



专题：6G 通感算融合技术

智能超表面系统的通信感知一体化：现状、设计与展望

胡小玲，于周源，钱骁伟，彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室，北京 100876)

摘要：通信感知一体化 (integrated sensing and communication, ISAC) 是 6G 的主流趋势，将 ISAC 引入智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 系统，具有扩展系统覆盖范围、提升通信和感知性能、降低系统成本和功耗三大优势。在概述和分析 RIS 系统 ISAC 研究现状的基础上，提出了两种非正交 ISAC 方法，支持盲区用户在非正交时频资源上的通信和感知，最后探讨了 RIS 系统 ISAC 的技术挑战和未来发展。

关键词：通信感知一体化；智能超表面；主被动波束成形

中图分类号：TP393

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022259

Integrated sensing and communication in reconfigurable intelligent surface systems: status, design and outlook

HU Xiaoling, YU Zhouyuan, QIAN Xiaowei, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Integrated sensing and communication (ISAC) is the dominant trend of the sixth generation mobile communication networks (6G). The introduction of ISAC into the reconfigurable intelligent surface (RIS) system can expand the system coverage, improve both communication and sensing performances, and reduce the hardware cost as well as the power consumption of the system. On the basis of outlining and analyzing the research status of ISAC in RIS systems, two non-orthogonal ISAC methods were proposed to support concurrent communication and sensing for blind-zone users on non-orthogonal time-frequency resources. Finally, the technical challenges and future development of ISAC in RIS systems were discussed.

Key words: integrated sensing and communication, reconfigurable intelligent surface, joint active and passive beam-forming

专题策划人：彭木根，张朝阳，周一青

收稿日期：2022-08-10；修回日期：2022-09-05

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (No.62201084)；国家重点研发计划项目 (No.2021YFB2900200)；中国通信学会青年人才托举项目 (No.2021QNRC001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62201084), The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2900200), The Young Elite Scientists Sponsorship Program by CIC (No.2021QNRC001)

0 引言

6G 有望同时提供高质量的无线连接服务和高精度的无线感知服务,成为智慧城市、工业互联网、车联网、远程医疗、沉浸式业务等许多新兴应用的关键推动力^[1-2]。6G 将以智能的方式连接大量的智能体,同时结合人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术与其强大的感知能力,将物理世界和生物世界与网络世界融合在一起,使网络具有类似人类的认知能力,助力万物互联到万物智联的转变^[3-4]。

随着连接设备和移动服务的快速增长,频谱也变得越来越拥挤。传统上,大多数商业通信系统都工作在 sub-6 GHz 频段,可与现有的用于空中交通管制、气象观测等领域的雷达感知系统和谐共存。然而,日益增长的无线连接需求驱动着无线通信频段向毫米波、太赫兹和可见光等更高频段扩展,与传统的雷达感知频段产生越来越多的重叠,沿用通信系统和雷达感知系统独立设计的模式将带来严重的通感干扰问题^[5]。因此,需要联合设计通信和感知系统,通过频谱共享和兼容性设计,减轻二者干扰,提升频谱利用率。而且,随着数字通信、超大规模天线、毫米波、太赫兹等技术的发展,通信系统和雷达感知系统之间的差异逐渐缩小,为二者的联合设计和硬件共享提供了可能。

- 雷达和通信在硬件结构和系统组成方面具有很强的相似性和可实现性,传统上由模拟硬件设备实现的雷达信号处理模块正在被广泛应用于通信系统的数字设备所取代。
- 雷达和通信在天线结构上越来越相似,相控阵是雷达系统发展过程中的关键技术之一,其大量的发送单元和接收单元规则排布,形成了大规模天线阵列,而多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术同样是通信大规模天线系统的一项关键

技术。

- 毫米波、太赫兹等高频段带来的大带宽,可同时支持高精度的感知和高速率的通信。

另外,通信与雷达感知在信号处理与数据处理等方面呈现越来越多的相似之处,通过信息采集与信息传递流程融合处理,减少不必要的感知和通信行为,可降低处理时延,提升信息处理效率。

因此,将通信与感知融合共生,实现通信感知一体化 (integrated sensing and communication, ISAC) 已成为主流趋势,也是当前 6G 空口技术研究的热点。ISAC 是指基于软硬件资源共享或信息共享实现感知与通信协同的新型信息处理技术,可有效提升系统频谱效率、硬件效率和信息处理效率^[6]。通过时频空资源复用、硬件设备共享、空口及协议联合设计等方式,实现通信功能与感知功能的统一管理,赋予无线网络高质量的信息传递和信息采集能力,从而提升网络整体性能和业务水平。ISAC 的核心设计理念是在同一个系统中支持通信和感知两个独立的功能且实现二者相互促进。感知将和通信一样,成为 6G 网络的原生能力。一方面,通信系统作为一个巨大的传感器网络,通过无线电波的传输、反射和散射,感知物理世界,提供广泛的感知服务;另一方面,通过感知获得的高精度定位、成像和环境重建等结果也有助于提高通信服务的质量和效率,例如将感知结果用于实现更准确的波束成形、更快的波束故障恢复以及更低的信道估计开销等。

毫米波等高频段是实现 ISAC 的主流频段。一方面,其提供的大带宽可同时实现高速率通信和高精度感知,并可为两个模块提供低时延的信息交换和共享;另一方面,小型天线也有利于将通信和感知两个功能进行模块化集成。然而,ISAC 在实际应用中面临着环境依赖度高、覆盖范围有限、成本功耗高的挑战。高频信号传输路径损耗高,非视距 (non-line-of-sight, NLOS) 路径非常弱,而视距



(line-of-sight, LOS) 路径容易被环境物体遮挡, 使得 ISAC 系统的性能高度依赖于传播环境, 覆盖范围受限, 存在较多的覆盖盲区。为了弥补高频信号的高路径损耗, 通常采用大规模 MIMO 技术, 这带来了高硬件成本和功耗的问题。

智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 的出现为解决 ISAC 技术面临的难题提供了全新的途径。智能超表面以可编程的方式对空间电磁波进行主动的智能调控, 有望突破传统无线传播环境的不可控性, 定制传播环境以满足特定的系统要求^[7]。结合 RIS 和 ISAC 技术具有以下三大优势。

- 扩展系统覆盖范围。当 LOS 路径被遮挡时, RIS 通过构建虚拟视距 (virtual line-of-sight, VLOS) 路径解决信号盲区覆盖问题, 提供盲区通信和感知服务; 而当存在 VLOS 路径时, RIS 通过提供额外的路径, 实现信号增强, 扩大系统覆盖半径。
- 提升通信和感知性能。传统的通信或者雷达系统通过收发端的设计被动地适应无线传播环境, RIS 的引入将无线传播环境也纳入了 ISAC 系统的设计中, 提供了额外的空间自由度, 通过收发端和无线传播环境的联合设计, 可有效提升通信和感知的整体性能。
- 降低系统成本和功耗。RIS 的应用使得毫米波 ISAC 系统的设计从传统大规模 MIMO 系统转变至新型 RIS 辅助的中型 MIMO 系统, 通过挖掘无源 RIS 的孔径增益和波束成形增益, 能够以较低的硬件成本和功耗实现较好的通感性能。鉴于上述优势, 目前在 RIS 系统中, 已经出现了一些关于 ISAC 的研究。

