

从通信连续性到通感连续性: 通感一体化切换技术



From Communication Continuity to Communication-Sensing Continuity: Handover Technologies in ISAC Networks

焦志琨/Jiao Zhikun, 陈力/Chen Li

(中国科学技术大学, 中国 合肥 230026)
(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602004

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260422.1734.005>

网络出版日期: 2026-04-23

收稿日期: 2026-01-23

摘要: 通感一体化 (ISAC) 网络的发展促使切换技术从传统的“通信连续性”向“通信-感知双连续性”演进。从链路级与网络级两个维度系统梳理了 ISAC 切换关键技术。在链路级层面, 阐述了感知辅助切换与感知服务切换两种典型范式; 在网络级层面, 剖析了网络级感知切换与网络级 ISAC 切换的核心挑战, 提出了相应的感知切换流程, 并总结了用户关联的最新研究进展与未来方向。针对网络级感知场景, 借鉴通信切换方法, 设计了模糊感知切换算法, 仿真验证了其优越性能。相关工作可为 ISAC 网络的移动性管理提供理论参考与技术支撑。

关键词: 切换; 通信-感知双连续性; 用户关联; 模糊逻辑

Abstract: The development of Integrated Sensing and Communication (ISAC) networks drives the evolution of handover technology from traditional communication continuity to communication-sensing dual continuity. The key technologies of ISAC handover are systematically reviewed from both link-level and network-level perspectives. At the link level, two typical paradigms, namely sensing-assisted handover and sensing-service handover, are elaborated. At the network level, the core challenges of network-level sensing handover and network-level ISAC handover are analyzed, corresponding sensing handover procedures are proposed, and the latest research progress and future directions of user association are summarized. For network-level sensing scenarios, a fuzzy sensing-based handover algorithm is designed by drawing on communication handover methods, and its superior performance is verified through simulations. Theoretical reference and technical support for mobility management in ISAC networks are provided by the related work.

Keywords: handover; dual continuity of communication and sensing; user association; fuzzy logic

引用格式: 焦志琨, 陈力. 从通信连续性到通感连续性:通感一体化切换技术 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 18-26. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602004

Citation: Jiao Z K, Chen L. From communication continuity to communication-sensing continuity: handover technologies in ISAC networks [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 18-26. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602004

随着低空经济提升至国家战略新兴产业高度, 构建“广域立体覆盖”的低空网络已成为第6代移动通信系统(6G)的核心愿景之一。在物流配送、空中交通及应急救援等低空应用场景中, 无人机、电动垂直起降飞机(eVTOL)等航空器的常态化作业, 本质上依赖于高质量的通信与感知保障。

通信感知一体化 (ISAC) 旨在通过共享频谱、波形与硬件资源, 在单一系统中同时实现无线通信与雷达感知。然而, 链路级 ISAC 研究存在小区间干扰严重、感知性能有限、感知范围易受障碍物遮挡等缺陷。为克服上述局限, 网络级 ISAC 成为必然趋势。在网络化架构下, 基站间通过协同调

度、多点探测和联合信号处理, 扩大了通信与感知覆盖范围, 提升了通信性能与感知精度, 增强了系统的抗干扰能力。网络级 ISAC 方案为低空航空器的轨迹追踪、入侵检测及协同避障等提供了低成本、高可靠的系统级方案。

网络级 ISAC 在提供性能增益的同时, 也为移动性管理带来了前所未有的挑战。在广域立体覆盖场景下, 低空航空器的高机动性以及视距 (LoS) 链路的频繁变换, 严重影响了通信与感知性能, 这要求系统必须在动态通感协作簇之间进行任务迁移。对于网络级 ISAC 而言, 切换的内涵已发生深刻演变: 在目标移动过程中, 不仅要维持控制链路与数据传输的“通信连续性”, 还要保障目标状态信息能够平滑交

接而不丢失,即实现“感知连续性”。传统的以通信质量为单一导向的切换准则,已难以满足网络级ISAC对目标追踪实时性与稳定性的严苛要求。研究从通信连续性向通信-感知双服务连续性跨越的切换技术,已成为支撑低空经济正常运行的迫切需求。

为系统性地解决上述挑战,本文从链路级和网络级两个层面对ISAC切换技术进行了全面梳理与研究。此外,针对网络级感知切换场景,借鉴传统通信切换方法提出了一种有效解决方案。

1 链路级切换

链路级ISAC是指在单一收发链路内实现通信与感知,通过共享硬件和频谱资源,在点对点传输中寻求通感性能的最优折中。链路级切换主要关注单基站或相邻基站间点对点链路的动态维护与资源重构。ISAC技术将感知能力引入移动性管理流程,催生了两种新的链路级切换范式:一是针对通信任务的连续性,利用感知信息增强通信切换鲁棒性,称为感知辅助切换;二是针对感知任务的连续性,提出的感知服务切换。

1.1 感知辅助切换

在传统通信切换范式中,网络对用户设备(UE)的认知主要依赖于参考信号测量,本质上是对信道衰落与干扰的被动响应。这种方式缺乏对物理环境和UE运动状态的直接感知,导致切换决策常滞后于动态变化,在高移动性、遮挡频发的场景下面临鲁棒性不足的挑战。感知辅助切换利用ISAC的感知功能,通过引入环境感知与运动信息,在小区选择、波束管理及触发机制等方面实现主动精准的切换控制,显著提升高动态场景下通信系统的可靠性。

文献[1]提出了一种完整的感知辅助切换机制。小区级切换在参考信号接收功率(RSRP)筛选小区的基础上,引入感知网络功能(SNF)。SNF根据感知服务请求与感知能力选择合适的感知模式,对UE进行位置与速度估计。基于该运动学信息,网络预测UE在候选小区中的停留时间,并据此动态调整切换参数(包括滞后余量(HOM)与触发时间(TTT)),从而有效提升切换效率。

针对波束级切换,文献[1]提出将感知能力与多波束波束成形相结合,通过通信波束与扫描波束协同获取环境与目标信息,实时构建无线电传播地图,从而预测潜在遮挡并实现有针对性的波束切换。同时,利用ISAC回波信号估计UE运动学信息,可实现波束指向的预测与提前调整,在减少导频与反馈开销的同时提升波束对齐的稳定性,减少通信中断。

