

智能超表面在通信感知一体化系统中的应用



Applications of Reconfigurable Intelligent Surface for Integrated Sensing and Communication

刘让/LIU Rang, 罗泓昊/LUO Honghao, 李明/LI Ming

(大连理工大学, 中国 大连 116024)

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202203009

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20220620.1444.002.html>

网络出版日期: 2022-06-21

收稿日期: 2022-05-24

摘要: 通过对智能超表面 (RIS) 辅助无线通信系统和雷达感知系统的工作原理、性能优势和实际应用的介绍, 揭示了 RIS 辅助通感一体化系统的可行性、优势及应用前景, 重点探讨了将 RIS 在近场通信和感知、双站感知、宽带系统中的挑战和机遇, 以及在通感一体化 (ISAC) 系统中部署有源、多个、无人机携带 RIS 等的可能性。认为人工智能将会给相关研究提供更有效和更鲁棒的算法设计方案。

关键词: RIS; 通感一体化; 反射系数设计; 多天线系统; 波束赋形设计

Abstract: After reviewing the functionalities, advantages, and practical applications of reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted wireless communication systems and RIS-assisted radar sensing systems, the feasibility, advancements, and prospects of RIS-aided integrated sensing and communication (ISAC) are revealed. Then, the challenges and opportunities of deploying RIS in various ISAC scenarios including near-field communication and sensing, bi-static sensing, and wideband systems are discussed, as well as the promising future directions of various RIS deployments in ISAC systems including active, multiple, and unmanned aerial vehicle (UAV)-mounted RIS. It is believed that artificial intelligence will provide more effective and robust solutions to related research.

Keywords: RIS; ISAC; reflection coefficient design; multi-antenna system; beamforming design

5G 的大规模商用有力推动了当今社会向万物智联迈进, 同时也促进了学术界和产业界对未来 6G 的研究。为了支持 6G 在智慧城市、智慧交通、智能家居等典型应用场景中的不同需求, 网络的通信、感知、计算等功能需要进一步强化和融合。因此, 除了进一步优化大规模天线阵列、毫米波通信和致密网络等传统技术之外, 亟须引入一些革命性的新技术来支撑未来 6G 网络。智能超表面 (RIS) 和通信感知一体化 (ISAC) 作为两种极具前景的创新型技术, 近年来受到了广泛关注。

RIS 的部署为系统提供了重塑信道的能力, 并为系统设计引入了新的自由度 (DoFs)。通过合理设计 RIS 反射系数, 可以实现智能操控无线传输环境, 解决盲区覆盖、边缘用户服务和信道环境恶化等通信难题, 为提升通信服务质量提供了一种高能量效率、高频谱效率、低硬件复杂度的解决方

案。在无线通信飞速发展的同时, 海量无线设备的接入和超高通信速率导致频谱资源需求激增, 进而造成了严重的频谱拥塞。针对这一难题, 业界提出了一种基于共享雷达系统和通信系统频谱资源的方案, 进一步支持两者共享天线、射频和基带软件无线电处理平台等资源, 极大地提升了系统的频谱、能量和硬件效率。

本文进一步研究和探讨 RIS 在 ISAC 系统中的应用潜力。首先, 概述了 RIS 的基本工作原理和优势, 总结了 RIS 在无线通信系统中的相关研究和应用。其次, 介绍了雷达系统中的感知需求和性能指标, 以及 RIS 辅助的雷达感知系统。然后, 介绍了面向 6G 的通信感知一体化技术, 分析对比了 RIS 辅助 ISAC 的相关研究, 并通过仿真实验证明了在 ISAC 系统中部署 RIS 的优势。随之, 讨论了 RIS 辅助 ISAC 的未来研究方向。最后, 对全文进行总结。

1 RIS 辅助无线通信

RIS 首先出现在无线通信领域, 因其具有高效智能操控

基金项目: 国家自然科学基金 (61971088)

