中国科学: 信息科学 2024 年 第 54 卷 第 11 期: 2503–2517
SCIENTIA SINICA Informationis
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
评述

智能超表面辅助的无线通信网络性能优化综述

虞文武[1,3*], 聂晓凯[2,4], 蔡豫晋[5], 李广举[1], 刘洪喆[1], 程强[6], 崔铁军[6]

1. 东南大学数学学院, 南京 211102
2. 东南大学自动化学院, 南京 210096
3. 紫金山实验室, 南京 211111
4. 东南大学深圳研究院, 深圳 518057
5. 东南大学网络空间安全学院, 南京 211102
6. 东南大学信息科学与工程学院, 南京 210096

* 通信作者. E-mail: wwyu@seu.edu.cn

收稿日期: 2024–02–22; 修回日期: 2024–04–24; 接受日期: 2024–07–22; 网络出版日期: 2024–11–08

国家重点研发计划 (批准号: 2022ZD0120001)、国家杰出青年科学基金 (批准号: 62225108)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2242022k60003, 2242024RCB0005, 2242024K30009)、国家自然科学基金 (批准号: 62233004, 62073076, 62103105, 62288101, 62201139)、江苏省网络群体智能重点实验室 (批准号: BM2017002)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20210218)、广东省基础与应用基础研究基金 (批准号: 2020A1515110129)、中央高校基础研究基金 (批准号: 2242022K30038)、江苏省前沿引领技术基础研究专项 (批准号: BK20212002)、“111” 项目 (批准号: 111-2-05)、江苏省应用数学科学研究中心 (批准号: BK20233002) 和东南大学至善青年学者支持计划资助

摘要 作为新一代智能化综合数字信息基础设施, 第六代移动通信 (6G) 深度融合人工智能、大数据以及先进计算等技术, 构建泛在互联, 智能体高效互通的新型网络模式, 具有更大系统容量、更快信息传输速率以及更加智能化与数字化的性能特征. 智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 是推动未来 6G 通信网络实现超级无线带宽、超大规模连接以及极其可靠通信能力等方面性能的极具潜力的新兴技术. 该技术是基于在数字超材料平面上集成的大量低成本无源反射元件, 通过自适应配置无线传播环境, 显著提高无线通信网络在复杂场景下的性能, 而实现自适应动态调控通信链路的关键在于对 RIS 辅助的网络系统优化. 为此, 本文通过对 RIS 近年来在网络性能优化方面相关研究文献进行综述, 从 RIS 辅助通信的网络架构及其性能优化方案和应用场景两个方面总结了当前 RIS 辅助的无线通信网络性能优化研究成果与进展, 并进一步讨论了通信网络部署 RIS 的潜在未来研究方向.

关键词 智能超表面, 无线通信网络, 性能优化, 6G

1 引言

第五代移动通信 (5G) 的广泛应用与部署有力推动了物联网的迅速发展, 面向智慧生活以及工业生产的无线通信终端规模与数据需求随之呈现出爆发式增长, 而经济社会的智能化、数字化、精细化

引用格式: 虞文武, 聂晓凯, 蔡豫晋, 等. 智能超表面辅助的无线通信网络性能优化综述. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 2503–2517, doi: 10.1360/SSI-2024-0060
Yu W W, Nie X K, Cai Y J, et al. A survey on the performance optimization of wireless communication networks assisted by reconfigurable intelligent surface (in Chinese). Sci Sin Inform, 2024, 54: 2503–2517, doi: 10.1360/SSI-2024-0060

© 2024《中国科学》杂志社

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

和高端化的发展趋势持续驱动通信技术向第六代移动通信 (6G) 迭代演进, 对未来通信网络性能提出更高的要求, 例如智慧工厂中的协作式机器控制、精准医疗中的远程手术、智能交通系统中的无人驾驶等重要应用场景对通信时延、数据传输速率、网络带宽与稳定性都有极为苛刻的要求. 作为新一代智能化综合数字信息基础设施, 6G 将构建人机物泛在智慧互联, 智能体高效互通的新型通信网络模式, 助力实现真实物理世界与虚拟数字世界的深度融合, 形成带动终端和流量市场规模进一步增长, 同时大幅提升网络性能的重要动力. 与 5G 网络相比较, 6G 通信网络将深化其服务场景, 构建超级无线带宽、超大规模连接、极其可靠通信能力, 并实现通信感知融合与普惠智能的新场景, 拓展新的功能应用, 包括全息通信、数字孪生、智慧医疗和自动驾驶等, 因而 6G 通信网络具有更大系统容量、更快信息传输速率以及更加智能化与数字化的性能特征 [1,2]. 6G 通信技术将利用更高的频段, 如太赫兹频段, 以实现更快的通信速率以满足特殊应用场景中的体验需求, 然而高频段信号极易受到环境因素的影响导致其衰减严重. 为了实现更为广阔区域的网络无缝覆盖, 需要部署大量基站 (base station, BS)、中继等通信设备, 由此造成无线通信网络的部署成本和能量消耗显著增加. 此外, 6G 通信网络发展也面临信道干扰严重、天线规模发展受限、被动适应无线环境等诸多挑战, 这些挑战制约了其在实际场景应用中达到理想性能标准 [3]. 因此, 如何在 6G 网络中提升传输速率和能量效率的同时, 有效降低通信网络的部署与运营成本并保障通信网络性能是实现其场景应用亟待解决的关键问题.

为应对未来 6G 通信网络存在的技术瓶颈, 近年来随着信息超材料技术的发展, 东南大学崔铁军院士团队在 2014 年首次提出智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 技术并进行了实验验证 [4~6]. RIS 由大量的电磁单元排列组成, 通过控制电磁单元上的可调元件, 如可变电阻器、PIN 二极管, 实时动态调节电磁单元的电磁性质, 进而形成幅度、相位、极化和频率可控制的电磁波, 这一过程提供了超表面的物理电磁世界和信息科学的数字世界之间的接口 [7,8], 根据信息传输需求动态调整信道条件以达到复杂环境下网络覆盖补盲与信号多流增速的目的, 具有低成本、低功耗、结构简单的特点 [9]. 该技术的核心在于利用超材料的可编码功能实现电磁波的控制, 而针对可编程超表面需要手动实现电磁单元的控制问题, 崔院士团队设计了一种无需人为参与的具有自适应可重构功能的智能超表面, 运用传感器对周围环境的感知能力, 通过建立无人传感自动反馈控制系统, 实现自适应调整入射电磁波 [10]. 不同于传统的电学控制方法, 为避免构建复杂的电路控制系统, 崔院士团队设计了一种轻量化, 结构紧凑且能够利用可见光驱动的数字化可编程电磁超表面 [11], 并提出了一种基于深度学习的快速高效的自动超表面设计方案 [12], 此外对 RIS 辅助无线通信网络的性能进行理论分析和大量实验验证 [13,14]. 针对高频通信存在的信号传输衰减严重并避免直达链路受阻的问题, RIS 能够自适应动态调整链路环境保障信息的可靠传输. 由此可见, RIS 技术能够有效提升复杂环境下通信网络性能, 是解决未来 6G 通信网络发展的极具潜力的重要手段.