1 RIS 系统 ISAC 研究现状

ISAC 根据感知目标是合作式目标还是非合

作式目标可分为无设备的 (device-free, DF) ISAC 和基于设备的 (device-based, DB) ISAC 两大类。DF ISAC 涉及对非合作目标的感知, 感知目标不参与感知的过程, 例如对无人机等非合作目标的探测, 通过发送电磁波并接收目标反射回波进行测距、测速等。DB ISAC 涉及对合作目标进行感知, 感知目标具有信息交互能力, 主动参与感知的过程, 例如蜂窝移动网络中对移动终端的定位, 基站发送定位参考信号给移动终端, 终端接收定位参考信号并上报测量值, 协助完成定位。RIS 系统 ISAC 研究分类如图 1 所示, 在对 RIS 系统 ISAC 的研究中沿用此分类概念^[8], 分为 DF ISAC 和 DB ISAC 两大类, 其中 DF ISAC 根据通信和感知是否采用一体化波形又可分为雷达通信共存 (radar-communication coexistence, RCC) 和雷达通信一体 (dual-functional radar-communication, DFRC) 两种情况, 而 DB ISAC 根据通信感知是否占用正交的时频资源, 分为正交 ISAC 和非正交 ISAC 两种情况。

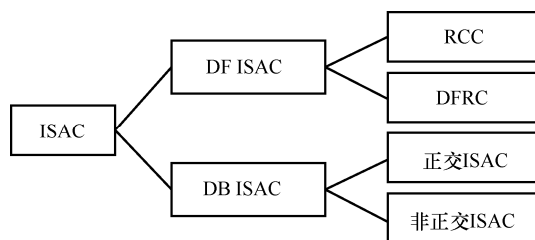


图 1 RIS 系统 ISAC 研究分类

1.1 RIS 系统 DF ISAC 研究

RIS 系统 RCC 示意图如图 2 所示, 通信和雷达感知共享频谱资源, 但采用不同的波形, 利用 RIS 减轻通信和感知之间的干扰。例如, 文献[9]研究了利用 RIS 降低基站通信对 MIMO 雷达的干扰, 通过联合优化基站主动发射波束成形和 RIS 相移矩阵以最大化雷达检测概率, 同时满足用户的信干噪比 (signal to interference and noise ratio, SINR) 和功耗限制。研究结果表明, RIS 可以有效抑制通信和雷达系统间的干扰以提高雷达检测

概率。更进一步,文献[10]研究了双 RIS 系统 RCC,通过部署两个接近通信收发机的 RIS 以增强通信信号并抑制雷达和通信之间的干扰,在满足雷达回波 SINR 约束条件下,最大化通信 SINR。由此可见,RIS 能够通过其被动波束成形,降低频谱共享情况下通信和雷达间的干扰,进而提升通信和感知性能。

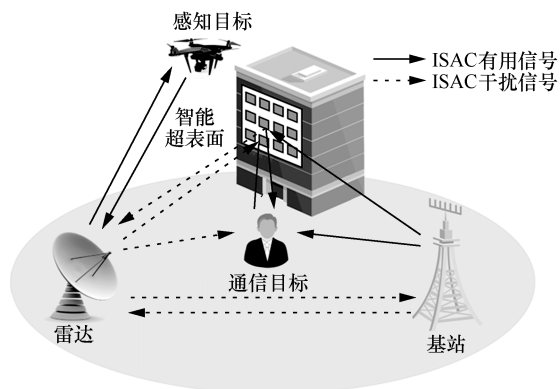


图2 RIS 系统 RCC 示意图

RIS 系统 DFRC 示意图如图 3 所示,通信和感知采用一体化波形,二者不存在干扰,利用 RIS 实现盲区覆盖^[11]、通感信号增强^[12-13]以及多用户干扰抑制^[14-15]。针对正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) —ISAC 系统的盲区目标检测问题,文献[11]提出利用多个 RIS 构建 VLOS 路径,辅助 ISAC 基站进行盲区目标的感知,并通过联合设计与频率相关的主被动波束成形,最大化雷达 SINR 和所有用户中的最小通信 SINR。与单个 RIS 场景相比,采用多个 RIS 可以实现 3.3 dB 的雷达 SINR 增强和 0.9 dB 的最小通信 SINR 增强。文献[12-13]研究了通过联合设计基站和 RIS 主被动波束成形设计,在通信信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 约束下最大化感知 SNR,实现提升通信性能的同时增强反射路径回波能量。此外,为缓解一体化波形设计约束所带来的多用户干扰 (multi-user interference, MUI) 问题,文献[14-15]研究一体化波形和 RIS 波束成形的联合设计问题。具体而言,文献[14]提出了一体化波形和 RIS 相移矩阵联合优化方

法,在满足波束方向图约束下最小化 MUI,基于此研究了雷达和通信性能之间的权衡关系。结果表明,采用 RIS 可在保障感知性能的前提下,显著提升系统的通信吞吐量。更进一步,文献[15]考虑更为实际的 RIS 反射模型,提出了恒模波形和离散 RIS 相移的联合设计算法,在信号到达方向 (direction of arrival, DOA) 估计的克拉美罗下界 (Cramer-Rao lower bound, CRLB) 约束下最小化 MUI。结果表明,所提算法可以显著提高通信速率,并可在 RIS 离散相移的情况下,达到接近连续相移的性能。此外,文献[15]还证明了当感知目标到一体化基站的距离远大于 RIS 到一体化基站的距离时,RIS 的部署对感知影响较小,但可显著提升通信的性能。

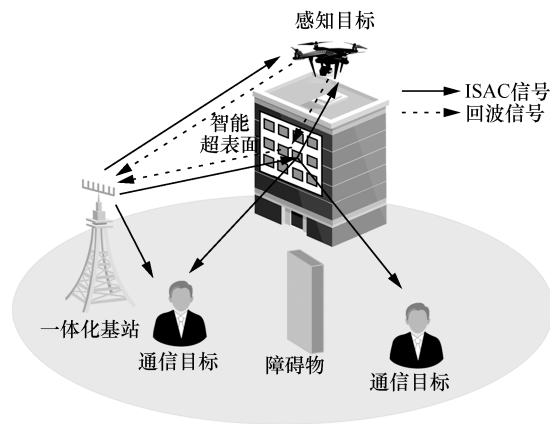


图3 RIS 系统 DFRC 示意图

1.2 RIS 系统 DB ISAC 研究

RIS 系统 DB ISAC 示意图如图 4 所示。DB ISAC 系统通常以具有信号收发功能的终端作为感知目标 (如图 4 (a) 所示)。将 RIS 部署于基站与终端之间,一方面,构建基站与终端之间的 VLOS 路径,实现盲区终端的通信与位置感知;另一方面,通过 RIS 波束成形设计增强通感信号,提升通信和感知性能。当前对 RIS 系统 DB ISAC 研究中,通信功能与位置感知功能通常占用正交的时频资源 (如图 4 (b) 所示),通信阶段与位置感知阶段的设计也往往独立进行。