文献[2]提出基于距离和基于概率的感知触发算法,引入“Counts-To-Trigger”机制,将连续感知测量符合条件作为切换依据,以密集的运动学测量替代稀疏的RSRP比较,实现更快的切换判决。配合为感知辅助切换设计的帧结构和协议,该方案显著提升系统吞吐量并减少通信中断时间。

在毫米波通信场景下,文献[3]提出利用调频连续波(FMCW)雷达实时感知环境,通过卷积神经网络-长短期记忆网络(CNN-LSTM)深度学习模型处理距离-角度信息,实现提前约1s的遮挡预测(准确率超过90%),从而支持网络在遮挡发生前主动触发切换,将“被动响应”转变为“主动预防”,提升毫米波通信的可靠性。

1.2 感知服务切换

感知服务切换旨在保障网络对无人机等移动目标的感知连续性。由于感知性能对视距链路的依赖性远高于通信,且感知目标不具备主动反馈能力,因此感知服务切换面临独特的挑战。本文从感知切换触发原因和感知拓扑切换两个方面介绍感知服务切换,并综述当前学界相关的感知切换机制与算法。

1.2.1 感知切换触发原因

根据文献[4],本文将感知切换触发原因分为以下4类:

1) 感知精度需求:在一段时间内,若目标链路的感知回波RSRP、信干噪比(SINR)等指标超过源链路一定阈值,则触发切换,相当于通信切换中的A3事件。

2) 感知质量保障:当当前链路因目标视距丢失、目标距离过远等因素导致RSRP或SINR低于预设阈值,或不同目标在距离、角度等维度难以分辨时,系统触发切换以维持感知精度。

3) 干扰管理:通信信号与感知信号可能相互产生强干扰。例如,当目标靠近通信用户时,为保障通信服务质量(QoS)或感知SINR,网络可能强制触发切换,将感知任务转移至干扰较小的邻近基站。

4) 资源分配权衡:ISAC系统中时频与功率资源在通信与感知间共享。当某一基站的通信负载激增,无法分出足够资源维持感知波束时,系统需将感知任务卸载至其他空闲基站。

1.2.2 感知拓扑切换

感知服务切换不仅仅是服务节点的变更,更本质地表现为感知拓扑架构的动态重构。ISAC支持多种感知拓扑,根据文献[5],各拓扑特点如下:

1) 单基地感知:收发天线位于同一基站。其优势在于无须基站间同步,但深受自干扰和全双工硬件限制的影响。

2) 准单基地感知:收发天线位于同一基站但物理分离,降低了全双工自干扰隔离的要求,但增加了成本。

3) 双/多基站感知:发射与接收位于不同基站。该拓扑能显著扩大感知覆盖范围,且不存在自干扰问题,但需要高精度时频同步。

图1展示了感知拓扑切换的动态过程。图1(a)和图1(b)展示了单基地感知及切换过程:当感知目标在位置A时,基站A自发自收进行感知;随着目标移动至位置B,原感知链路被阻断,此时切换为基站C自发自收。图1(c)和图1(d)展示了双基地感知及切换过程:目标在位置A时,基站A发射、基站C接收;随着目标移动至位置B,原感知链路被阻断,此时切换为基站C发射、基站B接收。在实际感知链路组网中,并非强制指定某一基站采用固定拓扑,而

是常针对不同用户,从多种拓扑链路中选取最佳形式。

1.2.3 感知切换机制与算法

在感知服务切换的实际部署中,如何设计高效的切换机制以维持高质量的跟踪精度,是一个具有潜力的新课题。

文献[4]引入了感知软切换机制。在切换期间,源基站并不立即停止感知,而是与目标基站共同对目标进行探测。源基站的感知数据(如目标轨迹、速度等先验信息)被共享给目标基站作为辅助信息。这不仅避免了目标基站进行耗时的全域波束扫描,还能通过多链路数据融合进一步提升感知精度。