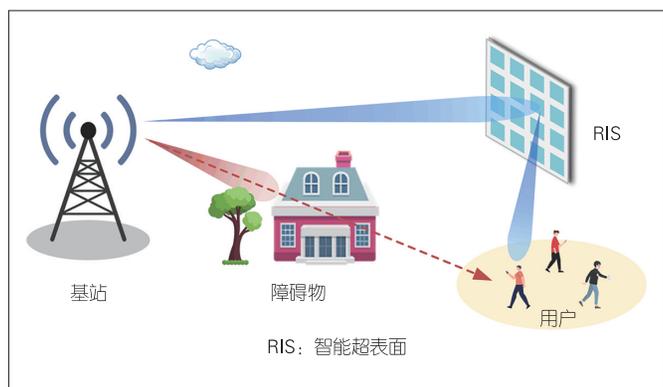
无线传输环境的能力而被视为未来6G网络的一个重要使能技术。近几年来，学术界和工业界涌现了大量关于RIS的理论研究和硬件实现，揭示了RIS辅助无线通信的优势和前景。

1.1 RIS的工作原理和优势

由超材料技术发展而来的RIS是由大量反射单元组成的。通常，这些反射单元的硬件结构非常简单且能耗极低。通过改变相应的电路参数（如偏置电压），每个反射单元可以获得不同的电磁响应，进而调控入射信号的相移、幅度、频率和极化等参数。通过协同控制多个单元参数，RIS实现了无源反射波束成形，并可构建更加有利的电磁传输环境。与传统有源中继相比，RIS具有硬件复杂度更低、能量效率更高的优势。RIS的组成器件轻便易携带，非常容易部署在建筑物表面或者移动端的表面等，因此RIS具有良好的便携性和移动性^[1]。

1.2 RIS在无线通信系统中的应用

目前无线通信系统中RIS的研究主要聚焦在联合优化RIS反射系数，以提升系统的各种性能指标。例如，最大化频谱效率/总速率/能量效率/安全传输速率/能量接收端的能量，最小化发射功率/误码率等。这些丰富广泛的应用展示了部署RIS所带来的性能增益，揭示了RIS在无线通信系统中的有效性^[2]。一个典型的RIS辅助下行多用户通信系统如图1所示。当基站与用户之间的直射链路被阻挡时，基站利用RIS建立的非直射信道实现下行多用户通信。



▲图1 RIS辅助下行多用户通信系统

2 RIS辅助雷达感知

近几十年来，无线通信系统和雷达感知系统的研究相互借鉴，共同发展。因此，在RIS辅助无线通信相关研究进行得如火如荼时，也涌现出很多关于RIS辅助雷达感知的探

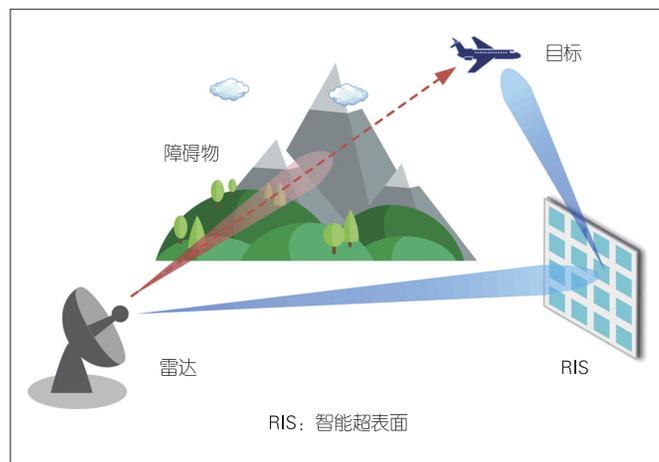
索。通过部署RIS可以改善雷达收发机与感知目标的信道环境，从而提升感知性能。

2.1 雷达感知需求和指标

在物理层的设计中，雷达感知需求主要包括检测和估计^[3-4]。检测是一个二分类或多分类任务，常用检测概率、误警率来衡量；估计指对目标的方位角、距离、速度、雷达反射截面积等参数进行估计，常用均方误差（MSE）或克拉美罗界（CRB）来衡量。考虑到检测概率、MSE、CRB等指标难以直接优化，现有研究大多采用一些间接手段，比如优化发射波形的波束方向图、最大化雷达接收回波的信噪比（SNR）或信干噪比（SINR）等。