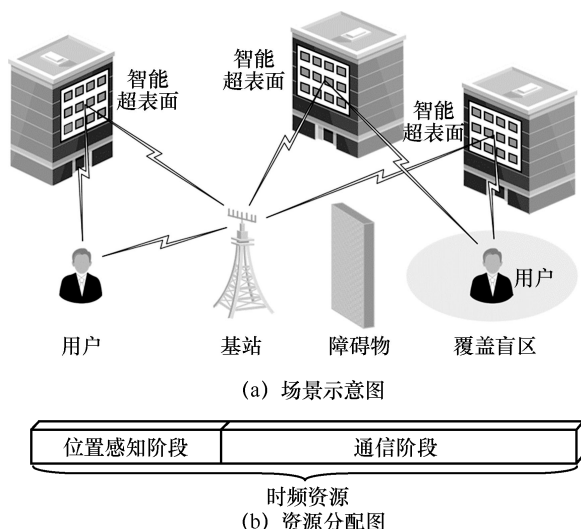


图4 RIS系统DB ISAC示意图

在对通信阶段的研究中,通过联合设计收发端的主动波束成形与RIS的被动波束成形,提高系统信噪比^[16]、频谱效率^[17]、能量效率^[18]以及可达速率^[19]等性能指标。在通信性能研究方面,文献[16]证明了引入RIS可获得正比于RIS阵元数平方的信噪比增益。在通信波束成形算法研究方面,文献[17]研究了一种基于定点迭代与阵列流形优化的波束成形算法,有效解决了RIS相位优化中单位模限制问题,并大幅提升了系统的频谱效率。文献[18]考虑RIS辅助的下行多用户通信场景,利用交替优化技术与梯度下降搜索技术进行波束成形设计,实现了传统中继辅助系统3倍的能量效率。此外,为了降低算法开销,文献[19]提出了一种基于角度的波束成形算法,通过联合优化基站发射波束与RIS反射系数以最大化系统可达速率。

在针对位置感知阶段的研究中,将RIS作为位置已知的定位参考点,通过估计接收信号强度(received signal strength, RSS)、到达角(angle of arrival, AOA)、离开角(angle of departure, AOD)以及到达时间(time of arrival, TOA)等参数辅助终端定位,并利用RIS波束成形设计进一步提升定位精度。在位置感知性能研究方面,文献[20]推导了RIS辅助的位置感知系统的CRLB,证明了在系统中引入RIS可获得正比于RIS面积平方

的定位精度增益。在位置感知算法研究方面,文献[21]研究了一种基于RSS的多用户定位算法,可实现传统基于RSS定位方法3倍的定位精度。针对盲区定位的场景,文献[22]研究了一种基于AOA与AOD估计的定位算法,可在RIS的辅助下实现对盲区用户的厘米级定位精度。

在同一个系统中对通信和感知功能进行联合设计,可实现对通感时频资源的灵活高效利用。鉴于此,文献[23]针对RIS系统,提出了一种时分正交ISAC方法,其通信和位置感知占用不同的时间资源,通信和感知的性能可以通过调整时间分配比例进行权衡。文献[24]基于时分正交ISAC的概念,提出了一种基于拉格朗日乘数与卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件的算法,对RIS波束成形及通感时间资源分配比例进行联合优化,实现联合最优的定位误差界与有效通信速率。为了进一步提升无线资源利用率,文献[25-26]针对半无源RIS系统,提出了一种非正交ISAC方法,支持盲区用户在非正交/相同的时频资源上同时实现通信与位置感知功能。

1.3 小结

RIS系统ISAC研究现状总结见表1,可分为DF ISAC和DB ISAC两大类。DF ISAC又分为RCC和DFRC两种情况:对于RCC,主要研究通过RIS波束成形降低通感之间的干扰;对于DFRC,主要研究利用RIS构建VLOS路径支持盲区通感,设计主被动波束成形增强通感信号,通过一体化波形和RIS波束成形的联合设计抑制多用户干扰。对DB ISAC的研究可分为正交ISAC和非正交ISAC两种情况,主要利用RIS提升终端通信速率和位置感知精度。

然而,当前RIS系统ISAC研究中,对波束成形的设计指标大多沿用原来通信系统和雷达系统的性能评价指标,例如通信速率、雷达感知CRLB等,或者采用间接的设计指标,例如通信SINR、雷达回波SINR、波束方向图及MUI等,在对通信和感知

表 1 RIS 系统 ISAC 研究现状总结

分类	参考文献	RIS 作用	通感性能评价指标	设计参数	CSI
RCC	[9]	抑制通感干扰	雷达检测概率 SINR	联合优化基站和 RIS 波束成形	完美 CSI
	[10]	抑制通感干扰	雷达 SINR 通信 SINR	联合优化 RIS 和雷达波束成形	完美 CSI
DFRC	[11]	协助盲区感知	雷达 SINR 通信 SINR	联合优化基站和 RIS 波束成形	完美 CSI
	[12-13]	增强通信和感知信号	雷达 SNR 通信 SNR	联合优化基站和 RIS 波束成形	完美 CSI
	[14]	抑制通信 MUI	波束方向图 MUI	联合优化一体化波形和 RIS 波束成形	完美 CSI
	[15]	抑制通信 MUI	CRLB MUI	联合优化一体化波形和 RIS 波束成形	完美 CSI
正交 ISAC	[23]	增强通感信号	定位误差界频谱效率	优化 RIS 波束成形	完美 CSI
	[24]	增强通感信号	CRLB 有效通信速率	联合优化基站和 RIS 波束成形以及通感时间分配比例	完美 CSI
非正交 ISAC	[25-26]	协助盲区通信和感知	通感 SNR	联合优化基站和 RIS 波束成形	位置信息

其中一者性能约束下, 优化另一者的性能, 难以实现最优的通感性能。因此, 尚需研究 RIS 系统 ISAC 联合性能界, 指导设计能够逼近通感性能界的最优波束成形。而且, 当前研究中, 波束成形设计大多依赖于完美信道状态信息(channel state information, CSI) 的假设, 而 RIS 级联信道的估计往往涉及较高的导频开销, 亟须研究基于部分低维 CSI 的一体化波束成形设计。此外, 当前对 RIS 系统 ISAC 的研究, 基本还处在通感竞争的初期阶段, 还需进一步探索如何实现通感相互促进。

2 RIS 系统的非正交 ISAC 设计

针对当前 RIS 系统 ISAC 研究中, 通感联合性能界不明晰、波束成形依赖完美 CSI 的问题, 提出了两种非正交 ISAC 设计方法, 利用分布式 RIS 构建多条 VLOS 路径, 协助盲区用户在非正交时频资源上的通信和位置感知。首先提出了通感 CRLB 辅助的非正交 ISAC 设计方法, 从估计误差的角度出发, 提出了通感联合性能评价指标, 即通感 CRLB, 基于此联合设计主被动一体化波束成形, 并证明了所提出的非正交 ISAC 方案在通信和感知性能方面均优于传统正交时分 ISAC 方案。然后, 提出了感知辅助的非正交 ISAC 设计方案, 利用感知信息进行主被动一体化波束成形设计, 由此实现通感从单纯竞争关系到既竞争又合作关系的转变, 而且规避

