

智能反射面辅助的无线信息与能量传输研究综述



Survey on Intelligent Reflecting Surface-Assisted Wireless Information Transmission and Power Transfer

庞海舰/PANG Haijian¹, 陈健锋/CHEN Jianfeng¹,
张广驰/ZHANG Guangchi¹, 崔苗/CUI Miao¹,
武庆庆/WU Qingqing²

(1. 广东工业大学, 中国 广东 510006;
2. 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室, 中国 澳门 999078)
(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of
Macau, Macau 999078, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202203005

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220620.1541.004.html>

网络出版日期: 2022-06-21

收稿日期: 2022-06-10

摘要: 智能反射面 (IRS) 是 6G 的关键技术之一。优化 IRS 的被动反射波束赋形, 能够对无线信息传输 (WIT) 与无线能量传输 (WPT) 进行辅助, 从而大幅提高频谱效率。全面介绍了 IRS 的研究现状。首先, 对 IRS 辅助 WIT 的研究现状进行了归纳分析, 表明 IRS 对提升系统通信性能起到关键作用; 然后, 对 IRS 辅助 WPT 的研究进行了梳理, 揭示了 IRS 在大幅提升能量传输效率方面的潜能; 随后, 重点叙述了 IRS 辅助无线携能通信的研究现状, 并展望了物理层安全、无人机通信和多 IRS 协同辅助等 6 个新研究主题和方向。

关键词: IRS; WIT; WPT; 无线携能通信

Abstract: With the ability to assist and greatly improve the spectrum efficiency of wireless information transmission (WIT) and wireless power transfer (WPT), intelligent reflecting surface (IRS) is envisioned as a key technology for future 6G communications. A comprehensive overview of the domestic and international research status of IRS-assisted WIT and WPT is proposed. First, the research on IRS-assisted WIT is summarized and analyzed, which shows that IRS plays an essential role in improving the performance of various WIT systems. Second, the research on IRS-assisted WPT is discussed, which reveals the great potential of the IRS in enhancing energy transfer efficiency. Then, the research on IRS-assisted simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) is emphatically described, and six future research directions of IRS-assisted SWIPT are prospected, including physical layer security, unmanned aerial vehicle (UAV) communication, multi-IRS cooperative assistance, and so on.

Keywords: IRS; WIT; WPT; simultaneous wireless information and power transfer

目前, 5G 无线通信系统正在全球范围内迅速部署和应用。互联网新兴产业的出现以及传统业务的更新迭代, 均对无线通信的服务质量提出了更高的要求, 即需要更高的频谱效率、更高的能源效率以及更可靠的链接服务。为了满足上述需求, 近年来出现了许多面向 5G 系统的新技术^[1], 例如增强型移动带宽 (eMBB) 和大规模多输入多输出

(Massive MIMO) 等。然而, 目前技术的应用仍存在着能源消耗多、硬件实现成本高以及信号处理复杂等缺点。近年来, 作为一种能够以低成本的方式重构无线信道、有效提升信道质量的新技术, 智能反射面 (IRS) 被提出, 并获得了业界的关注^[2]。

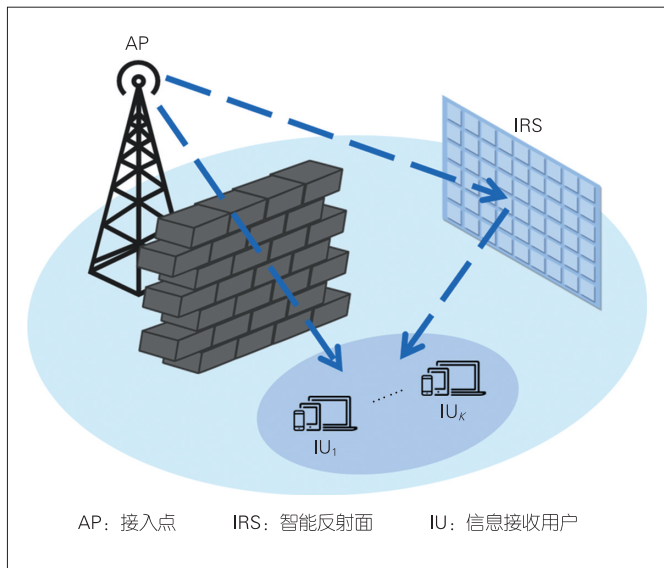
随着未来异构无线网络和智慧城市的发展, 预计到 2025 年, 全球的物联网设备数量将增加到 220 亿。数量如此庞大的无线设备要求无线通信系统不仅能提供更广泛的覆盖和更稳健的链接, 还要提供永久的能量供应。为此, 基于射频传输的远场无线能量传输 (WPT) 已成为一种实际可行且具有巨大潜能的用于物联网设备无线供电的技术^[3]。但是, 由于无线信道的路径损耗、阴影和多径衰减, 以及长距离传

基金项目: 广东省科技计划项目 (2021A0505030015、2020A050515010); 广东特支计划项目 (2019TQ05X409); 智慧城市物联网国家重点实验室 (澳门大学) 开放课题 (SKL-IoTSC (UM) -2021-2023/ORPF/A04/2022); 澳门科学技术发展基金项目 (SKL-IOTSC (UM) -2021-2023、0119/2020/A3、0108/2020/A); 广东省自然科学基金 (2021A1515011900)

输等原因，WPT通常运行在低能效的状态下。因此，如何提高WPT效率是应对未来无线网络设计的一个关键且具有挑战性的问题。IRS在辅助无线信息传输（WIT）方面具有优越性。WIT和WPT均工作在射频频段上，因此，可以预见IRS将成为有效提高WPT效率的重要技术之一。

1 IRS辅助WIT技术

IRS由大量低成本无源元件组成（通常被称为反射单元），可通过软件进行配置和编程。反射单元的几何和物理特性受到偏置电压的影响，因此它们能够独立地控制入射信号振幅和相移^[4]。IRS可以使入射信号以指定方向反射或传输，从而增加通信链路和优化自由度。图1显示了一个典型的IRS辅助WIT系统。系统包含1个无线接入点（AP）、1个IRS以及K个终端信息接收用户（IU）。AP下行向用户发送信息。IRS通过反射创建新的链路；通过控制反射信号的相位，使有用信号同相叠加，无用信号反相抵消，从而提高通信性能。



