

5G-A/6G 通感融合需求和关键技术方案研究

Research on Requirements and Key Technologies of 5G-A/6G ISAC

李福昌¹, 蒋振伟², 赵明阳¹, 代锋利², 杨 艳¹ (1. 中国联通研究院, 北京 100048; 2. 中国联通上海分公司, 上海 200080)
Li Fuchang¹, Jiang Zhenwei², Zhao Mingyang¹, Dai Fengli², Yang Yan¹ (1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China; 2. China Unicom Shanghai Branch, Shanghai 200080, China)

摘 要:

通感融合是 5G-A/6G 六大场景之一, 在低空经济等诸多领域具有重要的应用价值。系统分析了通感融合的业务需求, 梳理了其标准化进展及指标体系演进路径, 给出通感融合部署架构, 并重点分析了通感融合关键技术解决方案。最后进行了总结, 对未来发展方向进行了展望。

关键词:

5G-A/6G; 通感融合; 标准化; 网络架构; 关键技术
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.08.002
文章编号: 1007-3043(2026)08-0006-07
中图分类号: TN929.5
文献标识码: A
开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Abstract:

Integrated Sensing and Communication (ISAC) is one of the six core scenarios for 6G, and has important application in low-altitude economy and other emerging fields. The service requirements, standardization progress and KPI evolution of ISAC are analyzed, the network architecture is presented, and key technical solutions of ISAC are emphatically analyzed. Finally, a summary is conducted, and the future development direction is envisioned.

Keywords:

5G-A/6G; ISAC; Standardization; Network structure; Key technologies

引用格式: 李福昌, 蒋振伟, 赵明阳, 等. 5G-A/6G 通感融合需求和关键技术方案研究[J]. 邮电设计技术, 2026(8): 6-12.

1 通感融合业务发展需求

自从无线电通信诞生以来, 通信技术与感知技术(雷达是其典型应用技术)一直独立发展, 近年来二者正逐步深度融合。产生这种融合的主要原因有 3 点: 一是频谱向高频趋同, 无线通信向高频发展, 传统感知技术也以高频部署较多; 二是技术趋同, 无线通信为提高速率, 从 4G 后期开始采用大规模天线技术, 而感知技术为了实现更远更高精度的探测很早就采用了相控阵技术; 三是融合业务需求激增, 如低空经济场景既要与无人机通信, 也要对区域内的无人机进行

全域管控(无论是合法的还是非法的)。

通感融合通过空口及协议联合设计、频谱资源共享、软硬件设备共享等手段, 实现通信功能与感知功能的融合共生, 在传递信息的同时, 还能对目标或环境信息等进行测量、成像、识别、环境重构等^[1]。这种“一网两用”的技术范式不仅显著提升了频谱与硬件资源的利用效率, 还催生了一系列全新的业务形态与应用场景^[2-5]。

低空无人机监管是当前最主要的应用场景。近年来, 我国低空经济产业进入快速发展期: 2021 年低空经济首次被写入国家规划, 2023 年中央经济工作会议首次将“低空经济”列入战略性新兴产业, 2024 年全国两会首次将低空经济写入政府工作报告, 并将其打造

收稿日期: 2026-06-16

成为发展新质生产力的重要方向。据赛迪测算,2030年我国低空经济规模有望达到2万亿元,未来低空经济可能和如今的汽车工业一样,成为下一个10万亿产值级别的产业。

可靠的低空安全监管是低空经济发展的基础保障。传统监管手段面临覆盖范围有限、设备成本高、多系统协同困难等挑战,通感融合技术则能够有效满足这些需求。一方面满足低空无人机通信需求,保障数据传输的可靠性;另一方面实现全域无人机入侵检测至轨迹跟踪的管理,真正实现“一网两用、提质增效”,为低空经济发展打造安全屏障。

除此以外,通感融合在车路协同、灾害预警和智慧医养等场景的发展前景广阔。在车路协同领域,无论是人车协同还是自动驾驶,都需要对其他车辆、周围环境等进行全面的感知,并基于此开展决策判决。在灾害预警领域,通过雨水检测、山体滑坡、人员管理等技术,能够实现灾害的及时预警和处理,助力灾害防治能力现代化。通感融合对构建智慧养老服务体系也有非常重要的应用价值,利用心跳检测、智慧监护、摔倒预警等技术,可以发展面向居家、社区和机构的智慧医养结合服务。

