

可重构智能表面辅助的通信感知一体化系统



Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Integrated Sensing and Communication System

杨晓宇/YANG Xiaoyu, 尉志青/WEI Zhiqing,
孟春伟/MENG Chunwei

(北京邮电大学, 中国 北京 100876)
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202205005

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20221013.1459.014.html>

网络出版日期: 2022-10-14

收稿日期: 2022-08-25

摘要: 通信感知一体化 (ISAC) 是 6G 移动通信的候选技术之一, 可实现感知和通信的集成和优势互补。可重构智能表面 (RIS) 能够智能地控制传播环境, 提高网络的容量和覆盖率, 已成为 6G 实现广泛连接的一项关键技术。认为将 RIS 部署于 ISAC 系统可以提供一个通信和感知性能优化维度。从 ISAC 的研究意义出发, 探讨 ISAC 的关键技术, 概述 RIS 的工作原理及其在感知系统和通信系统中的应用, 并重点分析 RIS 辅助 ISAC 以更好地实现感知目标和服务通信用户的研究现状。

关键词: ISAC; 可重构智能表面; 6G; 频谱资源

Abstract: Integrated sensing and communication (ISAC) is recognized as one of the candidate technologies of 6G mobile communication, aiming to realize the integration and mutual benefit of sensing and communication. Considering that the reconfigurable intelligent surface (RIS) can intelligently control the propagation environment to improve the capacity and coverage of the network, it has become a key technology for 6G to achieve extensive connectivity. It is believed that deploying RIS on ISAC systems can provide a new performance optimization dimension of communication and sensing. The research significance of ISAC is highlighted, and the key technologies of ISAC are discussed. The working principles of RIS and its applications in sensing system and communication systems are summarized. Finally, the research status of RIS-assisted ISAC to better realize the sensing target and serve the communication users is analyzed.

Keywords: ISAC; RIS; 6G; spectrum resource

目前, 6G 移动通信被设想为一个集成感知、通信和计算等功能的系统, 并朝着高数据速率和智能化的方向发展^[1]。6G 系统不仅能够提供高质量无处不在的无线连接服务, 还具备高精度的感知能力, 以便实时测量和成像周围的环境。然而, 通信用户数量和对各种感知服务需求的增加导致无线频谱资源日益紧张。近年来, 由于感知和通信在硬件平台、系统架构和信号处理方法等方面的共性, 将感知系统和通信系统集成在一起的通信感知一体化 (ISAC) 技术引起了学术界和工业界的广泛关注。ISAC 旨在通过共享频谱、硬件平台、信号处理框架将感知和无线通信紧密结合, 并在两者之间寻求性能平衡和收益最大, 从而显著提高频谱效率和能量效率, 降低硬件成本和系统

功耗^[2]。

与此同时, 可重构智能表面 (RIS) 由于可以辅助无线通信系统和感知系统实现智能、可重构的传播环境, 也受到了广泛关注, 它被认为是在 6G 网络中实现智能无线电环境的一项关键使能技术^[3]。RIS 主要由大量低成本的无源元件组成。其中, 每个元件都能够独立地调整入射电磁信号的振幅和相移, 使电磁波灵活地朝向感兴趣的方向进行传播, 从而可以极大地扩大感知系统和通信系统的覆盖范围, 有效增强传输信号的质量。因此, RIS 可以通过创建有效的直射链路和引入额外的自由度来优化系统的相关性能。除此以外, 部署 RIS 也可以为 ISAC 系统提供额外的反射链路。通过这样的方式, ISAC 系统能够获得更好的感知性能和通信性能。作为一种有潜力提高 ISAC 系统性能的高效且经济的技术, RIS 最近引起了业界研究人员的广泛关注。

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2020YFA0711302); 国家自然科学基金资助项目 (U21B2014)

1 ISAC 技术概述

在过去的几十年中,感知系统和通信系统都在逐渐向更高的频带和更大规模的天线阵列发展。大带宽和大规模天线既提供了大量的通信用户连接,也大大提高了雷达在目标检测、角度与距离估计分辨率方面的相关性能。因此,在硬件平台、信号处理等方面,感知系统和通信系统存在着越来越多的相似性。除此之外,无线频谱资源变得日益紧张。这使得雷达和通信系统实现共享频带的需求变得越来越迫切。所以,通信感知一体化技术的设计最近受到了学术界的广泛关注。

