



研究与开发

6G 协同通感一体化技术的性能评估与系统设计

高鹏^{1,2}, 周飞飞^{1,2}, 王启兴^{3,4}, 廉黎祥³, 余金培^{3,4}, 马涛^{1,2}

(1. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 南京南瑞信息通信科技有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210;

4. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201304)

摘要: 协同通感一体化 (cooperative integrated sensing and communication, CoISAC) 技术作为6G通感一体化的重要发展方向, 能够利用网络中多类型设备的附加通感信息, 克服现有通感一体化系统感知精度低、非视距路径失能和感知范围小的问题。对CoISAC技术的现状进行总结和分析, 提出了一种新的感知性能评估指标和两种协同技术方案, 分析了CoISAC技术所面临的挑战, 并对未来技术发展趋势进行了展望。

关键词: 通感一体化; 协同技术; 克拉美罗下界

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024199

Performance evaluation and system design of 6G cooperative integrated sensing and communication technology

GAO Peng^{1,2}, ZHOU Feifei^{1,2}, WANG Qixing^{3,4}, LIAN Lixiang³, YU Jinpei^{3,4}, MA Tao^{1,2}

1. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, China

2. Nanjing NARI Information & Communication Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China

3. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

4. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304, China

Abstract: As a promising technique for 6G integrated sensing and communication, cooperative integrated sensing and communication (CoISAC) technology harnesses additional sensing information from various network nodes to overcome challenges of ISAC systems such as low sensing accuracy, non-line-of-sight path scenario, and limited sensing range. The current status of CoISAC technology was summarized and analyzed. A novel performance metric and two cooperative approaches were proposed. The challenges faced by CoISAC technology were analyzed, and the future development trend of CoISAC technology was forecasted.

Key words: integrated sensing and communication, cooperative technique, Cramer-Rao lower bound

收稿日期: 2024-04-08; 修回日期: 2024-08-08

通信作者: 余金培, yujp@microstate.com

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目 (No.5108-202218280A-2-170-XG)

Foundation Item: State Grid Corporation of China Headquarters Technology Project (No.5108-202218280A-2-170-XG)

0 引言

随着通信技术从5G海量连接走向6G万物智联,以通信为中心的传统移动网络对于感知能力的需求逐渐提升,感知作为未来6G系统的重要功能,可为智慧交通、智能工厂、健康检测等多种新应用场景提供有效助力^[1]。通感一体化(integrated sensing and communication, ISAC)技术将通信与感知能力融合在同一硬件平台和同一频段中,能够有效降低系统硬件开销、提高频谱效率,被视为6G中的一项变革性技术^[2]。

通信感知融合的思想最早可追溯至20世纪60年代初,美国航天工程师希望借助雷达脉冲信号的波形分集实现少量通信信息的传递^[3]。受限于硬件条件不足,此后近70年内,通信和感知两种功能基本上停留在频谱融合、设备分离的阶段^[3]。近年来,日益增长的通信需求不断驱使通信频谱向毫米波等高频段方向发展,同时相控阵雷达、多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)等关键雷达技术的发展与通信技术的发展呈高度相似的趋势,推动了通信和感知迈向频谱与硬件全面一体化的新阶段^[4-5]。然而,当前ISAC技术仍处于发展初期,现有研究主要考虑单节点的非协同模型,无法适用于未来6G中万物智联的网络化协同场景,主要存在如下问题与不足。

(1) 感知精度有限

通信信号以克服信道衰落、发送更多信息为目标,感知信号则以准确估计待感知物体状态为目标,二者不同的设计理念导致通信信号在感知精度上存在天然不足。现有研究普遍使用通信波形进行ISAC系统设计,无法支持用户在多类型场景下的高精度感知服务。如何依托现有通信系统架构,设计高精度的ISAC感知技术,成为推动ISAC技术能够得以广泛应用的关键内在驱动力。

(2) 非视距路径感知失能

通信信号在非视距路径信道情况下通过环境中未知遮挡物的反射抵达接收端,仍能解码完成通信功能。与之相比,未知遮挡物在感知服务中会引起“幽灵镜像”问题^[6],即错误地感知到环境中本不存在的目标,引起感知服务出错。无线技术的发展伴随着信道环境的复杂化,如何克服复杂信道环境中非视距路径问题,实现高效且鲁棒的感知服务,是未来ISAC技术发展中亟待解决的问题。

(3) 感知范围有限

未来6G信号的使用频段将进一步提高,这引入了信号增益和覆盖范围的权衡问题。现有5G基站的信号辐射半径约为300 m,要达到与4G基站相同的覆盖范围需要部署4~8个5G基站,且这一过程还受信道环境、波束优化、邻区配置等多种实际因素的影响。如何利用未来更高频段的6G信号,在保持高效传输的同时,扩展ISAC系统的覆盖范围,是未来ISAC技术需要解决的另一项关键问题。

随着6G系统中大规模泛在连接终端的不断增多,ISAC将迈向深层智慧的万物智联网络化系统^[3],即协同通感一体化(cooperative ISAC, CoISAC)系统。非协同感知和协同感知技术对比如图1所示,与传统非协同ISAC系统相比,CoISAC系统引入网络中其他协作节点的附加观测信息,提供空间分集增益,从而提升通信感知精度,解决非视距路径感知失能,提高信号覆盖范围等通信感知综合性能。此外,CoISAC技术有助于下一代无线系统的网络化发展,通过灵活分配用户接入数量、边缘算力等网络资源,推动通感一体化系统从现有个体智能向未来6G网络化群体智能系统不断演进。

1 CoISAC研究现状

CoISAC根据引入的协同节点类型与原有节点是否为相同类型,可分为同构CoISAC和异构

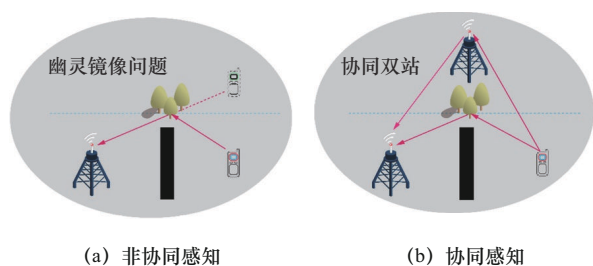


图1 非协同感知和协同感知技术对比

CoISAC两类。同构CoISAC系统中,通信和感知功能一般通过对特定发送波形进行解调和特征提取来完成。与之相比,异构CoISAC系统既可引入可重构智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)^[5]、物联网(Internet of things, IoT)节点^[7]等其他异构第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)设备作为协同节点,还可引入相机、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)^[8]等非3GPP设备作为全新协作节点^[9],从而满足系统较高的通感性能需求。CoISAC系统分类如图2所示,同构CoISAC可根据发送波形类型进一步分为基于通信、感知和新体制这3种波形的系统,而异构CoISAC根据协同设备是否采用射频信号,分为3GPP设备协同和非3GPP设备协同两种情况。