2 通感融合标准化进展

通感融合作为一项跨领域的融合技术,其标准化进程涉及国际与国内多个标准组织,呈现多路径并行推进的特点。与此同时,随着技术方案的不断成熟,通感融合的能力指标体系也在持续演进完善^[6-9]。

2.1 标准化进展

在国际标准方面,IEEE先于3GPP开展了感知研究工作,于2020年9月设立了IEEE 802.11bf工作组,聚焦于感知场景需求分析和无线局域网感知技术研究。3GPP作为移动通信领域最具影响力的标准组织,从R19开始启动通感融合业务需求和信道建模的研究工作,并初步确定感知业务和指标需求,基本完成无人机典型场景的信道建模工作;R20阶段进一步开展5G通感融合架构研究工作,并对无人机场景感知性能进行评估。此外,欧盟HEXA-X将通感融合列为6G六大支柱业务之一,并开展了相关研究。ITU于2023年6月正式将通感融合确定为6G的主要技术方向。

3GPP通感融合研究的主要进展如下。

2.1.1 3GPP R19版本

R19是5G-A通感相关内容的首个正式版本,该版

本完成了通感融合基础框架的搭建。SA1工作组牵头通感业务需求研究,重点针对通感技术在垂直行业应用的差异化业务需求、感知信息类型、信息采集和上报方案、感知能力及感知信息对外开放开展研究。工作组共定义了32个通感融合用例,涵盖目标检测与跟踪、环境监测和运动检测三大场景,制定感知KPI指标,并同步研究安全、隐私、监管、计费等新要求。

RAN1工作组牵头5G通感技术信道建模研究课题,主要研究通感融合在入侵检测和轨迹跟踪场景下的信道特性,涉及UAVs、室内室外人、室外车辆、室内自动引导车、公路铁路灾害监测等通感应用典型场景。同时,该工作组还研究不同的感知模式,包含基站和终端在内的6种的组合方案。

2.1.2 3GPP R20版本

R20是5G-A与6G并行演进的关键版本,6G进入研究阶段。SA2工作组牵头5G-A通感融合网络架构研究课题,主要研究5G-A网络核心网感知架构、感知授权和撤销、感知数据采集和传输、感知信息和感知数据对外开放、感知服务配置参数等系统设计关键技术点。

RAN1工作组牵头5G通感技术研究课题,主要研究无人机场景下,基站自发自收的感知性能评估,以及基站自发自收和基站A发B收的接入网网络架构设计方案及相关流程和信令。

RAN全会牵头6G通感子课题,将会对感知流程、物理层功能等做出设计,例如波形参考信号、测量反馈等。

2.2 感知能力指标演进

感知技术的理论基础是雷达方程。基于雷达方程,可以得到感知场景的信噪比公式。感知距离精度、测角精度、速度精度等感知结果都与信噪比直接相关。影响感知精度和分辨率的主要因素包括频率、带宽、天线设计和信噪比。在感知架构和感知波形比较明确的情况下,通常可以改变带宽、感知资源负载和天线振子数和发射功率来提升感知性能。通感指标影响因素分析如表1所示。

通感融合技术从5G-A向6G演进,其能力指标不断提升,以满足不同场景差异化感知需求。5G-A阶段重点解决无人机轨迹跟踪与入侵检测两大基础场景的感知需求(见表2),而6G阶段则进一步扩展了应用场景覆盖,新增了无人机起飞降落、低空高风险场景等对感知精度与实时性要求更高的用例,指标要求

表1 通感指标影响因素分析

指标	公式	影响因素
距离精度	$d = \frac{c/2B}{2\sqrt{2} \times \sqrt{\text{SNR}}}$	带宽, 信噪比
角度精度	$\alpha = \frac{0.886\lambda}{M \times d \times \cos(\varphi)} \times \frac{1}{16\sqrt{2} \times \sqrt{\text{SNR}}}$	频率, 天线振子数, 信噪比
速度精度	$V_{\text{acc}} = \frac{\lambda}{2NT_s} \times \frac{1}{\sqrt{2} \times \text{SNR}}$	频率, 信噪比
距离分辨率	$\Delta R = \frac{c}{2B}$	带宽
角度分辨率	$\theta_{\text{3dB}} = \frac{0.886\lambda}{D} = \frac{0.886\lambda}{M \times d \times \cos(\varphi)}$	频率, 天线振子数
速度分辨率	$\Delta V = \frac{\lambda}{2NT_s}$	频率