▲图1 典型的IRS辅助无线信息传输系统

1.1 IRS辅助单用户WIT

对于IRS辅助WIT技术，业界首先研究了单用户系统，代表性研究有以下两个。

(1) IRS能辅助提高信息传输的频谱效率。当AP距离用户较远时，两者之间的信道会有较严重的路径损耗，AP需要增大发射功率以确保用户通信的服务质量。通过部署IRS，通信系统能够建立高质量反射链路；通过有效叠加反射链路与直射链路，能有效改善AP与用户之间的信道质量，

提高通信频谱效率。相关研究主要围绕联合优化AP的主动波束赋形和IRS的被动波束赋形展开。文献[5]提出IRS辅助单用户多输入单输出（MISO）系统通过联合优化主动/被动波束赋形，在满足用户的最小信干噪比条件下最小化AP的发射功率。与没有IRS的传统设置相比，IRS能够显著提高链路质量和覆盖率。另外，IRS还能辅助基于正交频分复用（OFDM）的WIT。文献[6]对IRS辅助单用户OFDM WIT系统的研究表明，IRS能够有效提高OFDM传输的频谱效率，且每一个反射单元对每一个OFDM子载波具有相同的反射相位。此外，IRS还能有效辅助轨道角动量（OAM）通信。基于OAM的通信系统十分依赖发射和接收均匀圆阵之间的直射链路，当其被阻塞时，传输很可能面临中断。文献[7]的研究表明，当OAM通信系统的发射端和接收端被阻断时，IRS能够通过建立高质量的虚拟直射链路，并通过发射功率分配和IRS被动波束赋形维持系统的高速通信。

(2) IRS能辅助提高信息传输的安全性。在信息传输的物理层安全方面，当窃听信道的信道增益优于合法通信的信道增益时，传统的物理层安全技术（如人工噪声）难以保障合法通信的信息安全，而通过部署IRS可以有效解决这类问题。文献[8]提出，通过联合优化AP主动波束赋形和IRS的被动波束赋形，可以最大化安全速率。另外，IRS可以辅助实现信息的隐藏传输，防止合法通信信号被窃听者检测到。文献[9]提出，通过联合优化AP主动波束赋形和IRS被动波束赋形，可以实现合法通信的隐蔽通信速率最大化。

1.2 IRS辅助多用户WIT

业界进一步研究了IRS辅助多用户WIT系统，有如下3个代表性研究。

(1) IRS辅助的多址接入。业界对IRS辅助的正交多址接入（OMA）和非正交多址接入（NOMA）系统均进行了研究。通过研究IRS辅助OMA系统和NOMA系统的速率最大化，文献[10]比较了两种系统的性能。结果显示，IRS辅助NOMA系统允许多个用户共享同一个资源块，可以获得比OMA系统更高的频谱效率。文献[11]研究了多用户正交频分多址接入（OFDMA）系统的资源分配问题，通过联合优化AP的功率分配、IRS的被动波束赋形和时频资源块分配，实现用户总速率的最大化。文献[11]进一步研究了IRS的部署位置对系统性能的影响。多用户系统不仅需要关注频谱效率，还需要确保用户之间的公平性。文献[12]考虑了一个下行多用户的速率分割多址接入（RSMA）系统，利用基于连续凸近似方法交替优化主动/被动波束赋形，以最大化多个

用户之间的最小传输速率,保证各用户的公平性。

(2) IRS辅助的干扰信道。干扰信道(IFC)模型是一个经典的通信模型,它模拟了从一个发射机传输到其相应接收机的信息干扰其他发射机-接收机对的通信情况。对于即将到来的6G无线网络,密集部署的微基站(BSs)将产生更复杂的链路间干扰,这将会消耗大量资源。IRS作为新的干扰管理方法,通过反射入射信号来增强有用信号的同时也抑制了其他干扰信号。文献[13]研究了IFC下多IRS辅助多对收发机的资源分配问题,在满足AP最大发射功率和IRS的模一约束条件下,通过联合优化主动和被动波束赋形,最大化了系统的速率区域。文献[14]研究了两个用户向AP发送独立信息的系统容量区域,并提出分布式和集中式的IRS部署方式。研究表明,在实际信道设置下,集中式部署优于分布式部署,且当用户速率不对称时,容量增益最为显著。

(3) IRS辅助的认知无线电通信。虽然认知无线电(CR)通信系统允许次用户(SU)与主用户(PU)共享频谱,但当它们位于同一热点中时,由于存在强交叉链路干扰,可实现的速率变得非常有限。IRS通过动态调整反射信号的相位来改变无线传播环境,从而减少SU与PU链路之间的相互干扰,显著提高共存系统的频谱效率,最终实现高速率的数据传输。文献[15]研究了一个IRS辅助的CR通信系统,通过联合优化次用户发射机的波束赋形和IRS的被动波束赋形,在满足总发射功率约束和主用户的干扰约束下,最大化次用户的可实现速率。文献[16]进一步考虑了IRS不同部署位置对系统性能的影响,并证明了在没有IRS的传统CR系统中,采用IRS来提高SU速率的有效性及其在处理强干扰场景方面的优势。

1.3 更符合实际的系统模型

(1) 离散的反射相移。由于硬件的限制,IRS对信号反射的相移一般是离散的。因此,有必要进一步研究离散反射相移条件下IRS辅助WIT的性能。文献[17]研究了单/多用户MISO系统下连续相移与离散相移的性能对比,认为具有离散相移的IRS在反射单元数量渐大的情况下,可以实现连续相移相同的平方功率增益。文献[18]分别分析了连续和离散相移的IRS辅助NOMA系统的性能,结果显示当每个反射单元的相移控制在4 bit以上时,离散相移IRS与连续相移IRS几乎具有相同的通信性能。已有结果表明,即使IRS只具有离散的反射相移,仍然能够取得较高的性能增益,且当IRS反射单元的相移控制比特数越高,性能越接近连续相移的情况。

(2) 基于非完美信道状态信息(CSI)的鲁棒优化设计。

由于IRS通常是被动的,不具备信号解码能力,因此对IRS相关的无线信道进行估计难度较大,且估计误差不可避免。在IRS辅助WIT系统中,基于非完美CSI的鲁棒优化设计研究变得尤为重要。文献[19]研究了在单用户MISO系统中,直射信道和反射信道的CSI为不完美的情况,并联合设计了具有高鲁棒性的发射机主动波束赋形和IRS的被动波束赋形,以最小化均方误差。文献[20]研究多个IRS辅助多用户MIMO系统下的高鲁棒性传输方案。与文献[19]不同,它考虑系统存在随机CSI误差,提出通过联合优化发送预编码器、接收均衡器和IRS被动波束赋形,最小化均方误差。