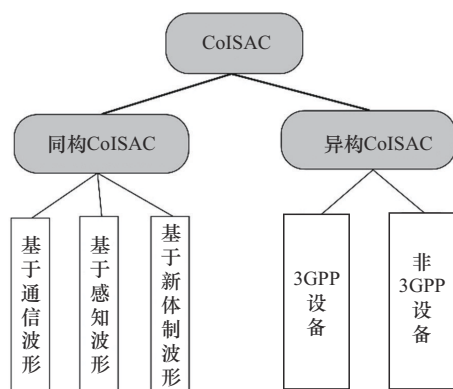


图2 CoISAC系统分类

1.1 同构CoISAC研究现状

同构CoISAC系统主要考虑多个基站相互协同完成通信和感知功能。基于通信信号的同构CoISAC系统如图3所示,图3中的云无线电接入网

(cloud radio access network, C-RAN)作为多站中心处理器,通过前向传输信号统一分发数据及调配多站资源配置,实现多用户高速率通信,同时可利用各基站发送的通信信号经目标反射后得到回波信号,对目标进行联合定位。多站协同方式作为最直接的一种CoISAC系统,具有同步精度高、性能提升大的特点,因此受到多方研究人员的关注。该方向的研究主要可分为以下两类问题。

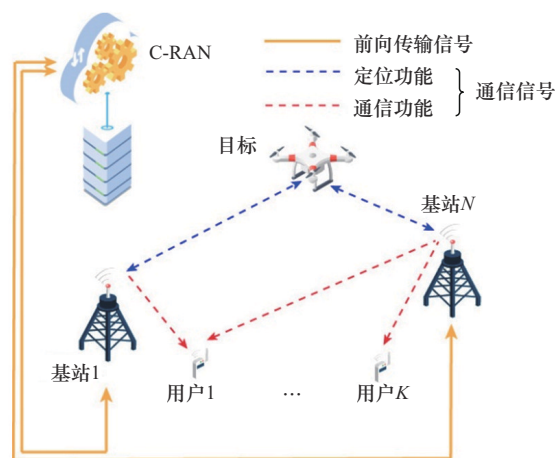


图3 基于通信信号的同构CoISAC系统

(1) 针对多站资源的自适应分配问题,提出了基于分式规划的波束管理算法,通过灵活切换基站的通感功能和控制波束的功率、指向及干扰抑制,有效提高了CoISAC系统的通感性能^[10]。

(2) 针对基于多站通信信号的定位算法开发问题,提出了基于角度-距离估计的定位算法,通过提取回波信号的多个角度观测信息,实现对目标位置的精确定位,并开发了基于5G NR波形的28 GHz毫米波原型验证平台^[11-12],该平台采用800 MHz带宽的双站合作定位模式,可对1 m/s的移动物体进行分米级精度定位。实验结果表明,双站CoISAC系统定位精度比单站非协同ISAC系统提高61%。

在感知精度要求较为严格的场景下,以通信波形为主体的CoISAC系统难以满足高精度的感知需求。为此,研究人员考虑以牺牲部分通信速

率为代价,使用感知信号作为系统唯一的发射波形,以换取高精度的定位或追踪性能。研究初期,研究人员提出了在感知波形的旁瓣位置插入少量二进制信息,在不影响主瓣方向感知性能的情况下,实现旁瓣方向的少量信息通信^[13]。为进一步提高通信速率,后续研究人员提出了采用多跳技术结合传统的雷达调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)的方式优化CoISAC的波形设计^[14],并通过最大化通信速率的方式配置系统功率资源。实验结果表明,在77 GHz的空旷室外环境下,所提多跳-FMCW波形设计可获得与传统FMCW雷达精度相近的角度分辨率,同时依靠多站协同的方式获得较低误码率的可靠通信性能。

此外,部分研究人员考虑采用传统通信或感知信号无法同时获得较高增益的通信和感知性能,提出了正交时频空(orthogonal time frequency space, OTFS)调制波形,该波形与传统通信正交频分复用(orthogonal frequency multiple access, OFDM)波形相比,具有峰均比较低的特点,同时具有较好的通感性能表现^[15]。然而,基于OTFS波形的ISAC系统较为复杂,存在与现有系统兼容性较差的问题,目前尚未见有基于OTFS波形的CoISAC技术研究报告,该类系统在未来或有较高潜力。

1.2 异构CoISAC研究现状

1.2.1 3GPP设备的异构CoISAC设计

同构CoISAC系统多采用多站相连的方式提高通感性能,然而该方式存在多站协同链路开销较大、基站部署不灵活的缺陷。为此,研究人员考虑采用6G技术中一种准无源、易部署的RIS设备代替部分基站,利用其表面的反射单元实现信号转发,实现如室内、基站盲区等复杂环境的通感信号覆盖^[5]。基于RIS的3GPP设备异构CoISAC系统如图4所示,该系统借助RIS设备的信道重构能力,用户可克服原有视距路径受阻问

题,在基站非视距路径下实现高性能的通信和感知功能。然而,RIS设备的引入需要对原有CoISAC系统重新进行级联信道建模并单独设计RIS反射单元的无源波束,与多站CoISAC系统相比具有设计难度较高、信道估计较为复杂等问题。针对联合波束设计问题,研究人员提出了一种基于交替迭代的波束成形算法,采用信噪比(signal to ratio, SNR)作为系统感知性能的设计和评估指标,通过最优化用户通信速率的方式,分别设计基站发射波束和RIS反射波束^[16]。实验结果表明,与不考虑RIS设备和随机RIS相位的CoISAC系统相比,采用RIS协同方案和波束优化算法可获得显著的通感性能增益。此外,研究人员近年开始考虑RIS协同场景中其他实际因素的影响,实现更具应用价值的联合波束设计,包含部分有源RIS设备设计^[17]、近场下RIS设计^[18]、同步精度影响^[19]等。该类系统的设计方法和求解算法较为类似,此处不再详述。

