

低开销智能反射面辅助无线通信研究综述



Survey on Low-Overhead Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Wireless Communication

陈天贝/CHEN Tianbei, 李娜/LI Na, 陶小峰/TAO Xiaofeng

(北京邮电大学, 中国 北京 100876)

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202306006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20231212.1443.006.html>

网络出版日期: 2023-12-13

收稿日期: 2023-10-15

摘要: 智能反射面 (RIS) 为无线网络注入新型绿色资源, 但也带来了新的组网开销, 成为制约其实际应用的关键。在考虑开销的基础上, RIS 是否依然能够发挥其赋能无线通信的潜在价值、如何降低 RIS 开销, 以及如何减小 RIS 开销的影响, 是亟待探索的问题。对低开销 RIS 辅助无线通信进行了系统综述, 梳理了 RIS 开销模型, 包括 RIS 通信开销模型和 RIS 电路开销模型, 分析了开销问题对 RIS 协助无线网络性能的负面影响, 并整理了 5 种常见的低开销方案。结合 6G 网络发展趋势, 对未来亟待解决的 RIS 开销问题及相关研究方向进行了总结。本研究有助于激发 RIS 的无线赋能潜力, 从而推进 RIS 技术在更多场景中的应用。

关键词: 智能反射面; 低开销设计; 信道估计; 信道反馈; 相位配置; 功耗开销

Abstract: Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs) are new green resources for wireless networks, but still bring in extra networking overhead, which may seriously limit their performance in practical networks. Based on these considerations, it is important to study whether and how RIS can still enhance wireless communication performance, and how to mitigate the impact of RIS overhead. A systematic review of low-overhead RIS-assisted wireless communication is presented. Two models of the RIS overheads are introduced, including communication overhead and circuit power consumption of the RIS. The corresponding impact on the communication performance is analyzed, then five low-overhead solutions are introduced. Finally, in line with the development trends of 6G networks, the unresolved issues are summarized and the corresponding research directions that need urgent attention in the future are envisioned. Our work will contribute to inspiring the potential of RIS-assisted wireless communication and promote RIS's application in more scenarios.

Keywords: reconfigurable intelligent surfaces; low-overhead design; channel estimation; channel feedback; phase configuration; power consumption

引用格式: 陈天贝, 李娜, 陶小峰. 低开销智能反射面辅助无线通信研究综述 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(6): 29-38. DOI: 10.12142/ZTETJ.202306006

Citation: CHEN T B, LI N, TAO X F. Survey on Low-overhead reconfigurable intelligent surface assisted wireless communication [J]. ZTE technology journal, 2023, 29(6): 29-38 DOI: 10.12142/ZTETJ.202306006

全球范围内已广泛开启 6G 移动通信技术研究的新篇章。国际电信联盟 (ITU) 发布《IMT 面向 2030 及未来发展的框架与总体目标建议书》^[1], 描述了 6G 的场景、需求、能力、关键技术推动因素等。其中, “可持续性”作为新增指标, 要求未来通信网络采用高效、低功耗技术, 为可持续发展目标做贡献^[2-3]。同时, 中国在 2020 年提出“双碳”战略目标, 近年来稳步推进能源产业的结构调整、其他产业的低碳转型等。积极构建绿色低碳的移动通信网络是重要内容之一。

5G 移动通信网络主要采用优化硬件架构设计、加快半导体工艺, 以及提高硬件集成度的硬件节能技术与包括符号关断、通道关断、小区关断等节能技术^[4], 一定程度上支撑了移动通信产业的绿色低碳需求, 但距离实现最终的“双碳”目标仍有较大差距。根据华为提供的数据显示, 典型的 5G 基站能耗为 11.5 kW^[5], 其中, 超过 75% 的能耗来自有源天线单元中的功放、数字基带、收发信板等关键器件^[6]。为满足日益增长的通信速率需求, 6G 网络将引入更多有源节点, 采用更高通信频段等。这些措施会带来更高的能量消

耗、硬件开支和维护成本^[7]。

6G网络在能耗问题上将面临更高的需求和更大的挑战^[8]，亟须突破新的高效组网架构及组网技术。智能反射面（RIS）是一种新型物理维度的无线传输技术，具备独特的低成本、低能耗、可编程、易部署等优点，被业界视为一种绿色的、可持续的、生态友好的潜在技术方案，通过对空间电磁波的幅度、相位、极化等特征的按需调控，可以构建智能可编程的无线环境^[9]。目前，RIS协助的无线通信技术受到全球学界和产业界的广泛关注。一方面，现有研究对传统有源天线的波束赋形和RIS节点的反射系数进行联合设计，可优化提升无线网络的能量或频谱效率^[10]，增强可靠性或安全性^[11]等。另一方面，产业界已开展RIS原型的研发与测试，例如：日本DoCoMo公司于2018年完成RIS外场测试，指出在28 GHz频段可将通信速率提升500 Mbit/s^[12]；美国麻省理工学院于2019年搭建2.4 GHz非授权频段的测试平台RFocus，表明RIS可将信号强度提升约10倍^[13]；清华大学戴凌龙教授团队于2020年成功研制256单元、2 bit离散相位的RIS原型，在28.5 GHz频段可实现19.1 dBi的天线增益^[14]；中国移动联合东南大学于2021年完成室外测试验证，证明RIS可使边缘用户吞吐量提升10倍以上^[15]；同年，中兴通讯联合中国电信完成5G高频外场的RIS测试验证，指出在26 GHz频段可使处于覆盖盲区或弱区的用户接收信号强度提升12.5 dB^[16]。

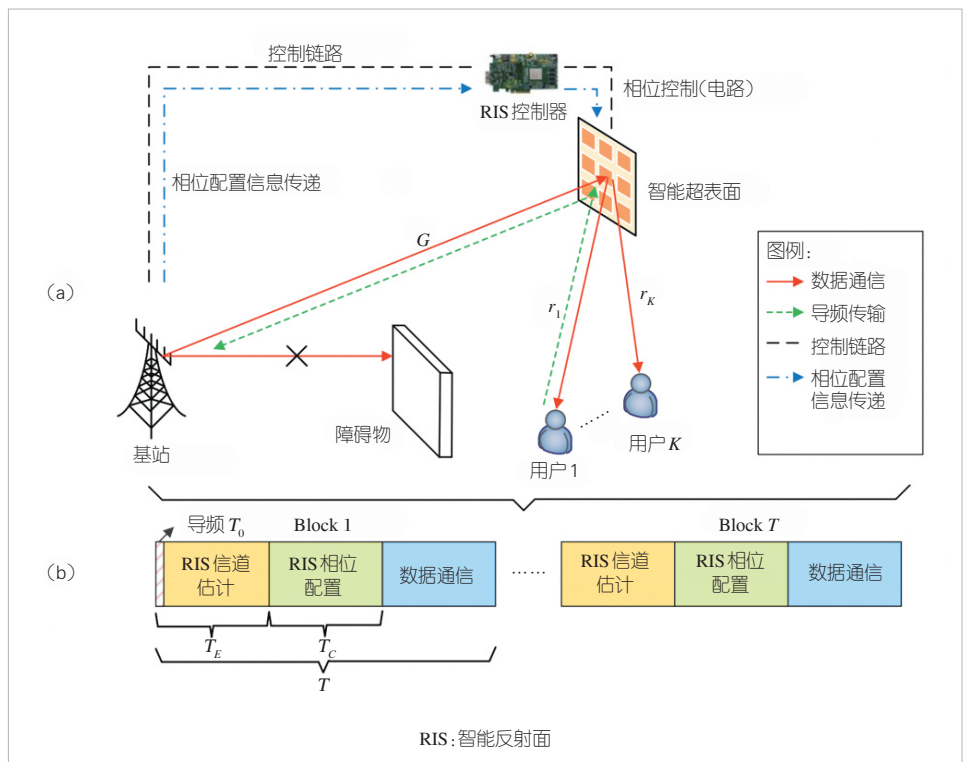
上述工作从理论和实践两个角度证明了RIS优化提升网络性能和用户体验的重要价值。然而，东南大学崔铁军院士指出，RIS的大规模阵列将导致庞大的信道规模，造成巨大的训练开销，同时由于受到硬件和功耗的限制，训练过程中反射单元的切换也将带来不可避免的时间开销^[17]；欧洲电信标准协会（ETSI）RIS工业规范组的创始成员和学术副主席、IEEE Fellow MARCO D. R. 教授指出，绝大多数关于RIS协助无线通信的研究仅聚焦于数据传输阶段，忽视了信道状态信息获取、RIS相位信息反馈及配置阶段产生的系统开销，而这些开销会降低甚至抵消RIS带来的性能增益^[18]；清华大学戴凌龙教授的研究表明，RIS信道状态信息获取的导频开销与基站天线数及RIS单