(3) 多IRS辅助的系统。如果系统只有一个IRS,在多障碍物环境下(如办公室、工厂生产线等),发射机与IRS或IRS与接收机之间的信道可能由于被遮挡而具有较大的路径损耗,影响通信性能。增加系统中的IRS数量,可增加反射信道的冗余,降低通信被阻挡的概率。因此,针对多IRS辅助WIT系统的研究不断涌现。文献[21]研究了一个多IRS协同辅助通信的系统,通过利用多个选定IRS对信号进行连续反射,在AP和远程用户之间建立多跳级联的视距链路。研究提出了最佳AP主动和IRS被动波束赋形设计,以及最佳IRS选择和波束路由解决方案,利用图论使级联视距信道功率最大化。结果表明,在优化路由设计中,在最小化端到端路径损耗和最大化协作无源波束赋形增益之间存在一个基本折衷。其中,当IRS反射单元的数量小/大时,前者/后者具有更大的主导作用。

1.4 基于机器学习的优化方法

在IRS辅助WIT系统的性能优化研究初期,我们主要采用数学优化方法。由于IRS的反射单元数量大,系统优化设计的复杂度高,数学优化方法在一些场景中难以应用。随着机器学习技术的发展,强化学习、深度学习等方法被逐步应用于IRS辅助WIT的性能优化研究中。

(1) 深度学习方法。在IRS辅助的无线通信系统中,信道估计需要巨大的训练开销,且系统优化涉及变量数极大。为了降低开销,优化复杂度,人们开始使用深度学习的方法来应对这一关键挑战。利用深度学习工具,文献[22]提出如何直接从采样的CSI中预测最佳IRS被动波束赋形,认为在不了解IRS阵列几何结构的情况下,可以获得接近最优的数据速率。文献[23]研究了在太赫兹无人机通信网络中,借助IRS进行主动切换和波束选择的问题,并提出了一种基于递归神经网络的新型深度学习解决方案。该方案可以根据事先对无人机位置/波束轨迹的观察,主动预测基站和IRS服务无人机的波束。结果表明,所提出的深度学习解决方案在主动

切换和波束选择方面具有较高的精度。在波束训练较少的情况下，深度学习算法的精度可以进一步提高。

(2) 强化学习方法。强化学习是机器学习最重要的研究方向之一，它使智能体通过“不断探索”学习到最优动作策略。深度强化学习则利用深度神经网络的优势来训练学习过程，提高强化学习算法的学习速度和性能。文献[24]考虑了一个IRS辅助的认知无线电系统，提出了使用深度确定策略梯度(DDPG)和SAC(Soft Actor-Critic)两种深度强化学习的算法来使次用户的信息速率达到最大。这两种算法均取得了与非凸优化算法相似的性能，但是计算复杂度更低。文献[25]提出使用DDPG算法求解IRS辅助的单用户MISO系统中的接收信噪比最大化问题。与基于半定松弛的方法相比，基于DDPG的算法可以在更短的运行时间内获得可比的接收信噪比性能。文献[26]考虑了IRS辅助的安全协作网络系统，提出了一种基于多智能体深度强化学习方法的优化算法来最大化系统总安全速率。该算法采用分布式框架来解决IRS反射系数的优化问题，能够利用共享累积梯度来代替共享训练数据，极大降低了无线设备的计算量。

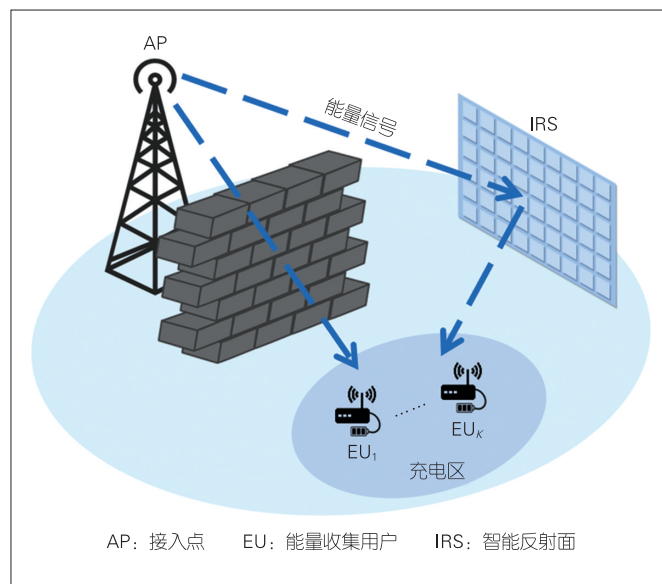
2 IRS辅助WPT技术

不同于传统的基于电感应或磁共振耦合的近场无线充电技术，WPT扩展了近场无线充电的距离，使得远场无线充电成为可能。为了最大限度地提高WPT的端到端传输效率，目前业界已有相当多关于高效射频硬件组件的研究，如电路、天线和整流器等，然而这类方法不适用于传播介质时刻变化的无线信道。因此，业界提出了将先进的无线通信技术和信号处理技术应用于WPT^[27]的方法。然而，此类技术在实践中都可能会产生较高的应用成本，且仍无法解决长距离传输和无线信道损耗所造成的严重功率损耗问题^[28]。考虑到上述问题，目前业界仍需开发新的低成本技术，从而能够以更节能的方式提高WPT的效率和性能。

当前，已有众多学者对各种场景下IRS辅助的无线通信系统进行了深入研究，验证了在无线网络中部署IRS的优越性。在传统的WPT系统中部署IRS，可以创建精确的无源能量波束对齐目标，从而补偿长距离传输导致的信号高衰减，为热点区域的无线设备提供增强的无线充电区。同时，这还有利于显著扩展WPT的覆盖范围。此外，对于非视距通信链路(NLoS)环境中受到严重阻塞的WPT系统，部署IRS可以使发射端和接收端通过IRS建立新的视距通信链路以绕过障碍物，从而提高WPT系统的性能。因此，IRS辅助的WPT是一种为无线网络供电的有效解决方案^[29-30]。