也更为严格(见表3)。

3 通感融合网络架构

通感融合网络需要在现有移动通信网络架构的基础上,通过新增功能实体与接口,实现感知功能的平滑引入与端到端能力交付。

通感融合网络端到端架构^[2-5]如图1所示,主要网元功能说明如下。

a) AAU:作为通感融合的射频前端,主要功能是实现通信与感知信号的一体化收发,并支持基于RTK的AISU精准工参测量,为高精度感知提供准确的位置基准。

表2 5G-A通感网络指标体系

场景	置信度/%	位置精度		速度精度		感知分辨率		最大感知服务时延/ms	刷新率/s	漏检率/%	虚警率/%
		水平/m	垂直/m	水平/(m/s)	垂直/(m/s)	位置(水平/垂直)/m	速度(水平/垂直)/(m/s)				
无人机轨迹跟踪	95	1~2	1~2	1~2	1~2	1	1	100~1 000	≤1	≤5	≤5
无人机入侵检测	95	≤10	≤10	-	-	10	5	≤1 000	≤1	≤5	≤5

表3 6G通感网络指标体系

场景	置信度/%	位置估计精度		速度估计精度		感知分辨率		最大感知服务时延/ms	刷新率/s	漏检率/%	误检率/%
		水平/m	垂直/m	水平/(m/s)	垂直/(m/s)	位置(水平/垂直)/m	速度(水平/垂直)/(m/s)				
无人机轨迹跟踪	≥90	1~2	1~2	3~5	3~5	-	-	100~1 000	≤1	≤5	≤5
无人机入侵检测	≥95	≤10	≤10	-	-	[10]	[≥5]	[≤1 000]	[≤1]	[≤5]	[≤5]
无人机起飞降落	[95]	[0.1]	[0.1]	[1]	[1]	[0.5]	[1]	[100~500]	[0.2]	[5]	[5]
低空高风险场景	99.99	≤50	50	5	5	10	0.5	≤100	0.1~1	0.1	1

注:[]中指标作为当前标准版本建议值,后续仍会进行讨论更新。

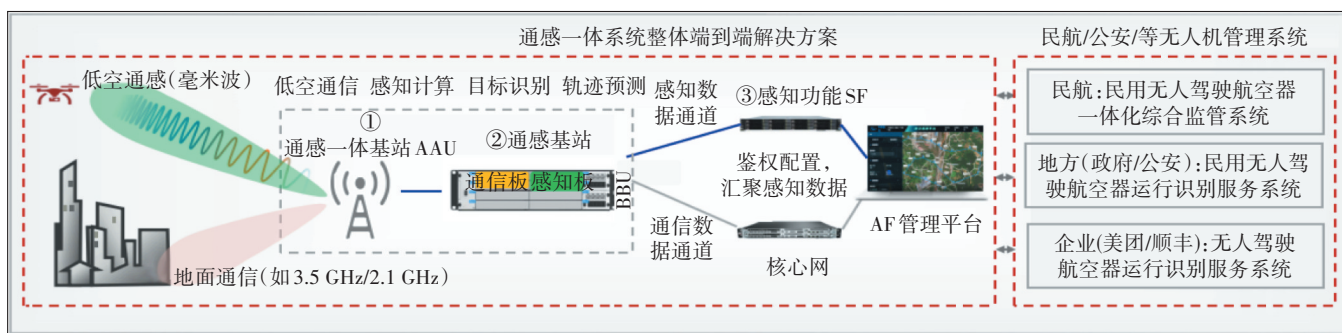


图1 6G网络架构示意

b) 感知板:主要功能是处理感知信号和感知数据。如果要想实现通感融合处理,需要在传统基站BBU新增感知板。根据在网络中地位的不同,BBU又分为Master BBU和Slave BBU(见图2)。其中,Master BBU管理一组Slave BBU,实现小区间去重关联、轨迹融合和感知结果汇聚上报;Slave BBU实现感知数据处理、

目标识别以及感知结果上报Master BBU。

c) 感知SF:新增的感知控制面网元,主要功能是感知业务控制和数据汇聚转发。该网元需要新增服务器硬件,部署在机房。SF是核心网设备,目前一个SF可以管理3 000个左右的BBU并且有扩充空间。SF南向接口接入感知基站,SF北向接口接入垂直行业业