了 RIS 级联信道估计的高导频开销问题。

2.1 通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 设计

通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 示意图如图 5 所示, 基站发送 ISAC 信号, 在分布式 RIS 的协助下为盲区用户同时提供通信和位置感知服务, 其中分布式 RIS 由两个子反射面组成。通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 传输协议如图 6 所示, 整个 ISAC 过程包含 N 个相干时间块, 每个相干时间块被进一步等分为包含 T 个时隙 (符号长度) 的两个子块/相干处理间隔。在第 $k \in \{1, 2\}$ 个子块内, 第 k 个子反射面处于激活模式并按照预设波束成形参数工作, 而另一个 RIS 处于非激活模式, 用户根据接收信号解调该子块内的 T 个信息符号并估计子反射面 k 到用户的一对到达角。基于一个相干时间块内估计的两对到达角, 用户可通过双站交叉定位算法估计自身的位置。

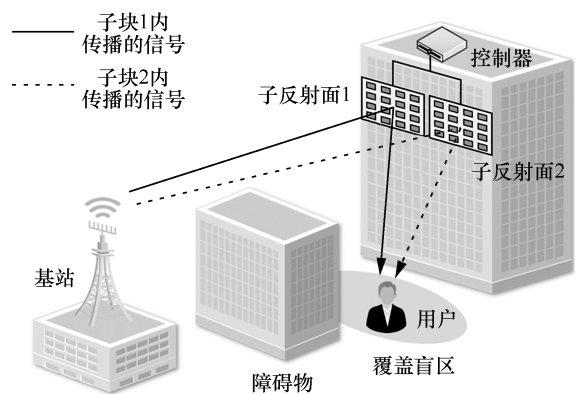


图 5 通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 示意图

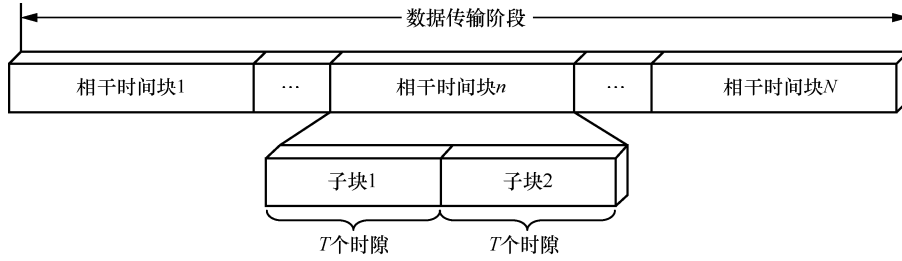


图6 通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 传输协议

对于所提出的非正交 ISAC，其通信性能由每个子块内通信符号 $x(t), t \in \{1, \dots, T\}$ 的传输性能所决定，而位置感知性能则由到达角 $(\gamma_{12U}^A, \varphi_{12U}^A)$ 的估计精度所决定。当前对 RIS 系统 ISAC 的研究，大多沿用原通感分立系统的评价指标，包括信道容量、SNR、频谱效率等通信性能，以及 CRLB、最小均方误差、雷达检测概率等感知性能指标。然而，通信和感知采用分立的评价指标，难以指导系统设计逼近通感联合性能界。因此，为了统一系统的通信性能与位置感知性能的评价指标，类比感知 CRLB，将通信 CRLB 定义为通信符号 $x(t)$ 的无偏估计量的 CRLB，由此可将 ISAC 过程等价于对到达角 $(\gamma_{12U}^A, \varphi_{12U}^A)$ 以及通信符号 $x(t)$ 的联合估计过程。基于此表征系统的通信与位置感知联合性能，并提出非正交 ISAC 的联合性能评价指标，即通感 CRLB：

$$\text{CRLB}_{\text{ISAC}} \triangleq \zeta \lg(\text{CRLB}_x) + (1 - \zeta) \lg(\text{CRLB}_{\text{angle}}) \quad (1)$$

其中， ζ 表示权重系数，用于调节系统的通信性能与位置感知性能。 CRLB_x 与 $\text{CRLB}_{\text{angle}}$ 分别表示一个子块内的平均通信 CRLB 与感知 CRLB，定义为：

$$\text{CRLB}_x \triangleq \sum_{t=1}^T \text{CRLB}(x(t)) / T \quad (2)$$

$$\text{CRLB}_{\text{angle}} \triangleq (\text{CRLB}(\gamma_{12U}^A) + \text{CRLB}(\varphi_{12U}^A)) / 2 \quad (3)$$

其中， $\text{CRLB}(x(t))$ 、 $\text{CRLB}(\gamma_{12U}^A)$ 、 $\text{CRLB}(\varphi_{12U}^A)$ 分别表示待估参量 $x(t)$ 、 γ_{12U}^A 、 φ_{12U}^A 的 CRLB。为求解待估参量的 CRLB，可将所有待估参量表示为

待估参数向量，通过计算待估参数向量的费舍信息矩阵得到每个待估参量的 CRLB，最终计算得到系统的通感 CRLB。

基于所提出的通感 CRLB，可通过联合优化基站主动波束成形与 RIS 被动波束成形调节系统的通感性能。具体而言，可将通感联合性能的优化问题构建为对通感 CRLB 的最小化问题，并进一步将问题分解为对基站波束成形向量与对 RIS 相位偏移向量优化的子问题。对于通感 CRLB 最小化问题，通感 CRLB 同时涉及通信和感知性能，形式比较复杂，传统仅考虑通信和感知一者性能的优化方法不再适用。因此，提出基于分布估计算法（estimation of distribution algorithm, EDA）的优化方法迭代优化基站主动波束成形与 RIS 被动波束成形，以最小化通感 CRLB，最终实现对系统通信性能与感知性能的有效调节与权衡。

2.2 感知辅助非正交 ISAC 设计

针对 RIS 阵元数量庞大所导致的级联信道估计高导频开销难题，提出感知辅助非正交 ISAC 方法，利用感知信息进行 RIS 一体化波束成形设计以兼顾通感性能，实现通感性能从单纯竞争关系到既竞争又合作关系的转变。

感知辅助非正交 ISAC 示意图如图 7 所示，用户发送 ISAC 信号，系统在分布式 RIS 的协助下为盲区用户同时提供上行数据传输和位置感知服务。该系统由基站、分布式 RIS 和位于盲区的用户组成，其中分布式 RIS 由一个具有较多反射阵元的反

射子面和两个具有少量感知阵元的感知子面构成。RIS的反射子面为用户和基站间建立VLOS路径,并通过被动波束成形提升通信性能,而RIS的分布式感知子面则通过接收来自用户的信号,估计信号到达角,进而感知用户的位置信息。

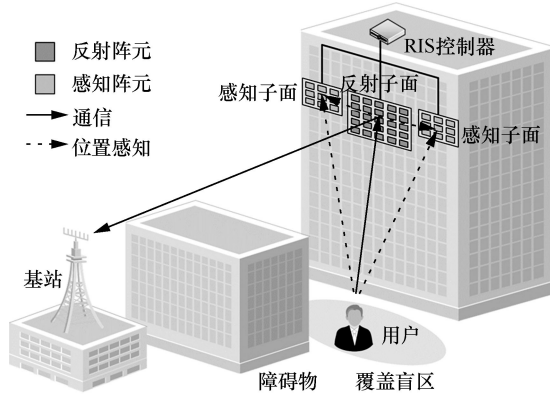


图7 感知辅助非正交ISAC示意图

感知辅助非正交ISAC传输协议如图8所示,系统ISAC的基本单元为长度为 T 个时隙的ISAC相干块(同一相干块内的信道保持不变),传输协议规定ISAC相干块包含两个阶段。第一阶段直接利用用户和基站之间的低维度信道估计结果进行主动波束成形,第二阶段基于感知到的用户位置进行联合波束成形设计。

