

面向 UAV-RIS 网络的三维创新架构与算法-能源协同设计研究

阎庆昕¹, 胡冰^{2,3}, 王恩良¹, 孙知信^{2,3}

(1. 南京邮电大学物联网学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学江苏省邮政大数据技术与应用工程研究中心, 江苏 南京 210003;
3. 南京邮电大学国家邮政局邮政行业技术研发中心(物联网技术), 江苏 南京 210003)

摘要: 针对 6G 网络中可重构智能表面 (RIS) 辅助无人机 (UAV) 通信系统, 提出了三维创新架构与算法-能源协同设计的系统性研究框架。首先, 构建了涵盖空间域、时频域和功能域的 RIS 三维技术创新体系, 其中空间域实现全空间覆盖与多流复用, 时频域实现通信感知一体化与宽带波束成形, 功能域实现信号增强与环境自适应。其次, 建立了统一数学建模框架, 通过三维参数化散射模型实现各类架构的一致性描述。再次, 提出了算法-能源双轨协同优化方法, 通过阐述维度定制化算法和跨维度深度展开网络对协同优化方法展开讨论。最后, 结合实际应用场景的不同特点, 对不同 RIS 架构选择进行推荐, 为典型场景提供最优 RIS 架构配置。

关键词: RIS; 无人机通信; 三维创新; 6G 无线网络; 算法-能源协同优化

中图分类号: TP393.0

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025223

Research on innovative 3D innovation architecture and algorithms for UAV-RIS networks-energy collaborative design

YAN Qingxin¹, HU Bing^{2,3}, WANG Enliang¹, SUN Zhixin^{2,3}

1. Internet of Things College, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Jiangsu Postal Big Data Technology and Application Engineering Research Center, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

3. Postal Industry Technology R&D Center (Internet of Things Technology), State Post Bureau, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: A systematic research framework for reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted unmanned aerial vehicle (UAV) communication systems in 6G networks was proposed, focusing on three-dimensional innovative architecture and algorithm-energy collaborative design. Firstly, a three-dimensional RIS technology innovation system covering the spatial, time-frequency, and functional domains was constructed. The spatial domain achieved full-space coverage and multi-stream multiplexing, the time-frequency domain achieved integrated communication and sensing with broadband beamforming, and the functional domain achieved signal enhancement and environmental adaptation. Secondly, a unified mathematical modeling framework was established, achieving consistent description of various architectures through a three-dimensional parameterized scattering model. An algorithm-energy dual-track collaborative optimization method was proposed, and the collaborative optimization approach was discussed through dimension-customized algorithms and cross-dimension deep unfolding networks. Finally, based on the different characteristics of practical application scenarios, recommendations for different RIS architecture selections were provided, offering optimal RIS architecture configurations for typical scenarios.

Keywords: RIS, UAV communication, three-dimensional innovation, 6G wireless network, algorithm-energy collaborative optimization

收稿日期: 2025-09-23; 修回日期: 2025-12-03

通信作者: 孙知信, sunzx@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62272239, No.62302237);江苏省研究生科研创新计划基金资助项目(No.KYCX24_1203)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62272239, No.62302237), The Graduate Research Innovation Program of Jiangsu Province (No.KYCX24_1203)

0 引言

随着 5G 网络大规模商用, 6G 的研发已成为学术界与工业界的关注焦点。对于技术层面而言, 6G 预期在传输速率、连接密度和可靠性等方面性能实现显著提升, 还需要实现亚毫秒级时延与厘米级定位精度^[1], 以支持全息通信、数字孪生和元宇宙等融合应用^[2]。在这一进程中, 可重构智能表面 (RIS, reconfigurable intelligent surface) 因其能够主动塑造无线传播环境的独特能力而备受关注^[3]。RIS 与无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 的协同可以结合 UAV 的高机动性和 RIS 的智能电磁调控能力, 为改善传统地面网络覆盖受限和部署成本高的问题提供了新思路^[4], 在城市增强、应急通信和偏远覆盖等场景中具有广泛应用潜力^[5]。

然而, 传统 RIS 基于单一的反射机制或透射机制, 仅能服务位于同侧的用户, 其半空间覆盖限制制约了其实际应用范围, 面临“双重衰落”的问题^[6]。研究人员提出通过主动 RIS 增强信号放大克服乘性衰落。Zhang 等^[7]的实验验证表明, 64 个主动 RIS 单元可以实现 130% 通信和速率提升, 吞吐量从 1~2 Mbit/s 提升至 30 Mbit/s。同时透射和反射可重构智能表面 (STAR-RIS, simultaneously transmitting and reflecting RIS) 应运而生, 其能在同一超表面独立调控透射与反射波束, 实现全空间通信。从技术演进观察, RIS 正经历从被动反射到主动增强、从对角相移到超对角可重构智能表面 (BD-RIS, beyond diagonal RIS)、从单功能到多功能集成的转变。BD-RIS 通过引入元件间耦合, 突破了传统 RIS 的秩 1 限制, 实现了多流复用, 频谱效率提升 2~3 倍。此外, 时空编码 RIS 实现了频率变换与非互易特性, 宽带真时延 RIS 解决了波束偏斜问题, 自感知 RIS 则具备环境感知与自适应配置能力^[8]。混合主动-被动架构可以有效实现通信性能与消耗成本之间的平衡, Nguyen 等^[9]通过实验证明, 仅需 4 个主动元件即可实现 38%~63% 最小速率提升。