1.1 ISAC 的研究意义

众所周知,通信系统的工作方式与雷达不同。通信系统能够在发射机获得信道状态信息(CSI)的情况下,通过专门设计的信号进行信息传输,然后借助接收机对存在噪声、干扰的信息进行恢复。感知系统则通过向目标发送探测信号来检测目标反射的回波信号中的有用信息,而不是从雷达发送的已知探测信号中检测。过去有关感知系统和通信系统共存的研究主要集中在这两个系统的集成方面,即采用两组硬件和两个不同的信号,并使用干扰消除技术减少两个系统之间的相互干扰。然而,当采用这种方式时,频谱效率的提高会变得非常有限。由于共存系统中的干扰是由传输两个不同的信号所导致的,因此,ISAC技术将通过使用单个发射信号来实现感知功能和通信功能的统一。这就意味着大多数的发射器和接收器等硬件平台将可能实现共享。研究者们进而可以探索两者之间的性能增益^[4-5]。ISAC使得感知功能和通信功能实现密切协调配合与相辅相成。总的来说,ISAC具有以下一些明显的优势^[6]:

(1) 减小设备尺寸,降低成本和功耗。ISAC将感知系统和通信系统集成到同一个系统中,这样就可以显著减少收发器等硬件设备的尺寸,从而达到节省成本、降低设备功耗的目的。

(2) 提高频谱效率。感知系统和通信系统的频谱资源共享可显著提高频谱效率。

(3) 提高性能增益。ISAC不以单独的感知功能或者通信功能为优化目标,而是通过两者之间的互助和协调来获得联合增益的。感知辅助通信和通信辅助感知可以显著提升通信和感知的能力。

1.2 ISAC 的关键技术

ISAC旨在通过共享硬件器件并采用相同的信号和波形,

来紧集成通信功能和感知功能。其中的一个关键研究问题在于:如何联合设计和优化ISAC的信号,才能使通信和感知的性能达到最优。

通信和感知的信号通常不能直接相互应用。感知信号旨在实现感知目标检测和感知参数估计,需要较低的峰均功率比和主瓣狭窄的模糊函数,以及较大的信号带宽和多普勒频移。而通信信号旨在高速可靠地传输数据和最大程度地承载信息,通常经过调制后具备较为复杂的信号结构,其峰均功率比较高^[5]。基于5G和6G通信系统中的信号,现有的ISAC主要有基于正交频分复用(OFDM)、正交时频空(OTFS)、滤波器组多载波(FBMC)等的信号设计。通信和感知彼此冲突的需求使得信号的设计和优化十分具有挑战性。因此,如何利用两者的共性并从中获得更好的收益是一个重要的问题。

通信和感知对波形的要求通常不同,需要综合考虑不同的性能指标以同时满足通信和感知的性能需求。ISAC的波形优化实现方案通常可以分为空间、时间、频率域3类^[6-7]。大规模天线阵列的引入为ISAC波形设计带来了更多自由度,例如可以在空间维度设计和优化一体化波形。空域波形优化主要通过设计空间预编码矩阵来实现。设计预编码矩阵可以改变发射信号的统计特性。该方案适用于以联合通信性能和感知性能为目标函数的全局波形优化,并且不需要改变现有通信信号,就可以在现有蜂窝网络中无缝实现。时域和频域的波形优化方案通常不仅需要对通信信号进行改动,还需要跨时频域来优化信号参数和资源分配。

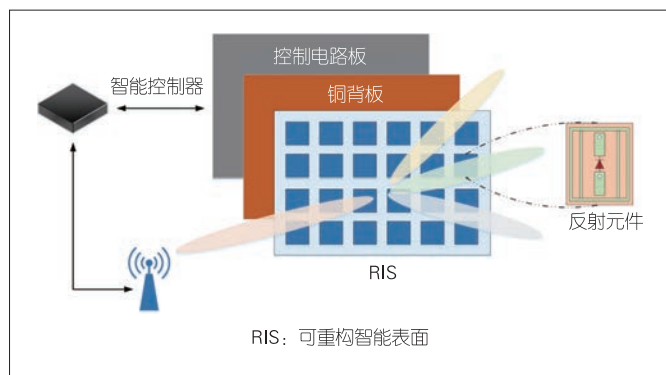
2 RIS 技术的工作原理及应用

实现超可靠无线通信的一个挑战在于用户所处的时变无线信道。传统的解决方法可以通过调制、编码和分集等技术来补偿信道衰落,或者通过自适应功率、速率控制以及波束赋形技术来适应信道衰落。然而,这些技术仍然将无线环境视为一个随机动态的不可控因素,因此无法实现未来6G无线通信网络的高容量和超可靠无线通信的目标。对此,我们急需开发革命性的新技术来克服传播信道的随机性,以满足未来无线网络对延迟、可靠性和连接性等方面的需求。为此,RIS被认为是一种有前途的低成本技术,可用于构建6G无线通信系统中能够灵活控制的智能可重构无线传播环境。

