

智能超表面 辅助通信感知一体化



RIS-Assisted Integrated Sensing and Communications

夏方昊/XIA Fanghao, 王新奕/WANG Xinyi,
郑重/ZHENG Zhong

(北京理工大学通信技术研究所, 中国 北京 100081)
(Research Institute of Communication Technology, Beijing Institute of
Technology, Beijing 100081, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202203010

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220620.1552.008.html

网络出版日期: 2022-06-21

收稿日期: 2022-06-07

摘要: 对智能超表面 (RIS) 辅助通信感知一体化 (ISAC) 技术的概念、发展历程、应用场景和研究现状等方面进行了系统性介绍。认为当前 ISAC 技术在波束设计、资源调度及通信安全等方面被动地受到无线电磁环境约束。而 RIS 技术可以通过主动重构无线信道特征, 引入额外空间自由度突破传统通信感知系统的能力, 有效提升 ISAC 系统的多种性能指标, 包括提升通信速率、消除用户间干扰、权衡感知与通信性能、增强通信安全等, 给未来智慧交通、智慧工厂和无人机网络等垂直行业应用提供了高精度、广覆盖的通信感知功能。

关键词: ISAC; RIS; 干扰消除; 通信安全

Abstract: Through the systematic introduction of the concept, development, application scenarios, and state-of-the-art of the reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted integrated sensing and communications (ISAC), it is believed that the performance of the current ISAC is passively constrained by the wireless electromagnetic environment in beam design, resource scheduling and communication security. By actively reconfiguring the characteristics of wireless channels, RIS introduces an additional spatial degree of freedom to improve the capabilities of the traditional sensing and communications, which enhances multiple performance metrics of ISAC systems, including the communication rate, interference cancellation, trade-off between radar and communication, and communication security. Such improvements provide high-precision sensing and broad-coverage communication for future vertical use cases, such as intelligent transportation, smart factory, and unmanned aerial vehicle networks.

Keywords: ISAC; RIS; interference cancellation; communication security

随着 5G 时代的到来, 无线通信设备数量呈爆炸式增长, 通信产业对无线频谱的需求日益迫切。为了解决频谱资源稀缺的问题, 我们需要探索未来通信系统与其他电子设备在同一频段下共存的可行性, 因此通信感知一体化技术应运而生^[1]。一方面, 无线通信频段向毫米波、太赫兹及可见光等更高频段发展, 将与传统感知频段产生越来越多的重叠; 另一方面, 无线通信与无线感知在系统设计、信号处理与数据处理等方面呈现出越来越多的相似性。因此, 利用同一套设备或共享部分设备器件实现通信与感知, 可以降低设备成本, 减少体积与功耗, 是未来发展的必然趋势^[2]。

多输入多输出 (MIMO) 系统利用其空间自由度进行发射波束赋形设计, 可显著提高通信与感知性能, 但在信号传播环境较差时仍存在较为严重的性能恶化。此时, 使用智能超表面 (RIS) 技术可以提升系统性能。

RIS 是由大量可重构反射元件组成的二维超表面^[3], 这

些反射元件可以独立调节入射信号的相移、幅值、频率与极化方式, 建立有利的发射机与接收机之间的视距链路, 从而有效扩大感知覆盖范围, 提高通信传输质量, 增强通信安全性等。此外, RIS 可以提供额外的空间自由度来解决信道衰落问题。因此, RIS 被认为是实现 6G 网络智能无线电环境的关键使能技术, 受到业界的广泛关注。

1 通信感知一体化技术的发展与挑战

在未来的 6G 系统中, 使用更高频带、更大带宽与密集分布的大规模天线阵列是必然发展趋势^[4]。集成通信与感知功能, 不仅可以降低硬件成本, 节约频谱资源, 还可有效避免通信系统与感知系统分离所带来的工作效率低、频带利用率低、能量分割性能下降等问题^[5]。一方面, 通信感知一体化系统可以利用通信信号的传输、反射及散射, 协作感知目标环境, 并凭借其通信能力汇聚感知信息, 拓展感知的维度