整体而言, 通过将 RIS 部署在无线通信网络环境中, 可以实现主动式与被动式的性能提升: 一方面 RIS 能够主动调控传播路径上的电磁波信号, 增强有效信号、减弱干扰、扩大覆盖范围, 从而提高通信传输性能; 另一方面 RIS 能够被动地改善信道的散射条件, 丰富无线信号传输链路, 从而增强通信系统的空间复用增益. 然而, RIS 实现自适应地调整通信链路需要电磁单元自动反馈控制系统确定其系数匹配以满足信息传输质量要求, 进而达到最佳波束形成的目标, 由此也给 6G 通信网络在实际场景中的运用带来了新的挑战, 即被动波束的形成需要对电磁单元系数进行优化确定. 相比较于传统的通信技术, RIS 的引入给通信网络带来了新的优化维度, 即 RIS 反射单元系数优化, 使得传统信号的传输过程发生了改变, 增加了信道建模、信道估计和资源优化的难度. 更有效地对 RIS 反射单元系数进行设计与优化是充分发挥 RIS 潜能的关键所在, 决定了被动波束的有效形成, 确保了高频信号传输衰减、直达链路受阻等因素影响下通信网络性能的提升, 对复杂环境下通信链路调整有决定性作用,

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

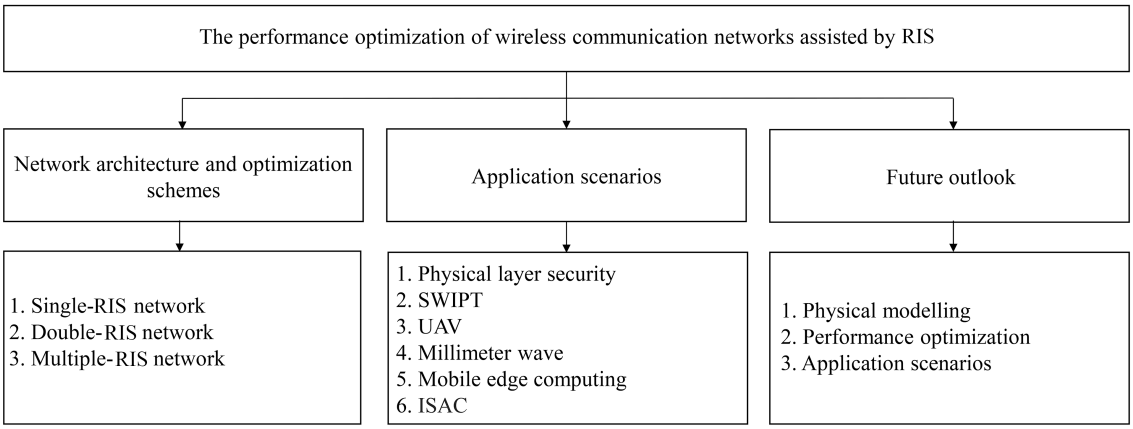


图 1 本文体系架构图

Figure 1 Overall architecture of this paper

是推动 RIS 技术进一步实现自动化波束设计的重要措施. 因此, RIS 辅助的无线通信网络性能优化是实现 6G 通信网络达到其在能效及速率等方面更高要求的关键途径.

针对不同应用场景, 通信网络对传输速率和能耗的要求也具有显著差异. 在干扰严重且对速率要求不高的网络环境中可部署单个 RIS, 对有源波束和无源波束进行优化, 减轻干扰的同时尽可能降低控制 RIS 产生的能耗. 对于高速率需求场景, 单 RIS 带来的增益不足以满足性能要求, 因此需要在通信网络中部署两个或者多个 RIS, 通过同时调节多个 RIS 的开关、幅值和相位, 不仅能够降低网络能耗, 还能够实现多路信号在接收者处的叠加, 从而大幅提升信息速率. 此外, 从通信网络优化框架的角度, 对于 RIS 辅助的无线通信网络, 目前绝大多数资源分配 (resource allocation, RA) 方案为集中式优化算法, 即由中心节点独立地执行优化算法 [15~27], 集中式优化算法能够获得全局信道状态信息, 因此能够实现更高的信息传输速率. 然而对于 RIS 辅助的多基站通信网络, 由于基站数量和用户数量的增多, 导致中心节点处的资源分配负担显著增加, 同时会降低资源分配可靠性. 通过设计分布式资源优化算法 [28], 利用多基站协作能够降低中心节点处的计算负担, 缩短资源分配时间以适应动态无线传输环境. 由此可见, 研究不同架构的 RIS 辅助通信网络的性能优化具有重要意义. 本文着重介绍目前 RIS 辅助通信网络的主要网络架构, 包含单 RIS、双 RIS 和多 RIS 辅助的通信网络, 并对现有研究工作和相应的性能优化方案进行总结, 最后介绍 RIS 辅助通信的应用场景和未来研究展望. 为了清晰地理解本文内容, 图 1 展示了本文主要内容的体系架构.

2 网络架构及其性能优化方案

由于大量终端用户共用频谱资源, 导致信道干扰严重, 通过在无线通信网络中部署 RIS, 能够在减轻干扰的同时提升信息传输速率, 并降低网络能耗. 进一步地, 需要部署不同数量的 RIS 以满足差异化的需求场景, 本节将对单 RIS、双 RIS 和多 RIS 辅助的通信网络架构和相应的性能优化方案进行详细介绍.

2.1 单 RIS 辅助的通信网络

单 RIS 辅助通信是网络仅通过部署单个 RIS 来建立基站与用户之间的通信链路, 通常适用于用户稀疏或者没有太多障碍物遮挡的小规模网络. 单 RIS 辅助的通信网络可分为无源 RIS、有源 RIS 和

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

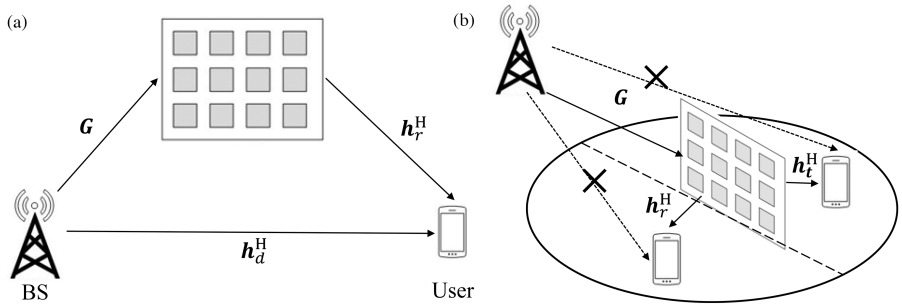


图 2 (a) 无源/有源单 RIS 方案; (b) STAR-RIS 方案

Figure 2 (a) Passive/active single-RIS scheme; (b) STAR-RIS scheme

STAR-RIS (simultaneously transmitting and reflecting RIS) 辅助的通信网络, 其中有源 RIS 能够实现信号的放大, STAR-RIS 可以实现 360° 的信号覆盖, 示意图分别如图 2(a) 和 (b) 所示.

2.1.1 无源 RIS

无源 RIS 工作时无需额外提供电源, 因此能够显著降低通信网络能耗. 通过调整 RIS 所有无源元件的幅值和相移系数, 反射信号可以与其他路径的信号相干地叠加, 以提高接收信号功率, 或者在非预期接收器处进行破坏性相加, 以抑制干扰并增强信息安全. 无源 RIS 辅助通信网络的性能优化是当前研究的热点, 已有大量研究成果. 文献 [15] 考虑了单 RIS 辅助的无线通信网络, 具有 N 个反射单元的 RIS 反射系数矩阵可以表示为 $\boldsymbol{\Theta} = \mathrm{diag}(\beta_1 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_1}, \ldots, \beta_n \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_n}, \ldots, \beta_N \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_N})$, 其中 $\beta_n \in [0,1]$ 和 $\theta_n \in [0, 2\pi)$ 分别代表第 n 个反射单元的幅值系数和相移系数, j 为虚数单位. 因此基站和用户 k 间的信道系数可以建模为 $\boldsymbol{h}_k = \boldsymbol{h}_{r,k}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{\Theta} \boldsymbol{G} + \boldsymbol{h}_{d,k}^{\mathrm{H}}$, 其中 $\boldsymbol{G}$, $\boldsymbol{h}_{r,k}^{\mathrm{H}}$, $\boldsymbol{h}_{d,k}^{\mathrm{H}}$ 分别代表基站与 RIS 间, RIS 与用户 k 间, 基站与用户 k 间的信道系数, 因此用户 k 处接收到的信号表示为

$$y_k = \boldsymbol{h}_k \sum_{q=1}^{K} \boldsymbol{w}_q s_q + \zeta_k, \tag{1}$$