然而, UAV-RIS 实际部署面临严峻挑战。在算法层面, 信道估计与波束成形的计算复杂度呈指数增长^[10]。当 RIS 元件数量从 256 增至 4 096 时, 传统凸优化算法计算复杂度从 $O(N^3)$ 增至 $O(N^4)$, 处理时延增加 256 倍^[11]。为了解决这个问题, 研究学者将目光转移到深度强化学习 (DRL, deep rein-

forcement learning)。Saleh 等^[12]采用长短期记忆深度 Q 网络 (LSTM-DQN, long short-term memory deep Q-network) 实现 60% 任务完成时间改进、93% 相对启发式方法提升。Mohsin 等^[13]提出了多输出近端策略优化 (MO-PPO, multi-output proximal policy optimization) 处理 CoMP-NOMA 网络的混合连续和离散参数, 通过动态自适应实现近乎最佳的性能。在能效层面, UAV 电池容量与 RIS 功耗无法协调平衡。被动 RIS 功耗仅 0.1~1 W 但性能受限, 主动 RIS 可提升 20~30 dB 增益但功耗达 10~100 W^[14]。Peng 等^[15]为 UAV-RIS 系统提出了一种基于无线信息与能量同时传输 (SWIPT, simultaneous wireless information and power transfer) 的双域能量收集 (EH, energy harvesting) 持久方案, 通过一种基于 SD3 的 SWIPT 进行求解, 仿真结果表明, 所提双域 EH 持久方案在动态通信环境下发射功率、反射元件相移、传输时间调度和 RIS 调度的联合优化中达到了近全局的最优。

尽管上述进展拓展了 RIS 潜力, 但在实际部署中, 其仍面临算法复杂度与能效的权衡挑战。随着 RIS 元件数增加, 主动 RIS 虽可克服“双重衰落”效应, 但功耗显著增加。因此能源优化在 UAV-RIS 研究中占据主导地位, 现有研究均涉及能源效率优化问题, 但同时考虑计算和能量成本的显式算法-能量协同设计几乎仍未被探索。大多数研究虽然优化了能耗, 但没有量化算法节省的能量是否超过执行算法所消耗的能量, 这对于实际应用场景中资源受限的 UAV 平台而言, 是一项亟须解决的挑战。

近期研究通过引入深度强化学习、联邦学习等人工智能技术, 以及基于瓦片的分组优化、元学习快速适应等创新方法, 为解决上述提出的多目标优化难题提供了新思路。在现有研究中, 针对 RIS 辅助 UAV 系统的综述多从单一视角展开, 如部署策略、技术演进^[16]、特定应用^[17]和性能优化^[18]。缺乏系统性分类框架与统一建模理论, 对复杂度与能效协同设计的探讨尚不深入, 如 Liu 等^[19]主要针对地面静态部署, 对 UAV 集成讨论有限; Mohsan 等^[16]的分类缺乏统一数学框架; Saleh 等^[12]虽探索了算法-能源协同设计, 但仅聚焦于单维度轨迹优化。

基于以上分析, 为了突破上述局限性, 本文围

绕 UAV-RIS 系统的理论与实践框架构建了 4 个研究内容: 1) 提出了 RIS 三维技术创新体系, 融合空间域、时频域与功能域, 构建立体化技术分类框架, 系统阐述不同维度间的内在联系与协同机制; 2) 建立了覆盖全维度创新的统一数学框架, 通过三维参数化散射模型整合空间域、时频域与功能域参数, 实现不同 RIS 架构的一致性表征; 3) 提出了算法-能源双轨协同优化方法, 构建算法复杂度与能耗的耦合模型, 通过定制化算法与跨维度协同优化提升计算与能源效率; 4) 构建了面向 UAV 集成的架构选择决策框架, 综合场景特征、性能需求与资源约束等因素, 通过需求映射与约束评估为不同场景推荐最优 RIS 架构组合。

1 RIS 技术演进与 UAV 系统集成基础

1.1 传统 RIS 架构回顾

RIS 技术经历了从被动反射到主动增强的演进。传统被动 RIS 的核心在于对角相移矩阵模型。

$$\Theta = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}) \quad (1)$$

其中, N 个反射单元满足单位模约束 $|\beta_n| = 1$, 建立了 RIS 辅助通信的基本信号模型。

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}_r^H \Theta \mathbf{G} \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中, \mathbf{h}_r 表示 RIS 到用户的信道, \mathbf{G} 表示基站到 RIS 的信道矩阵。为克服传统被动 RIS 的“双重衰落”, 研究人员提出了有源 RIS 架构, 允许放大因子 $|\beta_n| > 1$ 。混合架构通过选择性激活部分有源单元, 在 50 个总单元中仅配置 4 个有源单元即可实现 80% 的系统性能提升^[20]。

此外, 传统 RIS 的局限主要包括: 半空间覆盖限制, 服务范围仅 2π 球面度; 对角结构导致的秩 1 信道变换限制了空间复用; 窄带操作特性, 2.7 GHz 系统仅 8.5% 分数带宽^[21]; 信道估计复杂度随系统规模急剧增长。