与深度；另一方面，系统可利用感知功能获得的高精度定位、成像与环境重建能力，实现更精确的波束赋形、更快的波束失效恢复与更低的导频开销，进一步提升通信性能。

1.1 通信感知一体化发展历程及目标

根据通信模块与感知模块间联系的紧密程度与协作关系，通信感知一体化技术发展主要可以分为“业务共存、能力互助、网络互惠”3个阶段^[6]。

(1) 业务共存

业务共存是通信感知一体化技术发展的起始阶段。在此阶段，通信系统与感知系统实现硬件上的共用，并可通过时分或频分的方式来提升硬件利用率，减小系统体积，降低成本。但业务共存阶段的通信感知一体化系统，其通信波形与感知波形不同，通信与感知信号接收算法不统一，通信模块与感知模块之间仍存在相互干扰，并且由时分或频分导致的无线资源利用率低的问题也无法得到解决。因此，此阶段的研究重点是抑制通信与感知的互干扰，提升频谱效率。此阶段的研究主要以提升某一项功能为目标，同时尽可能保留另一项功能。在更极端的情况下，当通信能力与感知能力在资源分配与干扰等问题上冲突时，可以保留所需的功能，完全抛弃另一项功能。即使不考虑通信与感知之间的相互辅助，也要避免因一体化而带来的负面影响。

(2) 能力互助

相较于业务共存阶段，在能力互助阶段，系统对通信与感知能力的协同提升提出了更高的要求。在此阶段中，通信系统与感知系统不仅实现硬件上的共用，在波形设计、信号接收与处理等方面也实现了一体化设计。这加深通信与感知的相互融合，进一步提升通信与感知的信息共享、频谱复用能力。因此，此阶段的研究重点是一体化波形设计与波束赋形方案确定。此阶段的研究目标是在感知系统或通信系统保持最低要求的前提下，辅助提升另一项功能，达到超越通信感知共存系统的性能。

(3) 网络互惠

在未来6G网络中，卫星、无人机、基站（BS）及终端（UE）等设备将构成空天地海一体化网络架构，形成多维度、全方位、多节点的感知与通信网络。网络互惠是通信感知一体化技术在此场景下的最终发展状态。在能力互助阶段，在通信感知融合的基础上，我们需要进一步提升一体化波形的融合设计、系统干扰消除能力，并引入智能物联网全方位感知与人工智能计算资源，实现感知与通信相互协同提升。此阶段的研究重点是综合协调优化网络结构、资源管理与分配、边缘计算融合等技术。此阶段的研究目标是在满足

通信与感知的基本能力要求下，提升整体能力。

1.2 通信感知一体化发展的挑战

目前，通信感知一体化技术已经得到了广泛而充分的重视，并且在部分场景下已经展现了其高集成、低功耗、节约频谱资源的技术潜力。与此同时，该技术在波形设计、资源调度、通信安全等方面面临一系列挑战。

(1) 波形设计

对于通信感知一体化波形来说，传统感知系统与通信系统对发射信号的设计准则存在根本矛盾。感知系统中的发射信号不携带信息，为确定信号；而通信系统中发射信号携带信息，受信源影响，为随机信号。设计通信感知统一表征信号实际上是权衡感知性能与通信性能的过程。感知性能与通信性能的分析方法不同，性能指标也各不相同，因此无法作为设计统一表征信号的依据。这就需要在时频域与空域分别对发射信号进行优化，分析通信功能与感知功能对发射信号信息承载能力、发射信号波束方向等指标的需求，从而进行多性能指标智能优化。

(2) 资源动态调度

在广域物联网覆盖的环境下，面对无线网络低功耗的要求，基站需要针对多目标通信与感知需求，合理进行资源调度和分配。理论上，基于MIMO系统的空间分集能力，基站可针对性地设计波束。但在通信感知一体化系统中，为兼顾通信与感知的性能，通信波束设计的自由度会受到限制，并且在时变环境下，通信目标与感知目标的数量与比例、目标的优先级会进行动态变化^[7]。在面对复杂多变的场景时，采用单一的波束设计方式存在灵活性不足的问题，这会造成较大的能量和频谱资源浪费。为提高时变系统下基站与目标的通信速率和基站对目标的感知精度，我们需要对生成波束的数量、波束方向及总发射功率进行合理设计。