上式中, s_q 和 $\boldsymbol{w}_q$ 分别表示为用户 q 传输的数据信号和有源波束, ζ_k 表示在用户 k 端接收到的噪声信号. 研究表明, 通过在 SISO 场景中设置无穷多个反射单元, 功耗方面能够实现 N^2 的性能增益. 此外, RIS 能够增强传统无线网络的信息安全性能 [16~26] 和能量效率 [27]. 其中, 文献 [16] 研究窃听信道比合法信道更强的网络场景, 通过利用交替优化方法将原问题分解为有源波束和 RIS 系数优化子问题, 然后利用半正定放缩方法进行求解, 结果表明通过调节 RIS 系数能够提升信息安全传输速率. 进一步地, 文献 [17, 23] 引入人工噪声干扰窃听者, 以降低窃听者处接收到的信息速率. 为了提高通信网络灵活性, 文献 [24~26] 通过利用连续凸逼近技术对无人机飞行轨迹进行优化, 使得无人机靠近合法用户, 同时远离窃听者, 从而保证信息安全. 文献 [27] 研究 RIS 辅助通信网络中的能量效率最大化问题, 利用 Dinkelbach 算法和梯度下降法优化 RIS 相移系数, 与传统的有源中继相比, 能够实现 300% 的能量效率提升. 文献 [28] 针对 RIS 辅助的异构无线通信网络, 提出了集中式和分布式资源分配方案, 对信道分配、用户发射功率和 RIS 系数矩阵进行联合优化, 结果表明集中式资源分配方案能够实现更高的网络吞吐量, 而分布式资源分配方案由于微基站也参与资源优化, 能够极大缩短资源分配时间. 此外, 通过对 RIS 位置进行优化, 能够进一步提升信息传输速率 [29]. 表 1 对集中式和分布式资源分配方案进行总结比较.

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

表 1 集中式和分布式资源分配方案对比

Table 1 Comparisons between centralized and distributed RA schemes

	Centralized RA schemes	Distributed RA schemes
Implementation of schemes	Central node	Multiple BSs
Applicable scenarios	RIS-aided single-BS network	RIS-aided multi-BS network
Advantages of schemes	Improve the transmission rate	Reduce the burden of central nodes

2.1.2 有源 RIS

由于 RIS 链路存在双衰减特性并且要求尺寸不能过大, 且无源 RIS 无法对信号进行放大, 导致无源 RIS 辅助的通信网络速率和覆盖性能受限. 因此, 研究者们提出有源 RIS 解决方案, 其中反射元件均为有源器件, 能够对接收到的信号进行放大处理 [30~35]. 有源 RIS 的反射系数矩阵能够表示为 $\boldsymbol{\Phi} = \mathrm{diag}(a_1 \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_1}, \ldots, a_n \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_n}, \ldots, a_N \mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_N})$, 其中 $a_n \in [0, a_{n,\max}]$, $a_{n,\max} \geqslant 1$. 对于无源 RIS, $a_{n,\max} = 1$, 即无源 RIS 不能放大信号, 因此, 从数学表达式上看出, 无源 RIS 可以被当作有源 RIS 的一种特例. 不同于无源 RIS, 由于有源 RIS 具有放大功能, 因此有源 RIS 引入的噪声不可忽略. 文献 [30] 研究了有源 RIS 辅助的单基站单用户系统, 对 RIS 反射系数矩阵和接收波束进行联合优化, 首先利用交替优化方法对原问题进行分解, 然后借助连续凸逼近技术对 RIS 反射系数进行求解, 结果表明相比无源 RIS, 有源 RIS 能够显著提高信息传输速率. 文献 [33] 考虑有源 RIS 辅助的信息安全传输系统, 利用交替优化算法、半正定放缩和最小化最大化算法对基站发射波束、RIS 反射元件放大系数和相移系数, 提升了信息安全传输速率. 此外, 文献 [34] 结果表明通过利用有源 RIS, 能够降低移动边缘计算网络中的任务完成时延.

2.1.3 STAR-RIS

在传统 RIS 辅助的无线通信网络中, 由于 RIS 仅具有反射功能, 发射端和接收端必须位于 RIS 同侧, 因此导致了半空间的智能射频环境 [36], 限制 RIS 部署和应用的灵活性. 为了解决这个问题, 同时传输和反射 RIS (STAR-RIS) 的概念被提出 [37,38]. STAR-RIS 能够同时反射和传输入射信号, 实现全空间 360° 的信号覆盖, 其主要有 3 种工作方式, 分别为能量分离 (energy splitting, ES) 方式、模式转换 (mode switching, MS) 方式和时间转换 (time switching, TS) 方式. 传统 RIS 仅需要优化反射系数, 然而 STAR-RIS 需要同时优化传输系数和反射系数, 能够更加灵活地控制反射区和传输区的能量分配, 当更多用户位于传输区时, STAR-RIS 分配更多的能量到传输区, 从而极大提升网络吞吐量. 定义 STAR-RIS 中第 m 个元件的传输系数为 $F_m^t = \sqrt{\beta_m^t}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_m^t}$, 反射系数为 $F_m^r = \sqrt{\beta_m^r}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\theta_m^r}$, 由于需要遵循能量守恒定律, 因此 $\beta_m^t + \beta_m^r = 1$. 对于工作在 TS 方式的 STAR-RIS, 时间约束也需要被满足, 即 $\lambda^t + \lambda^m = 1$, 其中 λ^t 和 λ^m 分别表示 STAR-RIS 进行传输和反射的时间比例. 文献 [36] 考虑单播通信和多播通信两种场景, 针对 STAR-RIS 辅助的单基站 – 单反射用户 – 单传输用户网络, 提出一种基于惩罚的迭代算法优化基站波束和 STAR-RIS 系数, 结果表明通过部署大量的 STAR-RIS 元件, 相比传统仅反射 RIS, STAR-RIS 能够实现更低的功率消耗. 文献 [39~41] 研究了 STAR-RIS 辅助的非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 系统, 实现从 “基于信道条件的 NOMA” 到 “基于信道质量的 NOMA” 的转换, 同时能够提高网络连接容量. 更进一步地, 文献 [42] 通过引入辅助变量, 并构建非凸函数的凸下界函数, 对 STAR-RIS 位置进行优化, 实现 STAR-RIS 的最优部署. 文献 [43] 引入人工噪声, 旨在最大化网络信息安全传输速率. 文献 [44] 研究了 STAR-RIS 辅助的 MEC 网络中的能量最小化问题, 利用连续秩一约束放缩方法对 STAR-RIS 系数进行优化.

