

基于毫米波的5G-A 通感一体化技术综述

Review of 5G-A ISAC Technology Based on Millimeter Wave

王璐璐,杨艳,李培,张琳,李福昌(中国联通研究院,北京100048)

Wang Lulu, Yang Yan, Li Pei, Zhang Lin, Li Fuchang (China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

摘要:

面向无人机监管、水域航道监管等新业务的发展需求,基于毫米波的通信感知一体化技术可赋能5G-A网络从互通信息到感知探测的能力扩展。从通信感知一体化的应用场景需求出发,介绍了感知的关键指标,重点分析了通感一体化网络的关键空口技术、网络架构、组网方案,给出了毫米波通感一体化试点测试情况,最后对其未来进行了展望。

关键词:

毫米波;通感一体化;组网

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.01.005

文章编号:1007-3043(2025)01-0027-06

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:

Based on the development requirements of new businesses such as UAV supervision and water channel supervision, the mmwave-based ISAC technology enables the expansion of the capability of 5G-A network from information exchange to perception detection. Starting from the application scenario requirements of ISAC, the key indicators of sensing performance are introduced, the key air interface technology, network architecture and networking scheme of ISAC network are analyzed, and the pilot test situation of millimeter wave ISAC network is presented. Finally, the future of millimeter wave ISAC technology is prospected.

Keywords:

Millimeter wave; ISAC; Networking

引用格式:王璐璐,杨艳,李培,等. 基于毫米波的5G-A通感一体化技术综述[J]. 邮电设计技术,2025(1):27-32.

0 引言

2024年全国两会上,低空经济首次被写入政府工作报告^[1]。党的二十届三中全会也明确提出要发展通用航空和低空经济^[1]。低空经济作为新质生产力的典型代表,为经济发展带来了蓬勃驱动力。各地政府也持续积极出台相关政策,促进低空经济进入高速发展阶段。随着《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》等

政策法规的陆续施行^[2],如何切实落实法规要求,利用新型信息通信技术,保障常态化无人机低空飞行的可靠监管,成为确保低空飞行安全可控的重要一环。要实现低空监管大范围全覆盖,传统的单一雷达方案存在一些限制,例如城区遮挡较多、需要大量的雷达站址和建设成本、功率大、雷达与通信信号互相干扰、频段难申请等。因此,有必要研究通信与雷达深度融合的技术,为低空监管提供强力支持。

通信感知一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)简称通感融合或通感一体化,是5G-A/6G

收稿日期:2024-12-05

的重要创新技术之一,该技术基于软硬件的资源共享与协同,可在同一套基站设备、同一张网络中同时具备通信与感知功能,实现一网两用。通过建设规模化的低空监管通感网络,可以实现地面与低空的一体化覆盖。通过打造数字化监视服务平台,为无人机监管、反制提供信息技术支撑。但与此同时,当前通感一体化技术研究存在技术路线不统一、组网应用难度大等问题,需要进一步讨论和分析技术难题,突破关键核心技术,形成技术标准,为通感一体化基础设施建设奠定基础。

本文首先探讨了通感一体化技术的应用场景,分析了基于毫米波的通信与感知的指标要求;然后探讨了毫米波通感一体化空口波形技术与资源复用方案、网络架构以及组网技术,并给出了试验网测试结论;最后对未来进行了展望。

1 通感一体化应用场景与指标

1.1 应用场景

通感一体化技术的应用场景不仅限于低空经济或无人机监管^[3],其在水域船只监管、道路车辆监管等场景中同样具有广阔的应用前景。这些场景对通信和感知的需求各不相同,但都需要稳定、可靠、高精度的技术支持。

1.1.1 低空无人机监管

从通信需求考虑,无人机物流等应用需要网络的实时指引,无人机与地面控制中心之间需要稳定、连续的通信链路,以确保指令的准确传达和无人机状态的实时反馈。通感网络需要具备高速率、低时延和广覆盖的特性,以支持高清视频传输、实时监控和远程控制连续不中断等功能。