(3) 通信安全

随着5G技术的普及，一些新兴应用逐渐走入人们的生活，如远程医疗、车联网通信与机密信息传输等，因此确保通信安全与个人隐私至关重要。传统的网络层加密技术面临着许多问题，通信感知一体化系统更是存在诸多安全挑战。一体化信号需要对周围目标进行感知，与此同时信号中也包含通信的数据。无线信道的广播性与空域的开放性，使得信号容易被敌方设备窃听。在这种暴露的风险下，即使对通信数据本身加密，通信链路仍然可以被敌方目标检测，从而增加了网络受到攻击的风险^[8]。传统的通信物理层安全解决方案往往通过波束和波形设计降低窃听设备的接收信号功率，而对于通信感知一体化系统来说，此方法将严重降低系统对

攻击节点的感知能力。针对通信感知一体化系统，需要利用更多其他的通信安全技术来降低通信感知一体化系统的脆弱性，例如使用安全波束形成、人工噪声设计以及合作安全设计等方法。

2 RIS 增强通信感知一体化系统的典型应用

在通信感知一体化系统中，感知功能的实现通常要求通信感知一体化发射机与被感知目标之间存在视距路径。在此情况下，RIS 可以通过对无线环境的重构，建立额外的视距链路。这为非视距路径下的感知提供解决方案，从而提升感知区域的覆盖范围，提高感知精度。除此之外，RIS 还可以提升通信性能，提高传输速率，保障通信的可靠性。因此，RIS 对通信感知一体化系统的两种功能均可以起到增强的作用。可以预见，通信感知一体化系统结合同样具有广泛应用前景的 RIS 将成为 6G 时代中关键性的协作新范式。

(1) 智慧交通

如图 1 所示，未来的智慧交通系统，包括车联网与自动驾驶，将借助于通信感知一体化系统来实现人、车、路的高效协同互联。通信与感知在性能上相互促进，因此路边单元能够实现对车辆位置与速度的准确感知，车辆能够在高精度地提取周围环境信息的同时，与其他车辆、路边单元、行人等进行信息的快速交互^[9]。该场景的典型用例有自动泊车、道路环境监测控制、动态地图生成等。由于车辆在行驶过程中容易受到其他车辆建筑物的遮挡，通信与感知的性能都会受到影响。因此，基于 RIS 增强的通信感知一体化系统可以解决非视距传输造成的通信与感知性能损失的问题，重构无



▲图1 智能超表面增强 ISAC 的智慧交通场景

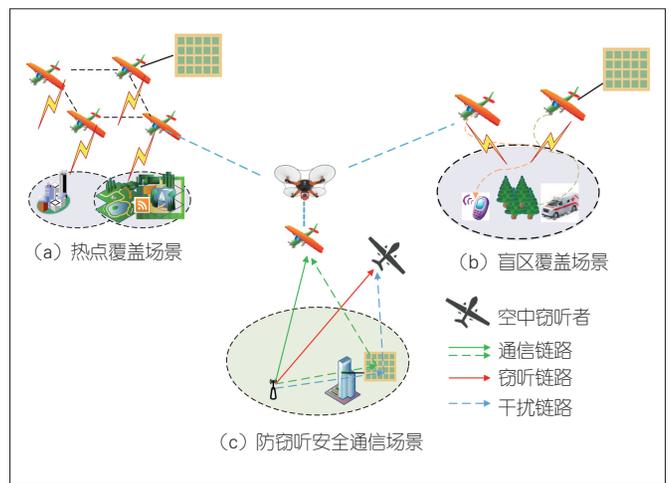
线信号传播环境，保障通信的可靠性，提升通信速率，增强感知能力，减少覆盖盲区，最终实现全面感知与泛在连接，满足未来智慧交通系统的需求。