2.1 RIS 的工作原理

RIS具有一种由电磁材料构成的二维表面,由大量具

有特殊物理结构的无源反射元件组成。其中，每个元件均能够独立地对入射信号进行可控的振幅和相位调节。如图1所示，典型的RIS结构主要由平面表面和智能控制器组成。平面表面一般由3层平面组成^[9]。最外层由大量印刷在电介质底板上的金属元件构成，可以直接对入射信号施加作用。每个元件内均嵌入了一个P-I-N结构（PIN）二极管。控制偏置电压可以使得PIN二极管在“开”或“关”之间切换状态，从而使元件对入射信号产生相移差。中间层是一个由铜材料构成的面板，可以有效避免信号能量的泄漏。最后一层是一个控制电路板，用来调整RIS每个元件对入射信号施加的反射系数，并由连接到平面表面的智能控制器进行操作。RIS反射系数的自适应调整主要通过智能控制器进行。智能控制器可通过现场可编程门阵列来实现。基站会计算系统所需要的RIS反射系数最佳值，并将该值通过专用的无线或有线反馈链路发送给RIS的控制器。反射系数的设计主要取决于动态的CSI。

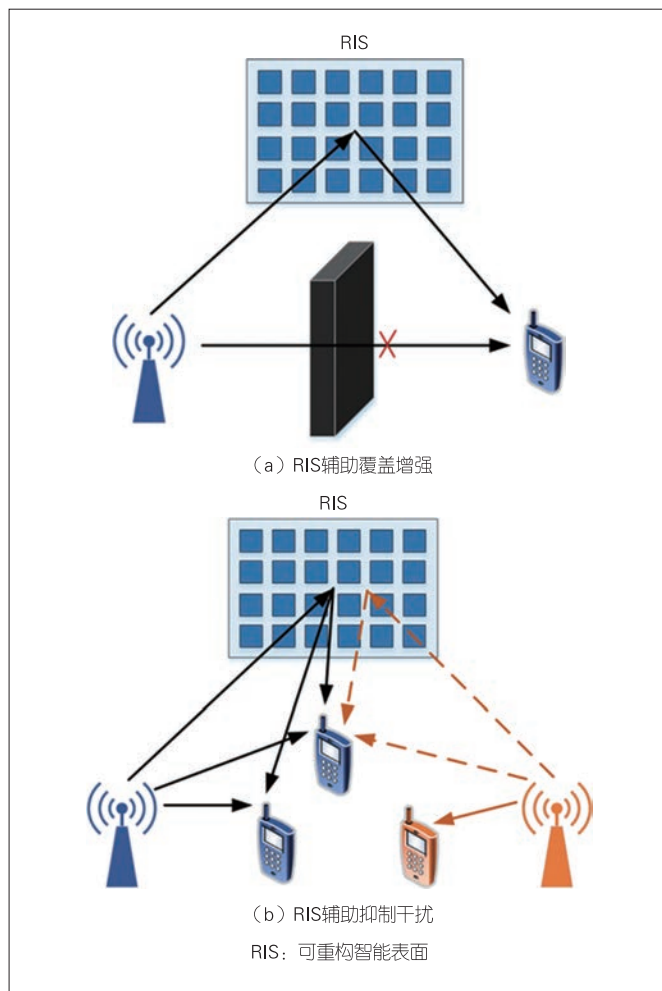


▲图1 RIS结构图

2.2 RIS在通信系统和感知系统中的应用

RIS提供了新的自由度来协助无线网络。这是因为它所引入的灵活性能实现良好的通信性能和感知性能。具体来说，RIS可以大规模部署在无线网络中，通过智能地调整每个元件的反射系数，使反射信号与来自发射器到接收器这条直接路径的信号进行叠加，从而高效提高所需的接收信号功率，或者通过破坏性组合的方式来减轻干扰，为从根本上解决无线信道衰落和干扰问题提供了一种新的手段^[9]。如图2（a）所示，发射机与接收机之间的直接链路会被障碍物所阻断。此时，我们可以将RIS部署在与发射机和接收机存在直接链路的位置，通过RIS智能反射使信号绕过发射机和接收机之间的障碍物，并向接收机所需方向创建额外的信号路径以改善传播条件。如图2（b）所示，对于同时存在来自发