图2显示了一个经典的IRS辅助WPT系统，其中包含一

个无线AP、一个IRS以及 K 个能量收集用户(EU)。WPT系统的高效工作依赖于AP和能量收集用户之间的高质量传输链路。然而，当AP与能量收集用户之间的链路存在阻挡物时，发射信号将受到严重损耗，从而导致WPT传输低效，能源浪费。而通过灵活部署IRS，如图2所示，可以创建额外的能够有效绕开阻挡物的传播链路，从而避免信号的高损耗，增强能量收集用户的接收信号强度。通过协作调整IRS反射单元的相位，改变反射信号的相位，可以实现在接收端的相关叠加，使无源波束形成增益。



▲图2 典型的IRS辅助无线能量传输系统

IRS辅助WPT的典型应用场景是IRS辅助无线供电通信网络(WPCN)，该网络主要基于“先收集后发送”协议。用户首先通过下行链路收集混合无线接入点(HAP)发送的能量，然后利用该部分能量通过上行链路向HAP发送信息。由于上行链路的通信性能取决于从下行链路中收集的能量，因此下行链路和上行链路存在折衷关系。与此同时，WPCN网络存在“双重远近”的现象^[31]，即距离HAP较远的用户下行链路和上行链路均具有较大的路径损耗。IRS能辅助补偿该现象，实现下行链路和上行链路的平衡。文献[32]考虑了在具有单天线HAP和多个用户的WPCN系统中部署IRS。为了使系统的总速率达到最大，文献[32]联合优化了上行链路和下行链路的时间调度，并优化了IRS的相位设计以增强上行链路和下行链路。文献[33]考虑了HAP是多天线的情况。相比于单天线HAP，多天线HAP具备空分复用的能力，在上行链路传输信息阶段能够有效处理用户间的信息干扰。文献[34]考虑了上行链路的NOMA与TDMA混合多址接入方

式。通过使用 NOMA 的串行干扰消除 (SIC) 机制以及 TDMA 的时间分配, 该方式实现了复杂度和传输性能的折衷。

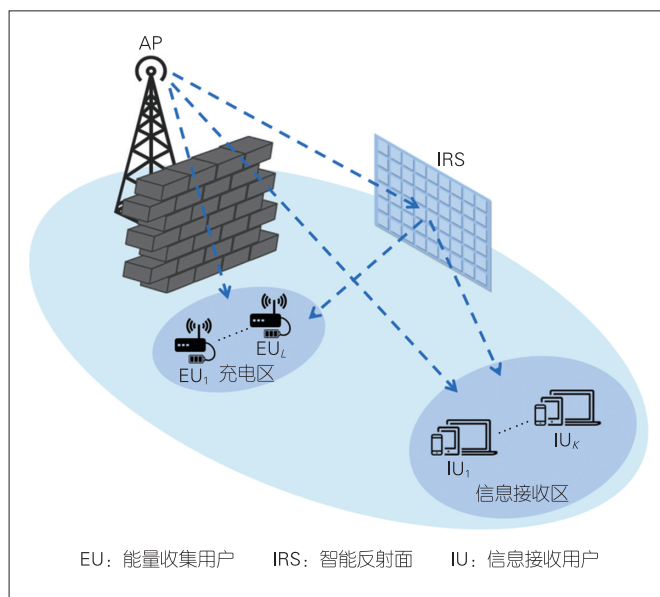
尽管 IRS 的能耗远低于用户的能耗, 但仍不应被忽视。IRS 的功耗取决于其反射单元的类型和特性。例如, 对于分辨率为 3 bit 的相位反射单元, 每个反射单元的电路功耗值为 1.5 mW, 而分辨率为 5 bit 的反射单元的功耗值更是达到了 6 mW^[35]。IRS 的反射单元数量通常很大, 因此其电路功耗不可忽略。随着 IRS 在 WPCN 中的应用, 出现了一种新的形式——自维持 IRS, 即 IRS 需要通过下行链路从 HAP 获取能量, 才能在后续的上行信息传输中正常工作。对自维持 IRS 的充能方式主要有 3 种: 一是分阶段充能^[36], 也称时间开关, 即 IRS 在某一时段停止工作, 利用全部反射单元进行能量收集, 而在其他时段利用收集到的能量进行信号反射工作; 二是分元件充能^[37], 即 IRS 上的部分反射单元停止工作以进行能量收集, 其余反射单元正常工作; 三是功率分割^[38], 即通过调整 IRS 反射单元的幅值, 部分入射信号被反射到用户, 而剩余信号被用于 IRS 反射单元的能量收集。此外, 也有基于时间开关和功率分割的混合充能方案^[39]。已有研究工作表明, 自维持 IRS 更符合实际, 有助于自维持物联网的实现。

3 IRS 辅助 SWIPT 技术

部署 IRS 能为无线携能通信 (SWIPT) 提供新的路径, 并增加新的优化自由度。主动和被动波束赋形的联合优化, 不仅能提高信息和能量传输效率, 而且有效扩大了系统的服务覆盖范围。本节主要叙述 IRS 辅助 SWIPT 的研究现状。图 3 显示了一个典型的 IRS 辅助 SWIPT 系统。该系统包含 1 个 AP、 K 个 IU 和 L 个 EU。AP 下行向用户同时发送信息和传输能量, IRS 通过自适应动态调整反射信号的相移, AP 到用户之间创建出高质量虚拟视距链路, 进一步提高信息和能量传输的性能。

3.1 提升 SWIPT 的信息传输速率和能量传输效率

业界对 IRS 辅助 MISO SWIPT 系统有如下研究。文献[40]提出一种基于惩罚算法的低复杂度算法, 在满足用户服务质量约束和 IRS 模一约束条件下, 联合优化主动/被动波束赋形, 以实现 AP 发射功率的最小化。在保障各用户性能的公平性上, 文献[41]研究最大加权能量的优化问题, 同时证明 AP 只需要发射信息波束赋形就能够满足同时存在信息接收用户和能量收集用户的服务质量需求。业界还进一步考虑了 AP 和用户同时配备多天线的场景, 即研究 IRS 辅助 MIMO