从感知需求考虑,一方面,地面感知系统需要具备高灵敏度、高分辨率特性,实时有效地监测和感知无人机的飞行轨迹、速度、高度等状态,以确保飞行安全。另一方面,机场、电网、政府等园区对安全有很高的要求^[4],无人机非法入侵将带来安全事故、机密泄露等问题。通感网络需要具备精准定位和识别的能力,以防非法无人机入侵等威胁安全的行为。

1.1.2 水域船只监管

从通信需求考虑,通感网络需要具备抗干扰、抗衰减特性,以确保在复杂水域环境中仍能保持稳定通信,支持遇险求救、航线导引、碰撞预警等服务。

从感知需求考虑,通过在岸边部署通感一体化设

备,实现对航道、海域船舶的全天候监控和感知,有效预防搁浅、走私等事故发生^[5],保障船舶安全有序通行。

1.1.3 道路车辆监管

从通信需求考虑,通感网络需要具备高可靠、低时延的特性,以支持车路协同信息的传输,而车辆之间的通信能力(V2X)可支持车辆间协同行驶和避障。

从感知需求考虑,通感网络需要对车辆的行驶轨迹、速度、位置等进行实时监测和感知,以确保交通安全。基于通感一体化技术可实现对道路环境的全面感知,构建高精度地图数字模型,监督高速公路、铁路上的非法入侵^[6],为驾驶员提供前方碰撞预警和盲区预警,降低事故发生率。

1.2 通信感知指标

通信即互通信息,指由信源发出无线电信号之后,信宿接收到正确信息。常见的基站和手机在通信时都可以充当信源和信宿的角色。通信系统的性能指标主要包括数据传输速率、频谱效率、传输可靠性、时延、误码率等。香农公式定义了通信信道的极限信息传输速率,信道带宽、信噪比是制约通信速率的最重要的影响因素。通信指标在5G系统中已经有充分的讨论和标准化,本文重点对5G-A网络中新增的感知能力开展研究。

感知的基本原理是由感知系统发射特定频率的无线电信号,并通过接收目标反射的回波信号来探测目标的距离、速度、角度等。

a) 感知测距通过发送信号与接收信号的时间差实现距离计算。电磁波信号以光速传播,感知系统通过电磁波往返目标的时间来计算目标与发射天线之间的距离。为确保测量的准确性,应尽量提升感知信噪比,增大发射信号带宽。

b) 感知测速主要通过多普勒效应原理实现。当目标向感知天线靠近时,反射信号频率将高于发射机频率,反之,当目标远离天线时,反射信号频率将低于发射机频率,通过测量回波信号的多普勒频移可计算出目标的速度,其影响因素包括波长、相干处理时间和感知信噪比^[7]。

c) 感知测角利用多天线不同波束接收回波信号之间的相位差进行测量,其影响因素包括波长、天线间距、孔径等^[8]。

感知系统测距、测速和测角的原理及主要的影响因素为其感知能力优化和升级提供了理论依据。评

价感知能力的主要性能指标包括精度、分辨率、探测范围、漏检率、虚警率等^[9]。

a) 精度表示测量结果与实际目标的差异,代表了测量的准确程度。

b) 分辨率表示能够区分出2个物体的最小距离,代表了感知系统能够区分2个靠近目标的能力。

c) 探测范围表示感知系统能够有效工作的最大探测距离。

d) 虚警率表示非目标信号被错误地判定为目标信号的概率,即在雷达探测区域内没有目标存在时,感知系统错误地发出警报,认为有目标存在的比例。

e) 漏检率表示感知系统未能探测到实际存在的目标的概率,即感知探测范围内确实有目标存在时,感知系统却未能发出警报,认为没有目标存在的比例。

毫米波频段与Sub 6 GHz频段相比具有更短的波长、更大的信道带宽、更大阵列天线和更窄的天线波束,这些特点均有利于提升感知测量的性能,并提供高速率、低时延、抗干扰的通信能力,可作为通感一体化技术应用的候选频段。