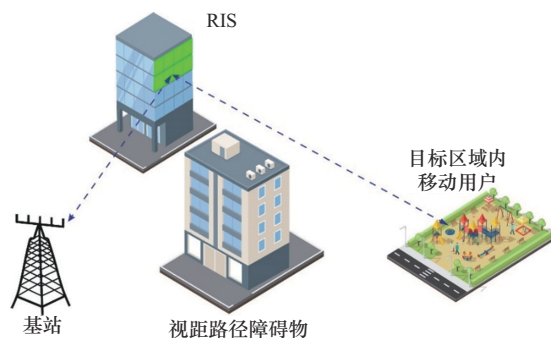
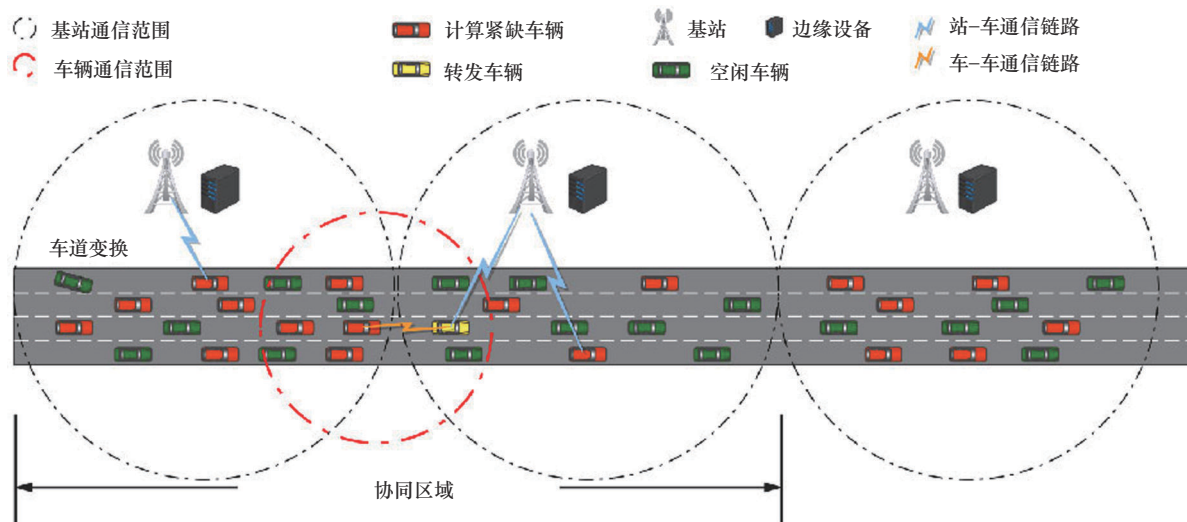


图4 基于RIS的3GPP设备异构CoISAC系统

协同化网络中存在部分设备的计算密集型任务请求,易导致周边设备接入困难或反馈时延大幅增加。为实现网络时延平均、合理分配算力资源,研究人员考虑将网络中部分IoT设备作为异构转发节点,并根据任务的不同优先级,灵活调度网络计算资源。基于转发节点的3GPP设备异构CoISAC系统^[20]如图5所示,图5在车联网系统中考虑了通感信号低时延可靠传输问题,研究人员利用协同网络中已接入的车辆信道状态信

图5 基于转发节点的3GPP设备异构CoISAC系统^[20]

息,提出了基于任务优先级的低时延资源分配算法。该算法可灵活选取信道空闲车辆作为转发节点,为任务优先级较高的计算资源紧缺车辆提供通感信号的中继转发业务,从而避免网络拥塞,降低网络平均时延^[20]。仿真结果表明,与同构无转发节点系统相比,异构转发节点系统能够有效缓解个别节点的算力不足问题,实现网络平均反馈时延的大幅降低。

1.2.2 非3GPP设备的异构CoISAC设计

除传统射频收发设备外,许多非3GPP设备的感知能力可以与通信网络中获得的感知数据进行融合,从而辅助提升CoISAC系统感知精度。例如,文献[21]采用摄像机辅助基站进行移动车辆的波束预测,利用循环卷积网络进行信道参数学习,与穷举法相比波束训练开销降低99%,可实现成功率约为65%的波束预测功能,基于非3GPP设备的异构CoISAC系统如图6所示。然而,非3GPP设备的感知数据与无线信号的数据类型有较大差异,可用数据处理工具较少。现有研究普遍采用较为简单的加权求和的方式进行感知结果融合,并利用神经网络或机器学习等工具对不同设备的融合权重进行学习^[22]。非3GPP设备的CoISAC设计目前还处于研究初期,融合方

法较为直接,需要更多先进融合算法和相关理论指导系统设计^[8]。

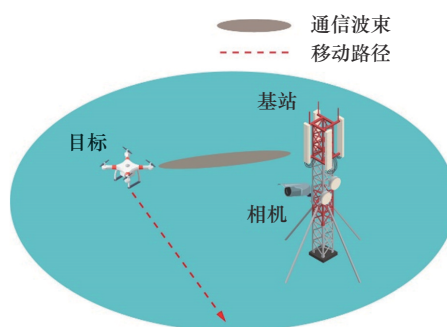


图6 基于非3GPP设备的异构CoISAC系统

2 CoISAC系统感知性能评估与CRB协同设计

协同技术引入多元设备提供了额外通感增益,同时也带来了相关技术难题。本文针对CoISAC系统感知性能评估指标不完善、同构多站CoISAC系统信号互干扰严重和能耗开销较大、异构RIS辅助的CoISAC系统级联信道估计和波束成形等问题,总结分析了现有研究的最新技术成果与前沿研究方向。

2.1 CoISAC系统感知性能评估

现有研究在通感性能指标的选取上大多采用

较为简单的方式,即直接延续传统通信和雷达系统相关评估指标进行系统通感功能的设计。例如,文献[23]中采用约束通信速率的方法,通过最大化感知信号的SINR实现系统发送波束成形的设计。该方法具有设计简单、计算复杂度低的优势,但该方式所采用的SINR作为感知性能指标仅能保证所接收的感知信号质量具有一定保障,无法保证系统感知精度、覆盖范围等具体感知性能,该问题被称为感知指标的泛化性问题。现有研究所采用的主要通信和感知性能指标总结见表1,表1对相关指标的泛化性问题和系统设计难度进行了总结。

通信系统的描述一般采用可达速率(achievable rate)^[23]、通信SINR^[24-25]、中断概率^[26]和遍历速率^[27]这4项指标,以上指标可根据使用场景不同进一步详细分类。通信SINR、可达速率和遍历速率主要用于描述不同情况下的通信系统容量。这3项指标由于表达式复杂程度不同,设计难度依次提升。其中,通信SINR表现为二次项形式,系统通信性能设计较为简单,但无法直接反映系统实际性能,缺乏客观性保障;可达速率与SINR相比需要额外考虑非线性对数运算,参数耦合造成设计难度较高,但能够客观反映真实通信速率,且可利用已有通信技术进行设计简化,常被用于各类ISAC系统设计^[23]。遍历速率

主要用于评估信道条件较差时(如信道状态信息获取质量较差)的系统通信容量,具有客观评估系统性能的优势,由于涉及复杂期望运算,难以直接用于通信性能设计,常利用数学近似手段处理后使用^[27]。与前述3项指标不同,中断概率以概率形式对通信系统的可靠性进行描述。该指标虽能客观描述系统通信性能,但涉及积分运算难以进行系统设计,常考虑作为评价类指标对系统可靠性进行分析^[26]。

感知性能评估和设计通常采用检测概率^[28]、感知SINR^[23]、感知SNR^[29-30]、互信息量(mutual information, MI)^[24]、波形图旁瓣差(difference between peak and side lobe, DPSL)^[25]这5种指标,以上指标可根据使用场景不同分为以下3类。

(1) 感知SINR、感知SNR、MI这3项指标从感知信号质量角度对感知性能进行描述,该类指标具有较为简单的二次结构的数学表示形式,易于系统设计。然而,该类指标未直接关注系统感知性能是否达到实际需求,存在无法保证系统真实感知性能的问题。

(2) 波形图DPSL指标描述了感知波形的主瓣方位和强度,并在一定程度上抑制了旁瓣电平,具有表达式较为简单且易于设计的优势,但与前述指标类似,无法真实反映系统的真实感知性能,缺乏实际保障。