传输协议的第一阶段包含 $\Delta\tau_1 + \tau_1$ 个时隙(符号时隙),在此阶段,RIS反射子面的被动波束成形向量 $\boldsymbol{\theta}^{(1)}$ 随机生成且保持不变(反射子面被视为信道中的普通反射体)。在第一阶段的前 $\Delta\tau_1$ 个时隙,系统基于传统的上行导频训练方法,估计

基站和用户之间的低维有效信道信息(effective channel state information, ECSI);在第一阶段的后 τ_1 个时隙,用户发送ISAC信号,系统基于ECSI进行波束成形,具体而言,用户和基站分别采用最大比率传输(maximum ratio transmission, MRT)和最大比合并(maximum ratio combining, MRC)的方法确定主动波束成形设计以最大化系统的通信性能,反射子面将信号由用户反射至基站,与此同时,两个感知子面将用户直射信号和由反射子面反射而来的信号进行处理,利用基于旋转不变技术的信号参数估计(estimating signal parameter via rotational invariance techniques, ESPRIT)和多信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法,获取用户信号的到达角,由此计算用户位置信息。

传输协议的第二阶段包含 $\Delta\tau_2 + \tau_2$ 个时隙,在此阶段,联合设计RIS反射子面的被动波束成形向量 $\boldsymbol{\xi}^{(n)}$ 、基站和用户的主动波束成形向量 $\boldsymbol{w}_{\text{BS}}^{(2)}$ 和 $\boldsymbol{w}_{\text{UE}}^{(2)}$ 。第二阶段的前 $\Delta\tau_2$ 个时隙,系统基于感知的位置信息设计主动、被动联合波束成形以同时增强系统的感知和通信性能,考虑用户对通信和感知性能的不同需求,通过引入通信感知权重因子 λ 构建优化问题并采用基于半正定松弛(semi-definite relaxation, SDR)和粒子群优化(particle-swarm optimization, PSO)的方法分别求解相应优化问题,得到基于感知信息的联合主动被动波束成形向量,最后系统将优化后的波束成形配

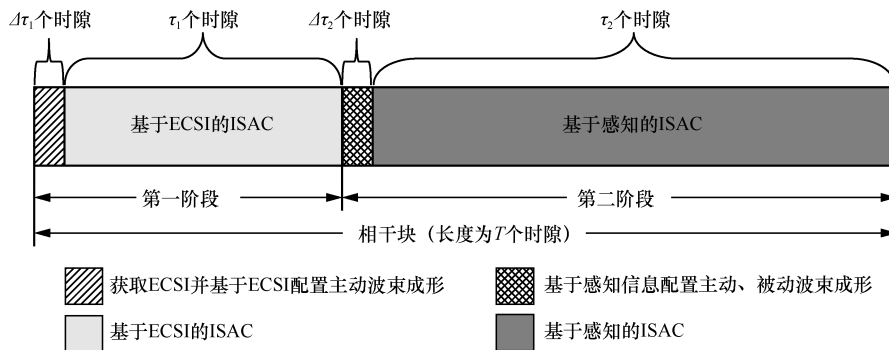


图8 感知辅助非正交ISAC传输协议



置信息告知基站和用户；在第二阶段的后 τ_2 个时隙，用户发送 ISAC 信号，系统采用优化后的波束成形同时完成感知与通信任务。

3 数值仿真结果

通过数值仿真，验证所提出的 RIS 系统非正交 ISAC 设计方法的有效性。

3.1 通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 设计

本节给出通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 设计方案的数值仿真结果与性能分析。通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 仿真示意图（俯视图）如图 9 所示，基站高度为 10 m，RIS 高度为 5 m，用户位于水平面，基站与 RIS 距离为 30 m，RIS 与用户距离为 10 m。如无特别说明，基站天线数 $N_t = 8$ ，RIS 阵元数 $L = 16$ ，用户配置天线数为 $N_r = 4 \times 4$ 的均匀矩形阵列，每个子块内包含时隙 $T = 2$ ，权重系数 $\zeta = 0.5$ 。

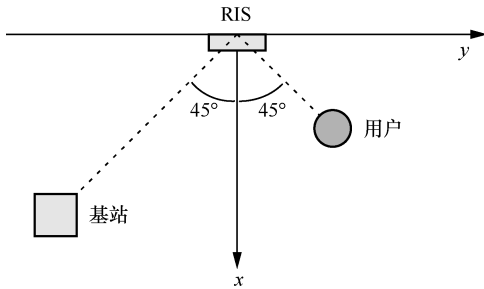


图 9 通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 仿真示意图（俯视图）

为了以更为直观的评价指标衡量系统的通信性能，基于所提出的通信与位置感知联合性能评价模型，根据通信 CRLB 与互信息的关系，将系统的通信互信息定义为发送信号 $x(t)$ 的熵与给定估计信号 $\hat{x}(t)$ 后发送信号 $x(t)$ 的条件熵之差：

$$I(t) = H(x(t)) - H(x(t) | \hat{x}(t)) = \frac{1}{2} \ln(\sigma_x^2 / \text{CRLB}(x(t))) \quad (4)$$

其中， σ_x^2 表示发送信号 $x(t)$ 的分布方差。基于此，本节采用平均通信互信息作为通信性能的

评价指标，采用感知 CRLB 作为位置感知误差的评价指标。

基于通感 CRLB 的一体化波束成形与基于 SNR 的一体化波束成形的通感性能对比如图 10 所示，在基于通感 CRLB 联合性能界的波束成形方案中，通信互信息随着感知 CRLB 的增加（即感知误差的增加）而提升，证明通信和感知性能之间存在置换关系，可牺牲一者的性能换取另一者性能的提升，通过调整通感权重系数，可灵活权衡通信和位置感知性能，实现图 10 中联合性能界上的任意通感性能组合。相比之下，基于 SNR 的波束成形方案不仅无法达到最优联合性能界，而且只能实现固定的通信和感知性能（图 10 中表现为一个点）。在感知性能方面，基于通感 CRLB 的波束成形方案远优于基于 SNR 的波束成形方案，在通信性能方面，前者略优于后者。此外，二者在通感性能方面均远优于随机相位波束成形方案。