元数成正比，这在实际大规模部署或移动场景下将是不可承受的，且会导致实际性能与理论性能出现较大偏差^[19]。因此，在考虑上述系统开销的前提下，RIS是否依然能够为无线网络带来性能增益，以及如何容忍或降低RIS开销的负面影响，是值得探索的关键问题。

1 RIS协助无线网络中的开销模型

相关研究表明^[20]，当RIS节点靠近基站或终端时，可更好地发挥其赋能无线通信的潜在价值。典型的RIS协助无线网络模型如图1（a）所示。由于多数RIS设备不具备完善的基带信号处理能力，需要由基站或终端来完成信道状态信息估计、RIS调控参数设计以及资源分配等复杂计算，之后通过有线^[21]或无线^[22]的控制链路将RIS调控参数传递到RIS控制器，由其完成对RIS单元相位、幅度等参数的配置，最后，便可基于RIS建立的辅助通信链路进行无线数据传输。典型的传输阶段示意图如图1（b）所示。

当RIS单元或调控参数信息的数量较大时，相应的信道信息估计、控制信息交互所产生的传输开销不容忽视，将造成显著的时间、能量等开销，进而压缩数据通信资源，制约通信系统性能。此外，RIS控制电路的运行也会消耗额外的能量，一定程度上增加移动通信网络的能耗负担。下面我们将分别介绍RIS协助无线网络中的开销模型。



▲图1 RIS协助无线网络模型及传输阶段示意图^[23]

1.1 RIS通信开销模型

正式数据通信阶段之前需要经历RIS信道信息的提取以及RIS调控参数的传递过程,然而多数RIS由全无源的反射单元构成,不具备基带处理能力,需要基站与终端的配合来完成对基站-RIS-终端级联信道信息的提取^[24],包括信道信息估计及必要的信道信息反馈。文献[18, 25]以单RIS协助的点对点无线通信为例,针对两种不同的导频发送模式,即逐一发送导频模式和正交导频传输模式,建立了由信道信息估计造成的时间与能耗开销的数学模型。两种传送模式下,相应的时间与功耗开销均与RIS反射单元数 N 呈线性关系。面对实际中部署的成百上千的反射单元,信道信息估计的开销无法忽略。

终端侧获得估计的级联信道信息后,需要将估计获得的信道信息反馈给基站,以进行资源优化设计^[26]。对于时分双工(TDD)系统而言,上下行信道具有互易性,下行信道信息可直接由上行信道估计获得,而频分双工(FDD)系统则需要借助额外的反馈链路,以获取下行信道信息^[27]。尽管已有很多经典的信道反馈方法,例如随机向量量化(RVQ)反馈方案^[28]、基于码本的反馈方案^[29]、基于深度学习的反馈方案^[30]等。然而,这些针对传统通信系统的设计并不能直接应用于RIS协助的通信系统,例如:传统RVQ码本尺寸呈 2^B 级指数增长^[31],其中, B 表示每个接收天线单元对应信道的反馈比特数。为充分实现复用增益所需的反馈比特数将随着天线数的增加而线性增加^[28]。面对具有大量反射单元的RIS协助无线通信,反馈链路开销将更加不可忽视。研究证明^[32-33],与传统无线网络相比,RIS协助无线网络面临更为严重的信道开销挑战。特别地,当RIS用于高速移动场景时,信道环境的快速变化需要频繁执行信道信息估计,进而造成更加显著的时间开销^[34]。

紧接着,基于前述获得的信道信息,基站或终端将进一步计算最佳的RIS单元调控策略,并将相应参数传递给RIS控制器,之后由其完成对RIS单元的相位、幅度等参数的配置。然而,受到控制链路带宽的约束,RIS调控参数的传递过程会产生必要的时间开销^[35]。同样以单RIS协助的点对点无线通信为例,文献[18, 25]建立了无线控制链路下RIS调控参数传递导致的时间与功耗开销的数学模型,其中,时间开销受到RIS单元数、控制链路带宽以及控制链路发送功率的影响。类似地,文献[36]建立了有线控制链路下RIS调控参数传递带来的时间开销的数学模型,该模型受到控制信息总比特数与控制链路数据速率的制约。另外,文献[37]提出采用RIS分组策略下配置的时间开销模型仅与单个RIS单元的调控时间及RIS分组数有关。

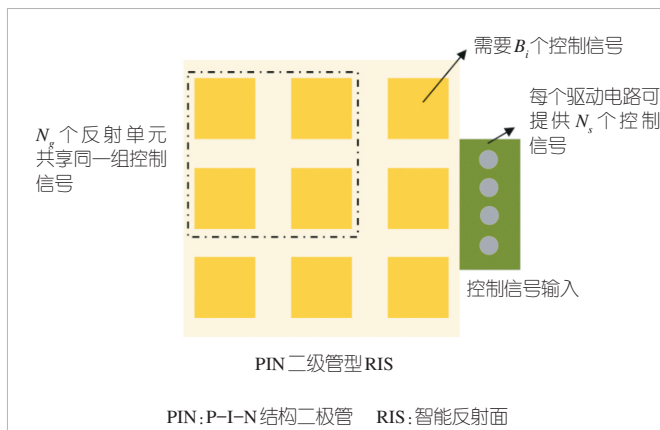
1.2 RIS电路开销模型

RIS单元的调控需要通过改变外部施加的偏置电压来实现,产生的硬件功耗将会影响整个网络的能量效率(EE)或频谱效率(SE)。同时由于RIS本身由数量庞大的反射单元构成,这种影响无法忽视。文献[35, 38-39]建立了单个RIS的理论功耗开销模型,相应的功耗开销与RIS单元数、每个RIS单元的离散相位量化阶数 b 密切相关。具体地,文献[35]列举出3~6 bit离散相位量化阶数下每个RIS单元的理论功耗值为1.5 mW、4.5 mW、6.0 mW、7.8 mW。不难看出,当离散相位量化阶数或RIS单元数较大时,RIS面板整体的功耗开销将十分显著。针对多RIS协助无线通信场景,RIS功耗将随着面板数量的增加而线性增加。除理论模型外,东南大学崔铁军院士、唐万恺副研究员、金石教授等实验验证了RIS的功耗开销模型^[40-41],包括静态功耗与动态功耗。其中,静态功耗又进一步包括控制面板的功耗和驱动电路的功耗,前者视为常数,取值为4.8 W,后者受到控制信号总数、驱动电路的输出控制信号数的影响,如图2所示。典型实测驱动电路功耗值为1 720 mW。动态功耗与RIS单元的极化方式、离散相位量化阶数以及编码状态有关,35 GHz频段下每个1 bit相位控制的RIS单元的典型实测功耗值为12.6 mW。