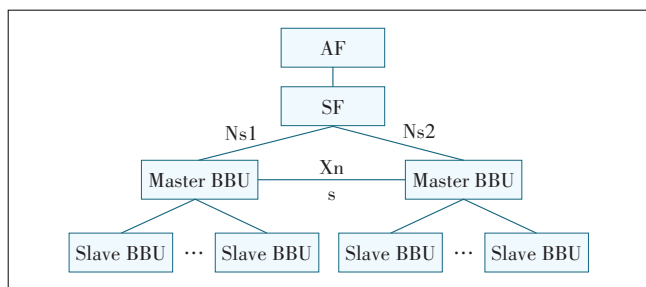


图2 Master BBU和Slave BBU组网示意

务监管平台AF。

d) 感知AF:作为通感网络面向行业应用的开放入口,负责对接外部数据应用方,提供感知数据信息服务,支持不同行业的应用。

4 通感融合关键技术分析

通感融合属于通信技术和感知技术的融合创新,通过多要素共享、多频段协同、多节点协作等思想,实现一套设备同时支持通信和感知能力,一网两用提质增效。通感融合涉及到的关键技术比较多,本章以“协同”为核心,重点介绍波形协同、组网频率规划以及多站、多频、多源等协同融合方案技术^[10-16]。

4.1 通感融合波形协同方案

波形设计是通感融合物理层的核心技术。通感融合波形协同方案采用脉冲波与连续波结合的方式,充分发挥雷达系统中脉冲波与通信系统中连续波各自的特性,实现2种波形的优势互补。该方案支持波形的灵活配置,能够满足多样化场景需求,具备广覆盖、无盲区的优良特性^[13-15]。

脉冲波作为传统雷达的常用波形,具有能量集中、感知精度高、覆盖距离远的特点,但探测近处物体存在盲区;连续波作为通信信号的常用波形,具有持续收发、无近距盲区的特点,适合近距离覆盖,可以有效弥补脉冲波的近场盲区(见图3)。因此,通感融合采用“近场连续波+远场脉冲波”的波形协同方案,有效结合了通信与雷达的优势,其波形协同覆盖范围示意如图4所示。其中连续波选择类OFDM波形,对毫米波感知覆盖范围为0~300 m;脉冲波选择LFM波形,感知范围为200~1 000 m。

4.2 通感融合频率组网规划

网络感知性能与“感知小区带宽”及“感知SNR”2个参数密切相关,更大的感知带宽和更高的SNR都有利于获得更好的感知位置精度。在总带宽一定的情况下,组网方案需要在感知带宽和SNR 2个参数间寻求合理的折中。

以毫米波频段总带宽为800 MHz的标准连片组网场景为例,对8×100 MHz和15×50 MHz这2种频分方案进行仿真评估,基站拓扑结构分别如图5和图6所示。8×100 MHz频分组网频率复用原则为同站小区异频、邻小区异频、二层邻小区对打/同向时异频;15×50 MHz频分组网频率复用原则为同站小区异频、邻小区异频、二层所有邻小区异频、三层邻小区对打异频。

当干扰超过门限时,可以通过干扰抑制(主要方式为波束规划)进一步提升性能。8频分(干扰抑制关)、8频分(干扰抑制开)和15频分3种组网配置下的感知仿真性能如表4所示。从仿真数据看,当开启干扰抑制开关时,8频分(干扰抑制开)和15频分2种配