2.2 RIS在雷达感知系统中的应用

一个RIS辅助雷达感知系统如图2所示。由于雷达与目标之间的直射（LoS）路径是实现感知功能的关键，当直射路径受到遮挡导致信号很弱甚至不存在时，可以在雷达和目标之间构建一个虚拟的LoS信道来实现盲区覆盖，保证感知性能。考虑到多跳引起的信号衰减，RIS一般部署在靠近雷达发射机或者接收机的地方。设计RIS反射系数^[5]或联合设计雷达发射波束成形和RIS反射系数^[6]，可以极大增强雷达接收的目标回波能量，从而提升目标探测性能。这些初步探索证实了RIS也能给雷达感知系统带来显著的性能增益。



▲图2 RIS辅助雷达感知系统

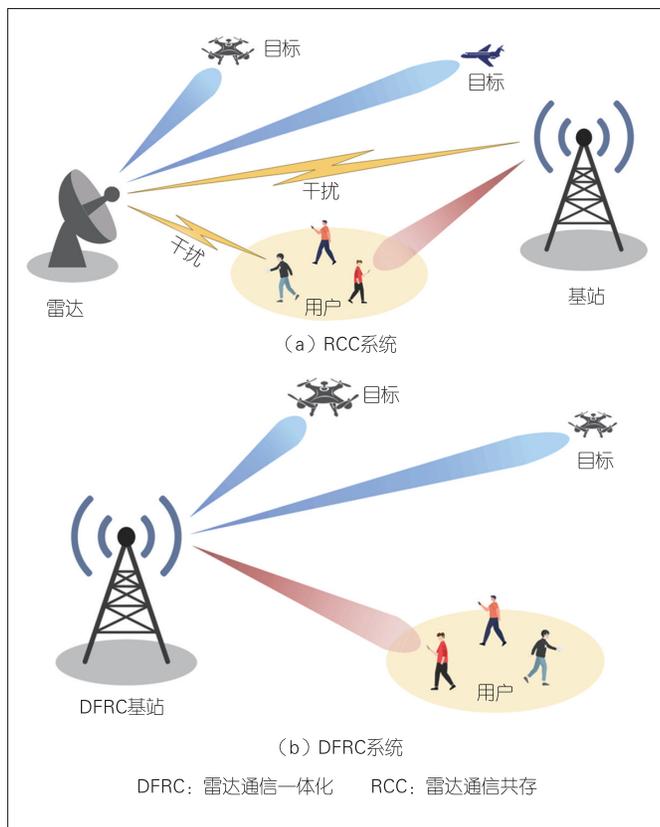
3 RIS辅助ISAC

新兴的ISAC技术融合了传统的通信系统和雷达系统，通过共享频带资源、传输波形与硬件平台，提升频谱/能量/硬件效率。在ISAC系统中部署RIS给系统设计引入了新的

自由度,通过合理设计 RIS 反射系数可以智能地调控系统的无线传输环境,更好地协调并提升通信和感知性能。

3.1 面向 6G 的 ISAC

为了支持未来 6G 网络对高速率无线通信、高精度感知能力、海量设备接入的愿景,ISAC 技术通过共享通信系统和雷达系统的频谱等资源来解决日益严重的频谱拥塞问题。ISAC 技术的产生源于无线通信系统和雷达系统存在的许多共通之处,比如,可共用的天线等射频前端硬件设备、相似的信号处理算法,以及一致的宽带大规模天线阵列系统演进趋势。ISAC 这个宏观概念涵盖了不同层次通信和感知的融合,从简单的双系统共存、协作,到一体化系统的联合设计,甚至包含通感融合的移动网络。在通过共享不同资源获得系统集成增益和协作增益的同时,这些技术方案也对 ISAC 系统的优化设计带来了严峻的挑战^[4]。