1.2 三维创新体系概述

根据上述总结的传统 RIS 技术在空间覆盖、频谱效率和功能灵活性等方面存在的主要局限, 研究人员从空间域、时频域和功能域 3 个维度进行了一系列的创新。

在空间域方面的创新主要包括三类技术突破: STAR-RIS 通过同时透射和反射实现 360° 全空间覆盖, 突破传统半空间覆盖限制; BD-RIS 引入非对角散射矩阵打破秩 1 信道约束, 实现多流空间复

用; 流体 RIS 通过机械自由度优化提供动态信道改善能力^[22]。在时频域方面的创新主要实现了从静态窄带到动态宽带的转变: 时空编码可重构智能表面 (STC-RIS, space-time coding RIS) 通过时空调制同时支持通信和感知功能^[23]; 真时延可重构智能表面 (TTD-RIS, true time delay RIS) 解决宽带系统波束偏斜问题^[24]; 滤波 RIS 实现频率选择与相位调控的结合^[25]。在功能域方面的创新赋予 RIS 主动智能能力: 有源 RIS 通过信号放大克服双重衰落; 全息 RIS 可以实现连续孔径精确波束控制; 自感知 RIS 具备环境感知和自适应配置功能; 能量收集 RIS 可以通过 SWIPT 技术解决可持续性挑战^[26]。

上述创新并非孤立发展, 而是形成了系统性的协同效应。Yan 等^[21]提出的分类框架系统描述了从 RIS 1.0 到 RIS 2.0 的演进路径。如图 1 所示的三维创新架构分类树对 RIS 技术创新全貌进行了直观描述。

空间域构成整个系统的物理基础, STAR-RIS 扩展的覆盖范围可以为时频域空时编码提供更多信号路径, 可移动 RIS 为自感知功能提供了动态调整基础。时频域作为信号处理核心, 其滤波、调制和时延能力直接决定了波束成形质量与功能实现水平, 如 TTD-RIS 既缓解了宽带失真, 又支持近场精确聚焦。功能域主要推动了 RIS 从被动反射转向主动智能, 其有源放大能力进一步增强了空间域和时频域中的系统性能。在实际研究中, 技术要素之间呈现高度融合特征: 空间-时频协同表现为 STAR-RIS 与空时编码结合优化空时分集; 近场聚焦与 TTD-RIS 融合可以实现三维精准波束控制。时频-功能协同主要表现为滤波 RIS 与全息 RIS 结合实现多频段异质功能配置; 动态频谱与通感一体化 (ISAC, integrated sensing and communication) 集成推动通信感知一体化形成。空间-功能协同则通过流体 RIS 与能量收集 RIS 组合, 实现了形态自适应与能量自供给的协同发展。这种多维度深度融合产生了“涌现效应”, 促使 RIS 从被动表面演进为集感知、通信与能量管理于一体的智能基础设施。