2 开销对RIS协助无线网络性能的影响

考虑前述RIS开销的前提下,RIS是否依然具备赋能无线通信的潜在价值,是需要探讨的根本问题之一。已有研究表明,RIS开销制约下的无线网络性能将严重偏离其可达的理论性能上界,甚至出现零增益或负增益^[18]现象。

针对经典的RIS协助点对点多天线无线通信场景,信道估计以及相位信息反馈带来的时间开销对系统的EE或SE的影响得以研究^[18],发现开销的存在将严重降低系统的EE或SE,甚至出现RIS本身的性能增益远远无法弥补开销带来的



▲图2 驱动电路功耗示意图^[40]

性能损失的情况。例如，当RIS单元数为50时，系统性能比理论上界下降约20%；而当单元数增加至150时，系统性能将下降约300%。类似地，文献[42]对导频/控制开销与可达速率之间的权衡关系展开研究，发现为缓解导频开销对网络性能的负面影响，当单元数较大时需要选择较低的离散相位量化阶数以减少控制信号的数量。此外，当开销达到一定程度时，单元数的增加反而使得可达速率逐渐下滑，比几乎不考虑开销的情形下降近72.4%。

针对RIS协助多用户无线通信场景，文献[37]对相位配置时间开销与系统吞吐量之间的权衡关系展开研究，发现对全部RIS单元的反射系数进行完全重配可以实现较高的瞬时数据速率，然而这一举措势必会缩短数据传输的时间。例如，当配置的时间占总时间的10%时，系统吞吐量比不考虑配置开销的情形降低78.6%左右。

针对多RIS协助无线通信场景，控制链路资源对系统遍历速率的影响得以研究^[43]，发现多RIS协助用户通信的方式虽然能显著提升信号功率，但会带来极高的同步信令开销。随着RIS数量的增加，不同RIS之间的严格同步会带来更大的信令开销，进而严重挤占控制链路资源。例如，相比于控制链路容量较大的情形 ($C_B^{\max} = 150$ Mbit/s)，系统的遍历速率将降低17.0%~47.9%。

另外，文献[35, 38]针对RIS自身功耗对系统EE性能的影响展开研究，发现EE随RIS单元相位量化阶数的增加而降低。例如，当量化阶数从4 bit增加至6 bit时，EE降低约37.3%。与此同时，该研究还发现EE与RIS单元数之间存在权衡关系。当单元数相对较少时，RIS引入带来的空间自由度将提升EE；然而当单元数相对较多时，RIS自身难以承受的功耗将抵消其对EE的性能增益，造成EE的下滑。

3 RIS协助无线网络的低开销方案

如前所述，信道信息的获取、RIS调控参数的传递和配置均会导致额外开销，严重时将制约通信系统的整体效率。因此，如何降低或容忍这些开销是需要探讨的另一个根本问题。针对此问题，一方面，业界专家广泛研究低开销的信道估计与反馈方法，充分挖掘RIS信道的空间相关性、稀疏性等特性，保障RIS信道估计与反馈阶段较低的开销；另一方面，一些研究综合考虑RIS的价值和成本，提出例如贪婪的RIS面板开/关控制算法等新算法，可有效提升系统的能量效率。

3.1 低开销的信道估计方案

RIS的信道估计可以采用传统思路或方法。例如：为克

服RIS本身无法收/发导频信号的缺点，部署有源RIS节点并将输出连至接收射频链路，以直接实现基带信道估计^[44]；逐个开启/关闭RIS单元，以实现信道估计的开启/关闭型信道估计策略^[45]，以及基于DFT的最小二乘（LS）估计方法^[23]和最小均方误差（MMSE）估计方法^[46]。然而，这些方法中有源RIS节点的引入以及RIS单元逐个开启/关闭的操作将为系统带来更高的功耗、硬件设计复杂度以及信道估计开销，其根本原因是未考虑RIS信道的特点，例如RIS信道的空间相关性、稀疏性、双时间尺度特性等。利用这些特点，可设计低开销的信道估计方案。

利用RIS信道的空间相关性，文献[47]提出RIS分组策略将RIS划分为若干组，每组RIS单元共享相同的反射系数。对此信道估计阶段只需开启/关闭对应分组的RIS单元，使得导频数从 $N + 1$ 降至 $N_{\text{group}} + 1$ 。当 N_{group} 分组数较多时，可以显著减少开销。

利用RIS信道的稀疏性，文献[48–49]将信道估计问题转化为级联稀疏信道的恢复问题，提出正交匹配追踪（OMP）、高斯混合近似消息传递（GAMP）算法，并引入残差网络，以降低对应的开销。另外，文献[50]提出基于快速交替的LS算法（FALS），只需观测信道矩阵的特定行/列即可恢复完整信道，相比于OMP算法可有效降低约45%的训练开销。

实际网络部署后，基站与RIS的位置往往就固定不变，基站–RIS之间的信道维数较高但变化缓慢，具有准静态特性；反之，用户处于移动状态，用户–基站/RIS之间的信道维数较低但变化较快，具有时变特性。这一性质被称为RIS信道的双时间尺度特性^[51]。基于这一性质，文献[32, 52]提出低开销的分段信道估计方案，针对基站–RIS信道提出双链路导频传输方案。基站发送下行导频并接收经RIS反射的上行导频，以此基于坐标下降算法恢复信道。由于基站–RIS信道具有准静态特性，长期观察内它的估计频率相对较低，对此可以将开销降低至 $2(N + 1)/\alpha + K \lceil N/M \rceil + K$ ，其中， α 为描述导频开销的因子， M 表示基站天线数， K 表示用户数。

利用不同用户RIS信道之间的相关性，文献[52–54]提出三阶段的信道估计框架，以有效降低不同用户级联信道之间存在的大量冗余。具体做法是：首先第一/二阶段实现典型用户的级联信道估计，接着第三阶段利用与典型用户信道的强相关性实现其他用户的级联信道估计，可以将原本 $KMN + KM$ 个信道系数降低至 $K + N + \max(K - 1, \lceil (K - 1)N/M \rceil)$ 。类似地，文献[55]则提出双结构正交匹配追踪算法（DS-OMP）来减少导频开销。

除此之外，基于深度学习的降低导频开销方法也备受瞩

目。文献[56]提出时域信道子采样和双深度神经网络的方法,神经网络中采用神经普微分方程(ODE)描述RIS动态信道以提高循环神经网络对时间序列的重建能力,进而降低动态时变信道的训练开销。文献[57]提出模型驱动的深度展开神经网络框架以降低训练开销,使训练开销相比于传统的LS可降低约25%。另外,文献[58–59]提出基于码本的信道估计与波束赋形协同方案。该方案利用位置信息离线生成具备环境感知能力的反射系数码本,根据需要选择对应的最佳码字,可以将信道估计开销降低至 QK ,即与RIS单元数无关,仅与码本的大小 Q 和用户天线数 K 有关,进而有助于显著降低开销。