(2) 智慧工厂

未来的智慧工厂呈现出无人化的趋势，海量接入设备与机器人将协同完成复杂的工业生产任务。其中，每种机器人负责生产环节的特定部分。只有系统满足超高精度感知与极低时延通信的要求，才可以实现机器人与机器人、机器人与设备、设备与设备之间的紧密合作。通信感知一体化系统可为智慧工厂提供帮助。具体来说，通信感知一体化技术可以辅助实现定位、成像以及环境地图构建等功能，也可以对信道状态信息进行感知，这样可以降低信令开销，保障在极低时延条件下的通信质量。除此之外，可以将感知到的信息上传至云端，实现联合感知，从而指导机器人或设备执行正确的决策。RIS 可被安装在工厂的墙壁、大型设备的表面，从而实现对通信感知一体化系统的增强，满足海量设备接入时对通信的高可靠性与低时延的要求。

(3) 无人机应用

无人机可被视为快捷灵活部署的空中节点，与通信感知业务结合紧密。通信感知一体化系统可部署在基站端或无人机平台上，同时实现通信功能与感知功能，从而提高频谱效率与能量效率。如图 2 所示，在无人机场景下，RIS 增强通信感知一体化系统的用例分为两类：一类是将 RIS 安装在无人机上，通过无人机的感知结果来调整 RIS 的相位，为热点地区或覆盖盲区的用户提供从基站端到用户端虚拟的视距通信链路，实现通信信号的广域覆盖^[10]；另一类是将 RIS 安装在合适的地面建筑上，通过基站端对无人机的感知来调节 RIS 的反射系数，从而提高与无人机的通信速率^[11]。如果无人飞机为窃听器，则可以通过调节 RIS 的反射系数来干扰窃听



▲图2 智能超表面增强通信感知一体化的无人机应用场景

者对有用信号的接收，防止窃听，提升通信安全性能。

3 RIS增强通信感知一体化系统的研究

RIS在提高无线通信的频谱与能量效率方面拥有巨大的潜力。RIS可以通过提供更好的感知覆盖来提高感知精度与分辨率，提升通信感知一体化系统性能。RIS与通信感知一体化系统的结合也带来了相应的问题。例如，RIS辅助的通信感知一体化系统可能引入新的信号干扰。当许多RIS分布式部署时，由于与RIS相关的网络信息有着被动的性质，因此仅有部分可用。在波束设计方面，需要同时考虑通信与感知两方面的性能，因此也面临难题。RIS缺乏信号处理能力，即使以大量的导频为代价，也难以精准获得与RIS相关的信道状态信息。为应对上述挑战，学术界在如下几个方面展开了研究。

3.1 联合波束赋形设计与RIS反射系数优化

MIMO系统的发射波束赋形设计可以提高通信与雷达感知性能。通过调整反射系数，RIS可以智能创造良好的传播环境，从而进一步提升性能。基站波束设计与RIS反射系数的优化并不是独立的：波束设计需要考虑RIS引入额外的空间自由度，同时RIS反射系数也需要以实际基站发射波束为依据进行优化。通过对一体化波形与RIS反射系数进行联合优化，可实现增益。

(1) 提升通信速率

RIS辅助的通信感知一体化系统需要同时完成目标感知任务和与用户通信任务。考虑到通信与感知的性能权衡，我们通常以RIS辅助目标检测感知为基本要求，最大化基站与用户之间的通信速率^[12]。文献[13]考虑了多天线基站同时向多用户发送数据的情况，以最小雷达目标信噪比与最大功率等条件为约束，并以最大化通信和速率为目标，优化发射波束与RIS反射系数。为了解决由此产生的非凸优化问题，可以采用分式规划（FP）、最大最小化（MM）等方法将其转化为若干易于处理的子问题，并进行迭代求解。