▲图3 典型的IRS辅助无线携能通信系统

SWIPT。文献[42]研究了能源效率最大化问题。为了提高能效, 提出了一种新的基于定价的性能度量, 称为网络效用。通过联合优化发送预编码矩阵和相移矩阵, 使网络效用函数实现最大化, 同时限制了 AP 处的发射功率、每个能量收集用户处所需的最小收获能量。为确保多用户间的公平性, 文献[43]考虑了信息接收用户的加权和速率最大化问题, 提出一种基于块坐标下降的算法, 用于交替优化 AP 处的发送预编码矩阵和 IRS 的相移矩阵。已有研究表明, IRS 能提高 SWIPT 的信息传输速率和能量传输效率。

3.2 基于非完美 CSI 的鲁棒优化设计

基于非完美 CSI 设计鲁棒 SWIPT 传输方案是重要的研究方向。文献[44]将 IRS 到能量收集用户和信息接收用户的信道建模为非完美信道, 即存在信道误差。通过联合优化主动/被动波束赋形, 可以最大化信息接收用户的最小速率。研究进一步对比了理想信道和非理想信道的性能表现, 且在求解理想信道的优化问题时推导出了封闭表达式。

3.3 数据解码和能量收集的同步

在物联网应用中, 接收机通常需要同时解码数据、收集能量^[45-46]。文献[45]研究了带有功率分裂方式的接收机的 IRS SWIPT 系统性能, 并与解码转发中继系统进行了比较。文献[46]研究了一个 IRS 辅助下行 SWIPT 的 MISO 系统。在该系统中, AP 同时向用户发送信息并传输能量, 用户采用功率分裂的方式来解码数据并获取能量。通过联合优化 AP 的

波束赋形、功率分裂因子和 IRS 处的反射相移, 可以使 AP 的发射功率最小化。

3.4 非线性能量收集模型

初始的研究一般假设收集到的能量与接收功率呈线性关系。实际上, 两者是非线性关系, 只在有限范围内才具有线性关系。因此, 非线性的能量收集模型更具有实际和普遍意义。文献[47]研究了多用户 MISO 系统的资源分配问题。系统所考虑的大型 IRS 被划分为多个块, 每个块的相移元素被联合设计, 以实现不同的传输模式。在满足非线性能量收集用户和信息接收用户的服务质量条件下, 联合优化 AP 处的波束赋形和 IRS 的传输模式, 以实现 AP 发射功率的最小化。文献[48]研究了 IRS 辅助太赫兹 SWIPT 系统的波束赋形问题, 并考虑级联信道的 CSI 不完备。文献[48]还提出了一种鲁棒的波束赋形设计, 通过采用半正定规划和伯恩斯坦型不等式, 在满足中断概率约束下, 联合优化 AP 的发射波束赋形和 IRS 的相移, 实现 AP 的发射功率最小化。

4 IRS 辅助 SWIPT 的新研究主题

随着通信技术的不断发展以及多种应用场景的不断涌现, 出现了多个备受关注的 IRS 辅助 SWIPT 的研究主题和方向。

4.1 IRS 辅助 SWIPT 技术的物理层安全通信

在没有部署 IRS 的传统 SWIPT 系统中, 如何实现信息安全传输是一个关键挑战。具体而言, 通常能量收集用户会部署在靠近发射端的位置, 而信息接收用户部署在距离发射端较远的位置, 因此能量收集用户比信息接收用户具有更好的信道, 从而可以很容易地窃听发射端发送给信息接收用户的信息, 成为潜在窃听者^[49], 如图 3 所示。然而, 对于当前常用的物理层安全技术如人工噪声与发射波束赋形等, 如果能量收集用户的信道和信息接收用户的信道具有较大的相干系数, 或能量收集用户与信息接收用户的距离较近且信息接收用户不能消除人工噪声 (AN) 信号引起的干扰, 则难以保证信息接收用户的信息安全。上述问题可以通过在信息接收用户或能量收集用户附近部署 IRS 并适当优化 IRS 的反射波束赋形来有效解决^[50]。

在 SWIPT 安全通信系统中引入 IRS, 可以提升安全通信性能, 并更好地利用 IRS 中增强有用信号和抑制有害信号的优点。文献[51]考虑了 IRS 辅助的 MISO SWIPT 安全通信系统, 通过优化发射机的波束赋形与人工噪声、IRS 的反射波束赋形, 信息接收用户和能量收集用户的可到数据速率之差

大于给定阈值, 系统的能量效率可实现最大化。文献[52]和[53]进一步对不完美 CSI, 甚至在无法得知 CSI 情况下的 IRS 辅助 SWIPT 的安全通信系统进行了研究。

4.2 无人机与 IRS 共同辅助的 SWIPT

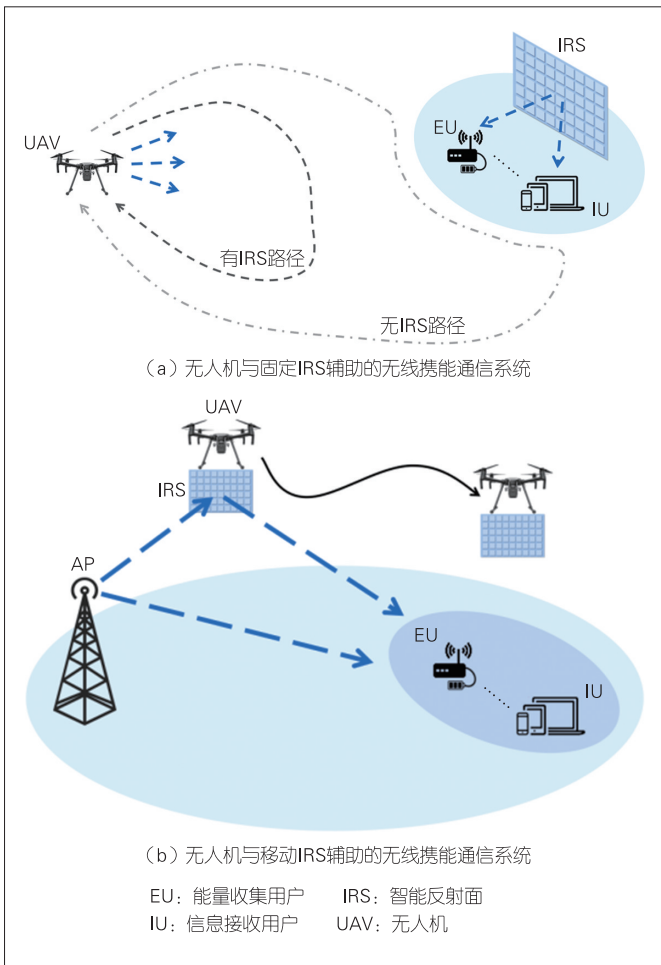
得益于高机动性、灵活性和按需部署等优点, 无人机目前已在无线通信领域发挥了重大作用^[54]。在 SWIPT 系统中, 无人机可以部署为 AP, 这样能够充分利用其高机动性和部署灵活性, 从而缩短发射端和接收端之间的距离, 有效避免信号因长距离传输造成的严重损害^[55]。然而, 当无人机需要为广泛分布的大量用户提供服务时, 为了提高 SWIPT 效率, 无人机需要充分靠近每一个接收端。但是频繁的移动不仅会导致无人机消耗过多的能源, 也会出现复杂的路径规划问题。为了应对这个问题, 在无人机通信系统中部署 IRS 是一种有效的解决方案。IRS 具有增强 SWIPT 效率的能力, 因此通过在密集的用户群附近部署 IRS, 无人机无须飞近用户就可以实现同等的传输效果, 如图 4 (a) 所示。此外, 传统的 IRS 大多部署在固定的位置, 只有固定的半空间反射覆盖范围, 因此可能无法与所有用户建立有效的 LoS 链路。将 IRS 安装在无人机等空中平台上, 可以利用无人机的机动性, 灵活变更或扩大 IRS 的覆盖范围, 如图 4 (b) 所示。