比如,如图 3 (a) 所示,较简单的雷达通信共存 (RCC) 系统通过共享通信和雷达的频谱资源提升频谱利用率,对现有硬件设施部署影响最小,但是需要合理地设计二者的发射信号实现干扰管控;如图 3 (b) 所示,极具应用前景的雷达通信一体化 (DFRC) 系统使用同一个发射机在相同的频带上发射双功能



▲图3 两种常见的 ISAC 系统

的波形来同时实现通信和感知功能,极大地提升了频谱效率,减小设备尺寸、成本和功耗,但是双功能发射波形的设计对于实现更好的通信和感知性能权衡至关重要。通过与其他先进技术交织融合,ISAC 能够实现和提升系统的通信与感知能力,因此拥有很大的研究潜力。

3.2 RIS 辅助 ISAC 相关研究

现有研究表明,单独在通信系统和雷达系统中部署 RIS 可以带来显著的通信/感知性能增益。可以预见的是,在融合了通信和感知能力的 ISAC 系统中引入 RIS,可以更加灵活地协调、提升系统的通信和感知性能。对于 RCC 系统,在基站和雷达之间部署 RIS 能够提升通信用户性能,实现较好的干扰管控^[7]。对于 DFRC 系统,当探测目标的距离远大于基站与 RIS 的距离时,部署 RIS 几乎不影响目标回波,但依然可以提升系统的通信性能^[8];考虑较近目标时,通过合理优化 RIS 反射系数,可以在提升通信性能的同时增强反射路径接收的目标回波能量^[9-10]/削弱杂波能量^[11],而且联合设计基站接收滤波器可以进一步提升雷达感知性能^[12-13]。此外,多天线系统的引入以及联合波束赋形设计使能通信系统同时传输多个数据流,使能雷达系统同时监测多个目标或达到更好的目标探测效果。表 1 对上述 RIS 辅助 ISAC 的相关研究进行了总结。可以看到,在不同的 ISAC 系统中,通过联合优化 RIS 反射系数和其他变量,可以提升不同的通信和感知性能指标。