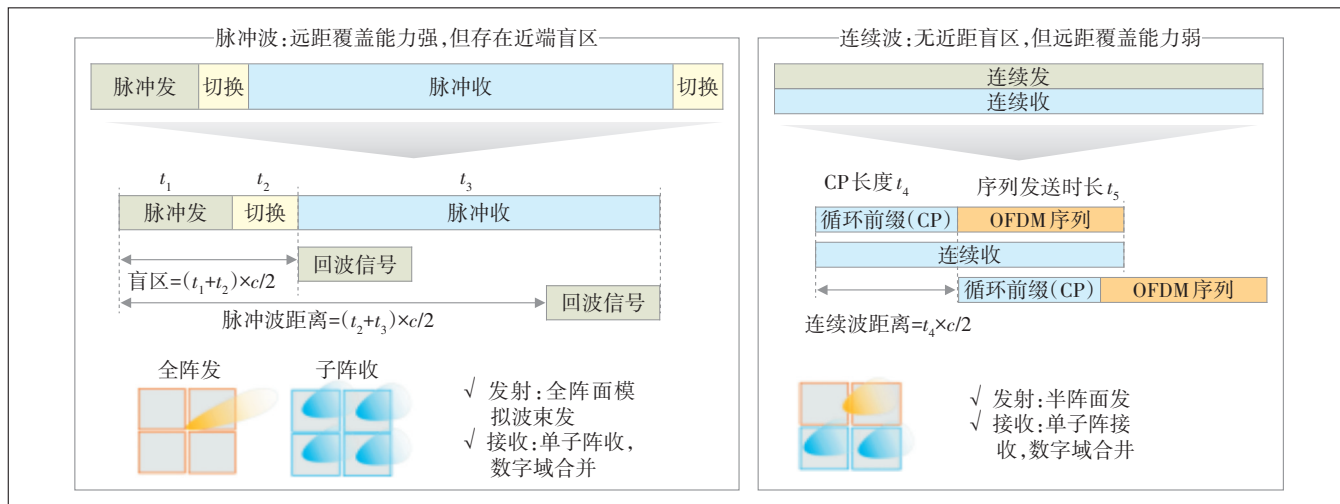


图3 脉冲波和连续波波形方案

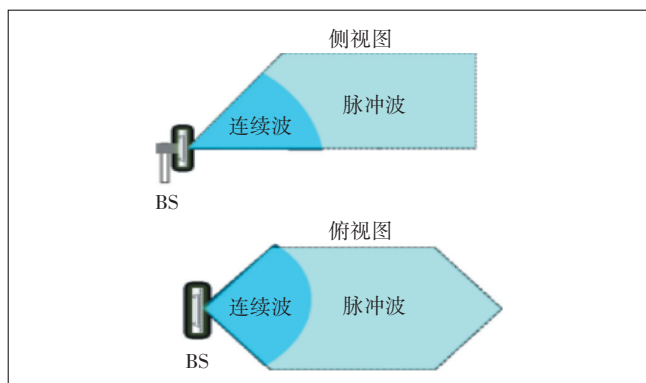


图4 波形协同覆盖范围示意

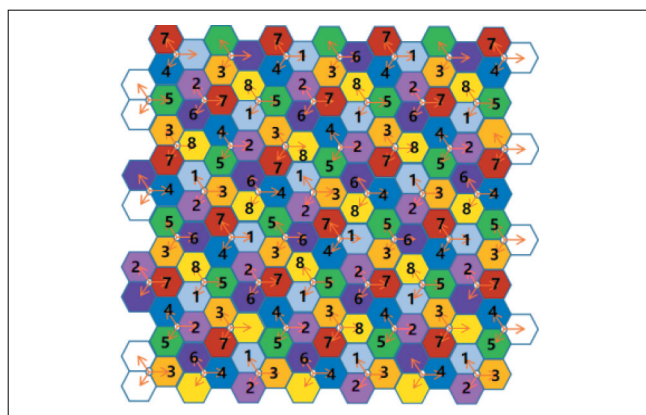


图5 mod8 频分的基站拓扑结构示意图

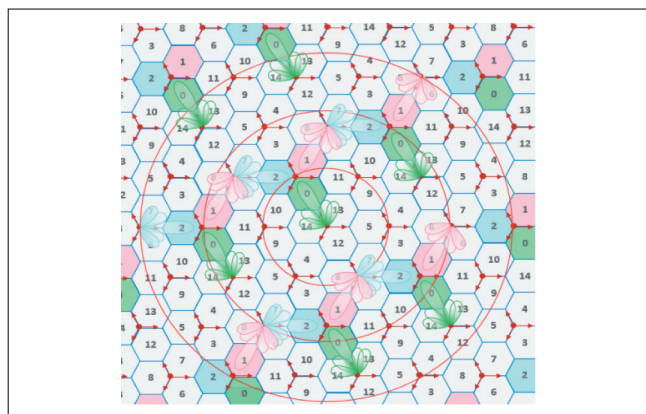


图6 mod15 频分的基站拓扑结构示意图

置的性能差别不大。在具体部署时可以根据具体场景考虑差异化方案,对精度要求高的场景可采用15频分方案,对分辨率要求高的场景可采用8频分方案。

4.3 通感融合多频融合方案

单频感知存在带宽有限、不能同时兼顾大范围扫描和高精度跟踪、易受主动干扰等问题;同时,不同频

表4 不同组网配置下的通感网络性能对比

仿真用例	站间距	SNR/dB		水平距离精度/m		垂直距离精度/m		速度精度/(m/s)	
		边缘	平均	边缘	平均	边缘	平均	边缘	平均
8 频分 (干扰抑制关)	1 km	27.21	24.46	4.1	2.08	5.46	2.77	0.041	0.024
8 频分 (干扰抑制开)		27.54	24.66	3.81	2	5.08	2.66	0.037	0.024
15 频分		27.8	24.22	4.27	2.13	5.7	2.84	0.04	0.025