4.3 多 IRS 协同辅助 SWIPT

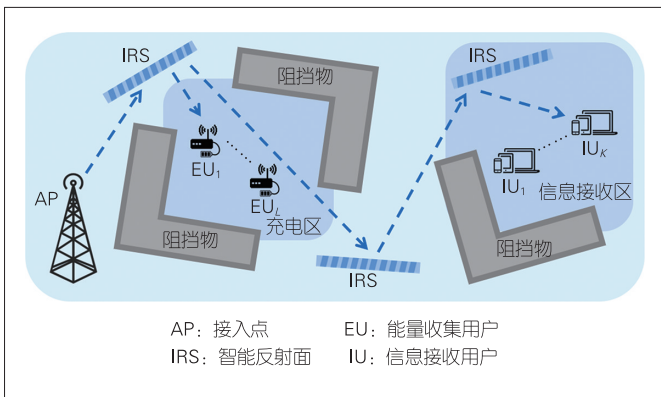
在许多应用场景下, 能量收集用户和信息接收用户的位置比较分散。随着用户数目的增加, IRS 反射信道被遮挡的概率也会增大。对于部署单个 IRS 的系统, 当其与 IRS 相关的信道被遮挡时会产生较大的路径损耗, 从而导致系统性能大幅下降, IRS 的作用大大减弱。因此, 有必要研究部署多个 IRS 协同辅助的 SWIPT。文献[56]考虑了在发射机和用户之间部署多个 IRS 的情况, 发射机发送的信号以多跳 IRS 反射的方式到达接收机, 以实现接收机收到的信号功率最大化。已有的研究表明, 多 IRS 协同的通信增加了新的优化自由度, 因此能进一步激发系统的性能。然而, 随着 IRS 数目的增加, 优化变量变得高度耦合, 优化难度也大幅提升。针对多 IRS 协同辅助 SWIPT 的场景, 一方面可考虑增加调度的策略, 在所有 IRS 中选取一部分进行协同辅助通信; 另一方面, 可考虑研究复杂度较低的算法, 降低优化难度。

4.4 新型多址接入方式下的 IRS 辅助 SWIPT

IRS 应用的一个重要挑战是 CSI 的获取。速率分拆多址接入 (RSMA) 是一种新型的多址接入方式。无论是完美或是不完美的 CSI, 通过 RSMA 都能对数据流进行预编码。因



▲图4 无人机与IRS共同辅助的无线携能通信系统



▲图5 多IRS协同辅助无线携能通信系统示意图

此RSMA是一种对不完美CSI具有鲁棒性的多址接入方式^[57]。通过在IRS系统中应用RSMA,能有效弥补IRS系统中获取完美CSI方面的不足。虽然相关研究已经证明了RSMA在多用户SWIPT方面的优势^[58],但均未考虑IRS的部署。在基于RSMA的SWIPT系统中应用IRS,RSMA特有的公共波束设计将会对SWIPT系统的性能产生怎样的影响?系统设计复

杂度如何?这些问题都仍有待进一步讨论。此外,RSMA特有的公共波束能够充当干扰信号或噪声信号以增强SWIPT系统的安全通信性能。然而,IRS的部署是否会增强或削弱该公共波束在安全通信方面的作用,也值得进一步研究。

4.5 有源IRS辅助的SWIPT系统

目前大多数IRS的研究考虑的均为无源IRS,即对应的反射单元只具有相位调整功能。在全双工模式下,无源IRS对信号进行相位处理时不会引入额外的噪声以及自干扰。然而,由于经过IRS反射的信号会产生距离累乘的高损耗,因此在长距离传输时,无源IRS将会使系统性能受限。为解决此问题,业界开始研究有源IRS。有源IRS由多个有源反射单元组成,它们能够使IRS放大反射信号的功率。值得注意的是,有源IRS与传统的中继不同,它使用低功耗的反射型放大器,并以全双工的方式直接反射信号^[59-60]。文献[60]在多种场景下对有源IRS和无源IRS的性能表现进行了对比,揭示了两种IRS在部署位置和反射单元个数等方面的区别。目前,关于有源IRS辅助的WPT与SWIPT的优化设计的研究还不多,特别是当有源IRS需要通过WPT的方式获取能量供应时,该如何对系统进行优化设计,仍有待研究。

4.6 基于机器学习方法的IRS辅助SWIPT优化设计

已有的IRS辅助SWIPT优化设计研究大多基于数学优化方法,但它们依赖于特定的信道和系统模型,需要根据不同应用场景进行特定设计,且可能面临较高的算法复杂度。机器学习的方法更多依赖于数据而非数学模型,因此在求解更复杂的优化设计问题方面比数学优化方法更具优势。目前,应用机器学习的方法求解IRS辅助SWIPT的优化设计问题的研究尚处于起步阶段,在多IRS部署、鲁棒优化设计等方面仍有待充分研究。