3.2 基于统计或混合CSI的低开销设计研究

对RIS协助无线网络性能的分析大多是基于瞬时信道状态信息(CSI)。然而,瞬时CSI的准确获取具有较大挑战,庞大的RIS单元数将造成极高的信令交换开销。与此同时,RIS不同状态之间的切换通常比较缓慢,约为几兆赫兹^[60]。这种硬件的不完美将导致导频传输的非连续性,增加估计的时间开销。为实现信道估计开销和网络性能之间的权衡,相关研究基于统计或混合CSI来设计RIS的相位偏移。

由于统计CSI变化相对较缓,系统有充足的时间来获取相关信息,无须对其频繁地更新,因此信令开销可以大大减少^[61]。文献[62–63]采用长期观察获得的统计CSI联合设计,发送波束赋形以及RIS的相位,以最大化遍历容量或速率。另外,当网络中存在窃听者时,由于它往往不会与基站主动交互,因此窃听信道的完美CSI无法获得。对此,文献[64]基于统计CSI联合设计以最大化遍历安全速率。

然而,前述方案中瞬时CSI的缺失可能会降低系统实时性能,对此采用瞬时和统计CSI的混合解决方案可以进一步改善开销与系统性能之间的权衡问题。文献[39, 65]联合设计用户侧的波束赋形和RIS的相位,以最大化RIS协助上行多用户多输入多输出(MIMO)系统的全局能量效率^[39]以及加权EE和SE的总和^[65]。另外,由于网络中窃听者位置的不确定性,因此难以实时获取与窃听者有关的瞬时CSI。对此,文献[66]基于混合CSI联合设计基站与RIS侧的波束赋形,最大化遍历安全速率。

3.3 低开销的CSI反馈技术研究

传统信道信息反馈方法包括RVQ反馈方案、基于码本的反馈方案以及基于深度学习的反馈方案等。然而,这些方法应用于RIS时,会导致量化码本的大小随着天线数呈指数

级增长,带来严重的反馈开销问题。因此,需要合理利用不同用户RIS信道的相关性、改进的学习算法、RIS信道定制的能力,来有效降低信道反馈信息的数量。

由于不同用户在共享完全一致的基站–RIS稀疏信道的同时,又有着各自独特的用户–RIS信道,因此最终级联信道矩阵有着数量有限的非零列向量,并且不同用户的非零列索引相同。文献[33]利用该性质挖掘级联信道的单结构稀疏性,将下行CSI反馈信息划分为“用户特定”的信道信息(对应着非零列向量)以及“用户无关”的CSI(对应着非零列索引)。前者经不同用户单独反馈给基站,而后者仅需经某特定用户反馈给基站进而降低下行CSI的开销。相比于传统的基于统计的信道反馈方案,后者可以降低约80%的下行CSI反馈开销。级联信道的三重稀疏结构得以进一步挖掘^[67]。不同用户共同的CSI信息包括路径角度值、偏移值以及幅度比例,这些信息仅需经部分用户反馈给基站,而其余信息可以经压缩后再反馈。相比于单结构稀疏反馈方案^[33]，“三重稀疏结构”的CSI方案反馈开销可进一步降低约56.8%。另外,文献[31]提出基于压缩感知的信道反馈方案,采用基于聚类的码本将下行CSI压缩为数量较少的信道向量以减小反馈开销。

然而,实际中并非所有的信道信息都具备完全稀疏性,采用压缩感知技术不能很好地提取出信道状态信息。对此,文献[27]提出名为Quan-Transformer的网络架构以实现CSI压缩与重构。该方案在有效压缩CSI的同时还能大幅提升CSI的恢复精度,相比于传统基于深度学习的信道反馈框架CsiNet能够提升约3.32%的NMSE性能。类似地,文献[68]提出基于数据驱动的深度学习的信道获取网络(CAN)。下行导频传输、UE侧的CSI反馈以及基站侧的CSI重建过程被建模为基于变换的端到端神经网络,从而以较低的导频与反馈信令开销获取下行CSI。

除此之外,文献[69]聚焦于路径增益的反馈设计,提出级联码本的方案来量子化信道中的视距路径和非视距路径增益。而面对多RIS协助场景,多RIS的引入将带来更高的信道维数、更复杂的传播环境,从而造成难以忍受的反馈开销。文献[70]基于路径选择以及相移器的设计,将丰富的散射环境定义为稀疏信道,对此仅需反馈主导路径的信道参数。相比于原本的 $3N_{\text{RIS}} + 3 \sum_{k=1}^K (L_{T,k} + L_{k,R})$,反馈开销可以显著降低至 $2N_{\text{custom}}$ 。其中, N_{RIS} 表示RIS的数目, $L_{T,k}$ 和 $L_{k,R}$ 分别表示非视距路径和传播路径数, N_{custom} 表示信道定制后的路径数。

3.4 低开销的相位配置信息反馈技术研究

RIS相位配置信息传输是RIS特有的传输开销。当单元数量大、相位精度高时,该开销将变得难以承受。为减小相位配置信息的反馈开销,文献[71]提出低秩张量建模的方法,例如PARALLEL FACTORS (PARAFAC)和Tucker,将优化得到的RIS相位配置表示为维数更小的预定义因子的Kro-necker乘积形式。调整对应预定义因子的数量可以控制反馈的相位配置数。相比于文献[18],该方案可以在保证可观的SE前提下极大地降低相位配置信息的反馈开销。基于传统的自编码,文献[72]移除批量归一化(BN)层并引入去噪模块,提出相移压缩和去噪网络(PSCDN)方案,将RIS相位信息随机映射到特征空间内维数更小的码字中,从而能够实现有限带宽下的高压缩比反馈。

针对控制链路带宽受限的情形,文献[36]提出新颖的基于自适应码本的有限反馈协议,同时给出两种自适应码本的解决方案,分别是随机邻近性(RA)和基于深度神经网络策略的RIS控制(DPIC)。这两种解决方案仅需要端到端的级联信道,无须对用户位置和入射角进行估计,可显著减小控制开销。

虽然前述方案一定程度上降低了相位配置信息的反馈开销,然而这些方案中RIS的相位配置优化依然依赖于CSI。面对快速变化的信道,频繁的RIS配置带来的巨大开销往往难以承受。对此,文献[73]将RIS相位配置与信道估计分离,当且仅当处于RIS波束覆盖范围内的用户服务质量(QoS)无法满足时才需要重新配置RIS的相位。在这种情况下,RIS相位重新配置的频率不再取决于信道相干时间,而取决于用户的移动速度、RIS波束的覆盖范围以及用户的QoS需求,进而有助于进一步减少开销。

3.5 考虑电路开销的RIS通信技术研究

兼顾电路开销的RIS通信技术研究是近年来的研究热点之一。文献[25]在兼顾信道估计和相位配置能耗的基础上,对RIS参数进行优化设计,提出一种针对点对点通信系统的高能效RIS通信方案,可提升系统能效约27.8%。文献[35]则针对多用户通信系统,提出基于Dinkelbach算法的功率分配方案,可将系统能效提升约300%。考虑非完备CSI条件下的上行MIMO通信系统,文献[39]基于闭合表达式推导最优功率分配策略,可实现能效与谱效之间的权衡。此外,文献[22, 38, 74]等还分别针对设备对设备(D2D)系统、多播系统、共生无线电系统提出最优能效方案。