2 通感一体化空口技术

2.1 通感一体化波形技术

通信与感知均采用无线电信号的形式来传递信息。为了实现高精度的通信感知一体化服务,共享频谱和软硬件资源,首先需要考虑波形的设计。

传统的无线通信波形的设计目标主要是提高频谱效率、抗干扰能力、吞吐量等。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术可以将传输的数据分配到互相正交的子频域信道上进行独立传输,具备频谱效率高、抗多径衰落、支持多用户接入等特点,因此4G/5G通信基站采用OFDM作为其通信波形。

OFDM可作为连续波信号用于感知系统。其优势在于OFDM技术通过子载波间的正交性来消除子载波间的干扰,抗干扰能力强,灵活性高,天线具备同时收发能力,且具备独立的距离和多普勒处理能力;缺点在于OFDM系统对频率偏移和相位噪声非常敏感,精准同步要求高,信号峰均比较高,这导致其探测距离受限,可作为连续波用于近距离感知。

线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)波形是被广泛应用于雷达系统中的一种波形。对于5G-

A来说,其远距离覆盖和精准高效的目标检测是感知探测不可或缺的能力,可作为连续波或脉冲波应用于通感系统中。LFM可用于增大感知线性调频信号占用的频带宽度,加大感知距离,同时线性调频信号的匹配滤波器在多普勒频移较大的情况下仍可以实现脉冲压缩,提升对速度的感知探测能力。当LFM作为脉冲波应用时,可实现远端覆盖,但不能同时进行信号收发,存在近端盲区的问题,需要感知系统对发射天线近端补盲。当LFM作为连续波应用于通感系统时,可实现近端感知。

因此,5G-A通感一体化系统可采用连续波与脉冲波复用的方式,由脉冲波实现远端覆盖,由连续波实现近端补盲(见图1)。基于OFDM与LFM的波形特征和能力,通过时分/频分/空分/码分资源复用等优化设计,可在一套系统中同时满足通信和感知的技术目标,保证近端和远端的通感一体化覆盖能力^[10]。

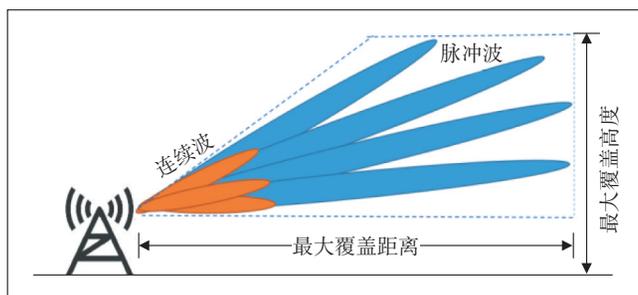


图1 通感一体化波形覆盖范围示意

2.2 资源复用

毫米波频段具备大带宽、大规模天线阵列的优势,支持灵活帧结构配置,可支持通信与感知信号采用时分、频分、空分资源复用或多种资源复用协同设计的方式。

在采用时分复用的情况下,感知/通信信号可以占用全部带宽,这有利于提升感知测量的精度和分辨率。复用方式可采用符号级的时分复用和时隙级的时分复用。在设计帧结构时,应结合通信和感知信号的特征,设置足够的保护带以避免不同信号间、相同信号的上下行发送间的干扰。在组网应用时,更要设计避免不同基站之间的互相干扰。对于脉冲波信号,若感知信号的发射以及其反射回波的接收是在同一基站,帧结构设计也应为反射回波预留足够的时域资源。图2所示是一个通感一体化帧结构设计的例子,在毫米波的DDDSU帧结构内配置一组感知信号,感知信号共占用24个符号,可采用全脉冲波、全连续波或