在分布式ISAC网络中,多个基站协同覆盖广阔区域,但单个基站的感知视场往往是局部的。当多个目标在不同基

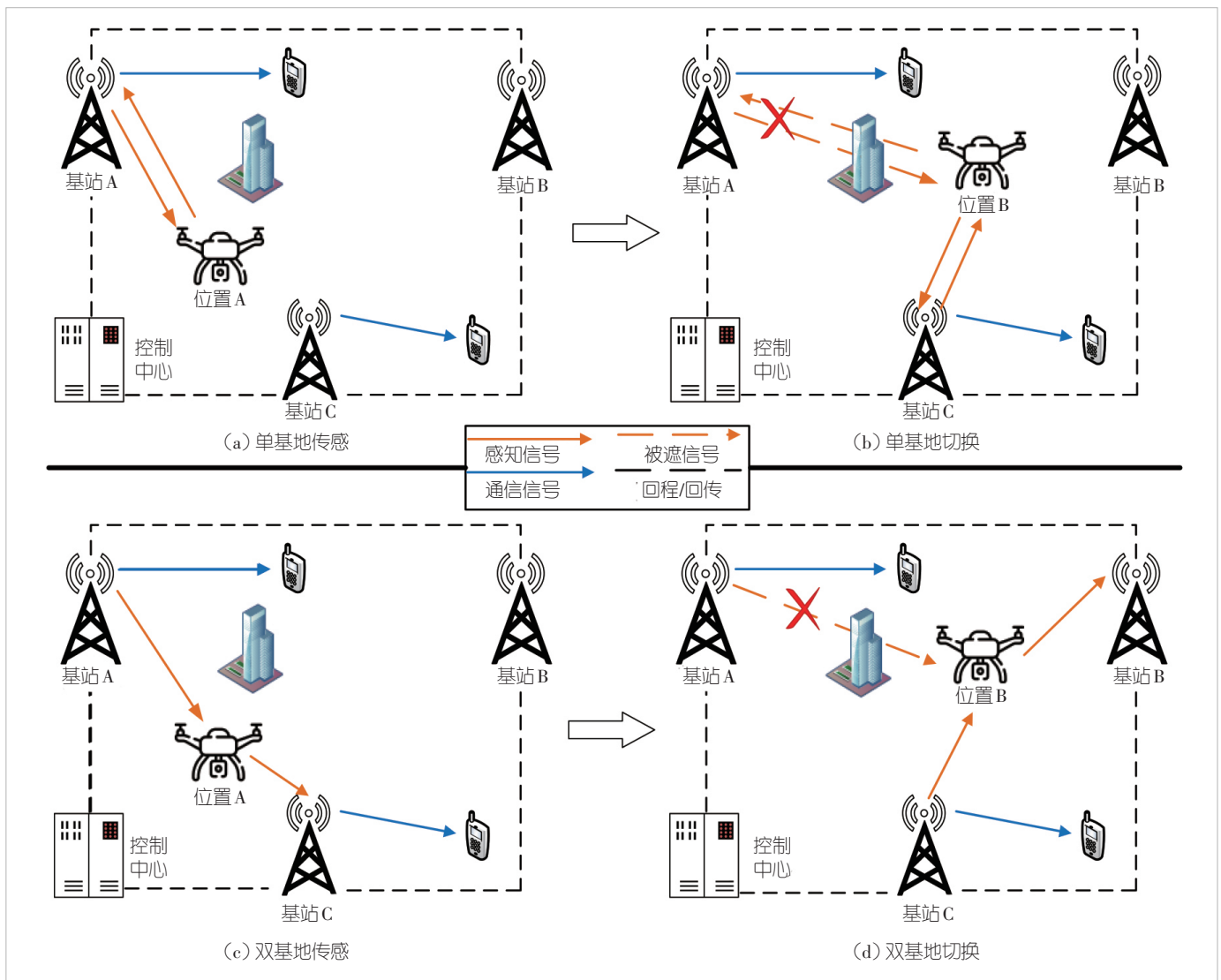


图1 不同感知拓扑的切换过程

站之间穿梭时,系统面临严峻的跨视场连续跟踪挑战:一方面,目标从源基站切换至目标基站时容易出现航迹断裂或身份混淆;另一方面,为维持跟踪精度,基站间需频繁交换感知数据,带来巨大的通信开销。因此,如何在保证跟踪连续性与精度的同时最小化通信负载,成为文献[6-7]研究的核心问题。

文献[6]提出了一种基于“置信传播”的切换框架。该方案利用因子图对数据关联进行建模,仅在预测目标即将进入相邻视场时触发信息交互,且只传递目标的“置信度”而非原始雷达回波。实验表明,该机制在大幅降低回程链路负载的同时,实现了接近集中式处理的跟踪精度。

文献[7]则聚焦于切换过程中的航迹连续性,提出了基于TPMBM滤波器的全轨迹切换方法。该研究引入“轨迹状态”的概念,主张在切换时传递包含历史信息的轨迹密度函数,使目标基站继承源基站的“成熟”航迹,从而有效避免目标基站的“冷启动”误差,提升跟踪鲁棒性。

2 网络级切换

网络级ISAC是指利用分布式协作技术,将多个ISAC节点(如基站、终端)互联,构成协同工作的有机整体^[8]。其中,无小区ISAC作为最具代表性的网络级ISAC架构,彻底重构了传统的无线接入形态,为实现全域无缝的通感服务奠定了全新的物理基础。

根据文献[9],无小区ISAC的核心在于“以用户为中心”,即动态调度周边接入点(AP),为每个用户组成专属的“服务簇”进行联合服务。在通信方面,簇内AP的联合传输彻底消除了小区间干扰,保障了全网均匀的高质量连接;在感知方面,广域分布的AP构建了宏观多基地雷达系统,利用空间分集增益有效克服视距遮挡与RCS起伏,实现高精度连续感知。

若仅分析移动感知网络(即只考虑感知用户的感知服务切换),则称该过程为网络级感知切换^[10]。当关注包含通信用户、感知用户及通感用户的移动ISAC网络,并同时考虑通信切换与感知切换时,则称该过程为网络级ISAC切换。

2.1 网络级感知切换

网络级感知切换主要针对非连接的移动目标(如低空无人机、非网联车辆等),其核心在于动态触发并优化多基站间的协同感知机制。网络首先需要确定协同感知形态,即“选择哪些基站”以及“需要多少基站”。文献[10]指出,基站选择不应以距离为依据,而应基于最大化空间分集增益或最小化位置误差界。网络还需优先筛选与目标具有良好LoS

连接且在几何分布上能形成较大孔径的基站组合,以提升联合估计精度。基站数量的选择需在感知精度与网络开销之间进行权衡。因此,高效的网络级感知切换策略通常是在满足感知指标约束的前提下,优先选择最少数量的基站。

文献[11]提出了一种“虚拟感知小区(VSC)”的切换范式。该范式将VSC定义为一个主基站(PBS)收发、两个辅基站(SBS)接收的协作簇,并利用卡尔曼滤波实现簇内遮挡下的PBS无缝切换,同时通过缓冲区迟滞机制优化簇间切换。然而,固定VSC架构强制采用“1发3收”的静态簇结构,导致系统无法根据实时信道状态动态适配资源:在LoS良好时造成资源浪费,而在遭遇遮挡时又因无法重构几何孔径导致性能急剧恶化。为此,本文提出如图2所示的全新网络级感知初始化与切换框架。

首先,本文中我们将感知链路分为测量集和传输集。传输集是指直接对目标进行联合感知的链路集合,测量集是指在初始化或切换时进行感知导频信号测量的链路集合。在初始化阶段,测量集内各感知链路的发射基站向目标发射感知导频信号,并由接收基站接收经目标反射的回波;随后,接收基站处理该信号,当测量周期达到TTT时,将处理所得的感知指标等信息打包为测量报告,发送至控制中心;控制中心根据该阶段感知指标的平均值,由高到低选择 N 条感知链路作为传输集,对目标进行联合感知。