表1 现有研究所采用的主要通信和感知性能指标总结

通信/感知性能指标		文献	评价指标	设计指标	泛化性指标	设计难度
通信指标	可达速率	[23]	√	√		一般
	通信SINR	[24-25]		√	√	简单
	中断概率	[26]	√			不可行
	遍历速率	[27]	√	√		困难
感知指标	检测概率	[28]	√			不可行
	感知SINR	[23]		√	√	简单
	感知SNR	[29-30]		√	√	简单
	互信息量	[24]		√	√	一般
	波形图旁瓣差	[25]	√	√	√	一般
	CRB	[31-33]	√	√		困难



(3) 检测概率指标重点关注所在方位是否存在目标以及成功检测概率, 该指标与前述指标不同, 具有客观性评价系统性能的优势, 但计算过程涉及复杂积分和分式运算, 多作为评估指标进行系统性能反馈, 目前尚未见有直接基于中断概率的CoISAC系统设计。

为解决上述难题, 可结合信号估计理论, 采用克拉美罗下界 (Cramer-Rao lower bound, CRB) 进行系统感知性能的评估和设计。该指标能够客观反映系统中待估计参数的极限性能, 与经典感知指标均方误差 (mean square error, MSE) 具有高度相关性, 可为系统实际性能提供理论保障, 即:

$$E\left\{\left(\hat{\theta}-\theta\right)\left(\hat{\theta}-\theta\right)^{\mathrm{T}}\right\} \geq J^{-1}(\theta) \triangleq \text{CRB} \quad (1)$$

其中, $J(\theta)$ 为费舍尔信息矩阵 (Fisher information matrix, FIM), 用于获取全部待估计量的参数信息, 满足如下关系。

$$J(\theta)=-E\left[\frac{\partial^2 \ln p(y, \theta)^{\mathrm{H}}}{\partial \theta \partial \theta^{\mathrm{H}}}\right] \quad (2)$$

其中, $p(y, \theta)$ 为观测信号 y 的关于待估计参数 θ 的似然函数。

在传统信号处理领域, CRB 常作为基线评价指标对估计算法进行性能评估。由于 FIM 的闭式表达式获取较为困难, 因此早期通感一体化领域并未使用该指标作为系统设计指标。随着传统感知性能指标的泛化性特点逐渐显露, 在多种场景下无法保证感知性能满足应用需求, 研究人员尝试采用 CRB 作为设计指标提升系统性能^[31-33]。

采用 CRB 作为感知指标的非协同感知性能表现如图 7 所示, 图 7 给出了 CRB 作为定位设计指标、可达速率作为通信设计指标时, 通过最小化 CRB、约束通信用户速率的方式, 设计的 28 GHz 单基站发射波束定位性能表现。由图 7 可知, CRB 指标与互信息量 MI、感知 SNR 相比, 定位

均方根误差 (root mean square error, RMSE) 下降 2.58 dB; 与波形图 DPSL 指标相比, RMSE 下降 3.36 dB, 随着接收信号 SNR 提升, 定位精度可达到分米至厘米级。此外, 当接收信号 SNR 上升至 20 dB, 由于用户通信速率限制, 此时通信性能和感知性能开始出现性能折中, 因此, 感知性能增速出现一定程度的减缓。

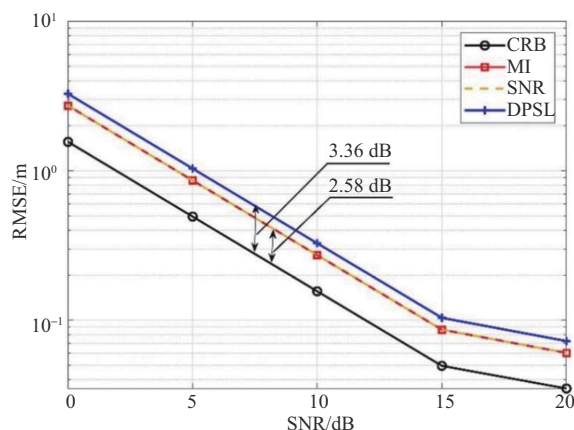


图 7 采用 CRB 作为感知指标的非协同感知性能表现

CoISAC 系统作为通感一体化系统的网络化延伸, 可继续将通信可达速率及感知 CRB 指标用于 CoISAC 系统设计。然而, CoISAC 系统引入协同设备提升了通感性能的同时, 也带来了不可避免的协同设计困难。例如, 采用 CRB 指导非协同通感一体化设计, 波束成形设计问题可通过较为简单的方式转化为半正定规划 (semi-definite programming, SDP) 问题^[34], 但在 CoISAC 系统中接收信号的多元化导致采用传统方式无法顺利求解原有问题, 需要针对不同系统类型提出针对性解决方案。

2.2 基于 CRB 的 CoISAC 系统协同设计

本节以现有研究中两种典型 CoISAC 系统为例, 展示同构多站 CoISAC 系统和异构 RIS 辅助的 CoISAC 系统协同设计。两种系统在性能提升和系统开销方面各有所长、相互补充。

2.2.1 同构多站 CoISAC 系统

通过引入额外设备的接收信号, 多站协同的

CoISAC 系统可获得通感性能增益的直接提升。与此同时,接收端的信号互干扰随协同设备的密集程度迅速升高,主要包含通信用户间的互干扰、通信用户和感知目标间的互干扰两种。为解决该问题,早期研究主要采用时分雷达通信(time division radar-communication, TDRC)^[35]、频分雷达通信(frequency division radar-communication, FDRC)^[36]、空分多址(space division multiple access, SDMA)^[37]这3种较为简单的方式进行波形设计,旨在利用正交多址的方式对干扰信号进行抑制。然而,时分和频分两种方式在相应的时频资源内仅作为通信或感知系统使用,频谱利用率较低,且不符合通感融合的设计理念,因此后续相关研究较少。SDMA方式在干扰较弱且通感用户较少的情况下效果较好,但随着干扰信号的加强,通感性能严重下降^[38]。

针对多站 CoISAC 系统信号互干扰严重的问题,可采用速率分多址接入(rate-splitting multiple access, RSMA)技术对多站通感信号的互干扰进行抑制。该技术是介于传统正交和非正交之间的一种灵活多址接入技术,通过引入串行干扰消除(successive interference cancellation, SIC)设备,以少量硬件开销和信号处理复杂度为代价,对通信用户间干扰以及通感间信号干扰进行消除或抑制。此外,针对上节提到的 CoISAC 系统采用 CRB 作为感知指标,存在系统设计难度较大的问题,可结合等价 FIM(equivalent FIM, EFIM)分析方法和矩阵提升(matrix lifting)技术,将 CRB 表达式转化为关于波束的凸函数形式,便于系统设计。