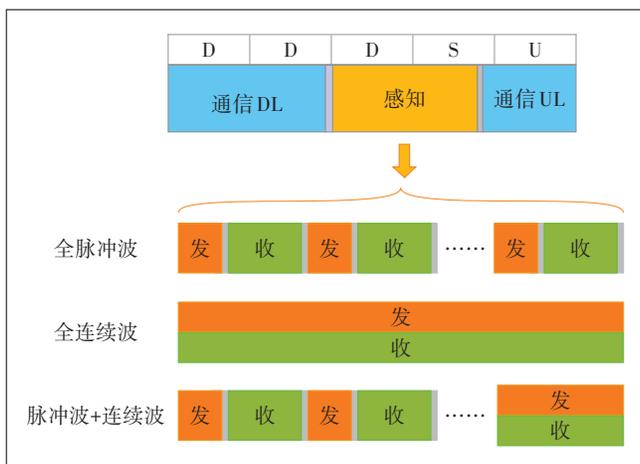


图2 通感一体化帧结构示例

者脉冲波与连续波组合配置的方式,以适应不同的应用场景。

在频分复用中,通信与感知采用不同的频域资源,多站组网时不会互相干扰,容易实现。但由于带宽资源是影响通信速率和感知精度/分辨率的重要因素,当频分复用因子较大时,通信和感知的性能将受到影响。

空分复用将通信信号与感知信号分配给不同的波束,此方式可利用全部的时频资源,理论上可以提升性能。但在毫米波频段采用窄波束的情况下,发送波束和接收波束的方向较多,情况复杂,且通信波束对感知波束的干扰较多,给感知波束的回波信号接收带来挑战,波束管理对软件算法要求较高,资源开销较大。

3 通感一体化网络架构

现有5G通信系统不具备感知功能(Sensing Function, SF),若要实现通感一体化,5G系统需要在核心网侧设计并增加一个SF,负责感知功能管控、感知数据处理、感知能力开放和安全等功能。SF可作为独立网元,或与现有网元(如位置管理网元)合设部署。根据感知网元与5G-A核心网整体的耦合程度,通感融合的网络架构可分为紧耦合和松耦合2种类型。

在紧耦合架构中,感知能力将加入现有的通信核心网架构中。通过SF与核心网的紧密耦合,可最大化利用5GC现有功能、接口和协议来实现感知能力的使能和对外开放,具备较好的后向兼容性,可作为广域场景的组网架构。

在松耦合架构中,SF与核心网解耦,在无需与

5GC交互或较少交互的情况下,SF通过与RAN侧基站之间的接口,独立完成对RAN侧的感知功能管理和测量数据处理,并将感知结果输出给应用功能(Application Function, AF)。AF作为提出感知需求的功能实体,也可实现感知结果的展示。面向局域网或专网场景,松耦合架构具备更好的灵活部署特性。SF本地化部署可满足数据不出园区的安全隐私需求以及企业对于数据安全和处理时延的要求。

4 通感一体化组网技术

4.1 感知模式

通感一体化组网方案首先要考虑基站的感知收发模式。根据感知收发端是否为同一基站设备,通感一体化的无线感知模式可分为单站感知和多站协同感知。

多站协同感知模式,又称A发B收,指在不同的基站上完成发送感知信号与接收反射回波信号。通过协同感知的模式^[11],一个基站发射信号之后,覆盖范围内的多个基站可以接收到反射的感知信号。通过多个基站对数据的联合处理,可扩大通信和感知的覆盖范围,提高对感知信号的接收性能。A发B收的感知模式对基站设备之间的同步要求较高,对现在的5G网络来说,A发B收的挑战较大。

单站感知模式,又称A发A收,指在同一个基站上完成发送感知信号并接收反射回波信号。由于信号的发射和接收是在同一个基站上实现的,不需要其他基站的协同处理,因此基站可以完成对通信和感知数据的初步处理,此模式是现在5G-A主要考虑的感知模式。

4.2 高低频协同组网

高低频协同组网方式利用低频段和高频段的不同特性,实现了更广泛、更高效的通信和感知覆盖。基于通感业务对5G-A网络性能的高要求,协同高、中、低频率,研究不同频段信号在应用政策、覆盖范围、感知性能、通信速率等方面的差异,优势互补,深度融合,形成高效协同的分层覆盖。低频段具有传播损耗小、覆盖距离远的优点,主要用于宏蜂窝广域覆盖和提供基本的通信服务。高频段具备大带宽的特点,可实现高速率低时延的通信服务和高精度感知功能。