在切换阶段,当某链路触发A2事件(即感知指标降至一定阈值)后,首先根据感知目标的位置等信息更新测量集,然后完成相应的测量工作。控制中心针对TTT范围内测量集和待切链路的表现,根据相应策略决定是否切换。当决定切换后,待切链路与新传输链路执行感知任务交接。

2.2 网络级ISAC切换

与仅关注单一功能的切换不同,网络级ISAC切换是一种系统级的统一资源调度,涵盖通信用户、感知用户及通感用户。网络级ISAC切换不再局限于用户位置的迁移,而是从系统内所有用户的综合服务质量角度进行决策。

网络级ISAC切换的本质是动态的用户关联(UA)。为实现高效的动态切换,必须首先解决每一时刻的UA问题。目前的学术工作主要围绕静态UA算法展开,这为动态切换奠定了理论基础,而真正的网络级ISAC切换研究尚处于起步阶段。

2.2.1 静态UA

静态UA旨在为不同类型的静止用户选择服务AP,以使得系统总服务质量最佳。文献[12]聚焦于通感用户,提出了

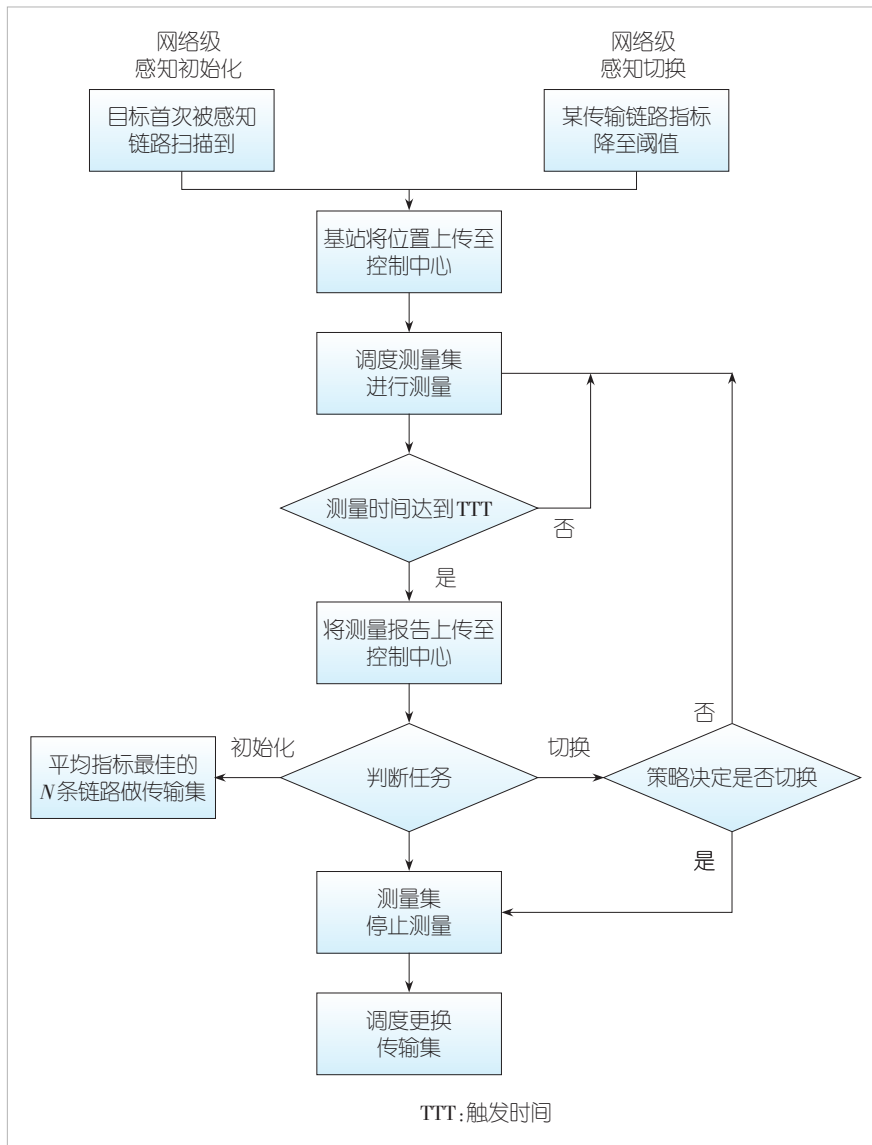


图2 网络级感知初始化与切换流程

一种两步式静态UA方案。该方案首先基于大尺度衰落筛选候选AP，随后结合通信干扰与感知几何构型进行精细化关联，在静态场景下实现了通感性能的帕累托优化。

文献[13]进一步扩展了研究范畴，探讨了通信用户、感知用户和通感用户共存场景下的静态UA问题，建立了统一关联架构，具体如公式(1)：

$$\begin{aligned}
 & \max_{a_{lk}} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K S_{lk} \cdot R_{lk} \cdot a_{lk} \\
 & \text{s.t.} \sum_{k=1}^K a_{lk} \leq \tau_p, \forall l = \{1, 2, \dots, L\} \\
 & 2 \leq \sum_{l=1}^L a_{lk} \leq X, \forall k = \{1, 2, \dots, K\} \\
 & a_{lk} = 0, \forall \{l, k\}, \text{ where } M_{lk} = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中，用户总数为 K ，AP总数为 L 。 a_{lk} 为二进制关联变量，当AP l 服务用户 k 时取值为1，否则为0。 S_{lk} 是AP l 对用户 k 的服务质量，通信用户设为信噪比，感知用户设为信杂噪比，通感用户设为两指标加权。 R_{lk} 为用户优先级权重。约束条件分别为每个AP的最大负载和每个用户能关联的AP数量上下限；矩阵 M 的作用是屏蔽链路质量过低的关联。该优化问题旨在通过联合最大化链路质量和AP优先级来最小化干扰，是典型的混合整数非线性规划问题，文献采用贪婪式算法求解，并仿真验证了其在系统吞吐、感知质量及算法复杂度之间的良好折中性能。