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

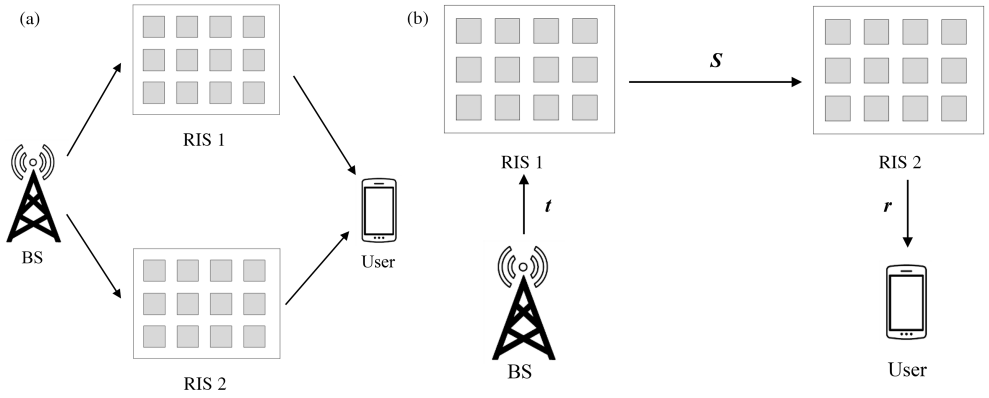


图 3 (a) 单反射双 RIS 方案; (b) 双反射双 RIS 方案

Figure 3 (a) Single-reflection double-RIS scheme; (b) double-reflection double-RIS scheme

2.2 双 RIS 辅助的通信网络

在用户密集或者障碍物众多的复杂环境中, 单 RIS 部署方案对网络性能提升只能起到有限作用, 难以确保用户接收到的信号强度. 一方面, 对于业务密集的热点区域, 单 RIS 带来信号传输的复用增益是有限的, 可能无法满足用户的需求. 另一方面, 对于高大建筑物的阴影区域或者室内外和公共交通工具内外的信号接驳等场景, 单 RIS 可能无法覆盖基站的信号盲区和远距离通信用户. 为了解决上述问题, 学术界和工业界开始关注双 RIS 辅助通信, 以提高用户体验并减少信号空洞. 双 RIS 辅助通信网络通常适用于用户密集或者障碍物众多的小规模网络. 双 RIS 辅助通信主要包括单反射和双反射双 RIS 辅助方案, 其架构图分别如图 3(a) 和 (b) 所示.

2.2.1 单反射双 RIS 方案

对于如商场、演唱会、体育场等业务密集的热点区域, 通过部署两个 RIS 进一步增加额外的无线通信路径与信道子空间, 从而可以提高信号传输的复用增益, 显著提升系统及用户的传输性能. 如图 3(a) 所示, 单反射双 RIS 辅助是将基站发出的信号分别通过两个 RIS 反射到目标用户上以实现多流增速的目标. 为了准确描述改方案, 文献 [45] 将基站与用户间的信道建模为

$$H = \boldsymbol{h} + \sum_{q=1}^{2} \boldsymbol{H}_{q,b}\mathrm{diag}(\boldsymbol{\theta}_{q,t})\boldsymbol{h}_{q,u}, \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{h}$ 是用户与基站间的直接信道链路, $\boldsymbol{h}_{q,u}$ 是用户与 RIS q 间的信道链路, $\boldsymbol{H}_{q,b}$ 是基站与 RIS q 间的信道链路, $\boldsymbol{\theta}_{q,t}$ 是 RIS q 的反射系数. 文献 [45] 利用交替优化和投影梯度下降法调整两个 RIS 的反射系数, 使得信道估计误差最小. 对于具有非正交多址的无线传能网络, 文献 [46] 利用双 RIS 增强基站与用户间的通信与能量传输效率, 通过联合优化时间分配和 RIS 相移参数实现了网络传输性能最大化.

2.2.2 双反射双 RIS 方案

单 RIS 通信网络可能还会存在覆盖空洞区域, 如在具有众多障碍物场景下的街道信号覆盖, 或者单 RIS 反射无法覆盖远距离用户. 为了保证基站发射的信号可以覆盖到每一个用户, 文献 [47] 首次提出了双 RIS 双反射辅助通信方案, 如图 3(b) 所示, 双 RIS 双反射通信方案是在基站和用户之间部署

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

两个 RIS, 基站发射的信号依次经过两个 RIS 反射到用户上以实现信号覆盖补盲的目标, 此方案下基站和用户间的信道可以建模为

$$h = \boldsymbol{r}\boldsymbol{\Phi}_2\boldsymbol{S}\boldsymbol{\Phi}_1\boldsymbol{t}, \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{t}$, $\boldsymbol{S}$ 和 $\boldsymbol{r}$ 分别是基站到 RIS 1, RIS 1 到 RIS 2 以及 RIS 2 到用户的信道增益, $\boldsymbol{\Phi}_1$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_2$ 分别是 RIS 1 和 RIS 2 反射系数矩阵. 对于一个单基站单用户的网络场景, 文献 [48] 对双层 RIS 方案进行了有效的信道估计和无源波束设计, 在考虑训练开销和信道估计误差的同时实现数据传输效率的最大化. 文献 [49] 将单基站单用户网络场景推广到了多输入多输出网络, 并利用可视信道的特征, 提出了一种无关于 RIS 元件数目的低复杂度算法来获得最佳发射协方差矩阵和无源波束矩阵, 使得网络容量达到最大化.

最近, 在实际场景下, 运营商在实施双层 RIS 通信方案时会将一个 RIS 部署在室外, 另一个 RIS 部署在室内, 从而完成从室外基站到室内用户的通信任务. 对于 RIS 同时部署在室内与室外的架构, 文献 [50] 准确地建立了信干噪比模型, 并分析了网络的频谱效率、能量效率和信号中断概率.

2.3 多 RIS 辅助的通信网络

在未来的大规模通信网络中, 用户规模的日益增加使得网络环境日趋复杂. 部署单/双 RIS 可能无法满足每一个用户的需求或者无法覆盖每一个信号空洞 [3]. 因此大量的研究人员尝试部署多个 RIS 来进一步提升其多流增速和覆盖补盲的能力, 以期望可以保证基站到每一个用户的服务质量. 作为双 RIS 方案的推广, 多 RIS 辅助通信网络通常适用于用户密集或者障碍物众多的大规模网络.

在基站与用户之间存在密集的障碍物环境下, 基站可以通过多个 RIS 将发射的信号多次反射到每个用户, 这种多跳信号的方式传输在绕过分散障碍物的同时也可以有效利用 RIS 间的协同波束形成增益. 文献 [51] 在多个 RIS 中选择合适的 RIS 来建立基站和用户间的多跳级联信道链路, 从而可以增强用户端的接收信号功率. 为此, 文献 [52] 中优化了基站处有源波束向量和 RIS 处无源波束向量, 并利用图论设计了 RIS 选择和波束路由的最佳方案, 从而获得了最大的级联信道功率. 为了使得所有用户中最小接收信号功率最大化, 文献 [52] 为每个用户选择最优的 RIS、波束路由路径, 以及基站的有源波束向量和 RIS 的无源波束向量, 在有效权衡性能和算法复杂度的前提下, 提出了一种有效的递归算法来列举可行路由解.

在用户密集区域, 当 RIS 之间部署距离较远时, 用户可以同时接收来自多个 RIS 的信号. 在此网络架构下, 文献 [53] 利用拉格朗日法 (Lagrange method) 和黎曼 (Riemann) 流形共轭梯度方法联合优化基站的波束向量和 RIS 的相移量, 提升了所有边缘用户的加权求和速率. 文献 [54] 利用协方差矩阵适应演化策略分别优化了单个用户的信噪比和多个用户的速率和. 基于联邦学习方法, 文献 [55] 在最大化网络吞吐量的同时, 对网络传输和计算开销进行了分析并建立了精确的能耗优化模型.

相比于单基站的小规模架构, 多基站的大规模通信网络架构更契合未来的通信场景. 考虑到设备在实际中可能存在硬件损坏的情况, 文献 [56] 利用交替优化和凸凹过程等方法, 提出了非高斯信号方案来提升网络的频谱和能量效率. 随后, 文献 [57] 在文献 [56] 的基础上, 并利用速率分拆技术和 STAR-RIS, 进一步提升了多蜂窝通信网络的频谱和能量效率.