射机的高信号衰减问题和严重干扰问题的接收机，我们可以采用如下两种方式：将RIS部署在合适的位置以提高接收机所需的信号功率，或者通过反射系数的适当设计来抑制干扰信号。



▲图2 RIS应用场景图

基于上述分析，联合设计发射机的发射波束赋形和RIS的反射波束赋形以提高系统的各种性能指标是RIS增强无线网络的一项重要任务。在过去几年里，研究人员对RIS在各种无线通信场景中的应用进行了广泛研究，以便实现各种通信性能指标的优化，比如可实现速率、能量效率、频谱效率最大以及传输功率、符号差错率最小等。最近，人们还进行了RIS在传感系统中部署的探索，以辅助雷达系统提高目标检测、目标定位及参数估计等应用的精度。与通信设计目的不同，RIS在感知系统中的设计目的主要是增强针对不同感知目标的信号，从而使得接收机更加容易地检测目标或估计目标所在的位置。

的均值。为了更为方便地表示,我们也可以使用发射波形/波束图、回波信号的SINR等一系列具体的指标来进行性能评估。

设计波形/波束图可以有效提高目标估计的性能。经过设计的波形具有较低的峰均功率比、良好的自相关和互相关特性、突出的杂波和干扰抑制能力。但实际上波形能够同时满足所有期望是非常困难的。不过人们可以将其设计为接近良好的波形/波束图。基于此,考虑到期望的波束图可以由信号协方差矩阵来控制,文献[16]提出联合设计感知信号协方差矩阵、通信系统波束赋形以及RIS相移的方法,在匹配期望的感知波形的同时,使下行链路多用户的和速率达到最大。此外,文献[16]还证明了RIS可以显著提高ISAC系统的性能。然而,在满足期望的发射波束图的情况下,ISAC系统波形设计的自由度通常会受到限制。这会引入过高的多用户干扰问题,极大地降低通信服务的质量。受RIS在干扰抑制方面应用的启发,文献[17]允许在设计波束和期望的波束图之间存在可容忍的失配,并通过联合优化发射波形和RIS相移,使多用户干扰和波束图相异的加权和最小。此外,文献[17]还证明了RIS不仅可以使发射波形更好地匹配理想波束图,还可以有效解决ISAC系统存在的多用户干扰问题。考虑到目标估计的一个基本功能是估计感知目标的到达方向(DOA),文献[18]将DOA估计的克拉美罗界(CRB)作为感知的性能指标,通过联合设计恒模波形和RIS相移,在满足感知的CRB约束下,使得多用户之间的干扰问题变得最小。此外,接收回波的SNR也可以被用作目标估计性能指标。文献[19]通过联合设计发射波束赋形和RIS相移,使得接收回波SNR达到最大,在保证目标估计性能的同时,满足用户通信的预定义SNR要求。

4 结束语

由于ISAC技术具有频谱利用率高、硬件成本低等一系列突出优势,因此它受到了学术界和工业界的广泛关注。ISAC技术有望促进具有高通信速率和高精度感知目标的6G技术的应用和发展。近年来,RIS已被公认为6G无线通信系统实现智能可重构无线电传播环境的一项有潜力的新范式。因此,研究人员将RIS应用于ISAC系统中,以进一步增强感知功能和通信功能。