文献[14]则侧重于通信用户和感知用户，提出了一种基于图神经网络的智能化关联方案。该方案创新性地将AP工作模式纳入优化范畴，智能决策AP应作为“通信发射机”“雷达发射机”或“雷达接收机”工作。该智能化方案在降低传统组合优化算法复杂度的同时，实现了接近全域最优的通感综合效用。

2.2.2 动态UA

当引入时间维度与用户移动性后，动态UA即构成网络级ISAC切换问题。动态UA与静态UA最大的区别在于，UA的变化会引入切换开销，从而显著降低网络性能。文献[15]是首个探讨网络级ISAC切换的研究，其专门针对“通感用户”设计了综合移动性管理框架，将切换过程划分为“初始接入”和“动态更新”两个阶段。

在用户入网的初始阶段，由于缺乏先验信息，系统采用静态策略构建服务簇：依据大尺度衰落进行初始聚类，筛选出能稳定覆盖的AP集合；随后引入启发式算法选择接收节点，在初期快速形成有效的通感联合拓扑。随着用户的移动，系统进入动态接入阶段。该阶段设计了动态自适应迟滞切换策略，根据用户速度实时调整迟滞门限，在服务质量与抑制乒乓效应之间取得有效平衡；同时，利用感知预测的轨迹提前判断最佳服务区域，动态执行AP的添加与删除。

尽管网络级ISAC切换目前鲜有研究，但针对网络级通信切换的研究在学界已发展多年，其关于网络级架构下高频

切换与资源调度问题的理论建模与智能决策,对网络级ISAC切换具有重要参考价值。

文献[16]针对以通信用户为中心的无小区网络,考虑到信道老化与观测不完备,将切换问题建模为部分可观测马尔可夫决策过程(POMDP)。该模型通过定义大尺度衰落状态的置信度向量,在非完全观测下优化长期累积速率。在网络级ISAC系统中,感知目标状态同样因杂波与遮挡影响而具有部分可观测性,可建立“通感联合POMDP”,将感知量测的不确定性(如跟踪误差协方差)显式纳入状态空间,从而使切换决策从单一的信噪比驱动,转变为对通感双重状态置信度的综合考量。

在求解算法与触发机制方面,文献[17]提出基于DQN的“条件触发”关联机制,仅在通信收益显著高于切换代价时激活切换,有效抑制乒乓效应。该思路可迁移至ISAC,建立“通信QoS+感知CRB”双重触发门限,并构建多智能体强化学习体系,通过联合学习机制解决多用户之间的资源竞争。

文献[18]作为文献[16]的演进工作,进一步利用软演员-评论家(Soft Actor-Critic)深度强化学习算法解决连续空间控制问题,并证明引入“移动方向辅助”观测能显著提升切换鲁棒性。因此,未来的网络级ISAC切换可进一步将感知提取的“用户轨迹”和“运动矢量”作为强化学习智能体的核心状态输入。此外,其目标函数应从单一的通信速率最大化,扩展为通感综合效用与切换开销之间的博弈:

$$R_t = \alpha \cdot \mathfrak{R}_{\text{com}}(s_t, a_t) + \beta \cdot \mathfrak{R}_{\text{sense}}(s_t, a_t) - \lambda \cdot \mathbf{Z}(a_t \neq a_{t-1}) \quad (2),$$

其中, $\mathfrak{R}_{\text{com}}$ 为通信速率, $\mathfrak{R}_{\text{sense}}$ 为感知增益, $\mathbf{Z}(\cdot)$ 为切换惩罚项, α 、 β 、 λ 为加权系数。

3 网络级感知切换方案

在动态变化的低空网络环境中,感知信号的测量不可避

免地受噪声和误差影响,加剧了切换系统的非线性和不确定性。模糊逻辑方法无须依赖精确的数学模型,能够有效处理这种模糊性。此外,模糊逻辑通过构建规则库,不仅增强了系统的可解释性,还赋予切换策略更强的适应能力和鲁棒性。加之其计算复杂度较低,非常适合在实时网络级感知切换中应用。

受文献[19]在通信切换中利用级联模糊系统进行链路质量预测的启发,本节将该方法迁移至网络级感知切换领域。不同于传统通信切换对吞吐量或丢包率的追求,感知切换更关注感知链路的几何退化趋势、视距条件以及目标回波的连续性。因此,本章针对感知任务的物理特性,对输入变量与隶属度函数进行重构,并结合2.1节提出的网络级感知初始化和切换流程,设计了面向感知连续性的区间二型模糊切换算法。

3.1 模糊感知切换策略

感知链路的质量由回波信噪比(SNR)表征。然而,由于目标非合作、回波信号稀疏且易受遮挡,单次SNR测量波动剧烈。为获得稳定且具预测性的质量指标,本文采用TTT期间测得的所有SNR的平均值和斜率作为切换系统的输入,分别记作 $\bar{\gamma}$ 和 γ' , 如公式(3)和(4),其中K为TTT期间测量的SNR个数:

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^K \gamma_i}{K} \quad (3),$$

$$\gamma' = \frac{K \sum_{i=1}^K i \gamma_i - \sum_{i=1}^K i \sum_{i=1}^K \gamma_i}{K \sum_{i=1}^K i^2 - (\sum_{i=1}^K i)^2} \quad (4).$$

本文所设计模糊感知切换系统如图3所示。该系统包含待切链路质量评估器、测量链路质量评估器和切换概率评估器3个评估器,每个评估器均是完整的模糊逻辑子系统。系统对待切链路和测量链路分别进行质量评估,并进一步输出切换概率。