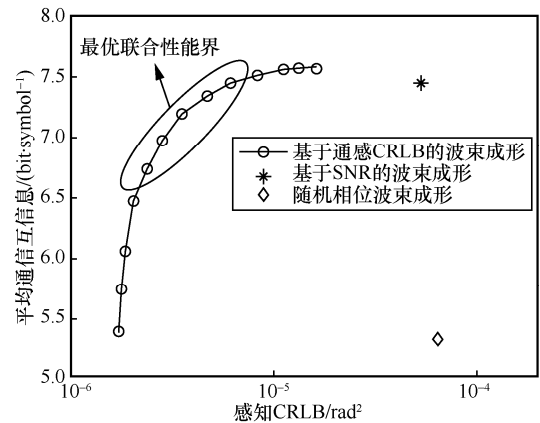


图 10 基于通感 CRLB 的一体化波束成形与基于 SNR 的一体化波束成形的通感性能对比

非正交 ISAC 与时分正交 ISAC 性能对比如图 11 所示，相比于正交时分 ISAC 方案，所提出的非正交 ISAC 方案能够同时实现更优的通信性能与位置感知性能。此外，随着 RIS 阵元数的增加，两者之间的性能差距变得更加明显。证明所提出的非正交 ISAC 方案能够在相同的时频资源下实现更好的通感性能，频谱效率得到了显著的提升。

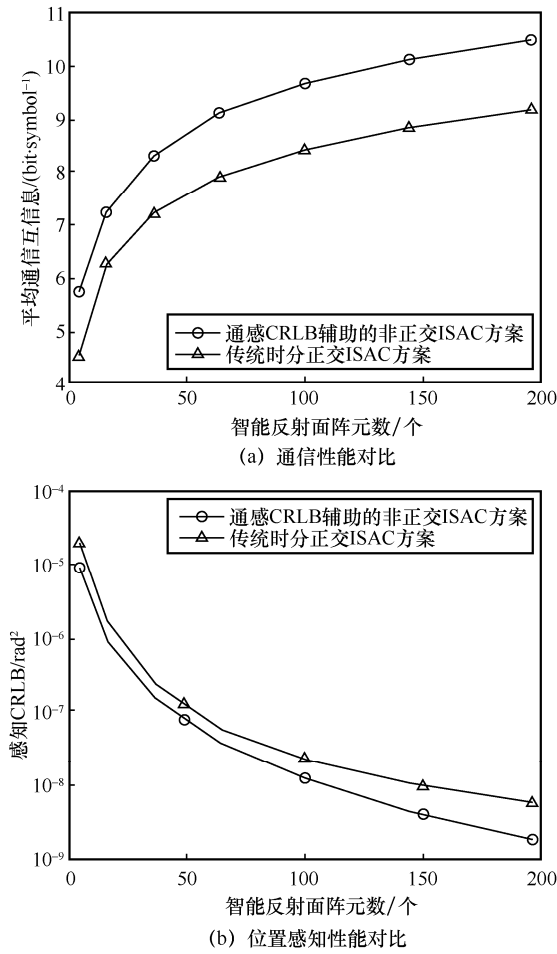


图 11 非正交 ISAC 与时分正交 ISAC 性能对比

3.2 感知辅助非正交 ISAC 设计

本节提供数值仿真以验证本文所提的感知辅助非正交 ISAC 设计方案的通感性能。感知辅助非正交 ISAC 仿真示意图(俯视图)如图 12 所示, RIS 反射子面和两块感知子面坐标分别为 $(0\text{ m}, 0\text{ m}, 3\text{ m})$ 、 $(0\text{ m}, -5\text{ m}, 3\text{ m})$ 和 $(0\text{ m}, 5\text{ m}, 3\text{ m})$, 基站高度为 20 m 且与 RIS 反射子面的距离为 50 m , 用户高度为 0 m 且与 RIS 感知子面的距离为 5 m 。如无特别说明, RIS 反射子面阵元规模为 20×20 (即反射子面阵元数 $M_c=400$), 两个感知子面规模为 6×6 (即感知子面阵元数 $M_s=36$), 基站天线数 $N_B=16$, 用户天线数 $N_U=16$, 相干块时隙长度 $T=100$, 第一阶段时隙长度 $\tau_1=5$ 。

感知辅助非正交 ISAC 方案与基于完美 CSI 的纯通信方案对比如图 13 所示, 其中通信性能指

标采用整个相干块内的平均通信速率表征, 感知性能指标采用用户位置的定位误差的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 表征。所提方案采用了基于感知信息的 SDR 波束成形方法, 纯通信方案采用了文献[13]提出的基于完美 CSI 的交替优化 (alternating optimization, AO) 波束成形算法。仿真结果表明, 首先, 所提感知辅助的波束成形策略能够根据不同的通信和感知需求灵活地调整并兼顾通信和感知性能; 而且, 相比于基于完美 CSI 的纯通信设计方案, 所提感知辅助非正交 ISAC 设计方案可通过牺牲少量通信性能, 换来厘米级精度的位置感知功能, 并规避完美 CSI 估计带来的高导频开销问题; 此外, 随着感知阵元数的增加, 所提感知辅助的非正交 ISAC 方案的通感性能均有明显提升, 且在通信性能方面与基于完美 CSI 的纯通信方案的差距逐渐减小。

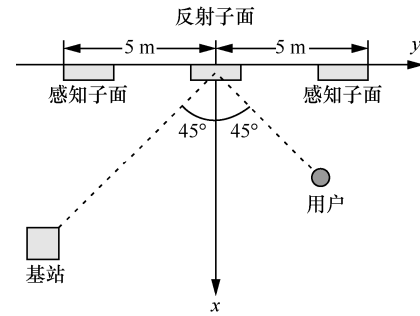


图 12 感知辅助非正交 ISAC 仿真示意图 (俯视图)

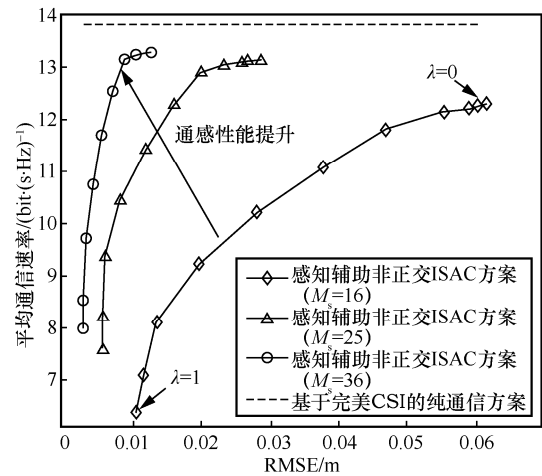


图 13 感知辅助非正交 ISAC 方案与基于完美 CSI 的纯通信方案对比



感知对通感性能的影响如图 14 所示,说明在相同的 ECSI 导频开销下,感知辅助的波束成形方案相比于基于 ECSI 的波束成形在通信和感知性能方面均具有显著的优势,且能够实现对通感性能的灵活调整,满足差异化的通感性能需求。不仅如此,在基于 ECSI 的波束成形方案中,通信和感知相互竞争空域资源。而在感知辅助的波束成形方案中,通信和感知不再是单纯的竞争关系,第一阶段获取的粗感知结果可用于同时提升第二阶段的通信和感知性能。具体而言,第一阶段由于获取的 CSI 有限无法进行有效的波束成形设计,只能支持粗感知和低速通信,而第二个阶段利用第一阶段获取的粗感知信息联合设计基站、RIS 和用户的波束成形,可同时支持高精度感知和高速率通信,在实现感知的同时增强通信和感知性能。另外,相比于基于完美 CSI 的波束成形方案,感知辅助的波束成形方案随着感知阵元数量 M_s 的增加可达到与基于完美 CSI 的波束成形(RIS 辅助纯通信系统)相近的可达速率,且具有更低的导频开销。基于完美 CSI 的波束成形,采用基于级联信道的信道估计方法获取高维 CSI,导频开销为 RIS 阵元数和用户天线数量的乘积(即 $M_c N_U$)^[27]且随 RIS 阵元数的增加呈线性增长,而所提出的感知辅助波束成形,仅需估计低维度的等效信道,导频开销仅为用户天线数 N_U 且与 RIS 阵元数量无关,从而规避了高维度 RIS 级联信道估计导致的高导频开销。

