #102 RP-232872[S]. 2023.
- [2] JIANG W J, WEI Z Q, YANG S S, et al. Cooperation-based joint active and passive sensing with asynchronous transceivers for perceptive mobile networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(10): 15627-15641.