(2) 消除用户间干扰

将通信感知一体化系统与RIS技术相结合，可以发挥RIS在缓解多用户干扰方面的潜力，提高通信性能，并更好地平衡感知性能与通信性能。文献[14]首先在探测波束图样严格受限的情况下，通过联合设计发射波形与RIS相移矩阵，降低系统多用户干扰。随后，文献[14]进一步探索探测波束图样吻合度与多用户干扰抑制之间的均衡设计。研究表明，引入RIS可以有效地降低通信感知一体化系统中存在的多用户干扰，从而显著提高系统吞吐量。此外，RIS还可以

平衡雷达与通信性能，使得发射波形与理想发射波束图更好地匹配。

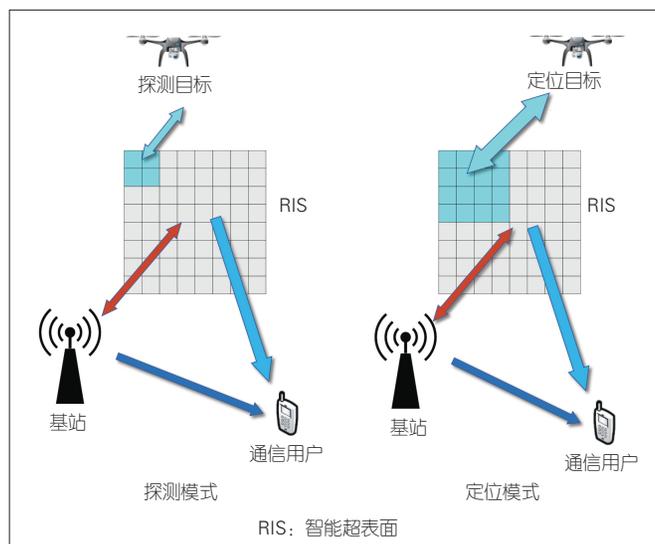
3.2 RIS单元模式切换

在通信感知一体化系统中，通信功能与感知功能高度集成。在共用设备硬件、波束联合设计的基础上，通信功能与感知功能不再有明显区分。通信感知一体化系统可以节省硬件成本以及频谱资源。但当通信需求与感知需求发生动态变化时，系统资源动态调度的灵活性相对不足。通过引入RIS，通信感知一体化系统可以实现通信波束与感知波束的分离，从而使系统更好地服务通信目标与感知目标。进一步地，系统可以通过对RIS单元的模式进行切换，来实现感知与通信性能的动态权衡。

文献[15]考虑一体化系统存在两种工作模式：探测模式与定位模式。如图3所示，系统自适应地根据RIS单元的通信模式与感知模式进行切换。在探测模式下，为了检测目标是否存在，系统利用宽波束进行扫描。在这种情况下，使有少量RIS单元用于感知，其余RIS单元用于与UE通信。在定位模式中，系统先使用宽波束进行目标的模糊感知，再使用大量RIS单元，利用窄波束精确定位目标。通过RIS单元模式的灵活选择，可以实现定位精度与通信频谱效率间的性能权衡。

3.3 隐蔽通信方案设计

传统的数据加密方法无法解决通信感知一体化系统中的所有安全问题。即使消息是加密的，由于空域开放性，通信数据与个人隐私信息仍有被泄露的风险。面对这一问题，隐



▲图3 RIS辅助探测/定位

蔽通信可以实现通信双方的隐藏信息传输,防止通信信号被恶意窃听者发现(即信号隐蔽)。窃听者无法确认信号的存在,则难以实施进一步的窃听行为。通过将隐蔽通信引入通信感知一体化系统,文献[9]设计联合感知与隐蔽通信系统,实现了高频谱利用率与敏感数据安全传输。通过引入RIS对信号的传播环境进行智能重构,通信感知一体化系统可以深度融合并进一步增强隐蔽通信。具体而言,设计者可以基于博弈论设计目标感知与隐蔽信号传输的收发机优化方案,对发射功率、RIS单元数目以及反射系数进行联合优化,以实现低成本、高效能隐蔽通信。