设 RSMA 中公有消息(common message)和私有消息(private message)的波束成形矩阵分别为 $\mathbf{W}_c = \mathbf{w}_c \mathbf{w}_c^H$ 、 $\mathbf{W}_p = \mathbf{w}_p \mathbf{w}_p^H$,则目标角度的 EFIM 矩阵中任一元素与波束矩阵具有如下线性表达式。

$$[\mathbf{J}_e]_{i,j} = \frac{2}{\sigma^2} \text{Tr} \left(\mathbf{W}_c \mathbf{F}_{i,j} + \sum_{k=1}^K \mathbf{W}_p \mathbf{F}_{i,j} \right) \quad (3)$$

其中, σ^2 为噪声功率, $\mathbf{F}_{i,j} = \left(\frac{\partial \mathbf{A}^H}{\partial \omega_i} \odot \mathbf{B}^H \right) \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^L$ $\left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \omega_j} \odot \mathbf{B} \right)$ 仅与信道状态和待感知目标有关(证明及具体参数介绍参见文献[33]), $\text{Tr}(\cdot)$ 为矩阵求迹运算符。需要指出的是,式(3)中 EFIM 的表达形式具有较强的普适性,可适用于不同场景下的多站 CoISAC 系统。例如,令 $\mathbf{W}_c = \mathbf{0}$, 系统可简化为基于 SDMA 的 CoISAC 系统,反之令 $\mathbf{W}_p = \mathbf{0}$, 则为广播 CoISAC 系统^[39]。

CoISAC 中感知指标可根据上述方法得到有效化简,结合通信技术中加权最小均方误差(weighted minimum mean square error, WMMSE)算法,研究人员进一步提出了一种基于连续凸近似(successive convex approximation, SCA)框架的联合波束成形和多站选取算法,可用于求解复杂 CoISAC 系统下的多参数资源分配问题。该算法一方面能够实现高效的干扰管理性能,另一方面有助于提高系统通信和感知性能增益,实现 CoISAC 系统的通感性能边界的高增益折中,具体算法流程参见文献[33]。基于 RSMA 的同构多站系统的通感性能表现如图 8 所示,仿真结果表明,RSMA 技术与传统 TDRC、FDRC 和 SDMA 正交多址接入相比,具有显著的干扰管理性能,以少量的系统架构开销为代价获得高增益的通感性能,通信性能可提高 0.46 bit/(s·Hz),定位精度可提高 1.93 m^[33]。

为便于通感信息高效处理并实现高精度同步,现有同构多站 CoISAC 系统多采用基于 C-RAN 的网络化拓扑结构^[40-42]。研究人员在通信 SINR 和位置 CRB 限制条件下,采用半正定松弛(semi-definite relaxation, SDR)算法实现通感性能有效功率分配,并给出了低算法复杂度的 CRB 近似设计方案^[42]。不同通信 SINR 限制下同构多站系统的能耗性能表现如图 9 所示,图 9 给出了不同通信 SINR 条件下多站 CoISAC 的总发送功率最小化设计。由图 9 可知,SDR 算法在不同 CRB

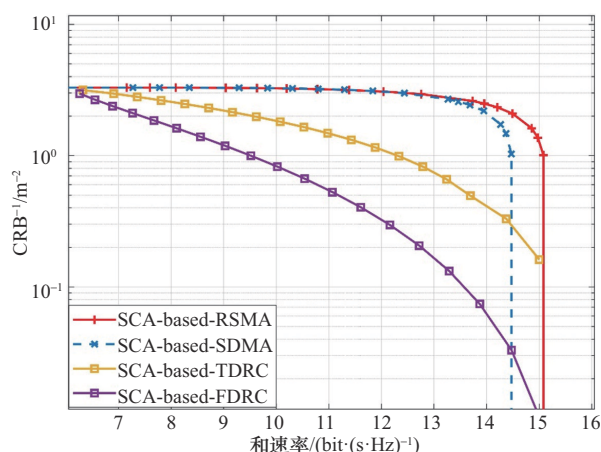


图8 基于RSMA的同构多站系统的通感性能表现

情况下 ($\tau=0.03, 0.05$) 与传统通感分离设计相比, 可有效降低系统总发送功率, 实现低功耗通感一体化设计。

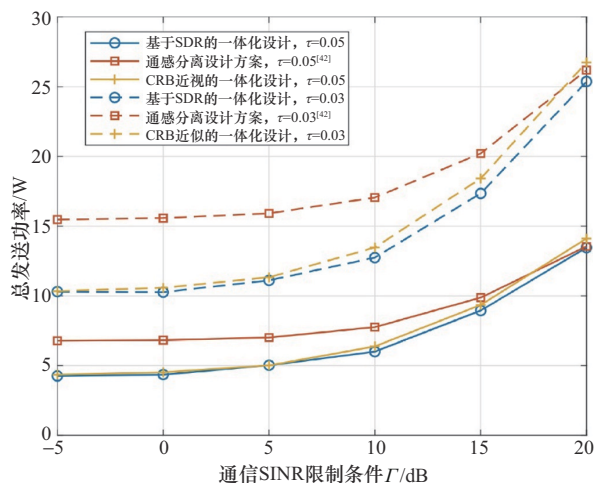


图9 不同通信 SINR 限制下同构多站系统的能耗性能表现

2.2.2 异构 RIS 辅助的 CoISAC 系统

针对多站 CoISAC 系统协同链路开销较大、复杂遮挡区域无法全面覆盖的问题, 结合 RIS 准无源、易部署的特点, 研究人员提出了 RIS 辅助的 CoISAC 系统, 采用 RIS 替代部分多站, 实现室内、建筑群等复杂区域内的通感信号覆盖。RIS 辅助的 CoISAC 系统的研究主要可针对两个方面展开: RIS 级联信道估计问题、基站和 RIS 联合波束配置问题。

RIS 技术的诞生早期主要用于对信号盲区范

围进行通信功能补偿, 在 RIS 技术早期即有人开展 RIS 信道估计技术研究。例如, 文献[43]提出了基于迭代思路的级联信道估计算法, 通过分别估计 RIS 级联信道的两部分, 实现对 CSI 信息的准确获取。该方法同样适用于 CoISAC 系统。然而该类算法迭代复杂度较高, 实际系统应用难度较大。为此, 文献[44]提出了一种基于坐标块下降 (block coordinate descent, BCD) 的低复杂度算法, 该算法可将高维求解问题转化为多个一维问题进行求解, 以牺牲少量信道估计精度为代价, 有效降低了原联合波束成形问题的求解复杂度。