针对多RIS协助无线通信网络,文献[75]联合优化基站侧的有源波束赋形、RIS侧的无源波束赋形以及RIS的相位

偏移,以最小化网络整体的功率消耗,这其中包括RIS节点自身的电路功耗。研究指出,通过动态关闭某些RIS面板,可以实现以非常小的性能损失大幅降低功率消耗。文献[76]则提出一种低复杂度的贪婪搜索算法,通过控制每块RIS面板的开/关状态,以最大化整个系统的能量效率。

当无线信道环境和RIS可用能量模型不确定时,文献[77]基于深度强化学习(DRL)优化发送功率分配以及每个RIS单元的工作状态,以提升系统整体能效。类似地,文献[78]采用DRL的方法求解RIS辅助的车辆自组织网络的能效最大化问题,可实现约87.5%的能效提升。文献[79]则提出一种基于长短时记忆(LSTM)联合资源分配算法,可基于实测数据预测最优RIS配置参数,相比传统的贝叶斯网络方法可提升约20.1%的系统能效。

新型的同时透射与反射型RIS(STAR-RIS)可以进一步增强覆盖能力。针对STAR-RIS辅助的多用户MIMO非正交多址(NOMA)系统,文献[80]基于Dinkelbach方法、对偶分解理论以及连续凸逼近(SCA)技术等,联合优化STAR-RIS的传输与反射波束赋形向量以实现最优的能效性能。文献[81]针对边缘移动计算(MEC)场景,通过联合优化STAR-RIS反射系数、功率分配以及卸载数据的大小,降低整个系统的总能量消耗。文献[82]进一步提出一种基于深度确定性策略梯度(DDPG)算法,通过联合优化基站侧的有源波束赋形和STAR-RIS侧的反射系数来最大化系统能效。

4 新研究主题

学术界广泛关注RIS开销问题,已针对典型场景下的基础模型提出多种有效的解决方案。然而,随着6G研究的推进,许多新的应用场景、技术需求陆续出现。如何在更加复杂多样的网络环境中有效发挥RIS的潜在价值,仍需要持续探索。本文从新场景、新型软硬件设计、新型组网架构、新技术交叉赋能等方面展开论述。

1) 全空间RIS协助的无线通信

相比于传统的纯反射型半空间RIS,STAR-RIS可实现360°的全空间覆盖^[83]。然而,STAR-RIS的每个单元需同时满足传输和反射需求,且相应传输和反射相位紧密耦合、相互制约。这对硬件复杂度、电路运行能耗、信道估计开销等均提出新的挑战。针对传统RIS模型开展的性能分析、低开销方案设计等结论,将不能很好地应用于STAR-RIS模型,因此需要开展新的技术方案研究。

2) 基于统计/混合CSI的联合波束赋形

基于统计/混合CSI优化设计RIS辅助通信系统的有源波

束赋形和无源波束赋形,可降低对信道估计及信息反馈的需求。该方法已被证明可实现通信性能增益与系统开销的折中权衡。现有研究已针对典型的基础通信场景提出了高效的联合波束赋形方案,而针对多点协作 RIS、多跳 RIS、高速移动等复杂场景,如何基于有限的 CSI 实现有效的联合波束设计仍有待探索。

3) 低功耗的 RIS 硬件平台

实际中具有多种不同的 RIS 硬件方案,在工作频率、码本切换时间、工作电压、功耗和部署成本等方面存在差异,因此可分别应用于不同的场景。例如,实测数据指出^[84],基于 RF-MEMS 和 MOSFET 设计的 RIS 具有较低能耗,但硬件成本较高;基于 PIN 二极管的 RIS 具有更低的硬件成本和更短的码本切换时间,但能耗较大且仅支持 110 GHz 以下的频段。随着电子信息材料科学与工程技术的进步,很多新型 RIS 方案将被提出。其中,低成本、低功耗、广适用范围的 RIS 硬件设计是潜在方向。

4) 低开销的 RIS 组网模型

在实际网络中部署 RIS 时需综合考虑用户分布、传播环境、成本控制等诸多因素。一方面,当将相同数量的 RIS 单元分别放置在用户与基站附近时,可实现比集中式部署更好的用户通信速率^[85];另一方面,障碍物较多、通信频率较高时,需要多个 RIS 接力建立通信链路^[86]。此时,多个 RIS 站点之间以及 RIS 与基站之间的相互协调,会显著增加同步挑战和信令开销。因此,如何权衡 RIS 协作组网增益与开销是极具挑战的研究课题。

5) AI 赋能的 RIS 通信方法

人工智能 (AI) 技术已被证明可以有效求解复杂应用中的非线性资源分配问题。因此,AI 赋能的 RIS 通信网络是备受关注的研究方向。AI 模型训练通常由处理能力较强的基站执行,相应的训练数据收集、传递等过程会造成额外通信开销。这可能要求 RIS 节点具备一定的信息感知能力,增加其硬件成本。同时,模型训练过程本身需要耗费庞大的计算时间与能量等^[87]。联邦学习、迁移学习^[88]等技术框架有望为低开销 RIS 组网提供新思路。

6) 低开销的 RIS 近场通信

为补偿严重的路径衰落带来的系统性能损失,预计未来网络将部署更多的 RIS 反射单元。然而,由于瑞利距离与天线口径的平方成正比,随着 RIS 面板孔径的不断增加,相应的近场通信范围将不断扩大,导致越来越多的用户、散射体处于近场环境中^[89]。对此,近场环境下的低开销方案设计面临新的挑战。例如,近场环境下,天线阵列导向矢量与散射体的坐标密切相关,对此原先的低开销码本方案将不再适

用^[90]。更糟糕的是,相比于远场码本,近场码本将包含更多的候选码字,使得近场的波束赋形设计更为复杂,造成更高的导频开销^[91]。传统远场环境下的低开销设计方案不能很好地解决这些问题,亟须开展新的技术方案研究。

7) 低开销的 RIS 协助通信感知系统

相比于传统的通信感知一体化 (ISAC) 网络,RIS 的引入可以在为处于非视距的感知目标创建虚拟直射链路的同时抑制干扰信号,有助于进一步增强感知性能^[92]。然而,ISAC 系统设计中需要综合考虑感知和通信的需求,除传统的通信参数例如信道信息的估计之外,还需要实现对感知目标的角度、速度、距离等参数的估计^[93],因此将占据更多的系统资源,造成额外的资源开销。除此之外,为满足未来高精度的感知需求,系统中将引入更多的 RIS 以提供更高的设计自由度^[94],然而,这些 RIS 之间的协同控制机制以及部署方案设计也将带来额外的资源开销。

8) 低能耗的 RIS 协助边缘计算网络

与传统的 MEC 网络相比,RIS 技术的引入,一方面,有助于改善无线链路的质量,提高传输速率,另一方面,有助于显著扩大无线卸载的覆盖范围^[95]。然而,现有研究大多聚焦于对 RIS 反射系数的优化来提升卸载效率^[96],忽视了网络中 RIS 节点的部署成本以及反射单元相位配置过程中产生的能耗开销。相关的工作处于起步阶段,有待进一步的探索。