1.3 UAV-RIS 集成场景与挑战

随着低空经济的不断发展, 6G 也在逐步与 UAV 技术进行融合。在 6G 网络中, UAV 与 RIS 集

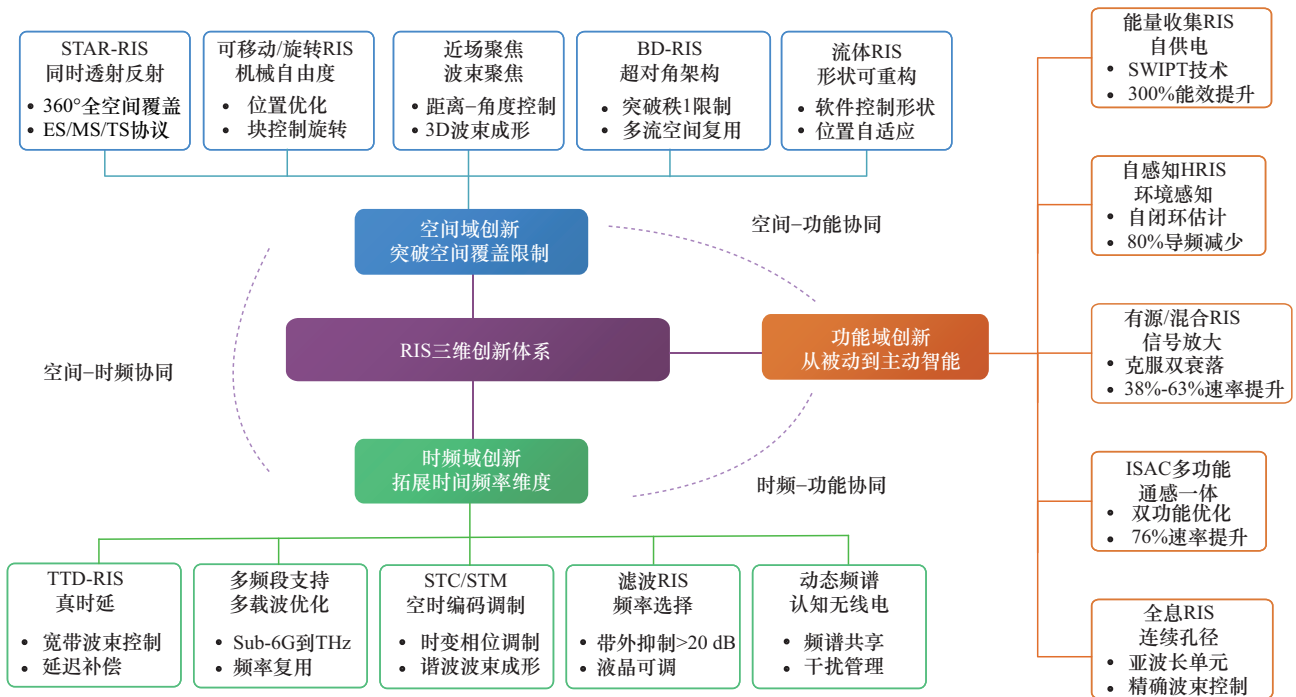


图1 三维创新架构分类树

成主要包括地面辅助型、机载型与分布式协同三类部署模式，面临着级联信道结构、严格机载资源约束及三维移动性等多重挑战。

UAV-RIS 级联信道具有多跳传播特性，需精确建模。三维几何随机模型需考虑无人机移动与环境动态^[27]；大规模 RIS 则需要依据 Fraunhofer 距离区分近远场；视距概率通过高度角建模，莱斯 K 因子则会随高度呈指数变化。而在信道估计方面，也有相关技术从不同角度解决问题，结构化逐元素秩一矩阵（SEROM, structured element-wise rank-one matrix）方法利用秩一特性降低 70% 导频开销^[28]；压缩感知技术通过动态双结构稀疏性（DDS, dynamic dual-structured sparsity）处理高机动场景^[29]；GRU 网络可以在非完美信道状态信息（CSI, channel state information）条件下实现鲁棒估计，仅需 800~1 000 轮训练即可收敛^[30]。

此外，通信系统设计的核心限制是能量约束。被动 RIS 元件功耗约 1 mW，控制器需 100 mW，主动配置则升至 10.5 W，系统总功耗介于 4~86 W^[31]。而电池容量 100~500 W 时限定了无人机的操作时间窗口，共计 $\tau = \left\lfloor \frac{B_{\text{cap}}}{P_{\text{avg}}} \right\rfloor$ 个时隙， B_{cap} 表示电池容量， P_{avg} 表示每时隙能耗，促使研究者开发混合能量收集策略。文献[32]通过结合射频和太阳能收集实现

81.5% 的效率，不规则 RIS 允许动态切换能量收集和信号反射模式，相比纯电池供电延长飞行时间 30%~50%。

UAV 在实际场景中，其载荷限制要求平衡 RIS 规模与飞行性能。每元件增重约 1 g，无人机最多容纳 1 600 个元件，总重 1.6~50 kg^[33]，影响重心位置。文献[34]系统评估了不同 RIS 架构对 UAV 平台的适配性，为实际部署提供了定量指导。

与此同时，UAV 的移动性挑战也存在研究难点，包括机械振动、风致波动与多普勒频移^[35]。球形 RIS 设计则可提供方向无关性能，避免平面结构因入射角变化导致的孔径衰减^[36]。自适应波束成形算法可以实时补偿位置变化，通过 K 均值聚类算法预测轨迹规划优化悬停位置，最小化稳定期间的能耗^[37]。

为了便于系统评估各类创新 RIS 架构在 UAV 平台的适配性，表 1 综合考虑了能耗、重量、复杂度和性能等多维度指标。

实测数据表明，不同 RIS 架构在无人机平台中表现出不同的性能与约束。被动 RIS 实测功耗最低，单元件仅 1 mW，控制器约 100 mW，单个元件重量仅为 1 g，更适合小型 UAV^[33]。主动 RIS 在能效方面提升明显，但天线收发器功耗达 10.5 W，系统总功耗 4~86 W，更适合大型无人机或地面平台。

STAR-RIS 支持全空间覆盖, 在 40 个用户场景中传输时间降低 19.43%。BD-RIS 频谱效率达 60 bit/(s·Hz) (传统 RIS 为 20 bit/(s·Hz)), 但对处理能力要求更高。混合 RIS 通过有源元件选择性激活实现 14 倍能效提升, 配置更灵活。在实际部署中, UAV 最多支持 1 600 个 RIS 元件, 总重 1.6~50 kg, 超过 800~1 200 个时增益递减^[33]。系统可在 1~5 m/s 风速下运行, 但需抑制 5 500 RPM 振动^[41]。

表 1 RIS 创新架构 UAV 适配性评估矩阵

架构类型	实测功耗	实测性能提升	元件重量	文献来源	典型应用场景
被动 RIS	每元件 1 mW, 控制器 100 mW	基准性能	每元件约 1 g	文献 [31,33]	覆盖扩展
主动 RIS	天线收发器 10.5 W, 系统总功耗 4~86 W	能效提升 26 倍	—	文献 [31,38]	远距离链路
混合 RIS	—	能效提升 14 倍, 单个有源元件即可实现改善	—	文献 [33]	自适应场景
STAR-RIS	—	传输时间降低 19.43%	—	文献 [39]	全空间服务
BD-RIS	—	频谱效率为 60 bit/(s·Hz), 相比传统 20 bit/(s·Hz) (提升 3 倍)	—	文献 [40]	多流传输