为提高 RIS 辅助下 CoISAC 系统的通感性能, 研究人员提出了多种联合设计基站和 RIS 波束算法, 采用不同数学方法有效克服了 CRB 设计难度较大的问题^[17,45-46]。文献[45-46]将 CRB 的复杂感知限制条件等价转化为两项易于处理的凸函数形式, 并采用交替迭代算法对联合波束进行近似最优求解。文献[17]进一步考虑在有源 RIS 辅助的 CoISAC 系统中实现联合波束设计, 通过严格数学推导给出了对应系统下的 CRB 表达形式, 并采用数学理论 S 流程 (S-Procedure) 方法对波束设计问题进行求解。基于异构有源 RIS 的用户角度 CRB 性能表现如图 10 所示, 图 10 给出了不同发送功率下, 有源 RIS (active RIS, ARIS) 设计和无源 RIS (passive RIS, PRIS) 设计的目标角度 CRB 性能表现, 其中, $a_{\max}$ 为 RIS 有源放大系数。为保证对比公平性, 有源 RIS 功率 P_{RIS} 与基站功率总和与无源 RIS 系统功率相等。由图 10 可知, 有源 RIS 辅助的 CoISAC 感知性能与无源设计相比可获得 30 dB 的性能提升, 原因在于有源 RIS 系统将部分功率分配至距离目标位置更近的风险端, 有效降低了信号历经 RIS 产生的二次反射损耗^[17]。

由于感知技术难以精确估计目标位置, 且目标可能存在频繁移动, 实际 CoISAC 系统需要对目标所在区域进行波束覆盖, 从而实现有效的目标定位性能。为解决该问题, 本文提出对区域内

定位性能最差位置进行CRB性能优化,实现对区域内任意位置用户的可靠波束覆盖。所述区域覆盖问题在数学上称为“minimax”问题,又称极小值极大值问题或鞍点问题(saddle point problem),该问题具有较强的非凸—非凹性质,暂无可用的数学工具进行直接求解^[47]。为此,可将minimax问题拆解为内部最差位置搜索问题和外部联合波束成形优化问题分别进行求解。

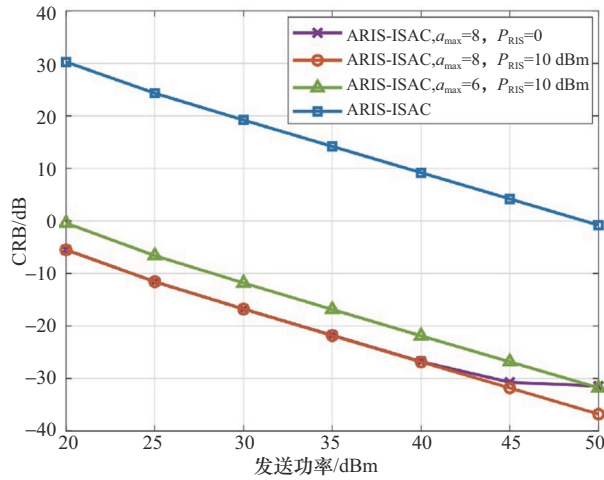


图10 基于异构有源RIS的用户角度CRB性能表现

(1) 内部最差位置搜索问题: 已有研究求解该问题时常直接采用位置遍历搜索,该方法存在计算复杂度和搜索精度之间的内在矛盾,且难以拓展至三维位置搜索问题。对该系统的感知指标CRB进行分析,可提出基于信道增益和路径损耗的联合搜索算法,将二维位置搜索问题转化为关于角度和路径损耗的两个一维搜索算法,进而获得区域最差位置坐标。

(2) 外部联合波束成形优化问题: RIS辅助的CoISAC系统中CRB表达式可转化为关于波束矩阵的凸函数形式。其中,位置相关参数(时延、出发角、到达角和路损)向量 $\eta = [\tau, \varphi, \theta, \rho]^T$ 的FIM矩阵元素满足如下表达式。

$$[J]_{i,j} = \frac{P\rho^2 N_b}{\sigma^2} \mathbf{D}(\mathbf{D}_\varphi \mathbf{\Omega} \mathbf{D}_\varphi^H) \odot (\mathbf{D}_\theta \mathbf{W} \mathbf{D}_\theta^H) \mathbf{D}^H \quad (4)$$

其中, P 、 ρ 、 N_b 分别为信号功率、级联路损和基站天线数, $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{D}_\varphi$ 、 $\mathbf{D}_\theta$ 为仅与信道状态和目标位置有关的矩阵, $\mathbf{\Omega}$ 、 $\mathbf{W}$ 分别为无源RIS波束和有源发射波束的矩阵形式。可以看出,波束矩阵与FIM呈线性关系,即就CRB指标而言,这种关系表现为易于设计的凸函数形式。需要指出的是,式(4)具有一定普适性,可根据不同系统设定进行转变。因此,外部联合波束成形问题可结合差分凸函数(difference of convex, DC)算法^[33]进行求解。

将内部和外部问题的求解结果进行单步迭代,可避免minimax问题中恶性分离或循环的收敛结果,具体算法流程参见文献[32]。基于异构RIS的区域覆盖定位性能表现如图11所示,由图11的仿真结果可知,两步法算法与传统可用于求解minimax问题的梯度-最大化(gradient descent with maximization, GD-max)算法相比,具有一倍以上的区域定位性能提升,与传统梯度下降-上升(gradient descent and ascent, GDA)算法相比,能够减缓或避免传统minimax问题求解过程中易产生的恶性分离收敛情况^[32]。

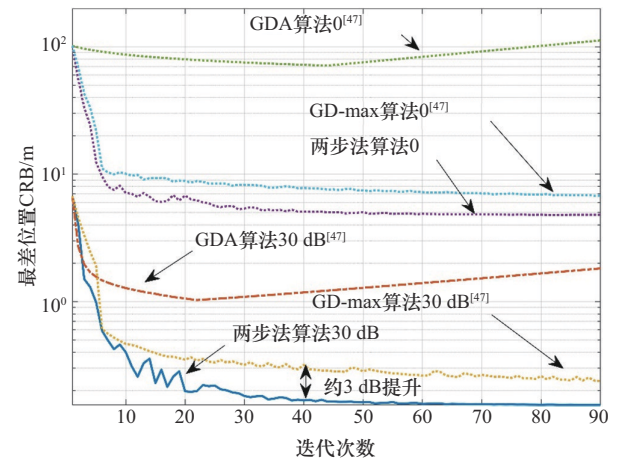


图11 基于异构RIS的区域覆盖定位性能表现

3 技术挑战与展望

以上研究表明网络化协同技术在通感一体化系统的性能提升、干扰抑制、资源利用等方面具



有显著优势,然而,现阶段与 CoISAC 相关技术的研究仍处于发展初期,在协同效率评估指标、多模态异构设备的感知融合、一体化波形设计以及高精度同步系统设计等方面仍面临多种挑战。

3.1 协同效率评估指标

对 CoISAC 系统的协同性能进行客观评估,形成有效且全面的评价体系,是合理分配协同设备时频资源的基础。现有 CoISAC 研究主要关注协同设备带来的通信和感知性能增益,缺少对协同设备效率的有效评估,易造成大量引入协同资源但通感性能提升有限的问题。然而,协同效率的评估需要对协同设备的时频资源开销和通感性能增益进行精确衡量,涉及较为复杂的信息耦合和理论性能极限分析,相关研究可从以下两个方向展开。

(1) 基于信息论的协同效率分析:通过对通感接收信号的有效信息提取,结合信息损失量的分析,研究人员可以从信息量的角度对协同设备的通信和感知效率进行分析。例如,研究人员从感知指标 CRB 的信息量出发,通过对多用户空间协同效率的信息损失量的分析,建立多用户协同效率概念^[48]。相关分析方法可扩展至更为复杂的多站或多 RIS 协同场景。