4 结束语

本文主要从基本概念、应用场景、研究现状、关键技术等方面对RIS辅助的通信感知一体化系统进行了详细介绍。RIS具有低成本、低复杂度及易部署的特点,通信感知一体化融合感知与通信能力,使通信与感知互相协作、相辅相成。面对5G乃至6G所带来的诸多挑战,这两项革新技术的结合给未来研究带来了全新的方向。值得注意的是,在当前阶段,这两项新技术仍然面临着评估指标不完善、算法不成熟以及安全性差等问题。如何将这两项技术与现有通信网络与感知网络兼容,提升其性能鲁棒性、场景普适性,推进相关技术尽快落地,是未来研究的重中之重。

参考文献

- [1] 中国通信协会. 通感算一体化网络前沿报告[R]. 2022
- [2] 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
- [3] LIU R, LI M, LIU Y, et al. Joint transmit waveform and passive beamforming design for RIS-aided DFRC systems [EB/OL]. (2022-05-05)[2022-06-04]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9769997>
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728-1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [5] PIN TAN D K, HE J, LI Y C, et al. Integrated sensing and communication in 6G: motivations, use cases, requirements, challenges and future directions [C]//Proceedings of 2021 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing. IEEE, 2021: 1-6. DOI: 10.1109/JCS52304.2021.9376324
- [6] IMT-2030(6G)推进组. 通信感知一体化技术研究报告[R]. 2021
- [7] YANG H, WEI Z Q, FENG Z Y, et al. Queue-aware dynamic resource allocation for the joint communication-radar system [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(1): 754-767. DOI: 10.1109/TVT.2020.3042551
- [8] HILLI A A, PETROPULU A, PSOUNIS K. MIMO radar privacy protection through gradient enforcement in shared spectrum scenarios [C]// Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum

- Access Networks (DySPAN). IEEE, 2019: 1-5. DOI: 10.1109/DySPAN.2019.8935749
- [9] DU H Y, KANG J W, NIYATO T D, et al. Reconfigurable intelligent surface-aided joint radar and covert communications: fundamentals, optimization, and challenges [EB/OL]. (2022-05-05)[2022-06-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9768334>
- [10] CHEN Z, MA X Y, HAN C, et al. Towards intelligent reflecting surface empowered 6G terahertz communications: a survey [J]. China communications, 2021, 18(5): 93-119. DOI: 10.23919/JCC.2021.05.007
- [11] GONG S M, LU X, HOANG D T, et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: a contemporary survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2020, 22(4): 2283-2314. DOI: 10.1109/COMST.2020.3004197
- [12] HE Y H, CAI Y L, MAO H, et al. RIS-assisted communication radar coexistence: joint beamforming design and analysis [EB/OL]. (2022-03-08)[2022-06-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9729741>
- [13] LIU R, LI M, SWINDLEHURST A L. Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems [EB/OL]. [2022-06-06] <https://arxiv.org/abs/2203.00265>
- [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] PRASOBH SANKAR R S, DEEPAK B, CHEPURI S P. Joint communication and radar sensing with reconfigurable intelligent surfaces [J]. 2021 IEEE 22nd international workshop on signal processing advances in wireless communications (SPAWC), 2021: 471-475. DOI: 10.1109/SPAWC51858.2021.9593143

作者简介



夏方昊, 北京理工大学信息与电子学院在读硕士研究生; 主要研究领域为通信感知一体化技术、智能反射表面技术与物理层通信技术; 参与国家自然科学基金重点项目、北京市科技计划等多个项目的研究。



王新奕, 北京理工大学信息与电子学院在读博士研究生; 主要研究领域为通信感知一体化技术与智能反射表面; 参与国家自然科学基金重点项目、面上项目及国家重点研发计划等多项国家项目的研究, 获2019年WOCC国际会议最佳论文奖; 已发表论文20余篇。



郑重, 北京理工大学信息与电子学院特别研究员、博士生导师; 主要研究领域为多天线通信技术、智能反射表面和随机矩阵理论; 主持和参加多项国家自然科学基金、北京市自然科学基金和科技部重点研发项目; 已发表论文40余篇。