高中低频协同组网是提升频谱应用效率的重要手段。基于资源整合与统一调度,该组网方式可充分

发挥低频段覆盖优势和高频段大带宽优势,提升系统的整体性能。在系统设计上,高低频协同组网还需充分考虑和解决频谱资源的分配和管理问题,避免不同频段之间的干扰,研究灵活调整通信和感知资源分配的方案,通过不断的技术创新和研究,实现通信与感知能力的匹配,进而达到5G-A通感一体化网络的弹性能力要求。

4.3 干扰抑制

干扰抑制方案是确保通感一体化系统性能稳定、提高目标检测与跟踪精度的关键。基站收到的回波信号强度越高、干扰越小,则感知信噪比越高,感知精度越高。一些常用的感知干扰抑制方案如下。

通感一体化基站多站组网存在复杂的信号干扰,需要在设备和网络部署时采取一定的干扰抑制手段。通过异频组网的方式,合理分配邻区频域资源,可消除邻站之间的同频干扰。异频组网的高复用因子越大,则干扰越小,单站可用的感知带宽越小,感知精度和分辨率也随之降低。因此可结合毫米波频段的波束赋形技术、灵活帧结构和多波形混合组网等方式,从多个维度进行不同配置,实现低复用因子的异频组网设计,获取感知带宽和干扰消除的最优解。

其次,设计自干扰消除的软硬件架构,抑制发射天线泄露到接收天线的干扰信号强度,通过低副瓣天线等技术,增强通感一体化基站对目标反射信号的接收能力。

最后,利用智能算法对实时信道波束信息和空间信息进行分析处理,深入分析通感一体化系统中的杂波特性,研究具备自适应能力的干扰置零方案,解决通感融合系统中复杂的杂波干扰。

4.4 移动性管理

在多站组网场景下,对于A发A收的通感组网模式,各小区的感知信号收发由本小区完成。感知目标(如无人机)在多个小区间移动时,若无法选择合适的通感基站完成跨小区切换,信号轨迹连续性可能会受到影响,甚至发生轨迹跟踪中断的情况。

轨迹接续技术在通感一体化中的应用主要体现在对目标对象的连续追踪和监测上。通过集成先进的感知和数据处理算法,通感一体化系统能够实时地传输信息,并实现目标轨迹的无缝接续。在小区覆盖的交叠区域内,通过BBU的站间协同处理,可实现感知轨迹的连续性和轨迹去重处理,保障感知目标在多小区之间的移动性管理(见图3)。

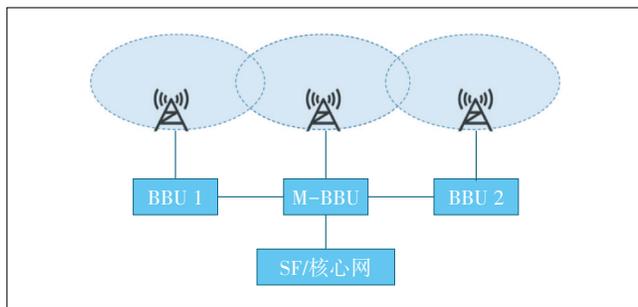


图3 通感一体化BBU站间协同示例

5 通感一体化测试

为了测试通感一体化技术在实际应用中的可行性和稳定性,在某园区选取了具有代表性的低空和水域环境,以现场试验的方式评估通感一体化技术在真实环境下的表现。

针对低空场景,在某园区内搭建三站三小区的组网试验环境,实现5G-A毫米波低空安防规模组网试点,对复杂轨迹识别、轨迹接续、干扰消除、基站盲区监测等展开测试。无人机在300 m以内的低空环境下,按照五角星的轨迹飞行。试验结果表明5G-A毫米波通感一体化基站对复杂图形具备识别能力,无人机轨迹清晰无断点,通过多基站组网,可规避单站环境下的站顶识别盲区问题(见图4)。