段的感知能力不同,适用场景不同,单一频段感知不能满足所有需求。中低频叠加毫米波多频融合方案可充分利用不同频段特性,拓展感知范围,系统实现从远距预警到近距精控的无缝覆盖与能力互补,构建层次化、智能化的全域感知网络,增加适用场景^[13-15]。

在高低频通感协同组网方案中,利用中低频覆盖范围广的优势,构建起大范围、高鲁棒性的感知扫描与预警区域(见图7)。这种融合感知能力能够更早、更可靠地识别远距离非法目标入侵行为,为整体安防体系提供宝贵的先期预警时间窗口。利用毫米波感知精度更高的优势,实现辅助无人机在复杂环境下的精准起降、场区安全监控以及对关键区域微小移动目标的持续监视等,显著提升近距态势感知与操作保障水平。

4.4 通感融合多站融合方案

单站感知受限于覆盖盲区、分辨率不足等因素,无法独立满足低空全域监管需求。同时,多径效应敏感,导致城市楼宇反射造成虚假目标,提高了虚警率,低速/静止物体识别率骤降,提高了漏检率。多站协同通过空间分集与数据融合,突破单站物理极限,实现低空全域无缝感知与动态资源优化。

如图8(a)所示,在覆盖交叠区域,可通过多站融合提升感知精度。对于非合作感知目标,多站点对同一位置的感知精度可能会存在较大差异,导致感知坐标失真。在 Master BBU 对多站上报结果进行同一性分析,利用回波信干噪比等参数构建融合算法,获得更精确的融合感知结果。

如图8(b)所示,在覆盖遮挡区域,可通过多站融合降低虚警率和漏检率。在密集城区等遮挡较多的区域,多径反射、地面和建筑物的强反射会引入大量的杂波,使得虚警率和漏检率这2个关键的感知指标

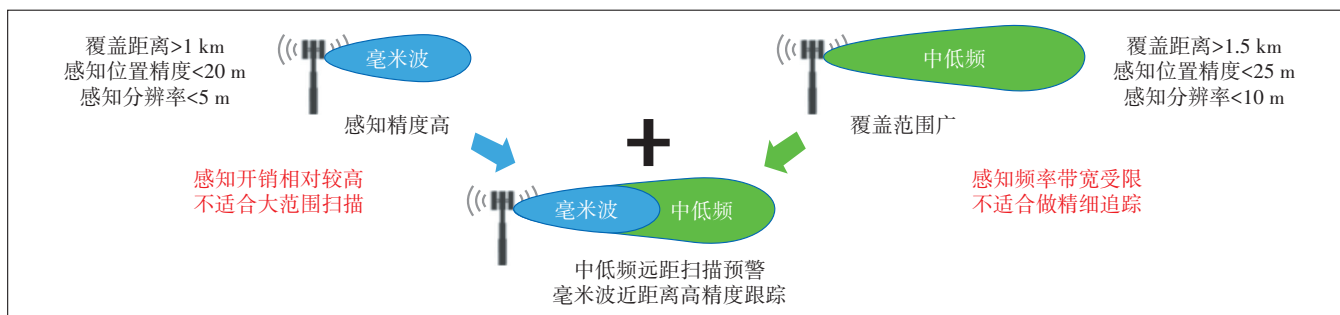


图7 高低频通感协同组网方案

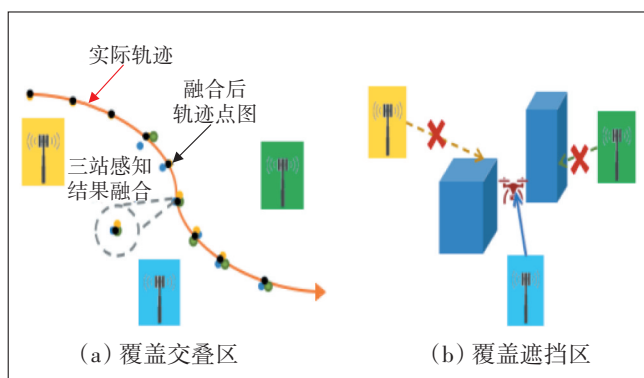


图8 通感多站协同组网方案

恶化。结合多站上报的结果, Master BBU 更容易判断出错误识别目标, 降低虚警率, 也能避免目标被遮挡, 降低漏检率。

4.5 通感融合多源融合方案

单一感知技术的局限性明显, 如 5G-A/6G 通感融合在近地感知方面精度与检测率不足、TDOA 设备受限于被检测目标信号发射、RID 设备需无人机主动上报、摄像头感知环境依赖性强及深度信息不足、雷达系统存在近距离盲区及功率受限等问题(见表5)。在实际部署时, 需要将通感基站、雷达系统、摄像头视频等多种感知技术整合, 优势互补, 以提升感知系统的精度与鲁棒性。