参考文献

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书[R]. 2020
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 2021
- [3] IMT-2030(6G)推进组. 智能超表面技术研究报告[R]. 2021
- [4] LIU F, MASOUIROS C, PETROPULU A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(6): 3834–3862. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2973976
- [5] ZHANG J A, LIU F, MASOUIROS C, et al. An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2021, 15(6): 1295–1315. DOI: 10.1109/JSTSP.2021.3113120
- [6] ZHANG J A, RAHMAN M L, WU K, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—A survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 306–345. DOI: 10.1109/COMST.2021.3122519
- [7] YUAN X, FENG Z Y, ZHANG J A, et al. Spatio-temporal power optimization for MIMO joint communication and radio sensing systems with training overhead [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(1): 514–528. DOI: 10.1109/TVT.2020.3046438
- [8] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE communications magazine, 2020, 58(1): 106–112. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900107
- [9] BASHARAT S, HASSAN S A, PERVAIZ H, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: potentials, applications, and challenges for 6G wireless networks [J]. IEEE wireless communications, 2021, 28(6): 184–191. DOI: 10.1109/MWC.011.2100016
- [10] XING Z, WANG R, YUAN X J. Passive beamforming design for reconfigurable intelligent surface enabled integrated sensing and communication [EB/OL]. (2022-01-01)[2022-08-15]. <https://arxiv.org/abs/2206.00525>
- [11] 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
- [12] LI Y K, PETROPULU A. Dual-function radar-communication system aided by intelligent reflecting surfaces [EB/OL]. (2022-04-10)[2022-08-15]. <https://arxiv.org/abs/2204.04721>
- [13] LIU R, LI M, SWINDLEHURST A L. Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems [EB/OL]. (2022-03-01)[2022-08-15]. <https://arxiv.org/abs/2203.00265>
- [14] LIU R, LI M, LIU Y, et al. Joint transmit waveform and passive beamforming design for RIS-aided DFRC systems [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2022, 16(5): 995–1010. DOI: 10.1109/JSTSP.2022.3172788
- [15] FANG S S, CHEN G J, XU P, et al. SINR maximization for RIS-assisted secure dual-function radar communication systems [C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685487
- [16] ZHU Z Y, LI Z, CHU Z, et al. Intelligent reflecting surface assisted integrated sensing and communications for mmWave channels [EB/OL]. (2022-01-05)[2022-08-15]. <https://arxiv.org/abs/2202.00552v1>
- [17] WANG X Y, FEI Z S, ZHENG Z, et al. Joint waveform design and passive beamforming for RIS-assisted dual-functional radar-communication system [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(5): 5131–5136. DOI: 10.1109/TVT.2021.3075497
- [18] 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
- [19] 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

作者简介



杨晓宇，北京邮电大学在读博士研究生；主要研究方向为通信感知一体化、可重构智能表面。



尉志青，北京邮电大学副教授、博士生导师；主要研究方向为面向智能机器的通信感知一体化技术。



孟春伟，北京邮电大学在读博士研究生；主要研究方向为面向智能机器的通信感知一体化技术。

综合信息

“中兴通讯技术杂志社第27次编委会议暨2022通信热点技术研讨会”隆重召开

8月的太原，秋高气爽。中兴通讯技术杂志社第27次编委会议暨2022通信热点技术研讨会在这里隆重举行。8月13—14日，来自高校、运营商、研究院所和企业的近90位ICT专家学者齐聚一堂，共话刊物发展，热议技术演进。公司执行副总裁王喜瑜和高级副总裁王翔出席会议。

编委会议上，王喜瑜执行副总裁介绍了中兴通讯最新发展情况。从2018年到现在，中兴通讯努力从网络基础设施的设备商转型为产业数字化和数字产业化的服务商，在深耕传统通信技术市场的同时，向汽车电子、新能源、机器人等领域的第二曲线拓展。目前中兴通讯利润率和现金流均达到历史最健康水平，实现了高质量发展。他指出，只有产业和学术双轮驱动，企业才能实现更快更长远的发展，中兴通讯通过出版学术刊物，跟踪前沿技术，传播产学研合作成果，在产业界和学术界架起了沟通与合作的金桥。

在通信热点技术研讨会上，郑纬民、罗智泉、任福继、金石、赵慧玲等16位专家学者针对算力、5G、元宇宙、智能超表面、网络标准等内容做了精彩的学术报告。

杂志社提出筹备“促进产学研合作青年专家委员会”。这是刊物发展的新举措，受到与会代表的好评。首批23位青委会委员中的13位代表参加了本次编委会议，并在座谈会上踊跃发言，为刊物发展和产学研合作建言献策。

由于疫情防控的原因，部分编委和专家无法现场参会，但通过现场直播，远程参与了会议。两天的会议直播吸引了23 000人次的在线观看与互动。

一年一度的编委扩大会议，是ICT领域专家和学者学术交流的盛会，是产学研协同创新的聚能场，更是民族通信企业体现责任担当的一个闪光点。