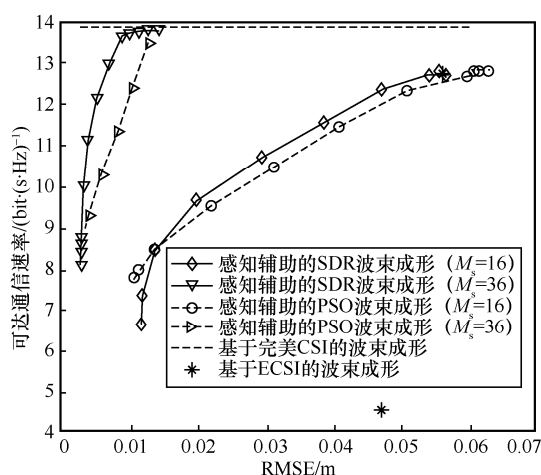


图 14 感知对通感性能的影响

4 技术挑战与展望

对 RIS 系统 ISAC 的研究表明 RIS 在抑制通感干扰、服务盲区通感、提升通感性能方面具有显著优势,然而当前 RIS 系统 ISAC 研究尚处在初期阶段,在通感联合性能评估、一体化波形设计、一体化波束成形设计以及一体化参数估计等方面仍面临着诸多挑战。

4.1 RIS 系统通感联合性能评估模型

对通感联合性能进行表征,形成统一的评价指标,是权衡和提升通感性能的理论基础。在 RIS 系统 ISAC 研究中,通信和感知共享硬件系统和时频资源,二者性能相互耦合,传统单一评价通信性能或者感知性能的指标不再适用,RIS 的引入也会同时影响通信和感知的性能,使得对通感联合性能的量化和评价变得更加的复杂。现有通感联合性能评价指标主要包括以下 3 类。

(1) 基于等效均方误差的联合性能评估模型,将通信的过程等效为随机变量参数估计的过程,采用等效均方估计误差对通信性能进行表征,从而建立起统一通信性能和感知性能的联合性能评估模型。

(2) 基于等效速率的联合性能评估模型,类比通信速率,根据感知参数和观测信号间的互信息,为感知性能定义一个等效估计速率,从而统一感知和通信评价指标。

(3) 基于容量-失真函数的联合性能评估模型,采用容量-失真函数表示在感知失真度限制下的最大通信容量,从而建立起体现通信容量和感知精度折中关系的另外一种联合性能评估模型。

然而,上述通感联合性能评估模型考虑的信道模型和场景比较简单,针对 RIS 系统中复杂 ISAC 场景和级联信道模型,需要建立更加实际和准确的联合性能评价模型。

4.2 RIS 系统一体化波形设计

一体化波形设计是实现 ISAC 的里程碑式的技

术, 是 ISAC 设计中至关重要的技术, 由于通信和感知在需求上存在差异, 现有的波形无法满足实际的应用。目前主要的研究方向为基于通信或感知波形的一体化波形研究和新型 ISAC 波形研究。前者由于不是专有波形, 无法很好地兼顾通信和感知需求, 而对新型 ISAC 波形的研究目前尚处于初期, 波形设计往往是针对特定的场景, 从求解优化问题的角度出发, 所设计的一体化波形依赖于特定的场景, 普适性较差。而 RIS 系统一体化波形研究中, 一体化波形设计和 RIS 配置相互耦合, 进一步增加了波形设计的难度。

因此, 需要研究兼顾通感性能的 RIS 一体化波形设计方法, 基于所构建的 RIS 系统 ISAC 联合性能评估模型, 分析 RIS 配置和一体化波形设计对通信性能和感知性能的影响, 综合考虑波形的通信保障特性、感知保障特性以及对 RIS 等不同系统配置的普适性, 明确一体化波形的设计指标, 包括可携带数据能力、最大用户数、感知精度、能耗、实现复杂度、灵活性和普适性等, 进而确定一体化波形的设计框架。在此框架下, 通过设计一体化波形的可调参数, 最优化 RIS 系统通感联合性能指标, 例如最小化等效均方误差或最大化等效速率/容量失真函数, 实现通感性能兼顾。

4.3 RIS 系统一体化波束成形设计

通过收发端有源波束和 RIS 无源波束的联合设计, 可有效提升通信速率和感知精度。按照优化的目标, 现有 RIS 一体化波束成形研究主要分通信性能主导和感知性能主导两种。第一种通信性能主导的情况, 波束成形设计目标为在感知性能满足一定约束条件下, 最大化通信性能, 例如在感知失真度限制下最大化通信用户数和速率。第二种感知性能主导的情况, 波束成形设计目标为通信性能满足一定约束条件下, 最大化感知性能, 例如在通信 SINR 约束条件下最大化雷达效用或在通信误码率约束条件下最大化雷达回波 SINR。然而, 由于现有的 RIS 一体化波束成形大多基于原有的通信性能指标

和感知性能指标, 难以实现逼近通感联合性能界的最优效果, 因此需要基于统一的通感性能评价指标, 探索逼近通感性能界的最优波束成形。

现有的 RIS 一体化波束成形依赖于完美的信道状态信息, 然而实际中由于噪声、用户的移动性、干扰等不利因素, 信道估计总会存在误差。而且有时为了降低 RIS 级联信道估计的导频开销, 仅通过少量的导频训练获取部分 CSI (例如统计 CSI、角度信息等)。因此, 针对不完美 CSI, 或者在仅有部分低维 CSI 的实际情况下, 如何设计有效的 RIS 一体化波束成形尚需研究。

此外, 由于 RIS 大规模的天线阵列, RIS 一体化波束成形涉及高维参数优化问题, 存在波束成形复杂度高的问题, 需要探索低复杂度的波束成形方法。可考虑从以下几方面降低联合波束成形设计的复杂度: 利用信道稀疏性和角度域特性降低优化参数的维度; 利用感知的信息简化波束成形设计; 采用机器学习、交替优化等手段降低算法复杂度。

4.4 RIS 系统一体化参数估计

一体化参数估计算法性能与 RIS 系统 ISAC 性能紧密相关, 直接关系到通感服务质量的好坏, 现有研究对通信参数 (信道估计、信号解调等) 与感知参数 (角度、速度、距离等) 的估计通常是分开进行的。通信参数的估计包括对信道的估计以及对信息符号的解调。由于 RIS 的无源特性, 一般通过对 RIS 反射模式 (例如 ON/OFF 模式) 的设计, 在收发端估计 RIS 级联信道, 并通过阵元分组、压缩感知等方法降低级联信道的估计复杂度。对信息符号的解调方法包括最小二乘、最小均方误差以及最大似然估计等算法。感知参数的估计主要包括估计目标的角度、距离、速度等信息, 常用的感知参数估计方法包括: 易于实现但分辨率低的周期图方法, 例如二维傅里叶变换; 适用于低维度信号场景下的最大似然估计; 适用于非连续样本的子空间算法, 例如 MUSIC; 适用于待估参数较少情况下的压缩感知技术; 适用于