5 结束语

RIS 是面向 6G 的创新性高效无线技术,其根本优势在于打破了传统无线信道的不可控局限,通过构建智能可编程的无线环境,有效提升无线网络的覆盖范围、通信效率、安全隐私能力等。然而,RIS 节点的引入也会带来额外开销。在考虑信道估计、无线控制等开销的前提下,如何尽量发挥 RIS 的无线赋能潜力是根本问题之一。

参考文献

- [1] BISOYI S, PASUPULETI M, KUCHI K, et al. IMT 2030 candidate technologies: a white paper by IIT hyderabad & wisig networks. [EB/OL]. (2023-07-26)[2023-10-15]. <https://arxiv.org/abs/2307.14978v1>
- [2] LIU R Q, LI R Y N, DI RENZO M, et al. A vision and an evolutionary framework for 6G: scenarios, capabilities and enablers [EB/OL]. (2023-05-23)[2023-10-15]. <https://arxiv.org/abs/2305.13887.pdf>
- [3] SELVA E, GATI A, HAMON M H, et al. Towards a 6G embedding sustainability [EB/OL]. (2023-07-13)[2023-10-15]. <https://arxiv.org/abs/2307.06636.pdf>
- [4] PIOVESAN N, LÓPEZ-PÉREZ D, DE DOMENICO A, et al. Machine learning and analytical power consumption models for 5G base stations [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(10): 56-62. DOI: 10.1109/MCOM.001.2200023

- [5] FAN C, DIAO Z, LIU W. Research on 5G power consumption and communication power supply scheme [J]. *Communication world*, 2019, 26: 28–30
- [6] ZOU Y, WANG Q G, CHI Y, et al. Electric load profile of 5G base station in distribution systems based on data flow analysis [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2022, 13(3): 2452–2466. DOI: 10.1109/TSG.2022.3150074
- [7] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2023, 25(2): 905–974. DOI: 10.1109/COMST.2023.3249835
- [8] 孙善球, 林学进, 王昊, 等. “双碳战略”给移动通信天线产业带来的机遇和挑战 [J]. *移动通信*, 2022, 46(3): 99–102
- [9] LIU R Q, WU Q Q, DI RENZO M, et al. A path to smart radio environments: an industrial viewpoint on reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE wireless communications*, 2022, 29(1): 202–208. DOI: 10.1109/MWC.111.2100258
- [10] 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
- [11] AI Y, DEFIGUEIREDO F A P, KONG L, et al. Secure vehicular communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2021, 70(7): 7272–7276. DOI: 10.1109/TVT.2021.3088441
- [12] SRRC. NTT DoCoMo, Metawave test 5G mobile system in Tokyo [EB/OL]. (2018–12–06)[2023–10–15]. <http://www.srrc.org.cn/en/news4504.aspx>
- [13] ARUN V, BALAKRISHNAN H. RFocus: practical beamforming for small devices [EB/OL]. (2019–05–13) [2023–10–15]. <https://arxiv.org/abs/1905.05130.pdf>
- [14] DAI L L, WANG B C, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results [J]. *IEEE access*, 2020, 8: 45913–45923. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977772
- [15] 中国移动通信有限公司研究院. 中国移动联合崔铁军院士团队完成6G智能超表面技术试验 [EB/OL]. (2021–07–21)[2023–10–15]. https://www.sohu.com/a/478712728_121124379
- [16] C114通信网. 中兴通讯联合中国电信完成业界首个5G高频外场智能超表面技术验证测试 [EB/OL]. (2021–07–08)[2023–10–15]. <http://www.c114.com.cn/news/127/a1167281.html>
- [17] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 等. 智能超表面技术研究报告 [R]. 2021
- [18] ZAPPONE A, DI RENZO M, SHAMS F, et al. Overhead-aware design of reconfigurable intelligent surfaces in smart radio environments [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2021, 20(1): 126–141. DOI: 10.1109/TWC.2020.3023578
- [19] WEI X H, SHEN D C, DAI L L. Channel estimation for RIS assisted wireless communications—part I: fundamentals, solutions, and future opportunities [J]. *IEEE communications letters*, 2021, 25(5): 1398–1402. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3052822
- [20] 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
- [21] MA Q, BAI G D, JING H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions [J]. *Light: science & applications*, 2019, 8(1): 1–12. DOI: 10.1038/s41377-019-0205-3
- [22] JIA S Q, YUAN X J, LIANG Y C. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in D2D communication network [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2021, 10(3): 683–687. DOI: 10.1109/LWC.2020.3046358
- [23] ZHENG B X, ZHANG R. Intelligent reflecting surface-enhanced OFDM: channel estimation and reflection optimization [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2020, 9(4): 518–522. DOI: 10.1109/LWC.2019.2961357
- [24] LIU H, YUAN X J, ZHANG Y J A. Matrix-calibration-based cascaded channel estimation for reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MIMO [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2020, 38(11): 2621–2636. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007057
- [25] ZAPPONE A, DI RENZO M, XI X J, et al. On the optimal number of reflecting elements for reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2021, 10(3): 464–468. DOI: 10.1109/LWC.2020.3034686
- [26] LEE G, JUNG M, KASGARI A T Z, et al. Deep reinforcement learning for energy-efficient networking with reconfigurable intelligent surfaces [C]// *Proceedings of ICC 2020 – 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2020: 1–6. DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9149380
- [27] XIE W W, ZOU J, XIAO J, et al. Quan-transformer based channel feedback for RIS-aided wireless communication systems [J]. *IEEE communications letters*, 2022, 26(11): 2631–2635. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3198793
- [28] JINDAL N. MIMO broadcast channels with finite-rate feedback [J]. *IEEE transactions on information theory*, 2006, 52(11): 5045–5060. DOI: 10.1109/TIT.2006.883550
- [29] SHEN W Q, DAI L L, ZHANG Y, et al. On the performance of channel-statistics-based codebook for massive MIMO channel feedback [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2017, 66(8): 7553–7557. DOI: 10.1109/TVT.2017.2656908
- [30] KUO P H, KUNG H T, TING P G. Compressive sensing based channel feedback protocols for spatially-correlated massive antenna arrays [C]// *Proceedings of 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2012: 492–497. DOI: 10.1109/WCNC.2012.6214417
- [31] SHIN B S, OH J H, YOU Y H, et al. Limited channel feedback scheme for reconfigurable intelligent surface assisted MU-MIMO wireless communication systems [J]. *IEEE access*, 2022, 10: 50288–50297. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3174095
- [32] HU C, DAI L L, HAN S F, et al. Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications [J]. *IEEE transactions on communications*, 2021, 69(11): 7736–7747. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3072729
- [33] SHEN D C, DAI L L. Dimension reduced channel feedback for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications [J]. *IEEE transactions on communications*, 2021, 69(11): 7748–7760. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3100428
- [34] CHEN Y B, WANG Y, WANG Z C, et al. Robust beamforming for active reconfigurable intelligent omni-surface in vehicular communications [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2022, 40(10): 3086–3103. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3196095
- [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] KIM J, HOSSEINALIPOUR S, MARCUM A C, et al. Learning-based adaptive IRS control with limited feedback codebooks [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2022, 21(11): 9566–9581. DOI: 10.1109/TWC.2022.3178055
- [37] ZHONG R K, LIU Y W, MU X D, et al. AI empowered RIS-assisted NOMA networks: deep learning or reinforcement learning? [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2022, 40(1): 182–196. DOI: 10.1109/JSAC.2021.3126068
- [38] DU L S, ZHANG W, MA J H, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in multicast transmissions [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2021, 70(6): 6266–6271. DOI: 10.1109/TVT.2021.3080302
- [39] YOU L, XIONG J Y, NG D W K, et al. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in RIS-aided multiuser MIMO uplink transmission [J]. *IEEE transactions on signal processing*, 2021, 69: 1407–1421. DOI: 10.1109/TSP.2020.3047474
- [40] WANG J H, TANG W K, JIN S, et al. Static power consumption modeling and measurement of reconfigurable intelligent surfaces [EB/OL]. (2023–03–01)[2023–10–15]. <https://arxiv.org/abs/2303.00299.pdf>
- [41] WANG J H, TANG W K, LIANG J C, et al. Reconfigurable intelligent surface: power consumption modeling and practical measurement validation (2022–11–01)[2023–10–15]. <https://arxiv.org/abs/2211.00323.pdf>
- [42] KIM J, YU H, KANG X, et al. Discrete phase shifts of intelligent reflecting surface systems considering network overhead [J]. *Entropy*, 2022, 24(12): 1753. DOI: 10.3390/e24121753
- [43] XIE Z Y, YI W Q, WU X L, et al. Downlink multi-RIS aided transmission in backhaul limited networks [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2022, 11(7): 1458–1462. DOI: 10.1109/LWC.2022.3174448
- [44] JIN Y, ZHANG J Y, ZHANG X D, et al. Channel estimation for semi-passive reconfigurable intelligent surfaces with enhanced deep residual networks [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2021, 70(10): 11083–11088. DOI: 10.1109/TVT.2021.3109937