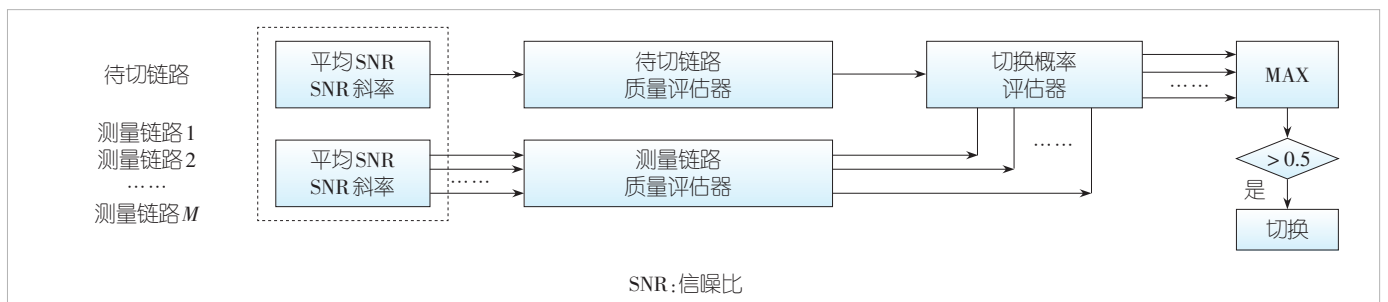


图3 模糊感知切换系统

3.2 模糊逻辑系统

由于低空感知场景中存在目标散射截面积的起伏,本文采用区间二型模糊逻辑系统,通过不确定性区域覆盖回波信号的随机波动,从而提高切换决策的鲁棒性。区间二型模糊逻辑系统包含模糊器、规则库、推理机、降型器和解模糊器五大部分。

图4给出了各变量的模糊器。图4(a)和图4(b)分别对应待切链路平均SNR模糊器和测量链路平均SNR模糊器,

二者论域均为[-12, 20] dB,并采用“劣”“中”“良”“优”4个模糊集。两者的区别在于:测量链路平均SNR模糊器的隶属函数中心整体向高SNR区域偏移。这是因为对于测量链路,只有当其平均SNR达到较高水平时,才认为其具备切换价值。

图4(e)给出了链路质量和切换概率的模糊器,其论域为[0, 1],采用“低”“中”“高”3个模糊集,用于表征链路质量评估结果及最终切换概率。图4(d)和图4(e)

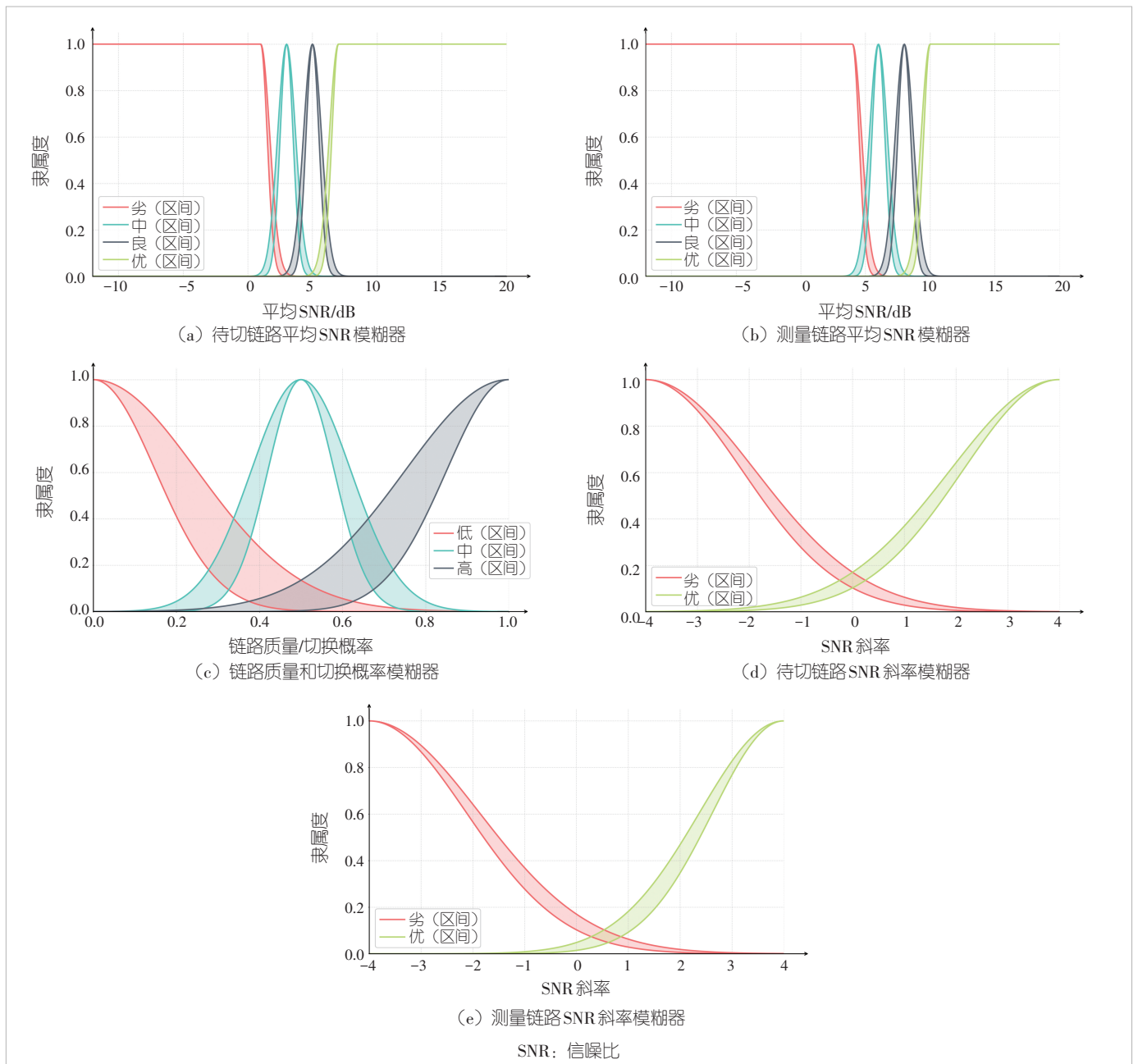


图4 各模糊集的隶属度函数

SNR: 信噪比

分别对应待切链路SNR斜率模糊器和测量链路SNR斜率模糊器,二者论域均为 $[-4, 4]$,并采用“劣”和“优”两个模糊集。测量链路SNR斜率模糊器对“优”区间的定义更严格,以突出对候选链路增长趋势的判断。系统其余设置同文献[19]。