综上所述, 被动 RIS 适用于资源受限平台, 主动 RIS 适用于高能耗场景, STAR-RIS 与混合 RIS 能够平衡性能与实用性, 是 UAV-RIS 系统的优选架构。未来应聚焦算法复杂度、能效与整体性能的协同优化。

2 RIS 三维创新架构体系

2.1 空间域创新架构

在空间域创新方面, 智能超表面技术通过三大突破性进展彻底改变了无线通信的覆盖与容量范式, 在接下来的总结分析中, 本文将其主要划分为全空间覆盖、多流空间复用和机械空间自由度 3 个出发角度。这些空间域创新共同推动了 RIS 从静态波束调控向动态全空间智能环境的演进, 为 6G 通信的极致性能需求提供了关键技术支撑。

2.1.1 全空间覆盖

STAR-RIS 通过在单一超表面上实现信号的同

时透射和反射, 突破了传统 RIS 仅能服务半空间用户的根本性限制^[42]。每个 STAR-RIS 元件 m 对入射信号进行功率分割, 产生透射和反射分量, 基本能量守恒定律约束系数满足 $|\beta_t|^2 + |\beta_r|^2 = 1$, 确保总输出功率不超过输入能量, β_t 和 β_r 分别表示第 m 个 STAR-RIS 元件的透射和反射幅度系数, 取值范围为 $[0,1]$ 。透射侧接收信号表示为 $y_t = \mathbf{H}_t \boldsymbol{\Theta}_t \mathbf{x}$, 反射侧接收信号表示为 $y_r = \mathbf{H}_r \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{x}$, 其中 \mathbf{x} 为发射信号向量, \mathbf{H}_t 和 \mathbf{H}_r 分别为传统 RIS 透射侧和反射侧到用户的信道矩阵。 $\boldsymbol{\Theta}_t = \text{diag}([t_1 e^{j\phi_{t,1}}, \dots, t_M e^{j\phi_{t,M}}])$ 和 $\boldsymbol{\Theta}_r = \text{diag}([r_1 e^{j\phi_{r,1}}, \dots, r_M e^{j\phi_{r,M}}])$ 分别为透射和反射配置矩阵, ϕ_t 和 ϕ_r 分别为第 m 个 STAR-RIS 元件的透射和反射相位, j 为虚数单位。在文献[43]中, 建立了耦合相移模型, 揭示了透射和反射相位之间的关系: $\phi_{t,m} = \phi_{r,m} + \pi - 2\arccos(t_m)$, 这一发现对硬件设计具有重要指导意义。

STAR-RIS 主要支持 3 种操作协议: 能量分配 (ES, energy splitting) 允许所有元件同时透射和反射, 通过连续调节功率分配比例适应动态用户分布; 时分切换 (TS, time switching) 在时隙间交替工作, 适用于时分多址系统; 模式切换 (MS, mode switching) 将元件分组为纯透射或纯反射模式, 显著降低硬件复杂度。文献[44]表明, ES 协议相比传统非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 可实现 76% 的速率提升, 而 MS 协议在复杂度和性能间达到更优平衡。

在实际应用中, STAR-RIS 与 UAV 的集成可以有效解决空中通信的覆盖限制。UAV 可同时服务两侧用户, 突破传统单侧覆盖约束。搭载 STAR-RIS 的无人机能在城市中建立准视距连接, 并在遮挡情况下通过智能波束重构维持通信。采用深度学习联合优化无人机轨迹和 STAR-RIS 相位, 可降低服务时间并提升能效。文献[45]将研究场景集中于超大规模天线阵列 (ELAA, extremely large aperture array) 部署后混合远近场通信的关键场景, 将 STAR-RIS 的全空间调控能力与混合非正交多址接入 (H-NOMA, hybrid non-orthogonal multiple access) 的灵活接入特性相结合, 所提方案相较于传统被动 RIS、正交多址接入和纯远场模型, 分别实现了 220.9%、71.2% 和 23.4% 的系统性能提升。

在应急通信等场景中, STAR-RIS 辅助的 UAV

在灾害区域提供连接,当地面基础设施失效时,多个 STAR-RIS 可部署在被困用户和 UAV 搭载基站之间创建额外的智能传输链路。STAR-RIS 辅助的无人机通过多跳链路扩展覆盖,实验验证其在城市峡谷环境中可实现 40%~60% 的覆盖提升。在算法加速方面,文献[46]采用神经网络将相位优化时延降至亚毫秒级。文献[47]提出了统一优化框架,通过凸松弛与交替优化在多项式复杂度内逼近全局最优,成果已获实地验证。

2.1.2 多流空间复用

BD-RIS 通过引入非对角散射矩阵,实现了 RIS 技术的突破,打破了传统对角 RIS 的秩 1 信道变换限制^[48]。与传统 RIS 的对角相移矩阵不同, BD-RIS 的矩阵允许所有元件之间产生耦合与联动。该矩阵满足能量守恒和对称性的物理约束,从而能对电磁波进行更全方位的智能操控。这种架构创新使系统能够塑造出全新的等效信道,极大地提升了 RIS 辅助通信系统的空间复用能力。