5 结束语

本文对IRS辅助的WIT和WPT的研究现状进行了综述。在IRS辅助WIT方面,针对不同系统配置介绍了IRS的设计与优化,并讨论了更接近实际情况的系统。在IRS辅助WPT方面,着重讨论了两个主要分支——WPCN和SWIPT。WPCN不仅能够利用IRS的高反射增益和全双工的特点来提升性能表现,还能够利用WPT技术实现IRS的自维持工作,为实现自维持物联网提供了性能优异的方案。IRS辅助的SWIPT能够同时兼顾信息传输速率的提升和能量传输效率的提升,为IRS的应用提供了更广阔的应用场景。

参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2014, 32(6): 1065–1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- [2] LIASKOS C, NIE S, TSIOLIARIDOU A, et al. Realizing wireless communication through software-defined hyperSurface environments [C]// Proceedings of 2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM). IEEE, 2018: 14–15. DOI: 10.1109/WoWMoM.2018.8449754
- [3] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(5): 1989–2001. DOI: 10.1109/TWC.2013.031813.120224
- [4] LIASKOS C, NIE S, TSIOLIARIDOU A, et al. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces [J]. IEEE communications magazine, 2018, 56(9): 162–169. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700659
- [5] WU Q 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. DOI: 10.1109/TWC.2019.2936025
- [6] YANG Y F, ZHANG S W, ZHANG R. IRS-enhanced OFDM: power allocation and passive array optimization [C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2019: 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014204
- [7] LI Y Q, JIANG M, ZHANG G C, et al. Achievable rate maximization for intelligent reflecting surface-assisted orbital angular momentum-based communication systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(7): 7277–7282. DOI: 10.1109/TVT.2021.3089021
- [8] CUI M, ZHANG G C, ZHANG R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface [J]. IEEE wireless communications letters, 2019, 8(5): 1410–1414. DOI: 10.1109/LWC.2019.2919685
- [9] ZOU L, ZHANG D C, CUI M, et al. IRS-assisted covert communication with eavesdropper's channel and noise information uncertainties [J]. Physical communication, 2022, 53: 101662. DOI: 10.1016/j.phycom.2022.101662
- [10] GUO Y Y, QIN Z J, LIU Y W, et al. Intelligent reflecting surface aided multiple access over fading channels [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(3): 2015–2027. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3042277
- [11] YANG Y F, ZHANG S W, ZHANG R. IRS-enhanced OFDMA: joint resource allocation and passive beamforming optimization [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(6): 760–764. DOI: 10.1109/LWC.2020.2968303
- [12] FU H, FENG S L, KWAN NG D W. Resource allocation design for IRS-aided downlink MU-MISO RSMA systems [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ICCWWorkshops50388.2021.9473650
- [13] JIANG M, LI Y Q, ZHANG G C, et al. Achievable rate region maximization in intelligent reflecting surfaces-assisted interference channel [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(12): 13406–13412. DOI: 10.1109/TVT.2021.3120308
- [14] ZHANG S W, ZHANG R. Intelligent reflecting surface aided multiple access: capacity region and deployment strategy [C]//Proceedings of 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. IEEE, 2020: 1–5. DOI: 10.1109/SPAWC48557.2020.9153884
- [15] YUAN J, LIANG Y C, JOUNG J, et al. Intelligent reflecting surface-assisted cognitive radio system [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(1): 675–687. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3033006
- [16] GUAN X R, WU Q Q, ZHANG R. Joint power control and passive beamforming in IRS-assisted spectrum sharing [J]. IEEE communications letters, 2020, 24(7): 1553–1557. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2979709
- [17] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(3): 1838–1851. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2958916
- [18] SUN Z Y, JING Y D. On the performance of multi-antenna IRS-assisted NOMA networks with continuous and discrete IRS phase shifting [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(5): 3012–3023. DOI: 10.1109/TWC.2021.3117494
- [19] ZHANG J Z, ZHANG Y, ZHONG C J, et al. Robust design for intelligent reflecting surfaces assisted MISO systems [J]. IEEE communications letters, 2020, 24(10): 2353–2357. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3002557
- [20] XU K Z, GONG S Q, CUI M, et al. Statistically robust transceiver design for multi-RIS assisted multi-user MIMO systems [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(6): 1428–1432. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3157127
- [21] MEI W D, ZHANG R. Cooperative beam routing for multi-RIS aided communication [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(2): 426–430. DOI: 10.1109/LWC.2020.3034370
- [22] TAHA A, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Deep learning for large intelligent surfaces in millimeter wave and massive MIMO systems [C]// Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2019: 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013256
- [23] ABUZAINAB N, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A, et al. Deep learning for THz drones with flying intelligent surfaces: beam and handoff prediction [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ICCWWorkshops50388.2021.9473804
- [24] ZHONG C W, CUI M, ZHANG G C, et al. Deep reinforcement learning-based optimization for IRS-assisted cognitive radio systems [EB/OL]. (2022-05-02)[2022-5-30]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9766179>
- [25] FENG K M, WANG Q S, LI X, et al. Deep reinforcement learning based intelligent reflecting surface optimization for MISO communication systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(5): 745–749. DOI: 10.1109/LWC.2020.2969167
- [26] HUANG C, CHEN G J, WONG K K. Multi-agent reinforcement learning-based buffer-aided relay selection in IRS-assisted secure cooperative networks [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 16: 4101–4112. DOI: 10.1109/TIFS.2021.3103062
- [27] ZENG Y, CLERCKX B, ZHANG R. Communications and signals design for wireless power transmission [J]. IEEE transactions on communications, 2017, 65(5): 2264–2290. DOI: 10.1109/TCOMM.2017.2676103
- [28] WU Q Q, LI G Y, CHEN W, et al. An overview of sustainable green 5G networks [J]. IEEE wireless communications, 2017, 24(4): 72–80. DOI: 10.1109/MWC.2017.1600343
- [29] DING F, PORS A, BOZHEVOLNYI S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications [J]. Reports on progress in physics, 2018, 81(2): 026401. DOI: 10.1088/1361-6633/aa8732
- [30] BONOD N. Large-scale dielectric metasurfaces [J]. Nature materials, 2015, 14(7): 664–665. DOI: 10.1038/nmat4338
- [31] JU H, ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2014, 13(1): 418–428. DOI: 10.1109/TWC.2013.112513.130760
- [32] LYU B, HOANG D T, GONG S M, et al. Intelligent reflecting surface assisted wireless powered communication networks [C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops. IEEE, 2020: 1–6. DOI: 10.1109/WCNCW48565.2020.9124775
- [33] ZHENG Y, BI S Z, ZHANG Y J A, et al. Joint beamforming and power control for throughput maximization in IRS-assisted MISO WPCNs [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(10): 8399–8410. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3045703
- [34] ZHANG D C, WU Q Q, CUI M, et al. Throughput maximization for IRS-assisted wireless powered hybrid NOMA and TDMA [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(9): 1944–1948. DOI: 10.1109/LWC.2021.3087495
- [35] HUANG C W, 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. DOI: 10.1109/TWC.2019.2922609
- [36] ZOU Y Z, GONG S M, XU J, et al. Wireless powered intelligent reflecting surfaces for enhancing wireless communications [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(10): 12369–12373. DOI: 10.1109/TVT.2020.3011942
- [37] HU S K, WEI Z Q, CAI Y X, et al. Robust and secure sum-rate maximization for multiuser MISO downlink systems with self-sustainable IRS [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(10): 7032–7049. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3097140
- [38] ZOU Y Z, LONG Y S, GONG S M, et al. Robust beamforming optimization for self-sustainable intelligent reflecting surface assisted wireless networks [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2022, 8(2): 856–870. DOI: 10.1109/TCCN.2021.3133839
- [39] LYU B, RAMEZANI P, HOANG D T, et al. Optimized energy and