3.3 仿真结果和分析讨论

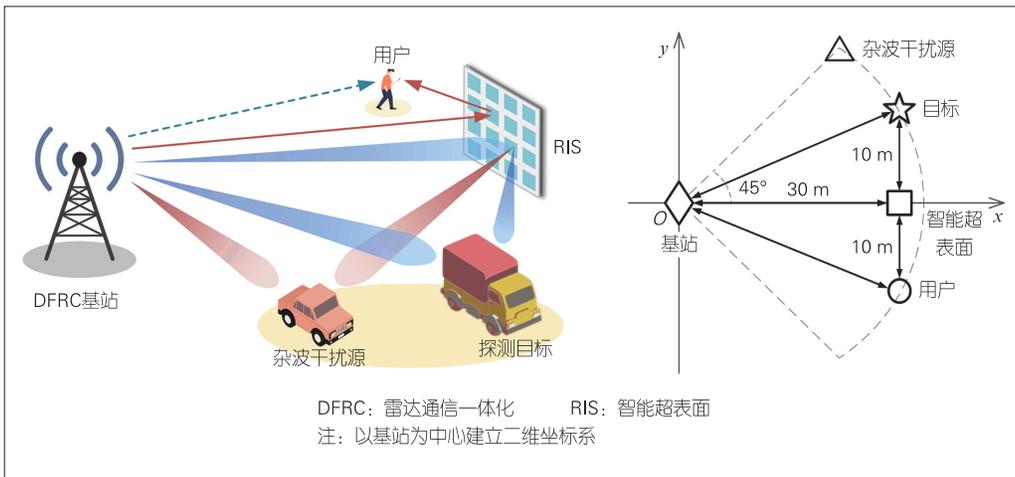
本节将通过仿真结果来验证在 DFRC 系统中部署 RIS 的有效性。为了方便分析,假设如图 4 所示的一个典型的 RIS 辅助 DFRC 系统。16 天线的基站在 N 元素 RIS 的辅助下同时服务一个单天线的用户,检测一个点目标,并且存在一个点杂波干扰源,且所有信道均只包含 LoS 路径。基站与用户/目标/杂波的路径损耗系数为 3.2, RIS 与用户/目标/杂波的路径损耗系数为 2.4,基站与 RIS 的路径损耗系数为 2.2。噪声功率为 -80 dBm,目标和杂波的 RCS 为 1,通信需求为 10 dB,发射功率为 20 dBW,每个雷达脉冲包含 20 个样本。通过联合设计 RIS 反射系数和基站的发射波形与接收滤波,在满足通信限制条件和天线恒功率发射的约束下,使雷达检测的 SINR 达到最大。为了解决这个复杂的非凸问题,通过引入辅助变量,并使用主优最小化 (MM) 和交替方向乘子 (ADMM) 法将原问题转化为几个可以解决的子问题,从而迭代求解。

图 5 展示了二维平面内 RIS 辅助 DFRC 传输环境中不同位置的能量分布。可以看到,基站形成的有源波束分别指向

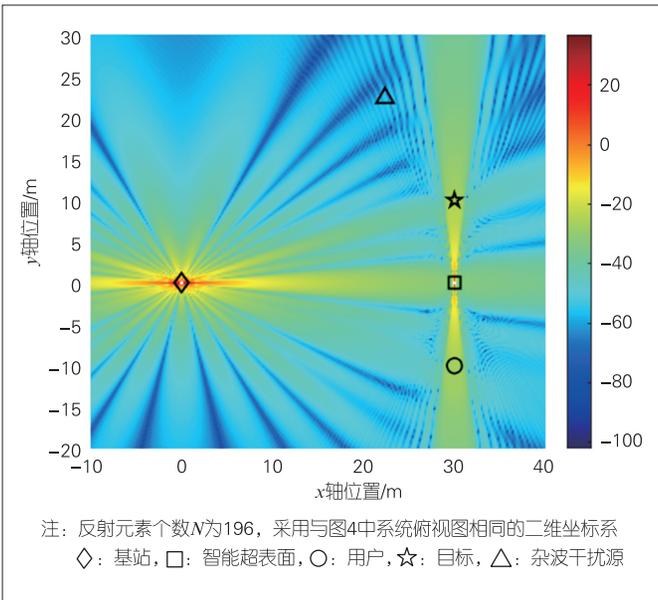
▼表1 RIS辅助ISAC相关研究总结

文献	系统模型			通信和感知性能指标	RIS是否辅助通信感知	优化变量(除反射系数外)	RIS是否影响回波	
	系统	基站天线数	通信用户数					感知目标数
[7]	RCC	基站单雷达多	单	多	SINR、SINR	否	雷达波束成形、接收滤波	否
[8]	DFRC	多	多	多	多用户干扰、方位角CRB	否	发射波形矩阵	否
[9]	DFRC	多	单	单	SNR、SNR	是	发射波束成形	是
[10]	DFRC	多	单	单	SNR、SNR	是	发射波束成形	是
[11]	DFRC(宽带、有杂波)	多	多	单	SINR、SINR	是	发射波束成形	是
[12]	DFRC(有杂波)	多	多	单	欧式距离、SINR	是	发射波形、接收滤波	是
[13]	DFRC	多	多	单	总速率、SNR	是	发射波束成形、接收滤波	是