3.3 仿真与分析

本文中的感知网络设置如图5所示,各基站之间可组成单/双基地拓扑。路径损耗函数如公式(5)所示。其中, d_1 代表发射基站与目标的距离, d_2 代表目标与接收基站的距离, σ_{RCS} 为散射截面积, X_σ 为阴影衰落,服从均值为零、方

差为1 dB的正态分布。

$$PL(d_1, d_2) = 72.37 + 23.2\lg(d_1) + 23.2\lg(d_2) - 10\lg(\sigma_{RCS}) + X_\sigma \quad (5)$$

将目标所在小区及其周围的6个小区内所有基站构成的感知拓扑链路作为测量集。我们将传输集数量设为2,初始化过程即在测量集中选取SNR最高的两条链路。目标无人机在基站覆盖区域内随机移动,每次行程为800 m,随机生成50条路线作为数据集。基站发射功率为40 dBm,噪声功率为-70 dBm,TTT为0.25 s,SNR测量周期为0.05 s,收发天线增益为24.5 dB,雷达散射截面积为2m²,A2事件触发阈值为3 dB,感知链路失败阈值为1 dB。为验证策略有效性,设置标准感知切换策略作为对比,该策略采用A3事件: $M_n \geq M_s + H_{ys}$ 。其中, M_n 为测量链路平均SNR, M_s 为待切链路平均SNR,切换门限 H_{ys} 设为4 dB。

图6展示了不同速度下两种感知切换策略的性能对比结果。在无线链路失败率方面,模糊感知切换策略在低速区间略优于标准策略;在中速区间,通过不确定性建模显著抑制

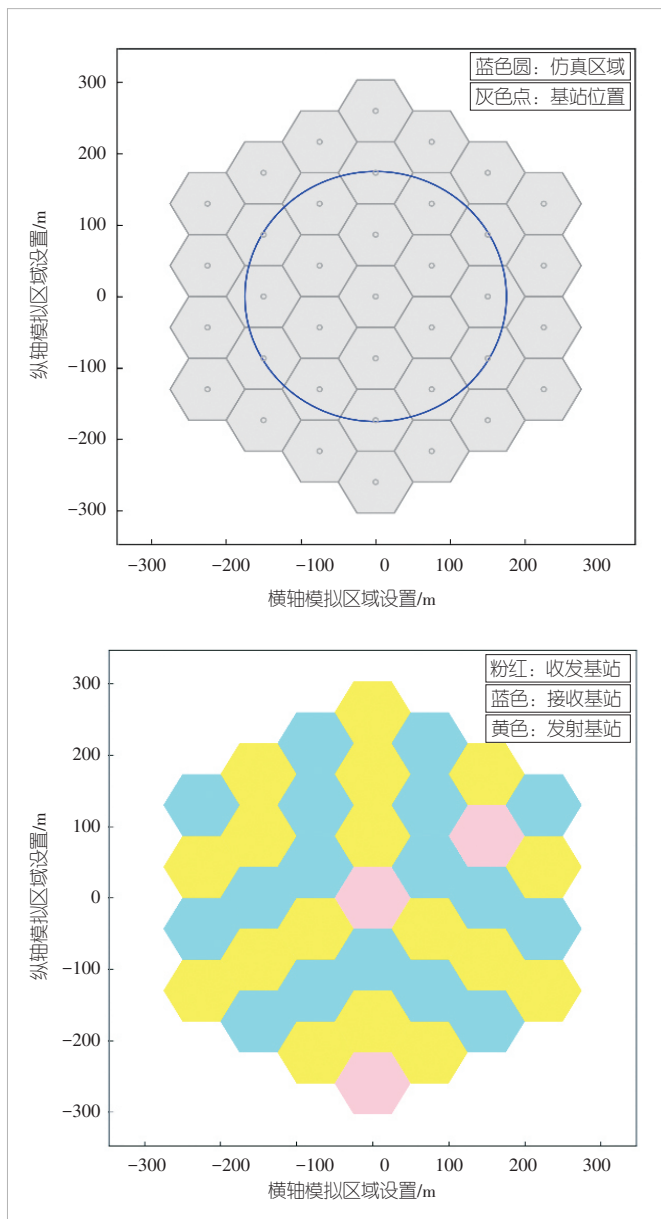


图5 网络级感知网络设置

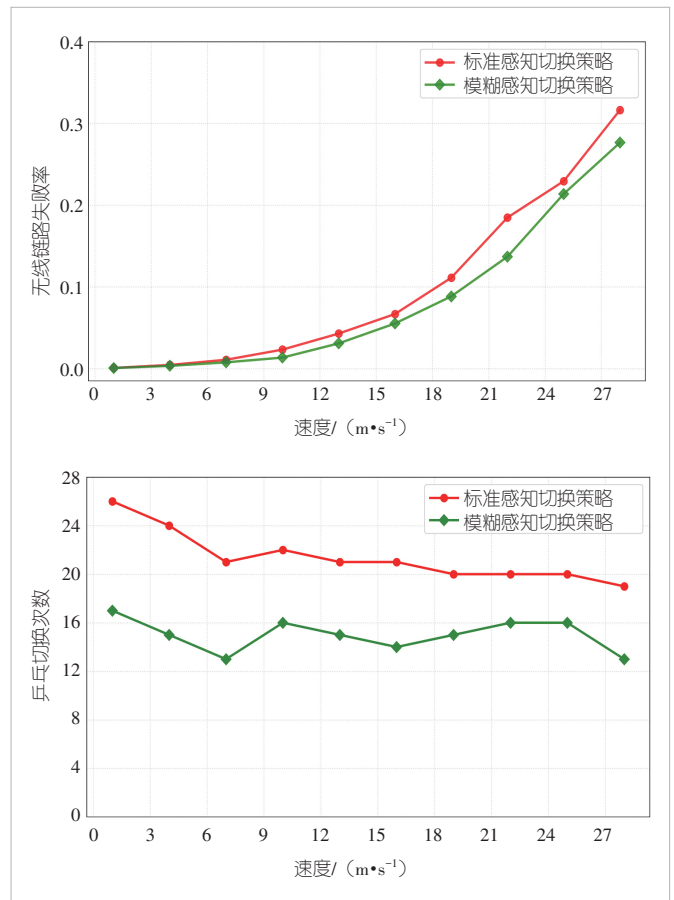


图6 不同速度下感知切换策略性能对比

了失败率的上升;在高速区间,虽因决策保守导致优势收窄,但仍优于标准策略。在乒乓切换抑制方面,模糊感知切换策略凭借区间隶属度对临界波动的缓冲效应,在全速度范围内显著优于标准策略。综合来看,该方案在切换可靠性与系统稳定性上均优于标准策略,为网络级协作感知的移动性管理提供了一种轻量、可解释的解决方案。