高维度信号参数估计的张量算法技术。

然而,对于 RIS 系统一体化参数估计,通信性能与感知性能相互耦合,分开估计通信参数和感知参数将导致较高的通信系统资源开销、较低的通信与感知效率,亟须研究通信和感知参数联合估计方法,而一体化系统中通信参数和感知参数相互耦合又极大增加了联合估计的难度。此外,RIS 一方面有助于提升参数估计的准确度,另一方面也带来了更多的待估参数,这进一步增加了参数估计的复杂度。因此,尚需研究低复杂度、高准确度的 RIS 一体化参数联合估计方法,以提升系统通信与感知效率,降低系统的资源开销。

5 结束语

本文在梳理 RIS 系统 ISAC 研究进展的基础上,提出了两种非正交 ISAC 方法,利用分布式 RIS 构建虚拟视距路径,支持盲区用户在非正交时频资源上的通信和感知。首先,提出了一种通感 CRLB 辅助非正交 ISAC 设计方法,基于通感 CRLB 统一了通信和感知性能评价指标,指导了 RIS 一体化波束成形设计,并证明了非正交 ISAC 在通信和感知性能方面均优于时分正交 ISAC。之后,提出了一种感知辅助非正交 ISAC 设计方法,利用感知信息设计 RIS 一体化波束成形以兼顾通感性能,实现通信和感知从单纯的竞争关系到既竞争又合作关系的转变,并且规避了 RIS 级联信道估计带来的高导频开销问题。最后,对 RIS 系统 ISAC 的技术挑战和未来发展进行了展望。

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]. 2021.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. White paper for the overall vision and potential key technologies of 6G[R]. 2021.
- [2] ZHOU Y Q, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(5): 20-27.
- [3] 段向阳, 杨立, 夏树强, 等. 通感算智一体化技术发展模式[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 37-48.
- DUAN X Y, YANG L, XIA S Q, et al. Technology development mode of communication/sensing/computing/intelligence integration[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 37-48.
- [4] ZHOU Y Q, LIU L, WANG L, et al. Service-aware 6G: an intelligent and open network based on the convergence of communication, computing and caching[J]. Digital Communications and Networks, 2020, 6(3): 253-260.
- [5] WU Q, ZHANG S, ZHENG B, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [6] IMT-2030 无线工作组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 2021.
IMT-2030 Wireless Working Group. Study report for integrated communication and sensing technology[R]. 2021.
- [7] IMT-2030 (6G)推进组. 智能超表面技术研究报告[R]. 2021.
IMT-2030 (6G)Promotion Group. Study report for reconfigurable intelligent surface[R]. 2021.
- [8] LIU A, HUANG Z, LI M, et al. A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(2): 994-1034.
- [9] WANG X, FEI Z, GUO J, et al. RIS-assisted spectrum sharing between MIMO radar and MU-MISO communication systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 10(3): 594-598.
- [10] 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(7): 2131-2145.
- [11] WEI T, WU L, MISHRA K V, et al. Multiple RIS-assisted wideband dual-function radar-communication[C]//Proceedings of the 2022 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S), F, 2022. Piscataway: IEEE Press, 2022:1-5.
- [12] JIANG Z M, RIHAN M, ZHANG P, et al. Intelligent reflecting surface aided dual-function radar and communication system [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 16(1): 475-86.
- [13] YAN S, CAI S, XIA W, et al. A reconfigurable intelligent surface aided dual-function radar and communication system[C]//Proceedings of the 2022 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications & Sensing (JC&S), F, 2022. Piscataway: IEEE Press, 2022:1-5.
- [14] WANG X, FEI Z, 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.
- [15] WANG X, FEI Z, HUANG J, et al. Joint waveform and discrete phase shift design for RIS-assisted integrated sensing and communication system under Cramér-Rao bound constraint[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 71(1): 1004-1009.
- [16] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.

- [17] YU X, XU D, SCHÖBER R. MISO wireless communication systems via intelligent reflecting surfaces[C]//Proceedings of 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 735-740.
- [18] HUANG C, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 4157-4170.
- [19] HU X, ZHONG C, ZHANG Z. Angle-domain intelligent reflecting surface systems: design and analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(6): 4202-4215.
- [20] HU S, RUSEK F, EDWARDS O. Beyond massive MIMO: the potential of positioning with large intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(7): 1761-1774.
- [21] ZHANG H, ZHANG H, DI B, et al. MetaLocalization: reconfigurable intelligent surface aided multi-user wireless indoor localization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(12): 7743-7757.
- [22] WANG W, ZHANG W. Joint beam training and positioning for intelligent reflecting surfaces assisted millimeter wave communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6282-6297.
- [23] HE J, JIANG F, KEYKHOSRAVI K, et al. Beyond 5G RIS mmWave systems: where communication and localization meet[J]. IEEE Access, 2022(10): 68075-68084.
- [24] WANG R, XING Z, LIU E. Joint location and communication study for intelligent reflecting surface aided wireless communication system[J]. arXiv preprint arXiv: 2103.01063, 2021.
- [25] LIU C, HU X, PENG M, et al. Sensing for beamforming: an RIS-enabled integrated sensing and communication framework[C]//Proceedings of ICC 2022 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 5567-5572.
- [26] HU X, LIU C, PENG M, et al. IRS-based integrated location sensing and communication for mmWave SIMO systems[J]. submitted to IEEE Transaction on Wireless Communication (Minor Revision).
- [27] PAN C, ZHOU G, ZHI K, et al. An overview of signal processing techniques for RIS/IRS-aided wireless systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2022, 16(5): 883-917.

[作者简介]



胡小玲(1993-),女,博士,北京邮电大学信息与通信工程学院特聘副研究员、博士生导师,主要研究方向为通信感知一体化、智能超表面通信和 AI 赋能的无线感知等。



于周源(1999-),男,北京邮电大学信息与通信工程学院博士生,主要研究方向为智能超表面系统的通感一体化联合性能表征与信号处理方法。



钱骁伟(1999-),男,北京邮电大学信息与通信工程学院博士生,主要研究方向为智能超表面系统的通感一体化波束成形与资源分配。



彭木根(1978-),男,北京邮电大学信息与通信工程学院院长、教授、博士生导师,网络与交换技术国家重点实验室副主任, IEEE Fellow, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士。主要研究方向为智能简无线网络、空天地海一体化网络、通信感知计算融合等。曾获得国家技术发明奖二等奖、北京市科学技术奖一等奖、中国通信学会科学技术奖一等奖、中国专利银奖、求是杰出青年成果转化奖、IEEE 通信学会海因里希—赫兹奖等。担任《电信科学》副主编, IEEE IoT 期刊指导委员会委员, IEEE Network、IEEE TVT、IEEE TNSE 等期刊的编委等。