为了更清晰地理清现有研究结果, 表 2 [15~57] 从网络架构类别、性能优化问题、优化变量和优化方案 4 个方面总结了上述工作. 从表 2 中可知, 目前研究的 RIS 辅助通信网络主要为单无源 RIS、双无源 RIS、多无源 RIS、单有源 RIS 和 STAR-RIS 辅助的通信系统, 关注的网络性能指标主要集中在最大化能量效率、最大化传输速率/网络吞吐量和最大化信噪比, 网络中能够调控的资源主要包含基

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

表 2 RIS 辅助的通信网络性能优化研究问题比较

Table 2 Problem comparisons in RIS-assisted communication networks in terms of performance optimization

References	Architecture	Performance	Variable	Algorithm
[15∼29]	Single passive RIS	Energy efficiency Transmission rate	Active beamforming Passive beamforming Artificial noise beamforming	Successive convex approximation Dinkelbach algorithm Alternating optimization
[30∼35]	Single active RIS	Signal-to-noise ratio Secure outage probability Energy efficiency	Active RIS beamforming Transmitting beamforming Receiving beamforming	Fractional programming Block coordinate descend Majorization-minimization Semi-definite relaxation
[36∼44]	STAR-RIS	Effective capacity Energy efficiency Throughput	Active beamforming Passive beamforming Decoding order Power allocation factor Location of STAR-RIS	Penalty method Successive convex approximation Successive constraint relaxation Alternating optimization Fractional programming
[45, 46]	Single-reflection double RISs	Channel estimation error Throughput	Transmission matrix Time allocation factor	Alternating optimization Projected gradient descent
[47∼50]	Double-reflection double RISs	Channel estimation Throughput Spectral efficiency Outage probability	Active beamforming Passive beamforming Routing path	Alternating optimization Convex optimization
[51, 52]	Multi-reflection multiple RISs	Received power	Active beamforming Passive beamforming Routing path	Graph theory Alternating optimization
[53∼57]	Single-reflection multiple RISs	Signal-to-noise ratio Throughput Spectral efficiency	Active beamforming Passive beamforming	Lagrange method Evolutionary method Federated learning Alternating optimization Convex-concave procedure

站/用户的有源波束和 RIS/STAR-RIS 的无源波束, 常用的优化方法包括连续凸逼近、Dinkelbach 算法、交替优化方法以及凸优化理论等. 此外, 表 3 总结了目前通信网络性能优化常用的方法及其主要特征. 从表 3 中可知, 对于简单的凸优化问题, 可以利用梯度下降法求得全局最优解, 然而对于具有大规模等式约束的凸优化问题, 需要利用交替方向乘子法进行求解. 在无线通信网络中, 性能优化问题一般为复杂的多变量非凸问题, 对于这种问题, 需要借助交替优化、连续凸逼近和 Dinkelbach 算法首先将非凸优化问题转换为凸优化问题, 然后利用凸优化理论进行求解.

3 RIS 辅助通信的应用场景

通过灵活地调节 RIS 系数, 能够将传统的不可控信道变为可控信道, 进而改善无线传播环境, 并提高无线网络的覆盖范围. 这使得 RIS 技术能够被广泛应用于无线通信网络中, 通过将 RIS 与新兴技术协同集成, 以下几个应用场景的性能优化受到研究者们的重点关注.

3.1 物理层安全

由于无线传输的广播特性, 无线传输容易受到诸如恶意攻击或安全信息泄露的安全威胁. 物理层安全技术利用无线信道的唯一性、时间可变性及空间去相关性等特质对信息传输进行加密, 具有良好

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

表 3 RIS 辅助的通信网络性能优化方案总结

Table 3 A summary of performance optimization schemes in RIS-aided communication networks

Algorithm	Idea	Problem	Advantage	Limitation
Gradient descent	Solve the minimum along the direction of gradient descent	Convex	Global optimality	Heavy computational burden
Alternating direction method of multipliers	Decompose the complex problem into several tractable sub-problems	Large-scale convex	Handle large-scale equality constraints	Slow convergence rate
Alternating optimization	Optimize a set of variables in each iteration	Semi-convex	Wide range of application	Local optimality
Successive convex approximation	Transform the non-convex function into a convex one	Non-convex	Deal with non-convex constraints	Find an appropriate convex function
Dinkelbach algorithm	Transform the fractional function into a subtraction-form one	Fractional programming	Fast convergence rate	Heavy computational burden

的适应物理层变化的能力. 然而当合法用户和窃听者位于相同方向, 且窃听者信道强度更强时, 窃听者能够完全接收信息, 因此传统的安全传输方案将不再适用. 然而在安全通信网络中部署 RIS, 通过改变 RIS 系数能够压制窃听信道, 并且提升合法信道, 使得信号在合法用户处相干地叠加, 在窃听者处破坏性地相加, 从而进一步提高传统无线网络的保密速率 [58,59]. 最近, 文献 [60] 提出一种基于协作干扰的混合 RIS 和中继辅助的安全传输方案, 通过利用人工噪声干扰多输入单输出 MISO 系统中窃听者的信道质量以提升物理层安全.

3.2 无线携能通信

RIS 可以作为一个多阵元发射机实现信息信号和能量信号的同步传输. RIS 的每个反射单元能够对来自基站的信息信号和能量信号的幅值、相位和极化方向进行实时调控, 并将调控后的信号分别反射到相应的信息接收端和能量接收端. 通过优化 RIS 幅值和相位, 能够增加信息传输信道和能量传输信道的增益, 使得在相同的发射功率下, RIS 辅助的无线携能通信系统能够实现更高的传输速率和更有效的能量接收 [61,62]. 文献 [63] 通过对 RIS 进行分模块设计, 并考虑信息和能量的辅助传输约束, 建立联合发射波束设计、RIS 模块分割比决策及相移设计的混合资源分配优化模型. 该优化模型在信息传输和能量收集方面, 均可得到较大的信息传输 – 能量收集区域, 并显著提高系统性能.

3.3 无人机通信

通过优化地面 RIS 的反射系数, 能够提升无人机与地面节点通信性能 [64]. 进一步地, 若将 RIS 部署在无人机上, 形成空中 RIS 平台 [65], 能够扩大服务范围, 实现空中智能通信. 与传统的地面 RIS 相比, 由于空中 RIS 一般位于较高的位置, 更容易与地面用户建立强的视线链路, 同时无线信道被障碍物阻挡的概率降低. 通信网络的速率和能效与 RIS 的位置密切相关, 因此对于空中 RIS, 无人机/RIS 的移动位置需要进行优化, 在保证无人机续航的同时以最优轨迹进行飞行, 从而最大化网络传输速率和能效. 文献 [66] 搭建了一种机载 RIS 的无人机系统进行无线通信, 解决了可编程数字编码超表面的无线控制问题. 携带 RIS 和现场可编程门阵列的无人机作为可移动的空中基站飞行, 成功地将通信信

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

号反射给目标用户.

3.4 毫米波通信

毫米波信号具有带宽大、波束窄、传输质量高等特征, 但由于其属于高频信号, 导致路径损耗较大. 为克服严重的路径损耗, 发射端和接收端通常配备大规模天线阵列以实现信号定向传输, 强指向性的波束和毫米波信道的稀疏性会导致秩亏的信道矩阵. 在这种情况下, 无法发挥多天线系统的空间复用优势. 为解决信道秩亏问题, 可在基站和终端用户之间部署 RIS, 利用 RIS 的信道调控能力, 构造秩可调的信道矩阵, 提升系统空间复用能力 [67]. 文献 [68] 为应对毫米波通信加入 RIS 进行辅助通信导致系统变复杂难以获得信道状态信息这一挑战, 采用了混合智能反射表面结构, 即 RIS 由大量无源元件和有限的射频链构成. 通过多信号分类算法对信道的离开角和到达角同时进行估计, 并利用深度神经网络对路径增益进行估计, 成功避免了在对复数训练时出现相位缺失的情况.

3.5 移动边缘计算

通过在移动边缘计算系统中部署 RIS, 能够进一步提升传输速率, 降低网络时延 [69]. 具体来讲, 对于需要卸载任务的用户, 由于 RIS 能够增强用户和边缘云服务器之间的信道链路, 使得无需消耗额外的能量便能够降低任务传输时间. 此外, 通过调节 RIS 系数, 每个用户卸载任务比例也会被相应改变, 从而导致边缘云服务器占用资源发生变化, 因此能够根据服务器实时计算能力, 对 RIS 系数进行灵活调节. 针对一种 RIS 辅助移动边缘计算系统, 文献 [70] 提出了一种新的协议来节省用户端能耗, 其中系统可以根据信道状态信息、RIS 电池的能量状态与用户任务队列状态, 自适应地在能量收集模式、RIS 辅助任务卸载模式和 RIS 待机任务卸载模式中选择一种合适的工作模式.