在连接架构上,其复杂度经历了从单连接到全连接的范式转变。全连接 BD-RIS 需要 $\frac{N(N-1)}{2}$ 个互连阻抗元件加上 N 个自阻抗元件,总计约 $\frac{N^2}{2}$ 个可调元件。然而,文献[49]图论的研究表明,树连接 BD-RIS 仅需 $N-1$ 个连接即可在单用户多输入单输出 (MISO, multiple-input single-output) 系统中实现最优性能。文献[50]提出的 Q-stem 等智能连接架构通过拓扑优化,在性能和电路复杂度之间取得了更佳的平衡。这一切不同架构的分析,都建立在一个统一的多端口网络理论之上,该理论通过一个由纯虚数阻抗矩阵构成的公式来表征其散射行为。

在城市密集部署场景中, BD-RIS 与 UAV 的协同部署展现出巨大潜力。受限于 UAV 移动约束和 BD-RIS 相位限制,可以通过交替优化和强化学习方法求解。在多用户多输入多输出 (MIMO, multiple-input multiple-output) 系统中, BD-RIS 通过增强的干扰管理和空间复用能力实现了传统 RIS 无法达到的性能。系统模型中的非对角相移矩阵能够实现完全干扰抑制。通过干扰对齐约束,即对于所有不是 k 的用户,他们的信号经过 BD-RIS 后对用户 k 的干扰为零, BD-RIS 使 K 个用户系统达到 $\frac{K}{2}$ 的自

由度,达到干扰信道条件下的理论极限。为进一步平衡性能与复杂度,研究者提出了一种三阶段波束成形策略,融合基于 Takagi 分解的 BD-RIS 被动波束成形、主动发射波束成形以及接收端合并处理,以可控的计算开销实现接近最优的系统性能^[51]。文献[52]研究显示, BD-RIS 辅助的设备间通信通过联合干扰对齐设计,相比传统方案实现了 7 倍的和速率提升。

在特定通信任务方面, BD-RIS 在应急通信中展现出独特优势。在灾害响应场景下, BD-RIS-UAV 系统部署时间低于 30 s,通过混合能量收集实现全天候持续运行^[53]。BD-RIS 增强的认知无线电多层非地面网络在频谱共享场景中实现了显著的性能提升。在全双工通信系统中,非互易 BD-RIS 通过多端口网络模型实现了自干扰消除,显著提升了系统容量^[54]。

2.1.3 机械空间自由度

块控转动 RIS (BC-RIS, block-controlled RIS) 通过引入机械旋转自由度实现了功耗与性能的突破。BC-RIS 系统在实现与传统元件控制 RIS 相同频谱效率的同时,功耗仅为后者的 $\frac{1}{M}$,其中 M 为每块包含的元件数。连续旋转架构相比离散角度调整在动态环境中展现出显著优势,提供了更高的相位控制自由度和优化灵活性。旋转功率建模为

$$P_{\text{rotation}} = \sum_{m=0}^{\frac{M-1}{2}} m|\theta|P_{\text{unit}}, \text{ 其中, } P_{\text{rotation}} \text{ 表示 RIS 阵列}$$

的总旋转功率消耗, M 表示每个块包含的 RIS 元件数量, m 表示求和索引, θ 表示旋转角度, P_{unit} 表示单位旋转的功率消耗。该模型表明 BC-RIS 通过机械旋转补偿减少电子控制,每个模块仅需单一相位控制电路而非独立元件控制,从而实现功耗仅为传统元件控制 RIS 的 $\frac{1}{M}$ 。

在整体通信系统能耗约束下,通过优化搭载 RIS 的 UAV 三维运动轨迹,实现了通信性能的最大化。系统采用结合路径损耗与莱斯衰落的空对地 (AG, air-to-ground) 信道模型,空对地信道模型为 $h_{\text{AG}} = \sqrt{\beta_0 d^{-\alpha}} g_{\text{AG}}$, h_{AG} 表示空对地信道系数, β_0 表示参考距离处的信道功率增益, d 表示 UAV 与地面节点之间的传输距离, α 表示路径损耗指数, g_{AG} 表示小尺度衰落系数,服从莱斯分布以反映空

对地链路中视距传播的主导特性。UAV 的推进能耗遵循式(3)。

$$E_{\text{prop}} = P_0 \left[1 + \frac{3v^2}{2v_{\text{tip}}^2} \right] + P_1 \sqrt{1 + \frac{v^4}{4v_{\text{min}}^4} - \frac{v^2}{2v_{\text{min}}^2}} + \frac{1}{2} \rho S C_d v^3 \quad (3)$$

其中, E_{prop} 表示 UAV 的推进能耗。右侧第一项中, P_0 表示悬停状态下的叶片阻力功率, v 表示 UAV 的飞行速度, v_{tip} 表示旋翼叶尖速度。第二项中, P_1 表示悬停状态下的诱导功率, v_{min} 表示最小诱导速度, 该项反映了诱导功率随飞行速度的变化关系。第三项中, ρ 表示空气密度, S 表示旋翼盘面积, C_d 表示机身阻力系数。后续可以通过深度确定性策略梯度 (DDPG, deep deterministic policy gradient) 和近端策略优化 (PPO, proximal policy optimization) 算法处理连续动作空间, 并借助聚类方法提升 DRL 的训练效率, 从而在综合考虑速度、空气动力学参数及悬停或飞行权衡的基础上, 实现三维轨迹的优化。