- information relaying in self-sustainable IRS-empowered WPCN [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(1): 619-633. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3028875
- [40] WU Q Q, ZHANG R. Joint active and passive beamforming optimization for intelligent reflecting surface assisted SWIPT under QoS constraints [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1735-1748. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000807
- [41] WU Q Q, ZHANG R. Weighted sum power maximization for intelligent reflecting surface aided SWIPT [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(5): 586-590. DOI: 10.1109/LWC.2019.2961656
- [42] SHARMA V, YASWANTH J, SINGH S K, et al. A pricing-based approach for energy-efficiency maximization in RIS-aided multi-user MIMO SWIPT-enabled wireless networks [J]. IEEE access, 10: 29132-29148. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3158486
- [43] PAN C H, REN H, WANG K Z, et al. Intelligent reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1719-1734. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000802
- [44] YANG Z Y, ZHANG Y. Optimal SWIPT in RIS-aided MIMO networks [J]. IEEE access, 2021, 9: 112552-112560. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3099698
- [45] MASOUMI H, EMADI M J. Performance analysis of cooperative SWIPT system: Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward [J]. AUT journal of modeling and simulation, 2019, 51(2): 241-248
- [46] ZARGARI S, FARAHMAND S, ABOLHASSANI B. Joint design of transmit beamforming, IRS platform, and power splitting SWIPT receivers for downlink cellular multiuser MISO [J]. Physical communication, 2021, 48: 101413. DOI: 10.1016/j.phycom.2021.101413
- [47] XU D F, YU X H, JAMALI V, et al. Resource allocation for large IRS-assisted SWIPT systems with non-linear energy harvesting model [C]// Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2021: 1-7. DOI: 10.1109/WCNC49053.2021.9417357
- [48] ZHU Z Y, XU J L, SUN G C, et al. Robust beamforming design for IRS-aided secure SWIPT terahertz systems with non-linear EH model [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(4): 746-750. DOI: 10.1109/LWC.2022.3142098
- [49] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Secrecy wireless information and power transfer with MISO beamforming [J]. IEEE transactions on signal processing, 2014, 62(7): 1850-1863. DOI: 10.1109/TSP.2014.2303422
- [50] NIU H H, LEI N. Intelligent reflect surface aided secure transmission in MIMO channel with SWIPT [J]. IEEE access, 8: 192132-192140. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032759
- [51] LIU J X, XIONG K, LU Y, et al. Energy efficiency in secure IRS-aided SWIPT [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(11): 1884-1888. DOI: 10.1109/LWC.2020.3006837
- [52] XIU Y, WU J, GUI G, et al. Artificial noise-aided secure SWIPT communication systems using intelligent reflecting surface [C]// Proceedings of 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2020: 6-11. DOI: 10.1109/ICCC49849.2020.9238914
- [53] NTOUGIAS K, KRIKIDIS I. Robust design of secure IRS-aided MISO broadcasting for SWIPT and spectrum sharing [C]// Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2021: 1-7. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685809
- [54] WU Q Q, LIU L, ZHANG R. Fundamental trade-offs in communication and trajectory design for UAV-enabled wireless network [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(1): 36-44. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800221
- [55] XIE L F, CAO X W, XU J, et al. UAV-enabled wireless power transfer: a tutorial overview [J]. IEEE transactions on green communications and networking, 2021, 5(4): 2042-2064. DOI: 10.1109/TGCN.2021.3093718
- [56] MEI W D, ZHANG R. Cooperative beam routing for multi-IRS aided communication [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(2): 426-430. DOI: 10.1109/LWC.2020.3034370
- [57] JOUDEH H, CLERCKX B. Robust transmission in downlink multiuser MISO systems: a rate-splitting approach [J]. IEEE transactions on signal processing, 2016, 64(23): 6227-6242. DOI: 10.1109/TSP.2016.2591501
- [58] CAMANA ACOSTA M R, MORETA C E G, KOO I. Joint power allocation and power splitting for MISO-RSMA cognitive radio systems with SWIPT and information decoder users [J]. IEEE systems journal, 2021, 15(4): 5289-5300. DOI: 10.1109/JSYST.2020.3032725
- [59] LONG R Z, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(8): 4962-4975. DOI: 10.1109/TWC.2021.3064024
- [60] YOU C S, ZHANG R. Wireless communication aided by intelligent reflecting surface: active or passive? [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(12): 2659-2663. DOI: 10.1109/LWC.2021.3111044

作者简介



庞海舰，广东工业大学在读硕士生；主要研究方向为智能反射面和速率分拆多址接入。



陈健锋，广东工业大学在读硕士生；主要研究方向为智能反射面和物理层安全。



张广驰（通信作者），广东工业大学教授；主要研究领域为新一代无线通信技术；已发表论文100余篇。



崔苗，广东工业大学讲师；主要研究方向为新一代无线通信技术；已发表论文60余篇。



武庆庆，澳门大学助理教授、全球高被引科学家；主要研究方向为智能反射面等新一代无线通信技术；已发表论文130余篇。