CRB: 克拉美罗界 DFRC: 雷达通信一体化 ISAC: 通信感知一体化 RCC: 雷达通信共存 RIS: 智能超表面 SINR: 信干噪比 SNR: 信噪比



▲图4 RIS辅助DFRC系统及其俯视图



▲图5 不同位置的能量分布图

了目标、RIS和用户,RIS形成的无源波束也指向了目标和用户,同时杂波干扰源处的能量得到了抑制。

图6展示了基站接收的不同路径目标回波强度(以信噪比的形式表示)。与没有部署RIS的DFRC方案相比,更多的RIS反射单元带来的总增益更大。随着RIS反射单元的增多,RIS所能带来的增益变大。所以反射路径的信号强度逐渐变大,直射

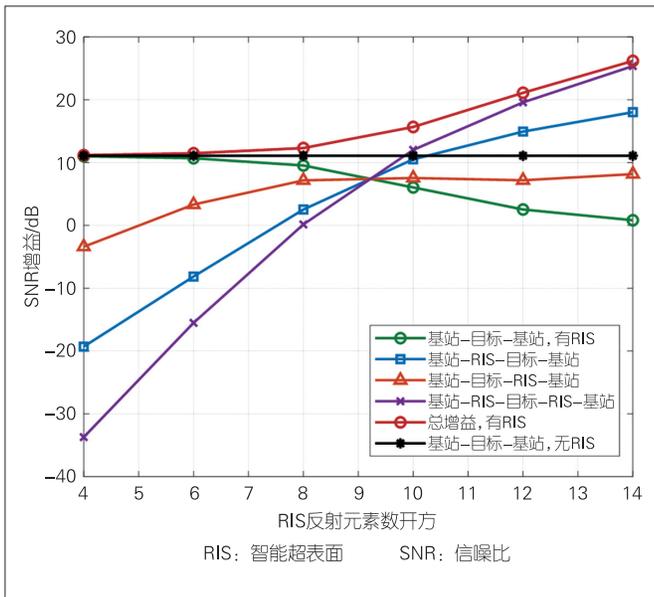
路径的反而减小。当 N 增大到一定程度时,两次经过RIS的路径最强。这些结果验证了部署和联合优化RIS的优势,还表明了大规模RIS的有效性。

4 RIS辅助ISAC的未来研究方向

上述研究初步证实了RIS辅助ISAC系统的可行性和有效性。为了进一步提升RIS辅助ISAC的性能,促进更多实际应用场景中的部署实施,本章中将探讨了一些亟待解决的问题和相关的未来研究方向。

4.1 RIS在近场通信与近场感知中的应用

随着超大规模反射阵列和更高载波频率的发展,RIS的近场范围逐渐变大。另一方面,为了获得更大的反射增益,RIS通常部署在靠近发射机/接收端的位置。因此,近场通信/感知是未来6G网络必须要面对的场景。在远场传输中,近似为平面波的电磁波可以将波束指向某个特定角度;而在



▲图6 不同路径接收回波信号强度

近场传输中, 呈现球面波特性的电磁波可以将波束集中在特定角度和特定距离的地方。这个特性对系统设计来说既是挑战又是机遇: 一方面, 基于球面波的建模使得系统的信道估计和波束设计等问题都更加复杂, 尤其是当RIS的反射单元个数和基站的天线数较多时; 另一方面, 球面波可以利用更多的空间DoFs, 在提升通信容量、实现更高感知距离/角度分辨率、提升定位精度方面具有潜力。因此, 对于RIS部署在近场区域的ISAC系统, 合理的建模和优化设计将有助于实现更好的通信和感知性能。