流体天线系统 (FAS, fluid antenna system) 与 RIS 的协同通过位置可重构实现了通信性能创新。Salem 等^[22]提出的流体 RIS (FRIS, fluid RIS) 系统将超表面划分为非重叠子区域, 每个流体元件能够在指定区域内任意位置出现而不需要物理移动, 以 37.5% 更少的天线元件实现与传统 RIS 相同的性能。在优化算法方面也取得显著进展, 粒子群优化结合半定松弛处理多用户 MISO 场景。也有研究提出相关优化算法在联合优化场景中实现显著的元件节省。FRIS 系统展现了高达 176% 的和速率提升^[55]。

基于上述研究, 机械空间自由度的联合优化模型表述为 $\max_{\mathbf{q}(t), \boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\Omega}(t)} R(\mathbf{q}(t), \boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\Omega}(t))$, $\boldsymbol{\Omega}$ 为旋转角度, $\mathbf{q}(t)$ 为位置向量, $\boldsymbol{\theta}(t)$ 为相位偏移。综合优化框架通过 3 层分解实现可处理性: 发射波束成形、相位偏移优化和位置优化。这种分解将复杂度从 $O(N^M K^L)$ 降至每次迭代 $O(N^3 + K^3 + M^2)$, 使实时优化成为可能, 理论自由度相比固定系统提升 2~5 倍^[56]。

在实际性能对比中, 可移动 RIS 展现出显著优势。可移动天线-可重构智能表面 (MA-RIS, movable antenna RIS) 系统相比固定位置方案可实现 24% 的中断概率改善和 2 dB 的信噪比 (SNR, signal-to-noise ratio) 增益^[57]。在多接入边缘计算 (MEC, multi-access edge computing) 环境中, 可旋

转 RIS 能够降低高达 47.3% 的总能耗, 并同时提升系统性能。其中, 二维配置因具备更高的几何紧凑性和更强的波束成形能力, 明显优于一维结构。在室外 50 m 和 500 m 距离的实际传播环境中进行的实验表明, 部署于砖墙表面的可移动 RIS 可有效替代传统吸收屏, 结合角度信道稀疏性算法带来了显著的信噪比提升。

2.2 时频域创新架构

本节聚焦于 RIS 在时域与频域维度的创新架构设计, 分析其通过联合调控电磁波时空特性以突破传统无线系统性能瓶颈的潜在研究点。首先, 探讨如何通过引入时间维度的周期性相位调制, 将信息编码到不同的空间谐波上, 从而实现通信与感知一体化。其次, 聚焦宽带场景下的波束畸变问题, 介绍具有频率选择功能的 RIS, 通过真时延技术与滤波设计, 实现对宽带信号和特定频段的精确操控。最后, 从系统层面出发, 阐述如何通过联合优化 RIS 配置、无人机轨迹与频谱资源, 在复杂的时变信道中最大化系统效能。这些时频域创新共同构成了 RIS 从静态被动器件向动态智能控制器演进的关键技术路径, 为 6G 网络奠定了坚实的基础。

2.2.1 时空编码技术

时空编码 (STC, space-time coding) 和时空调制 (STM, spatio-temporal modulation) 是 RIS 赋能无线通信系统的变革性技术, 在面向 6G 的无人机通信等应用中展现出显著潜力。其核心在于通过可编程超表面对电磁波的空间和时间维度进行联合调控。时变调制为电磁传播引入了前所未有的自由度, 为通信与感知一体化应用开辟了新的可能性。

RIS 系统中时变相位调制的数学基础遵循关系式 $\theta_n(t) = \theta_0 + \omega_m t$, 其中 $\theta_n(t)$ 为第 n 个 RIS 单元的时变相位, θ_0 为初始相位偏移, ω_m 为调制角频率, t 为时间。这种周期性相位调制根据关系式 $f_{\text{out}} = f_{\text{in}} + k f_m$ 产生谐波频率, 其中 f_{out} 为输出频率, f_{in} 为输入载波频率, k 为谐波指数, f_m 为调制频率。每个 RIS 单元的反射系数可表示为周期函数, 如式(4)所示。

$$\Gamma_{pq}(t) = \sum_{n=1}^L \Gamma_{pq}^n U_{pq}^n(t) \quad (4)$$

其中, $\Gamma_{pq}^n = A_{pq}^n \exp(j\phi_{pq}^n)$ 表示复反射系数, $U_{pq}^n(t)$ 表示调制周期为 T_0 的周期脉冲函数。

谐波波束成形技术基于傅里叶级数分解, 对空

间谐波分布进行精确调控。通过设计傅里叶系数 $a_{pq}^m = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \Gamma_{pq}^n \exp\left(\frac{-j2\pi mn}{L}\right)$, 可独立控制不同频率谐波的幅度与相位。第 m 次谐波的远场方向图可表示为

$$\mathbf{E}_m(\theta, \phi) = \sum_{p=1}^M \sum_{q=1}^N a_{pq}^m \mathbf{E}_{pq}(\theta, \phi) \exp[jk_m(px + qy)] \quad (5)$$