3.6 通感一体化

通信与感知融合共生, 实现通信感知一体化已成为通信网络发展的主流趋势, 但在实际应用中, 通感一体化面临着环境依赖度高、覆盖范围有限、成本功耗高的挑战 [71]. RIS 辅助的通感一体化是一种前沿的融合技术, 它结合了 RIS 技术和通信感知一体化技术, 旨在实现更高效、可靠和安全的通信. 在通感一体化网络中部署 RIS 可以通过构建虚拟视距路径来解决信号盲区覆盖问题, 从而为盲区用户提供通信和感知服务. 此外, 通过联合设计收发端和 RIS 波束, 可以更加精准地满足通信和感知的需求. 例如, 在通信方面, RIS 可以根据实时感知的信道状态信息动态调整其反射特性, 以优化信号的传输路径和功率分配, 从而提高通信的频谱效率和可靠性. 在感知方面, RIS 可以协助生成虚拟视距链路, 增强感知目标的信号强度, 提高感知的准确性和灵敏度.

4 未来研究展望

相比于现有的通信网络, RIS 的部署在网络能效、空间占有以及用户体验等方面具有明显的优势. 但面对万物智联的未来通信网络, 若不能进一步提升 RIS 的性能将难以实现 6G 网络中大连接、高带宽和低时延场景下的通信需求. 此外, 目前大多数现有的关于 RIS 性能优化研究都是以仿真为验证的理论分析, 还远无法达到真正应用到实际通信网络中的地步 [72]. RIS 性能优化的未来研究主要涉及物理建模、性能优化方案和应用场景扩展等方面.

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

4.1 RIS 的物理建模

现有研究将 RIS 上的每个单元都建模成独立的理想移相器, 假设 RIS 反射单元的相位是连续且任意可调的. 然而, 在 RIS 的实际设计中, 要实现反射单元相位从 0 到 2π 的连续可调, 需要连续的偏压或者其他外部条件来驱动变容二极管、石墨烯和铁电薄膜等器件, 这不仅需要更复杂、更高精度的控制电路, 还会导致生产成本的上涨, 无论从技术上还是实现上均具有挑战性. 因此, 在实际应用中 RIS 一般采用离散相移调节方式. 在复杂的信道环境中, 对于这种具有离散相移的 RIS, 如何构建精准的 RIS 反射信道模型是提升网络性能的关键所在. 此外, 单 RIS 无法满足未来大规模通信场景用户需求, 因此多 RIS 的部署日趋重要, 现有研究忽略了 RIS 之间的相互影响关系, 极大地影响了整个网络的性能评估. 当考虑多 RIS 间的反射信号时, 无线传播环境将变得极其复杂, 如何对接收端处的接收信号进行准确建模是一大难点. 而且, RIS 硬件材料的更新也会影响 RIS 的模型参数. 因此, 后续研究需要对 RIS 的物理模型以及无线信道模型进行准确建模.

4.2 RIS 的性能优化

针对更加全面通信性能目标 (如系统容量、频谱优化、网络性能和运营成本), 后续研究应当提高联合设计优化算法的性能. 注意到现有的网络优化方案大都是集中式的. 集中式方案中, 需要一个中央处理器收集网络节点 (基站、RIS 和用户) 和无线信道的所有状态信息. 中央处理器在集中决策之后, 将最优的行为指令下发给各通信节点以执行. 一旦中央处理器发生故障或数据泄露, 将会影响整个网络的正常运行. 在分布式方案中, 基站通过邻居基站的信息, 可以独立管理相关联的 RIS 和用户行为. 分布式方案不仅省略了参数收集和行为指令下发的流程, 还将中央处理器的全局决策任务划分为多个子任务在每个基站上并行执行. 相比于集中式方案, 分布式方案可以显著减少信令开销和降低计算负荷. 因此, 研究分布式优化方案是一个非常有意义且重要的方向. 此外, 通信网络中构建的问题一般为混合整数非线性规划问题, 现有算法一般利用交替优化方法和变量放缩方法先将这类问题转换为易处理的凸优化问题, 然后借助凸优化理论进行求解, 然而这种处理方式会降低网络性能, 因此设计一种针对混合整数非线性规划问题的求解算法极其重要, 这也是目前优化理论亟待突破的领域.

4.3 RIS 的应用场景扩展

目前 RIS 的性能优化主要应用在覆盖补盲和多流增速场景. 传统的蜂窝部署可能存在覆盖空洞区域, 如在高大建筑物的阴影区域, 对于这种场景, 可将 RIS 部署在基站与覆盖盲区之间, 通过有效地反射/透射使传输信号到达覆盖盲区, 从而提升覆盖性能. 此外, 对于业务密集的热点区域, 可以通过 RIS 增加额外的无线通信路径, 从而提高信号传输的复用增益, 显著提升系统及用户的传输性能. 然而, 这远无法满足未来的实际场景需求. 在 6G 网络中, RIS 可能在高频通信、空间通信、三维定位、物联网、无线边缘计算、物理层安全、信能同传、频谱感知与共享、全双工通信、多小区通信系统、多组多播传输、轨道角动量、语义通信等方面有着巨大的潜在应用价值. 因此如何将 RIS 匹配这些应用场景, 并保证 RIS 为网络提供高效增益是重要的研究方向之一.

5 结论

RIS 利用集成在平面上的大量无源反射元件通过软件编程智能地配置无线传播环境, 从而极大地改善了移动通信系统中的信道环境、覆盖延伸和热点增强. RIS 的部署是实现 6G 网络中大连接、高带宽和低时延场景下的通信需求重要途径之一, 其中 RIS 的性能优化是保证 RIS 能够应用到未来通

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

信场景的必要前提. 因此本文针对不同的 RIS 通信网络架构, 总结了目前常见的性能优化问题、性能优化方案和应用场景, 并提出了 RIS 性能优化的目前瓶颈及其未来研究方向. RIS 辅助通信网络的性能优化将会给 6G 网络带来一种全新的范式, 推动多种应用场景建设, 突破产业发展瓶颈, 为未来网络发展奠定基础. 此外, 针对未来大规模无线通信网络, 由于要求全局信道状态信息的获取, 集中式资源分配方案会使得通信成本显著增加, 因此设计高效的分布式资源分配方案具有实际应用价值 [28, 73, 74].