4 结束语

本文系统梳理了ISAC网络中的切换技术,揭示了从“通信连续性”向“通信-感知双连续性”跨越的内在逻辑。在链路级层面,分别探讨了如何借助感知技术提升通信切换的鲁棒性,以及如何保障感知服务的平滑交接。在网络级层面,分析了网络级感知切换与网络级ISAC切换的核心问题,提出了网络级感知切换的流程,并总结了网络级ISAC切换的最新进展与未来方向。针对网络级感知场景,本文借鉴传统通信切换方法,设计了区间二型模糊切换算法,并验证了其优越性。在后续工作中,我们可深入研究网络级ISAC切换,探索通感联合POMDP建模,引入深度强化学习方法,为低空经济等新兴场景提供可靠的移动性管理方案。

参考文献

- [1] Zhang H J, Zhang Y X, Liu X N, et al. Resource allocation and mobility management for perceptive mobile networks in 6G [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(4): 223-229. DOI: 10.1109/MWC.004.2300056
- [2] Li Y, Liu F, Xiong H, et al. Look before switch: sensing-assisted handover in 5G NR V2I networks [PP/OL]. arXiv[2025-11-07][2026-02-22]. <https://arxiv.org/abs/2511.05195>
- [3] Demirhan U, Alkhateeb A. Radar aided proactive blockage prediction in real-world millimeter wave systems [C]//Proceedings of ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2022: 4547-4552. DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9838438
- [4] Ribeiro Y S, Makki B, de Almeida A L F, et al. Mobility management in integrated sensing and communications networks [PP/OL]. arXiv (2025-01-12)[2026-02-10]. <https://arxiv.org/abs/2501.08159>
- [5] Lyazidi Y, Equi J, Shreevastav R, et al. ISAC architecture and sensing topology switching in 6G cellular networks [C]//Proceedings of IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE, 2024: 26-31. DOI: 10.1109/CSCN63874.2024.10849754
- [6] Bai L P, Ge Y, Wymeersch H. Belief propagation-based target handover in distributed integrated sensing and communication [PP/OL]. arXiv[2026-02-10]. <https://arxiv.org/abs/2506.23118>
- [7] Ge Y, Kallio O, Chen H, et al. Target handover in distributed integrated sensing and communication [C]//Proceedings of 2025 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2025: 1-6. DOI: 10.1109/ICC52391.2025.11161942
- [8] Han K, Meng K T, Wang X Y, et al. Network-level ISAC design: state-of-the-art, challenges, and opportunities [PP/OL]. arXiv[2026-02-18]. <https://arxiv.org/abs/2505.01295>
- [9] Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. User-centric cell-free massive MIMO networks: a survey of opportunities, challenges and solutions [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 611-652. DOI: 10.1109/COMST.2021.3135119
- [10] Zhang Y, Shan H G, Chen H B, et al. Perceptive mobile networks for unmanned aerial vehicle surveillance: from the perspective of cooperative sensing [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2024, 19(2): 60-69. DOI: 10.1109/MVT.2024.3373931
- [11] Zhao C B, Feng Y, Luo H L, et al. Networked ISAC-based UAV tracking and handover toward low-altitude economy [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2025, 24(9): 7670-7685. DOI: 10.1109/TWC.2025.3562396
- [12] Naeem A, Amhoud E M, Arslan H. A novel user association scheme for joint radar and communication in cell-free mMIMO systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2025, 74(11): 17738-17753. DOI: 10.1109/TVT.2025.3581637
- [13] Naeem A, Gharib A, Amhoud E M, et al. Scalable association of users in CF-mMIMO: a synergy of communication, sensing, and JCAS [PP/OL]. arXiv [2026-02-18]. <https://arxiv.org/abs/2506.01060>
- [14] Zafari M, Swindlehurst A L. ASSENT: learning-based association optimization for distributed cell-free ISAC [PP/OL]. arXiv[2026-02-18]. <https://arxiv.org/abs/2511.09992>
- [15] Sun X Y, Xue W Y, Li J M, et al. Mobility management framework for cooperative cell-free ISAC systems [J]. IEEE Internet of Things journal, 2025, 12(23): 49784-49800. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3604762
- [16] Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. Handoffs in user-centric cell-free MIMO networks: a POMDP framework [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(8): 10319-10335. DOI: 10.1109/TWC.2024.3371379
- [17] Xue Q, Sun Y, Wang J, et al. User-centric association in ultra-dense mmWave networks via deep reinforcement learning [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(11): 3594-3598. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3108013
- [18] Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. Handoff design in user-centric cell-free massive MIMO networks using DRL [J]. IEEE transactions on communications, 2025, 73(11): 11368-11384. DOI: 10.1109/TCOMM.2025.3592581
- [19] Haghrah A, Haghrah A, Niya J M, et al. Handover triggering estimation based on fuzzy logic for LTE-A/5 G networks with ultra-dense small cells [J]. Soft computing, 2023, 27(22): 17333-17345. DOI: 10.1007/s00500-023-08063-6

作者简介



焦志琨, 中国科学技术大学信息科学技术学院在读硕士研究生;研究方向为通感一体化组网技术、移动性管理技术等。



陈力, 中国科学技术大学教授、博士生导师, 中国科学技术大学“学术领军人才培养计划”入选者;主要研究方向为下一代网络中通信、感知和计算的融合,及其在产业中的落地应用;主持多个国家自然科学基金面上项目、青年科学基金项目,以及国家重大专项课题项目。