(2) 基于能量开销的协同效率分析:实际 CoISAC 系统除发送信令开销外,还涉及数模转换和算力消耗等多种复杂开销。能量开销是一种较为直接且有效的评估方法,能够全面表征各类设备的综合损耗,结合系统实际通感性能增益,可建立起体现能量损耗和通感性能的折衷关系的效率评估模型。

需要指明的是,上述两种分析方式各有利弊。从信息量角度可对发送信号的协同效率进行准确理论分析,但忽略了系统实际损耗,仅可作为效率性能上限指导 CoISAC 系统设计;从能量开销角度可全面分析系统综合功耗,但该方式高度依赖于具体建模方式,少量的参数误差可能导致效率分析失去实际意义。

3.2 多模态异构设备的感知融合

得益于机器学习和神经网络等人工智能 AI 技术的发展,传统多类型异构设备的感知结果融合逐步成为可能。摄像机在视线清晰的情况下具有高精度的定位性能和感知范围,毫米波雷达在雨雾天气等复杂情况下具有稳定的近距离精确感知结果。将不同类型的异构设备进行感知数据共享,可实现感知精度的大幅度提升,完成如姿态识别、结构检测等高复杂度的感知任务,符合从现有个体智能向未来多元化群体智能技术发展的趋势。

然而,多模态异构数据融合难度较大,且在通感场景下需要适应快速变化的信道环境,存在高精度结果计算复杂度高和低时延要求的内在矛盾。为此,在线参数实时训练的神经网络成为多模态异构 CoISAC 系统的优选解决方案。与传统线下训练神经网络不同,在线学习网络采用较少的预训练数据,克服传统网络在不同信道场景下泛化性较弱的缺陷。然而,该类网络目前仅适用于感知精度要求较低的场景,如何更好融合多模态辅助感知数据实现感知精度的有效提升,是该类型 CoISAC 系统需要解决的一个重要难题。

3.3 一体化波形设计

通信波形旨在对抗信道衰落,承载更多有效数据信息,本质是对香农极限的逼近;感知波形旨在提取目标相关信道的具体特征信息,本质是对信号估计理论极限的逼近。可见,通信和感知二者之间存在根本性矛盾,导致单一采用通信或感知信号进行一体化设计,难以实现通信感知的优良折中性能。因此,现有以通信或感知信号为主的一体化波形将成为通感一体化技术发展中的过渡性技术,并逐步被新型一体化波形代替。然而,现有研究中普遍仅考虑一体化波束成形技术研究,且依赖于具体场景设定,缺乏普适性。

未来通感一体化涉及多种感知任务类型,通信场景更加复杂,一体化波形设计面临更为严峻的挑战。以传统通信波形的设计思路作为参考,

一体化波形设计需要同时满足通信的高频谱效率和感知的高感知精度两方面的需求, 以实现高效能一体化设计。此外, 一体化波形还应具有灵活的可重构性能, 能够通过波形参数调整适应多种通感性能需求场景。

3.4 高精度同步系统设计

同步精度是影响 CoISAC 系统的感知性能的关键因素。根据电磁波传输速度粗略估计, 10 ns 的同步估计误差将引起 3 m 的定位精度误差。考虑未来 6G 系统中多元化的感知任务类型以及厘米级的定位精度要求, CoISAC 系统涉及多种类型的协同设备, 急需高精度的同步误差解决方案, 实现感知性能的有效提升, 具体可从硬件设备和软件算法两方面进行考虑。

同步误差产生的主要原因是收发两端晶振频率不同步。传统通信芯片的时钟精度要求不再适用于通感一体化系统, 从硬件角度提升时钟精度将从根源上缓解由此带来的感知误差。此外, 同步误差还受时钟参数估计算法的影响, 采用相关性较强的导频序列或设计高精度的同步算法, 可在硬件补偿的基础上从算法角度进一步降低同步误差带来的影响。

4 结束语

本文总结了当前通感一体化技术所面临的挑战和网络化 CoISAC 协同技术的发展现状, 分析了同构和异构两种不同系统的优势及存在的问题; 针对感知指标的泛化性问题, 提出采用 CRB 作为感知性能的有效评估指标, 仿真实验证明了 CRB 指标与传统感知指标相比具有 3 dB 左右的定位精度提升, 可达到分米至厘米级定位精度; 针对同构多站系统的干扰管理问题、功率分配、RIS 异构系统的有源波束设计和区域定位问题, 总结了现阶段基于 CRB 指标协同设计的最新技术成果并给出了多种协同设计方案, 仿真结果说明了采用 CRB 指标进行系统设计, 可实现感知性能的有效

提升; 最后, 总结了本领域技术发展所面临的挑战并对未来发展方向进行了展望。

参考文献:

- [1] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(4): 1-11.
YAN S, PENG M G, WANG W B. Integration of communication, sensing and computing: the vision and key technologies of 6 G[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(4): 1-11.
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G 前沿关键技术研究报告[R]. 2022.
IMT-2030(6G)Promotion Group. 6G frontier key technology research report[R]. 2022.
- [3] MEALEY R M. A method for calculating error probabilities in a radar communication system[J]. IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry, 1963, 9(2): 37-42.
- [4] LIU F, ZHENG L, CUI Y H, et al. Seventy years of radar and communications: the road from separation to integration[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2023, 40(5): 106-121.
- [5] 胡小玲, 于周源, 钱晓伟, 等. 智能超表面系统的通信感知一体化: 现状、设计与展望[J]. 电信科学, 2022, 38(9): 36-49.
HU X L, YU Z Y, QIAN X W, et al. Integrated sensing and communication in reconfigurable intelligent surface systems: status, design and outlook[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(9): 36-49.
- [6] MAHLER R P S. Statistical multisource-multitarget information fusion[M]. Boston: Artech House, 2007.
- [7] CUI Y H, LIU F, JING X J, et al. Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: applications, trends, and challenges[J]. IEEE Network, 2021, 35(5): 158-167.
- [8] 杨杰, 黄艺璇, 杜涛, 等. 通信感知一体化原型验证的研究现状与发展趋势[J]. 通信学报, 2023, 44(11): 43-54.
YANG J, HUANG Y X, DU T, et al. Prototype verification for integrated sensing and communications: current status and development trends[J]. Journal on Communications, 2023, 44(11): 43-54.
- [9] IMT-2030(6G)推进组. 6G 通感融合系统设计研究报告[R]. 2023.
IMT-2030(6G)Promotion Group. 6G sensing and communication system design research report[R]. 2023.
- [10] LIU S, LI M, LIU Q. Joint BS mode selection and beamforming design for cooperative cell-free ISAC networks[J]. arXiv preprint, 2023, arXiv:2305.10800.
- [11] JI K J, ZHANG Q X, WEI Z Q, et al. Networking based ISAC hardware testbed and performance evaluation[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(5): 76-82.
- [12] WEI Z Q, JIANG W J, FENG Z Y, et al. Integrated sensing and