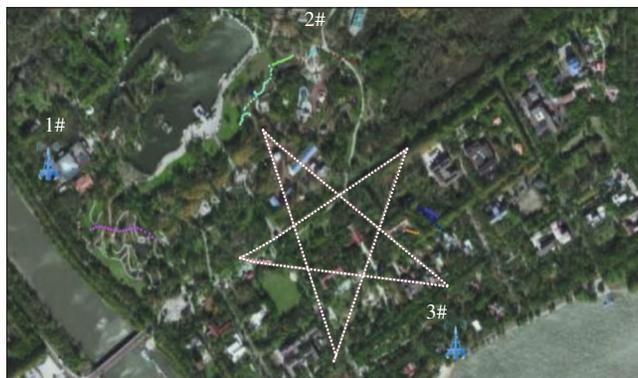


图4 某园区低空无人机通感测试

某航道船只检测试点将5G-A毫米波通感一体化技术能力扩展到内河航运场景,为航道管理、船舶运行提供更先进、更精准的保障手段。通过实时比对通感一体化检测数据与摄像头的数据可以看出,5G-A毫米波通感一体化技术可精准感知到船舶航行的轨迹、航速等(见图5)。试验结果表明船只侦测距离可达到1 km以上,监测精度达到亚米级。



图5 某航道通感一体化测试

6 结束语

通感融合是5G-A/6G的重要场景,具备较大的市场潜力^[12-16]。通信感知一体化系统通过一张网络实现通信和感知2种业务,基于共用频率、站址、软硬件资源等,实现一网两用,避免因2套设备同时存在而造成的资源浪费问题。本文从通感一体化的场景需求出发,探讨了毫米波通信感知一体化关键技术,并给出试点环境下的试验结果,通过现场测试为未来通信感知一体化应用提供技术支撑,推动通信技术向更高效、更智能的方向发展。目前,通信感知一体化技术还面临理论系统待完善、技术难点待突破、技术标准待统一等诸多挑战,后续还需要开展更深入的技术研究,为规模化商用奠定基础。

参考文献:

[1] 李珮. 低空经济兴起金融服务大有可为[N]. 金融时报, 2024-10-16(6).
[2] 高兴昌. 无人机侦测和反制技术综述[J]. 中国无线电, 2024(8): 50-53.
[3] 江聘, 郭博昊. 北京延庆无人机产业: 翱翔蓝天的经济新引擎[N]. 证券时报, 2024-10-24(A4).
[4] 杨晓光, 陈凯华. 国家安全视角下的人工智能风险与治理[J]. 国家治理, 2024(13): 49-53.
[5] 陈爱平. 5G“扬帆”赋能长三角智能航运[N]. 经济参考报, 2023-07-13(5).
[6] 郭京威. 基于通信技术的城市轨道交通信号控制系统研究[J]. 铁路采购与物流, 2024, 19(7): 53-55.

[7] 李沸乐, 杨文聪. 5G-A通感融合网络架构及演进研究[J]. 邮电设计技术, 2023(5): 33-38.
[8] 林祉秋, 张玖鹏, 闫实. 多基站协作通感一体化体系架构及关键技术研究[J]. 移动通信, 2024, 48(6): 52-60.
[9] 马晓萌, 冯舒文, 原昊, 等. 基于深度学习的雷达目标识别算法评估系统设计[J]. 遥测遥控, 2024, 45(3): 24-34.
[10] 曹明华, 周根学, 杨清, 等. OFDM-LFM无线光通信感知一体化系统及性能分析[J/OL]. [2024-10-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20240919.0844.012.html>.
[11] 李虎军. 基于感知通信一体化的中继系统与多节点协作感知技术[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
[12] 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.
[13] 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.
[14] 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.
[15] 杨艳, 张忠皓, 马静艳. 6G通信感知一体化架构与技术研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 1-4, 15.
[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:

王璐璐, 毕业于北京邮电大学, 工程师, 硕士, 主要从事无线通信技术研究工作; 杨艳, 毕业于北京邮电大学, 正高级工程师, 博士, 主要从事无线通信关键技术研究工作; 李培, 高级工程师, 硕士, 主要从事5G-A、6G无线接入关键技术研究、标准化研究工作; 张琳, 工程师, 硕士, 主要从事空地一体化、通信感知一体化关键技术研究工作; 李福昌, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事无线新技术研究、管理工作。