在多源融合通感组网中, 感知结果融合是各个感知技术独立进行感知, 并在服务平台进行数据汇总, 感知结果由多系统综合研判, 实现“多位一体”全天候无死角低空防护体系。通感多源融合组网如图9所示, 各组成系统的定位如下。

a) 通感融合基站: 由 Master BBU 及 Slave BBU 构建感知能力系统, 进行全域范围扫描, 及时发现与追踪。具备大规模覆盖下的综合经济效益和长期运营成本优势, 预计成本会随着 5G-A/6G 网络的普及和规

表5 不同感知技术优劣势对比

对比项目	技术原理	技术优劣势	技术演进	频谱成本	安装成本	运维成本	适用领域
通感融合 (5G-A/6G)	主动感知	优: 广域连续覆盖、通感融合; 劣: 超多目标感知算力制约	3GPP 持续推进, 具备统一标准及技术商用迭代能力	近乎为零(共享运营商商用频谱)	低(与现网基站共址, 节省土建、传输、电力成本)	低(与通信基站共维共优)	在大范围内对全目标进行搜索和初步跟踪
雷达 (Radar)	主动感知	优: 范围大、精度高、响应快; 劣: 近场盲区、组网能力受限	无统一技术联盟	高(需申请专用频段, 可能有许可费)	高(需新建铁塔/塔桅、独立电力、传输线路)	高(需专业团队定期校准维护)	对全目标在超远距离预警并做精准跟踪
TDOA	无线监听	优: 部署灵活, 无辐射信号; 劣: 依赖基站密度, 无法抗静默	无统一技术联盟, 依赖无人机控制信号等	零(仅接收, 不发射)	中(需租赁路灯杆等社会资源, 部署供电与回传网络)	中(节点多, 维护工作量大)	在小范围内对非静默目标进行电磁监测, 搜索和跟踪目标
RID	无人机上报解析	优: 部署灵活, 无辐射信号, 数量少; 劣: 依赖无人机主动明文上报	无统一技术联盟, 依赖对无人机信息上报要求的标准	零(仅接收, 不发射)	略低(需租赁路灯杆等社会资源, 部署供电与回传网络)	略低(节点较少, 独立维护)	对合作目标做路径等飞行信息确认
光电摄像头	视觉捕捉	优: 精准识别, 无电磁干扰; 劣: FOV 小、难扫描、天气影响大	无统一技术联盟	零(光学设备)	取决于需求数量(需新建立杆、取电、光纤回传节点)	取决于需求数量(独立维护)	确认目标后, 做进一步的识别