- communication enabled multiple base stations cooperative sensing towards 6G[J]. *IEEE Network*, 2024, 38(4): 207-215.
- [13] HASSANIEN A, AMIN M G, ZHANG Y D, et al. Dual-function radar-communications: information embedding using sidelobe control and waveform diversity[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(8): 2168-2181.
- [14] GU M X, LEE M C, LIU Y S, et al. Design and analysis of frequency hopping-aided FMCW-based integrated radar and communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(12): 8416-8432.
- [15] GAUDIO L, KOBAYASHI M, CAIRE G, et al. On the effectiveness of OTFS for joint radar parameter estimation and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(9): 5951-5965.
- [16] LIU R, LI M, SWINDEHURST A L. Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems[C]//*Proceedings of the 2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 997-1001.
- [17] ZHU Q, LI M, LIU R, et al. Cramér-Rao bound optimization for active RIS-empowered ISAC systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, PP(99): 1.
- [18] OZTURK C, KESKIN M F, WYMEERSCH H, et al. RIS-aided near-field localization under phase-dependent amplitude variations[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(8): 5550-5566.
- [19] ZHAO Y Q, XU W, YOU X H, et al. Cooperative reflection and synchronization design for distributed multiple-RIS communications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2022, 16(5): 980-994.
- [20] CAO D, WU M H, GU N, et al. Joint optimization of computation offloading and resource allocation considering task prioritization in ISAC-assisted vehicular network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, PP(99): 1.
- [21] JIANG S F, ALKHATEEB A. Computer vision aided beam tracking in a real-world millimeter wave deployment[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 142-147.
- [22] LI X F, CHEN M Z, LIU Y C, et al. Graph neural networks for joint communication and sensing optimization in vehicular networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(12): 3893-3907.
- [23] LI B, PETROPULU A. MIMO radar and communication spectrum sharing with clutter mitigation[C]//*Proceedings of the 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [24] NI Z T, ZHANG J A, YANG K, et al. Multi-metric waveform optimization for multiple-input single-output joint communication and radar sensing[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 1276-1289.
- [25] CHEN L, LIU F, WANG W D, et al. Joint radar-communication transmission: a generalized Pareto optimization framework[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021(69): 2752-2765.
- [26] LIU M, YANG M L, WEI F, et al. A nonorthogonal uplink/downlink IoT solution for next-generation ISAC systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(5): 8224-8239.
- [27] XU C C, CLERCKX B, CHEN S W, et al. Rate-splitting multiple access for multi-antenna joint radar and communications[J]. *arXiv preprint*, 2021, arXiv: 2103.07914.
- [28] DONG F W, LIU F, CUI Y H, et al. Sensing as a service in 6G perceptive networks: a unified framework for ISAC resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(5): 3522-3536.
- [29] HE J G, WYMEERSCH H, SANGUANPUAK T, et al. Adaptive beamforming design for mmWave RIS-aided joint localization and communication[C]//*Proceedings of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [30] WYMEERSCH H, DENIS B. Beyond 5G wireless localization with reconfigurable intelligent surfaces[C]//*Proceedings of ICC 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [31] GAO P, LIAN L X, YU J P. Optimal passive beamforming for cooperative localization with RIS-assisted mmWave systems[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 222-227.
- [32] GAO P, LIAN L X, YU J P. Wireless area positioning in RIS-assisted mmWave systems: joint passive and active beamforming design[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2022(29): 1372-1376.
- [33] GAO P, LIAN L X, YU J P. Cooperative ISAC with direct localization and rate-splitting multiple access communication: a Pareto optimization framework[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(5): 1496-1515.
- [34] LIAO B, XIONG X, QUAN Z. Robust beamforming design for dual-function radar-communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(6): 7508-7516.
- [35] KUMARI P, MYERS N J, HEATH R W. Adaptive and fast combined waveform-beamforming design for MMWave automotive joint communication-radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(4): 996-1012.
- [36] SIT Y L, NUSS B, ZWICK T. On mutual interference cancellation in a MIMO OFDM multiuser radar-communication network[J].

- IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 3339-3348.
- [37] YIN H J, LIU H. Performance of space-division multiple-access (SDMA) with scheduling[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 611-618.
- [38] XU C C, CLERCKX B, CHEN S W, et al. Rate-splitting multiple access for multi-antenna joint radar and communications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2021, 15(6): 1332-1347.
- [39] MAO Y J, DIZDAR O, CLERCKX B, et al. Rate-splitting multiple access: fundamentals, survey, and future research trends[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2073-2126.
- [40] BEHDAD Z, DEMIR Ö T, SUNG K W, et al. Multi-static target detection and power allocation for integrated sensing and communication in cell-free massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, PP(99): 1.
- [41] DEMIRHAN U, ALKHATEEB A. Cell-free ISAC MIMO systems: joint sensing and communication beamforming[J]. arXiv preprint, 2023, arXiv: 2301.11328.
- [42] HUANG Y, FANG Y, LI X M, et al. Coordinated power control for network integrated sensing and communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(12): 13361-13365.
- [43] WEI L, HUANG C W, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Channel estimation for RIS-empowered multi-user MISO wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(6): 4144-4157.
- [44] ZHONG K, HU J F, PAN C H, et al. Joint waveform and beamforming design for RIS-aided ISAC systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2023(30): 165-169.
- [45] LIU R, LI M, LIU Q, et al. SNR/CRB-constrained joint beamforming and reflection designs for RIS-ISAC systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(7): 7456-7470.
- [46] LYU W T, YANG S J, XIU Y, et al. CRB minimization for RIS-aided mmWave integrated sensing and communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(10): 18381-18393.
- [47] JIN C, NETRAPALLI P, JORDAN M. What is local optimality in nonconvex-nonconcave minimax optimization?[C]//Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. New York: PMLR Press, 2020: 4880-4889.
- [48] GAO P, LIAN L, YU J. Efficiency of spatial correlation for multi-RIS-assisted multi-user direct localization[C]//Proceedings of ICC 2023 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 2741-2746.

[作者简介]



高鹏 (1997-), 男, 博士, 国网电力科学研究院有限公司工程师, 主要研究方向为无线通信、通感一体化、卫星通信。



周飞飞 (1986-), 男, 国网电力科学研究院有限公司工程师, 主要研究方向为新型电力通信系统、通感一体化、卫星通信。



王启兴 (1999-), 男, 上海科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星通信、频谱共存。



廉黎祥 (1991-), 女, 博士, 上海科技大学信息科学与技术学院助理教授, 主要研究方向为通信感知一体化、机器学习与无线通信应用。



余金培 (1965-), 男, 博士, 中国科学院微小卫星创新研究院研究员, 主要研究方向为深度学习方法的在轨应用、卫星通信、卫星研制与空间科学应用。



马涛 (1983-), 男, 国网电力科学研究院有限公司高级工程师、技术标准管理委员会委员, 江苏省科学技术协会首席专家, 主要研究方向为电力系统通信、电力 LTE 宽带无线应用技术。