- [45] ELBIR A M, PAPAFAIROPOULOS A, KOURTESSIS P, et al. Deep channel learning for large intelligent surfaces aided mm-wave massive MIMO systems [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2020, 9(9): 1447–1451. DOI: 10.1109/LWC.2020.2993699
- [46] JENSEN T L, DE CARVALHO E. An optimal channel estimation scheme for intelligent reflecting surfaces based on a minimum variance unbiased estimator [C]//*Proceedings of ICASSP 2020 – 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2020: 5000–5004. DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9053695
- [47] YANG Y F, ZHENG B X, ZHANG S W, et al. Intelligent reflecting surface meets OFDM: protocol design and rate maximization [J]. *IEEE transactions on communications*, 2020, 68(7): 4522–4535. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2981458
- [48] WANG P L, FANG J, DUAN H P, et al. Compressed channel estimation for intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave systems [J]. *IEEE signal processing letters*, 2020, 27: 905–909. DOI: 10.1109/LSP.2020.2998357
- [49] MAO Z D, LIU X Q, PENG M G. Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted massive MIMO systems—a deep learning approach [J]. *IEEE communications letters*, 2022, 26(4): 798–802. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3147200
- [50] CHUNG H, KIM S. Efficient two-stage beam training and channel estimation for ris-aided mmwave systems via fast alternating least squares [C]//*Proceedings of ICASSP 2022 – 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2022: 5188–5192. DOI: 10.1109/ICASSP43922.2022.9746094
- [51] GAN X, ZHONG C J, HUANG C W, et al. Multiple RISs assisted cell-free networks with two-timescale CSI: performance analysis and system design [J]. *IEEE transactions on communications*, 2022, 70(11): 7696–7710. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3208629
- [52] YANG S J, LYU W T, XIU Y, et al. Active 3D double-RIS-aided multi-user communications: two-timescale-based separate channel estimation via Bayesian learning [J]. *IEEE transactions on communications*, 2023, 71(6): 3605–3620. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3265115
- [53] WANG Z R, LIU L, CUI S G. Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted multiuser communications: framework, algorithms, and analysis [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2020, 19(10): 6607–6620. DOI: 10.1109/TWC.2020.3004330
- [54] WEI Y, ZHAO M M, ZHAO M J, et al. Channel estimation for IRS-aided multiuser communications with reduced error propagation [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2022, 21(4): 2725–2741. DOI: 10.1109/TWC.2021.3115161
- [55] WEI X H, SHEN D C, DAI L L. Channel estimation for RIS assisted wireless communications—part II: an improved solution based on double-structured sparsity [J]. *IEEE communications letters*, 2021, 25(5): 1403–1407. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3052787
- [56] XU M, ZHANG S, MA J P, et al. Deep learning-based time-varying channel estimation for RIS assisted communication [J]. *IEEE communications letters*, 2022, 26(1): 94–98. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3127160
- [57] HE J G, WYMEERSCH H, DI RENZO M, et al. Learning to estimate RIS-aided mmWave channels [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2022, 11(4): 841–845. DOI: 10.1109/LWC.2022.3147250
- [58] AN J C, XU C, WU Q Q, et al. Codebook-based solutions for reconfigurable intelligent surfaces and their open challenges [J]. *IEEE wireless communications*, 2022, (99): 1–8. DOI: 10.1109/MWC.010.2200312
- [59] JIA X, AN J C, LIU H, et al. Environment-aware codebook for reconfigurable intelligent surface-aided MISO communications [J]. *IEEE wireless communications letters*, 2023, 12(7): 1174–1178. DOI: 10.1109/LWC.2023.3265399
- [60] TANG W K, LI X, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: transceiver design and experimental results [J]. *China communications*, 2019, 16(5): 46–61. DOI: 10.23919/jcc.2019.05.004
- [61] ZHENG B X, YOU C S, MEI W D, et al. A survey on channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications [J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2022, 24(2): 1035–1071. DOI: 10.1109/COMST.2022.3155305
- [62] HU X L, WANG J W, ZHONG C J. Statistical CSI based design for intelligent reflecting surface assisted MISO systems [J]. *Science China information sciences*, 2020, 63(12): 222303. DOI: 10.1007/s11432-020-3033-3
- [63] JIA Y H, YE C C, CUI Y. Analysis and optimization of an intelligent reflecting surface-assisted system with interference [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2020, 19(12): 8068–8082. DOI: 10.1109/TWC.2020.3019088
- [64] LIU J, ZHANG J, ZHANG Q, et al. Secrecy rate analysis for reconfigurable intelligent surface-assisted mimo communications with statistical CSI [J]. *China communications*, 2021, 18(3): 52–62. DOI: 10.23919/JCC.2021.03.005
- [65] BIE Q Y, LIU Y, WANG Y X, et al. Deployment optimization of reconfigurable intelligent surface for relay systems [J]. *IEEE transactions on green communications and networking*, 2022, 6(1): 221–233. DOI: 10.1109/TGCN.2022.3145026
- [66] LIU C, TIAN C, LIU P X. RIS-assisted secure transmission exploiting statistical CSI of eavesdropper [C]//*Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2022: 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685746
- [67] SHI X, WANG J T, SONG J. Triple-structured sparsity-based channel feedback for RIS-assisted MU-MIMO system [J]. *IEEE communications letters*, 2022, 26(5): 1141–1145. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3147220
- [68] WU M H, GAO Z, HUANG Y, et al. Deep learning-based rate-splitting multiple access for reconfigurable intelligent surface-aided tera-hertz massive MIMO [J]. *IEEE journal on selected areas in communications*, 2023, 41(5): 1431–1451. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3240781
- [69] CHEN W C, WEN C K, LI X, et al. Adaptive bit partitioning for reconfigurable intelligent surface assisted FDD systems with limited feedback [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2022, 21(4): 2488–2505. DOI: 10.1109/TWC.2021.3112819
- [70] CHEN W C, WEN C K, LI X, et al. Channel customization for limited feedback in RIS-assisted FDD systems [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2023, 22(7): 4505–4519. DOI: 10.1109/TWC.2022.3226442
- [71] SOKAL B, GOMES P R B, DE ALMEIDA A L F, et al. Reducing the control overhead of intelligent reconfigurable surfaces via a tensor-based low-rank factorization approach [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2023, 22(10): 6578–6593. DOI: 10.1109/TWC.2023.3244487
- [72] YU X H, LI D, XU Y J, et al. Convolutional autoencoder-based phase shift feedback compression for intelligent reflecting surface-assisted wireless systems [J]. *IEEE communications letters*, 2022, 26(1): 89–93. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3123941
- [73] JAMALI V, ALEXANDROPOULOS G C, SCHÖBER R, et al. Low-to-zero-overhead IRS reconfiguration: decoupling illumination and channel estimation [J]. *IEEE communications letters*, 2022, 26(4): 932–936. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3141206
- [74] LI J, LI X, BI Y J, et al. Energy-efficient joint resource allocation with reconfigurable intelligent surfaces in symbiotic radio networks [J]. *IEEE transactions on cognitive communications and networking*, 2022, 8(4): 1816–1827. DOI: 10.1109/TCCN.2022.3188986
- [75] SUN S Y, FU M, SHI Y M, et al. Towards reconfigurable intelligent surfaces powered green wireless networks [C]//*Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2020: 1–6. DOI: 10.1109/WCNC45663.2020.9120857
- [76] YANG Z H, CHEN M Z, SAAD W, et al. Energy-efficient wireless communications with distributed reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE transactions on wireless communications*, 2022, 21(1): 665–679. DOI: 10.1109/TWC.2021.3098632
- [77] YANG B, CAO X L, HUANG C W, et al. Intelligent spectrum learning for wireless networks with reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2021, 70(4): 3920–3925. DOI: 10.1109/TVT.2021.3064042
- [78] PAN Q Q, WU J, NEBHEN J, et al. Artificial intelligence-based energy efficient communication system for intelligent reflecting surface-driven VANETs [J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2022, 23(10): 19714–19726. DOI: 10.1109/TITS.2022.3152677
- [79] GUPTA K D, NIGAM R, SHARMA D K, et al. LSTM-based energy-efficient wireless communication with reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE transactions on green communications and networking*, 2022, 6(2): 704–712. DOI: 10.1109/TGCN.2021.3135437
- [80] GUO Y, FANG F, CAI D H, et al. Energy-efficient design for a NOMA assisted STAR-RIS network with deep reinforcement learning [J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2023, 72(4): 5424–5428. DOI:

- 10.1109/TVT.2022.3224926
- [81] ZHANG Q, WANG Y H, LI H, et al. Resource allocation for energy efficient STAR-RIS aided MEC systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2023, 12(4): 610–614. DOI: 10.1109/LWC.2023.3236411
- [82] FANG F, WU B B, FU S, et al. Energy-efficient design of STAR-RIS aided MIMO-NOMA networks [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(1): 498–511. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3223706
- [83] LIU Y W, MU X D, XU J Q, et al. STAR: simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces [J]. IEEE wireless communications, 2021, 28(6): 102–109. DOI: 10.1109/MWC.001.2100191
- [84] LIU R Q, DOU J W, LI P, et al. Simulation and field trial results of reconfigurable intelligent surfaces in 5G networks [J]. IEEE access, 2022, 10: 122786–122795. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3223447
- [85] ZHANG S W, ZHANG R. Intelligent reflecting surface aided multi-user communication: capacity region and deployment strategy [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(9): 5790–5806. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3079128
- [86] YOU C S, ZHENG B X, ZHANG R. Wireless communication via double IRS: channel estimation and passive beamforming designs [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(2): 431–435. DOI: 10.1109/LWC.2020.3034388
- [87] WANG J H, TANG W K, HAN Y, et al. Interplay between RIS and AI in wireless communications: fundamentals, architectures, applications, and open research problems [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2021, 39(8): 2271–2288. DOI: 10.1109/JSAC.2021.3087259
- [88] ZHANG S, LI M Y, JIAN M N, et al. AIRIS: Artificial intelligence enhanced signal processing in reconfigurable intelligent surface communications [J]. China communications, 2021, 18(7): 158–171. DOI: 10.23919/JCC.2021.07.013
- [89] LIU W, PAN C H, REN H, et al. Low-overhead beam training scheme for extremely large-scale RIS in near field [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(8): 4924–4940. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3278728
- [90] JIANG Y H, GAO F F, JIAN M N, et al. Reconfigurable intelligent surface for near field communications: beamforming and sensing [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(5): 3447–3459. DOI: 10.1109/TWC.2022.3218531
- [91] CUI M Y, WU Z D, LU Y, et al. Near-field MIMO communications for 6G: fundamentals, challenges, potentials, and future directions [J]. IEEE communications magazine, 2023, 61(1): 40–46. DOI: 10.1109/MCOM.004.2200136
- [92] 杨晓宇, 尉志青, 孟春伟. 可重构智能表面辅助的通信感知一体化系统 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(5): 17–22
- [93] RIHAN M, ZAPPONE A, BUZZI S, et al. Passive vs. active reconfigurable intelligent surfaces for integrated sensing and communication: challenges and opportunities [J]. IEEE network, 2023, (99): 1. DOI: 10.1109/MNET.2023.3321542
- [94] LIU R, LI M, LUO H H, et al. Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: opportunities, applications, and future directions [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(1): 50–57. DOI: 10.1109/MWC.002.2200206
- [95] 李斌, 刘文帅, 谢万城, 等. 智能超表面赋能移动边缘计算部分任务卸载策略 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2309–2316
- [96] BAI T, PAN C H, HAN C, et al. Reconfigurable intelligent surface aided mobile edge computing [J]. IEEE wireless communications, 2021, 28(6): 80–86. DOI: 10.1109/MWC.001.2100142

作者简介



陈天贝, 北京邮电大学信息与通信工程学院在读硕士研究生; 主要研究领域为智能反射面技术。



李娜, 北京邮电大学副教授、博士生导师, 主要研究领域为5G/6G无线组网关键技术、无线内生安全、物理层安全; 先后主持和参与国家重点研发计划、国家自然科学基金、北京市自然科学基金等国家级省部级项目10余项, 曾获1项科研成果奖励; 已发表论文40余篇, 获授权专利10余项, 出版专著1部。



陶小峰, 北京邮电大学教授、博士生导师, 移动互联网安全技术国家工程研究中心主任, 无线新技术研究所副所长, 英国工程技术学会会士, IEEE通信学会北京分会主席, 中国科协联合国信息咨商专业委员会委员; 主要研究方向为5G/6G; 曾主持国家杰出青年科学基金、国家“863”计划重大项目、北京市自然科学基金等项目, 被评为北京市科技新星、科技北京百名领军人才、“万人计划”科技创新领军人才, 曾2次获得国家技术发明奖; 已发表论文200余篇, 出版学术专著3部。