模效应而持续下降。

b) 摄像头: 核心区域锁定, 近距离精确识别。具备高分辨率视觉捕捉与目标身份核验能力, 将在其擅长的特定领域作为重要补充, 共同构建完整的低空感知网络。

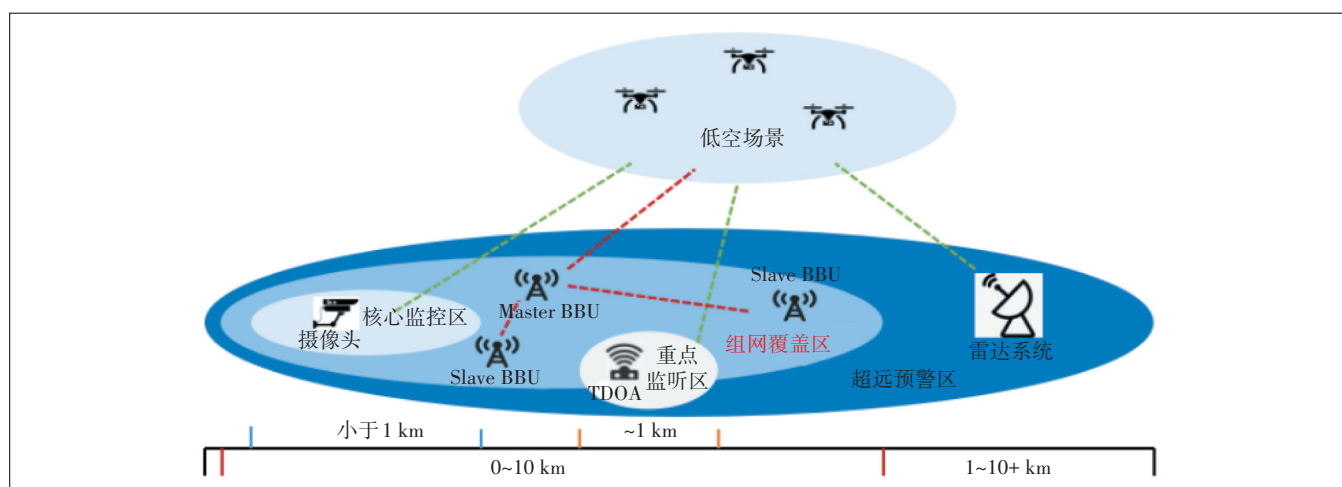


图9 通感多源融合组网

c) TDMA:重点区域盯防,全时电磁监测。具备部署灵活、无主动辐射的技术优势,有效监听各来源电磁信号。

d) 雷达系统:超远距离预警,重点目标跟踪。具备全天候、全天时工作特性,可为特定目标追踪提供可靠保障。

5 结束语

本文分析了通感融合的业务需求,梳理了其他标标准化进展及指标体系的演进,给出通感融合部署架构,并重点分析了通感融合关键技术解决方案。面向未来,通感技术将向更加深度的多源融合、空天地海全域感知、通感智算能力增强等方向发展,以实现6G构建万物智联社会的需求。

参考文献:

- [1] 尹浩,黄宇红,韩林丛,等. 6G 通信一感知一计算融合网络的思考[J]. 中国科学:信息科学,2023,53(9):1838-1842.
- [2] ITU. Draft new recommendation ITU-R M.[IMT.framework for 2030 and beyond] - framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond; ITU-R SG05 [R/OL]. <https://www.itu.int/md/R19-SG05-C-0131>.
- [3] 中国联合网络通信有限公司研究院. 中国联通 6G 白皮书(V1.0) [R/OL]. <http://221.179.172.81/images/20210322/30691616408868127.pdf>.
- [4] 中国联通研究院. 中国联通 6G 业务白皮书 [R/OL]. <https://www.13115299.s21i.faiusr.com/61/1/ABUIABA9GAAG7ua4pQYoxfPZ4gY.pdf>.
- [5] 中国联通. 中国联通 6G 通感智算一体化无线网络白皮书 [R/OL]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/706910012>.
- [6] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书[R/OL]. https://wenku.baidu.com/view/bbf428be920590c69ec3d5bbfd0a79563c1ed48c.html?_wks_1785915339580.
- [7] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R/OL]. <https://www.docin.com/p-4168061080.html>.
- [8] IMT-2030(6G)推进组. 通感一体网络架构设计及关键技术研究报告[R/OL]. <https://www.docin.com/p-4787937049.html>.
- [9] IMT-2030(6G)推进组. 6G 通信感知一体化协作感知关键技术前沿报告[R/OL]. <https://www.sgpjbg.com/baogao/182321.html>.
- [10] 段向阳,杨立,夏树强,等. 通感算智一体化技术发展模式[J]. 电信科学,2022,38(3):37-48.
- [11] 杨文彬,邱裕鹤,苏郁. 面向网络化通信感知一体化的立体覆盖方法[J]. 中兴通信技术,2025,31(1):28-38.
- [12] 中国移动通信研究院,华为技术有限公司. 算力感知网络技术白皮书[R/OL]. https://wenku.baidu.com/view/76d92f5f26c52cc58bd63186bceb19e8b8f6ec8a.html?_wks_1785917504889.
- [13] 杨艳,李福昌,张忠皓. 6G 通感融合的愿景及典型技术探讨[J]. 邮电设计技术,2021(12):18-22.
- [14] 杨艳,张忠皓,李福昌. 6G 通感一体化组网理念及关键架构研究[J]. 移动通信,2023,47(9):11-16.
- [15] 杨艳,张忠皓,李福昌. 通感一体化融合架构及关键技术[J]. 移动通信,2022,46(5):52-55.
- [16] 李培,曹亘,李福昌. 通信感知一体化感知目标移动性管理研究[J]. 邮电设计技术,2024(7):18-22.

作者简介:

李福昌,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为5G-A/6G移动通信系统;蒋振伟,高级工程师,硕士,主要从事无线网络优化及5G-A相关技术研究工作;赵明阳,工程师,博士,主要研究方向为5G-A/6G移动通信系统;代锋利,工程师,学士,主要从事无线网络优化及5G-A相关技术研究工作;杨艳,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为5G-A/6G移动通信系统。