参考文献

1 Yao J C, Xu W, Huang Y M, et al. Techniques for reconfigurable intelligent surface-aided 6G communication network: an overview. J Signal Process, 2022, 38: 1555–1567 [姚嘉铖, 许威, 黄永明, 等. 基于可重构智能表面的 6G 通信技术. 信号处理, 2022, 38: 1555–1567]
2 IMT-2030(6G) Promotion Group. 6G Typical Scenarios and Key Capabilities White Paper. 2022 [IMT-2030(6G) 推进组. 6G 典型场景和关键能力白皮书. 2022]
3 RISTA. Reconfigurable Intelligent Surface Technology White Paper. 2023 [智能超表面技术联盟. 智能超表面技术白皮书. 2023]
4 Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. Light Sci Appl, 2014, 3: e218
5 Zhou R Y, Tang W K, Li X, et al. A brief survey of mobile communications through reconfigurable intelligent surfaces. Mobile Commun, 2020, 44: 63–69 [周儒雅, 唐万恺, 李潇, 等. 基于可重构智能表面的移动通信简要综述. 移动通信, 2020, 44: 63–69]
6 Cui T J, Li L, Liu S, et al. Information metamaterial systems. iScience, 2020, 23: 101403
7 Wan X, Xiao C K, Huang H, et al. Joint modulations of electromagnetic waves and digital signals on a single metasurface platform to reach programmable wireless communications. Engineering, 2022, 8: 86–95
8 Wang Z X, Yang H Q, Shao R W, et al. A planar 4-bit reconfigurable antenna array based on the design philosophy of information metasurfaces. Engineering, 2022, 17: 64–74
9 Liu J N, Liu S C, Liu D, et al. Research on the application of 6G-oriented reconfigurable intelligent surface. Telecom Eng Tech Standardization, 2022, 35: 1–7 [刘吉宁, 刘少聪, 刘大, 等. 面向 6G 的智能超表面应用研究与思考. 电信工程技术与标准化, 2022, 35: 1–7]
10 Ma Q, Bai G D, Jing H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions. Light Sci Appl, 2019, 8: 98
11 Zhang X G, Jiang W X, Jiang H L, et al. An optically driven digital metasurface for programming electromagnetic functions. Nat Electron, 2020, 3: 165–171
12 Qiu T, Shi X, Wang J, et al. Deep learning: a rapid and efficient route to automatic metasurface design. Adv Sci, 2019, 6:
13 Tang W, Chen M Z, Chen X, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement. IEEE Trans Wireless Commun, 2021, 20: 421–439
14 Tang W, Dai J Y, Chen M Z, et al. MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: system design, analysis, and implementation. IEEE J Sel Areas Commun, 2020, 38: 2683–2699
15 Wu Q, Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming. IEEE Trans Wireless Commun, 2019, 18: 5394–5409
16 Cui M, Zhang G, Zhang R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface. IEEE Wireless Commun Lett, 2019, 8: 1410–1414
17 Hong S, Pan C, Ren H, et al. Artificial-noise-aided secure MIMO wireless communications via intelligent reflecting surface. IEEE Trans Commun, 2020, 68: 7851–7866
18 Ning B, Chen Z, Tian Z, et al. Joint power allocation and passive beamforming design for IRS-assisted physical-layer service integration. IEEE Trans Wireless Commun, 2021, 20: 7286–7301
19 Li J, Xu S, Liu J, et al. Reconfigurable intelligent surface enhanced secure aerial-ground communication. IEEE Trans Commun, 2021, 69: 6185–6197
20 Gong C, Yue X, Wang X, et al. Intelligent reflecting surface aided secure communications for NOMA networks. IEEE Trans Veh Technol, 2022, 71: 2761–2773

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

21 Luo J, Wang F, Wang S, et al. Reconfigurable intelligent surface: reflection design against passive eavesdropping. IEEE Trans Wireless Commun, 2021, 20: 3350–3364
22 Asaad S, Wu Y, Bereyhi A, et al. Secure active and passive beamforming in IRS-aided MIMO systems. IEEE Trans Inform Forensic Secur, 2022, 17: 1300–1315
23 Li B, Wu W, Li Y, et al. Intelligent reflecting surface and artificial-noise-assisted secure transmission of MEC system. IEEE Int Things J, 2022, 9: 11477–11488
24 Zhou X, Wu Q, Yan S, et al. UAV-enabled secure communications: joint trajectory and transmit power optimization. IEEE Trans Veh Technol, 2019, 68: 4069–4073
25 Pang X, Zhao N, Tang J, et al. IRS-assisted secure UAV transmission via joint trajectory and beamforming design. IEEE Trans Commun, 2022, 70: 1140–1152
26 Fang S, Chen G, Li Y. Joint optimization for secure intelligent reflecting surface assisted UAV networks. IEEE Wireless Commun Lett, 2021, 10: 276–280
27 Huang C, Zappone A, Alexandropoulos G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication. IEEE Trans Wireless Commun, 2019, 18: 4157–4170
28 Cai Y, Yu W, Nie X, et al. Joint resource allocation for RIS-assisted heterogeneous networks with centralized and distributed frameworks. IEEE Trans Circ Syst I, 2024, 71: 2132–2145
29 Zhu J, Huang Y, Wang J, et al. On the position optimization of IRS. IEEE Int Things J, 2022, 9: 11712–11724
30 Long R, Liang Y C, Pei Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications. IEEE Trans Wireless Commun, 2021, 20: 4962–4975
31 Khoshafa M H, Ngatched T M N, Ahmed M H, et al. Active reconfigurable intelligent surfaces-aided wireless communication system. IEEE Commun Lett, 2021, 25: 3699–3703
32 Zhu Q, Li M, Liu R, et al. Joint beamforming designs for active reconfigurable intelligent surface: a sub-connected array architecture. IEEE Trans Commun, 2022, 70: 7628–7643
33 Dong L, Wang H M, Bai J. Active reconfigurable intelligent surface aided secure transmission. IEEE Trans Veh Technol, 2022, 71: 2181–2186
34 Peng Z, Weng R, Zhang Z, et al. Active reconfigurable intelligent surface for mobile edge computing. IEEE Wireless Commun Lett, 2022, 11: 2482–2486
35 Wang Y, Lin Z, Niu H, et al. Secure satellite transmission with active reconfigurable intelligent surface. IEEE Commun Lett, 2022, 26: 3029–3033
36 Mu X, Liu Y, Guo L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications. IEEE Trans Wireless Commun, 2022, 21: 3083–3098
37 Xu J, Liu Y, Mu X, et al. STAR-RISs: simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces. IEEE Commun Lett, 2021, 25: 3134–3138
38 Liu Y, Mu X, Xu J, et al. STAR: simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces. IEEE Wireless Commun, 2021, 28: 102–109
39 Zuo J, Liu Y, Ding Z, et al. Joint design for simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS assisted NOMA systems. IEEE Trans Wireless Commun, 2023, 22: 611–626
40 Liu H, Li G, Li X, et al. Effective capacity analysis of STAR-RIS-assisted NOMA networks. IEEE Wireless Commun Lett, 2022, 11: 1930–1934
41 Fang F, Wu B, Fu S, et al. Energy-efficient design of STAR-RIS aided MIMO-NOMA networks. IEEE Trans Commun, 2023, 71: 498–511
42 Gao Q, Liu Y, Mu X, et al. Joint location and beamforming design for STAR-RIS assisted NOMA systems. IEEE Trans Commun, 2023, 71: 2532–2546
43 Han Y, Li N, Liu Y, et al. Artificial noise aided secure NOMA communications in STAR-RIS networks. IEEE Wireless Commun Lett, 2022, 11: 1191–1195
44 Zhang Q, Wang Y, Li H, et al. Resource allocation for energy efficient STAR-RIS aided MEC systems. IEEE Wireless Commun Lett, 2023, 12: 610–614
45 Bazzi S, Xu W. IRS parameter optimization for channel estimation MSE minimization in double-IRS aided systems. IEEE Wireless Commun Lett, 2022, 11: 2170–2174
46 Xie Z, Li X, Zeng M, et al. Resource allocation for double IRSs assisted wireless powered NOMA networks. IEEE Wireless Commun Lett, 2023, 12: 823–827

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

47 Han Y, Zhang S, Duan L, et al. Cooperative double-IRS aided communication: beamforming design and power scaling. IEEE Wireless Commun Lett, 2020, 9: 1206–1210

48 You C, Zheng B, Zhang R. Wireless communication via double IRS: channel estimation and passive beamforming designs. IEEE Wireless Commun Lett, 2020, 10: 431–435

49 Han Y, Zhang S, Duan L, et al. Double-IRS aided MIMO communication under LoS channels: capacity maximization and scaling. IEEE Trans Commun, 2022, 70: 2820–2837

50 Shaikh M H N, Bohara V A, Srivastava A, et al. An energy efficient dual IRS-aided outdoor-to-indoor communication system. IEEE Syst J, 2023, 17: 3718–3729