4.2 RIS在双站感知中的应用

在实际应用中, 为了获得较强的目标回波信号, 避免共置收发机之间的干扰, 双站感知系统比上述单站感知使用得更加广泛。在基于双站感知的ISAC系统中部署RIS有双重优势: 一方面, 对于双站系统中至关重要的同步问题, 部署RIS可以构建一条相对稳定的虚拟LoS信道, 用于在实际直射信道遮挡或较弱的情况下提供较强的参考信号; 另一方面, 同时在ISAC发射端和感知接收端部署RIS, 可以更好地实现通信感知性能权衡, 探测信号集中和杂波分离的功能。

4.3 RIS在宽带ISAC系统中的应用

分析RIS的硬件实现电路可以发现, 这些反射器件对不同频率入射信号产生的响应也不相同, 即RIS具有频率选择性。而现有关于RIS辅助宽带系统的研究并没有考虑这一特性, 这将不可避免地降低通信服务质量, 并将导致目标回波的多普勒频率模糊, 影响对目标运动速度的估计。因此在建

模RIS辅助宽带ISAC系统时, 应该将RIS的频选特性考虑在内, 并探索其对宽带通信和运动目标检测的影响。

4.4 ISAC系统中的多种RIS部署方式

除了现有ISAC研究中采用的单个无源RIS固定部署, 还有诸多其他类型和部署方式的RIS。(1) 有源RIS: 它可以放大入射信号从而克服信号多跳造成的路径衰减, 因此部署有源RIS并联合设计其放大系数和相移, 可以极大提升ISAC系统的通信和感知能力; (2) 多个RIS: 在通信/感知的热点区域或边缘区域部署多个RIS, 合理优化其部署位置并联合设计RIS反射系数, 可以提供大规模反射阵列增益, 从而保证热点区域的高通信吞吐量、高精度感知, 以及边缘区域的通信与感知覆盖; (3) 无人机携带RIS: 利用无人机引入的流动性, 通过联合优化其运动路线和RIS反射系数, 可以提供低空通信和感知, 覆盖由于地面障碍产生的盲区。

4.5 基于人工智能技术的算法设计

在RIS辅助的ISAC系统设计中, 需要优化的RIS反射系数一般较多且为离散值。RIS级联信道需要估计的参数更多, 具体的感知性能指标难以显式地表达和优化。因此, 基于传统优化方法的算法设计较为复杂, 不利于RIS的实际部署。基于人工智能(AI)技术的算法设计是一个新的思路, 有望提供一个更高效、更鲁棒、通信和感知性能更好的解决方案。

5 结束语

作为两个新兴技术的结合体, 智能超表面辅助的通信感知一体化支持高质量、广覆盖、高可靠的通信和感知功能, 将为未来6G网络发展提供有力的支撑。本文首先概述了相关技术的原理和研究现状, 然后讨论了若干亟须解决的问题和未来的研究方向, 期望能促进该技术在更多实际应用场景中的研究。

参考文献

- [1] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450–2525. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007211
- [2] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(5): 3313–3351. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3051897
- [3] LI J, STOICA P. MIMO radar with colocated antennas [J]. IEEE signal processing magazine, 2007, 24(5): 106–114. DOI: 10.1109/MSP.2007.904812
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and

下转第69页➡

- [13] KONG L, HE J G, AI Y, et al. Channel modeling and analysis of reconfigurable intelligent surfaces assisted vehicular networks [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ICCWshops50388.2021.9473681
- [14] LI A C, LIU Y, LI M, et al. Joint scheduling design in wireless powered MEC IoT networks aided by reconfigurable intelligent surface [C]//Proceedings of 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). IEEE, 2021: 159–164. DOI: 10.1109/ICCCWorkshops52231.2021.9538853
- [15] AL-HILO A, SAMIR M, ELHATTAB M, et al. Reconfigurable intelligent surface enabled vehicular communication: joint user scheduling and passive beamforming [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2022, 71(3): 2333–2345. DOI: 10.1109/TVT.2022.3141935
- [16] 尉志青, 马昊, 张奇勋, 等. 感知-通信-计算融合的智能车联网挑战与趋势 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(1): 45–49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202001010
- [17] KU Y J, BAIDYA S, DEY S. Adaptive computation partitioning and offloading in real-time sustainable vehicular edge computing [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(12): 13221–13237. DOI: 10.1109/TVT.2021.3119585
- [18] ZHANG J, GUO H Z, LIU J J, et al. Task offloading in vehicular edge computing networks: a load-balancing solution [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(2): 2092–2104. DOI: 10.1109/TVT.2019.2959410

➔上接第57页

- beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728–1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [5] BUZZI S, GROSSI E, LOPS M, et al. Foundations of MIMO radar detection aided by reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE transactions on signal processing, 2022, 70: 1749–1763. DOI: 10.1109/TSP.2022.3157975
- [6] WANG F Z, LI H B, FANG J. Joint active and passive beamforming for IRS-assisted radar [J]. IEEE signal processing letters, 2022, 29: 349–353. DOI: 10.1109/LSP.2021.3134899
- [7] HE Y H, CAI Y L, MAO H, et al. RIS-assisted communication radar coexistence: joint beamforming design and analysis [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 349–353. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3155507
- [8] WANG X Y, FEI Z S, HUANG J X, et al. Joint waveform and discrete phase shift design for RIS-assisted integrated sensing and communication system under Cramer-Rao bound constraint [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2022, 71(1): 1004–1009. DOI: 10.1109/TVT.2021.3122889
- [9] JIANG Z M, RIHAN M, ZHANG P C, et al. Intelligent reflecting surface aided dual-function radar and communication system [J]. IEEE systems journal, 2022, 16(1): 475–486. DOI: 10.1109/JSYST.2021.3057400
- [10] YAN S C, CAI S, XIA W C, et al. A reconfigurable intelligent surface aided dual-function radar and communication system [C]//Proceedings of 2022 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications & Sensing. IEEE, 2022: 1–6. DOI: 10.1109/JCS54387.2022.9743509
- [11] WEI T, WU L L, MISHRA K V, et al. Multiple IRS-assisted wideband dual-function radar-communication [C]//Proceedings of 2022 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications & Sensing. IEEE, 2022: 1–5. DOI: 10.1109/JCS54387.2022.9743502
- [12] LIU R, LI M, LIU Y, et al. Joint transmit waveform and passive beamforming design for RIS-aided DFRC systems [J]. IEEE journal on selected topics in signal processing, 2022, 1. DOI: 10.1109/jstsp.2022.3172788
- [13] LIU R, LI M, SWINDLEHURST A L. Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems [EB/OL]. [2022-05-25]. <https://arxiv.org/abs/2203.00265>

作者简介



刘文帅, 南京信息工程大学在读硕士研究生; 主要研究领域为智能超表面技术、移动边缘计算。



李斌 (通信作者), 南京信息工程大学副教授; 主要研究领域为无人机通信、移动边缘计算、智能超表面技术; 主持和参与科研项目近 10 项, 获江西省自然科学奖一等奖 1 项; 发表论文 30 余篇, 获授权发明专利 5 项。

作者简介



刘让, 大连理工大学在读博士研究生; 主要研究方向为通感一体化、智能超表面、符号级预编码。



罗泓昊, 大连理工大学在读本科生; 主要研究方向为通感一体化和智能超表面。



李明, 大连理工大学教授、信息与通信工程学院院长; 主要研究领域为无线通信系统中的信号处理技术, 涵盖了通感一体化、智能超表面、毫米波通信、大规模多入多出系统和物理层安全通信等诸多应用场景; 2018 年获辽宁省自然科学奖二等奖、辽宁省通信学会学术论文一等奖, 2017 年获辽宁省自然科学学术成果奖一等奖, 2019 年获辽宁省自然科学学术成果奖三等奖; 发表论文 100 余篇, 获授权专利 5 项。