51 Mei W, Zhang R. Cooperative beam routing for multi-IRS aided communication. IEEE Wireless Commun Lett, 2020, 10: 426–430

52 Mei W, Zhang R. Multi-beam multi-hop routing for intelligent reflecting surfaces aided massive MIMO. IEEE Trans Wireless Commun, 2021, 21: 1897–1912

53 Li Z, Hua M, Wang Q, et al. Weighted sum-rate maximization for multi-IRS aided cooperative transmission. IEEE Wireless Commun Lett, 2020, 9: 1620–1624

54 Yin T, Li L, Lin W, et al. Joint active and passive beamforming optimization for multi-IRS-assisted wireless communication systems: a covariance matrix adaptation evolution strategy. IEEE Trans Veh Technol, 2023, 72: 9281–9292

55 Li L, Ma D, Ren H, et al. Toward energy-efficient multiple IRSs: federated learning-based configuration optimization. IEEE Trans Green Commun Netw, 2021, 6: 755–765

56 Soleymani M, Santamaria I, Schreier P J. Improper signaling for multicell MIMO RIS-assisted broadcast channels with I/Q imbalance. IEEE Trans Green Commun Netw, 2022, 6: 723–738

57 Soleymani M, Santamaria I, Jorswieck E A. Rate splitting in MIMO RIS-assisted systems with hardware impairments and improper signaling. IEEE Trans Veh Technol, 2022, 72: 4580–4597

58 Niu H, Lin Z, Chu Z, et al. Joint beamforming design for secure RIS-assisted IoT networks. IEEE Int Things J, 2023, 10: 1628–1641

59 Jia H, Ma L, Valaee S. STAR-RIS enabled downlink secure NOMA network under imperfect CSI of eavesdroppers. IEEE Commun Lett, 2023, 27: 802–806

60 Shi Y, Wu Y, Zhao D Q. Hybrid intelligent reflecting surface and relay assisted secure transmission scheme based on cooperative interference. J Comput Appl, 2024. doi: 10.4218/etrij.2023-0401 [石岩, 武岳, 赵冬青. 基于协作干扰的混合智能反射面和中继辅助安全传输方案. 计算机应用, 2024]

61 Ren H, Chen Z, Hu G, et al. Transmission design for active RIS-aided simultaneous wireless information and power transfer. IEEE Wireless Commun Lett, 2023, 12: 600–604

62 Ren J, Lei X, Peng Z, et al. RIS-assisted cooperative NOMA with SWIPT. IEEE Wireless Commun Lett, 2023, 12: 446–450

63 Shi C Y, Yue D W, Li Q, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted millimeter wave simultaneous wireless information and power transfer system. Radio Eng, 2024, 6: 1512–1521 [石陈荥, 岳殿武, 李琦, 等. 可重构智能表面辅助的毫米波无线携能通信系统研究. 无线电工程, 2024, 6: 1512–1521]

64 Ren H, Zhang Z, Peng Z, et al. Energy minimization in RIS-assisted UAV-enabled wireless power transfer systems. IEEE Int Things J, 2023, 10: 5794–5809

65 Tyrovolas D, Mekikis P V, Tegos S A, et al. Energy-aware design of UAV-mounted RIS networks for IoT data collection. IEEE Trans Commun, 2023, 71: 1168–1178

66 Zhang X Y, Kong X K, Liu Z Q, et al. Design and Verification of a communication system based on UAV with airborne reconfigurable intelligent surface. Chinese J Radio Sci, 2024, 39: 741–747 [张馨予, 孔祥鲲, 刘子庆, 等. 加载可重构智能超表面的无人机通信系统设计与验证. 电波科学学报, 2024, 39: 741–747]

67 Gong S, Xing C, Liu H, et al. Hardware-impaired RIS-assisted mmWave hybrid systems: beamforming design and performance analysis. IEEE Trans Commun, 2023, 71: 2317–2334

68 Fu Y H, Chen D. Channel estimation for hybrid intelligent reflecting surface structure assisted mmWave communications. J Commun, 2021, 42: 189–196 [傅友华, 陈栋. 混合智能反射表面结构辅助的毫米波通信信道估计. 通信学报, 2021, 42: 189–196]

69 Qin X, Song Z, Hou T, et al. Joint optimization of resource allocation, phase shift, and UAV trajectory for energy-efficient RIS-assisted UAV-enabled MEC systems. IEEE Trans Green Commun Netw, 2023, 7: 1778–1792

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060

70 Tang D, Huang X W, Luo Z W, et al. Design and optimization for wireless-powered IRS-aided mobile edge computing system. J Commun, 2023, 44: 79–92 [唐冬, 黄栩蔚, 罗至威, 等. 无线供能智能反射面辅助移动边缘计算系统设计与优化. 通信学报, 2023, 44: 79–92]
71 Hu X L, Yu Z Y, Qian X W, et al. Integrated sensing and communication in reconfigurable intelligent surface systems: status, design and outlook. Telecommun Sci, 2022, 38: 36–49 [胡小玲, 于周源, 钱骁伟, 等. 智能超表面系统的通信感知一体化: 现状、设计与展望. 电信科学, 2022, 38: 36–49]
72 Ma H B, Zhang P, Yang F, et al. Reflections on reconfigurable intelligent surface technology. ZTE Commun, 2022, 28: 70–77 [马红兵, 张平, 杨帆, 等. 智能超表面技术展望与思考. 中兴通讯技术, 2022, 28: 70–77]
73 Wang K, Fu Z, Xu Q, et al. Distributed fixed step-size algorithm for dynamic economic dispatch with power flow limits. Sci China Inf Sci, 2021, 64: 112202
74 Fu Z, Yu W W, Lü J H, et al. A distributed normalized Nash equilibrium seeking algorithm for power allocation among micro-grids. Sci China Tech Sci, 2021, 64: 341–352

A survey on the performance optimization of wireless communication networks assisted by reconfigurable intelligent surface

Wenwu YU[1,3*], Xiaokai NIE[2,4], Yujin CAI[5], Guangju LI[1], Hongzhe LIU[1], Qiang CHENG[6] & Tiejun CUI[6]

1. *School of Mathematics, Southeast University, Nanjing* 211102*, China*;
2. *School of Automation, Southeast University, Nanjing* 210096*, China*;
3. *Purple Mountain Laboratories, Nanjing* 211111*, China*;
4. *Shenzhen Research Institute, Southeast University, Shenzhen* 518057*, China*;
5. *School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing* 211102*, China*;
6. *School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing* 210096*, China*
* Corresponding author. E-mail: wwyu@seu.edu.cn

Abstract As a new generation of intelligent comprehensive digital information infrastructure, the 6th generation mobile communication (6G) deeply integrates the technologies of artificial intelligence, big data and advanced computing to build a new network mode of ubiquitous interconnection and efficient interworking of agents, which has a larger system capacity, faster information transmission rate and more intelligent and digital performance characteristics. Reconfigurable intelligent surface (RIS) is an emerging technology with great potential to drive the performance of future 6G communication networks to achieve super wireless bandwidth, hyperscale connectivity, and extremely reliable communication capabilities. This technology is based on a large number of low-cost passive reflection elements integrated on the digital metamaterial plane, and significantly improves the performance of wireless communication networks in complex scenarios through adaptive configuration of wireless propagation environments. The key to realizing adaptive dynamic regulation of communication links lies in the optimization of RIS-assisted network systems. Therefore, this paper provides a review of the relevant research literature on RIS-related network performance optimization in recent years, which summarizes the current research achievements and progress of RIS-assisted wireless communication network performance optimization from two aspects of RIS-assisted communication network architecture with performance optimization scheme, and application scenarios. This paper further discusses the potential future research directions of deployment of RIS-assisted communication networks.

Keywords reconfigurable intelligent surface, wireless communication networks, performance optimization, 6G

https://www.sciengine.com/doi/10.1360/SSI-2024-0060