其中, $k_m = \frac{2\pi(f_c + mf_0)}{c}$ 表示第 m 次谐波的波数。谐波波束成形技术通过傅里叶级数分解调控空间谐波分布, 利用傅里叶系数实现对不同频率谐波幅度与相位的独立控制。该数学框架通过物理实现简单的 1 bit 或 2 bit 单元时间调制, 实现了等效的多比特编码, 在维持复杂波束成形能力的同时显著降低了硬件复杂度。

现有最新研究将该原理扩展至 BD-RIS 架构, 摆脱了对角结构限制, 实现了具备全散射矩阵的灵活调控, 可支持多个并发波束的复杂控制。文献[58]采用正交时空调制将反射信号编码至独立信道, 实现了功能单元与故障单元的清晰功率区分, 为系统快速诊断提供了新途径。与此同时, 基于时空编码超表面的 ISAC 技术则代表了无线系统设计的范式转变, 在提升通信与感知性能的同时缓解了频谱稀缺问题。目前主要编码策略包括分区调制和全孔径时空调制。Chen 等^[23]首次实验验证了采用 2 bit 时空编码超表面的 ISAC 系统, 可同时控制用于通信的基频和感知的谐波空间分布。

2.2.2 宽带与频率选择

传统相移器具有频率依赖特性, 导致宽带 RIS 系统中不同频率的分量产生角度色散, 从而引发波束偏斜问题。TTD-RIS 架构通过引入频率无关的延迟补偿有效解决了这一问题, 其核心由式(6)描述。

$$\tau_n = \frac{d_n \sin \theta}{c} \quad (6)$$

其中, τ_n 为第 n 个单元的时延, d_n 为单元与参考点之间的间距, θ 为目标转向角, c 为光速。该方法可在整个工作带宽内保持一致的波束成形增益, 使所有频率分量均能获得接近最优的阵列增益, 而传统仅相位方案在超宽带场景中会出现高达 50% 的增益退化。

最新实验原型采用分层虚拟子阵结构, 在显著

降低系统实现复杂度的同时, 仍可以保持 70%~85% 的 TTD 性能。基于子阵的 RIS (SA-RIS, subarray-based RIS) 通过单元级动态组连接架构为各子阵独立配置时延, 在高度相关信道中可实现 60% 的和速率提升^[59]。Ka 波段超过 400 个 1 bit 单元的实验表明, 室内外场景均可实现 26~27 dB 的功率增益^[60]。稀疏 TTD 架构将有限 TTD 单元与传统相移器结合, 为中带宽场景提供了性能与成本的有效平衡。而在超宽带场景中, TTD 可带来 2~4 倍的频谱效率提升^[61]。TTD 补偿还可有效缓解近场区域的“双波束分裂效应”, 并在尺寸超过 $100\lambda \times 100\lambda$ 阵列的菲涅尔区内保持波束相干性^[62]。

通过将频率选择表面与可重构智能表面相融合, 本文得到了兼具空间与频谱调控能力的频率选择表面 (FSS, frequency selective surface), 该技术已取得最新进展: 其带外抑制能力超过 20 dB, 并具备快速滚降特性; 在接收-发射结构中集成高 Q 值集总滤波器后, 带外抑制目标已接近 30 dB。此外, 滤波 RIS 架构通过结合包含相移器和滤波器的专用功能模块, 解决了传统 RIS 设计固有的低品质因子问题, 实现了 Q 因子 14, 显示出接近理想的频率选择性^[63]。

液晶技术因其在可重构滤波应用中的巨大潜力而备受关注。它通过一种缺陷延迟线架构, 将相移功能层与电磁波辐射层分离, 从而实现了低于 100 ms 的快速响应。相关研究采用 4.6 μm 超薄 LC 层的突破性液晶 RIS (LC-RIS, liquid crystal RIS) 设计在 62 GHz 展示了 $\tau_{\text{on}} = 15 \text{ ms}$ 和 $\tau_{\text{off}} = 72 \text{ ms}$ 的切换速度, 并且具有 6.8 GHz 带宽, 即便使用了有损耗的玻璃基板, 其插入损耗仍能保持在 7 dB 以下^[64]。此架构不仅实现了连续的 360° 相位调节, 波束扫描范围也达到 $\pm 50^\circ$, 同时仅需 0~25 V 的偏置电压驱动。更重要的是, 它能利用现有的 LCD 制造工艺, 为实现低成本和大规模生产提供了可能。在 57~63 GHz 的品质因数达到 $81^\circ/\text{dB}$, 相比传统 20 μm 倒装微带线减少了 38% 的损耗^[65]。

STAR-RIS 是实现全空间无线覆盖的关键技术。文献[66]提出了一种工作在 2.6 GHz 频段的新型有源 STAR-RIS, 通过集成功率放大器, 提供了最高约 12 dB 的可调主动增益。文献[67]报道的原型实现了 $\pm 60^\circ$ 的宽角波束扫描能力; 文献[68]则在一个 9×9 的超表面中, 分别实现了高达 32.2% 与 33.7% 的反

射和透射孔径效率。

2.2.3 时频资源优化

时频资源优化对于提升无线系统性能至关重要,其核心在于联合调控 RIS 的相位、UAV 的飞行轨迹以及频谱资源的分配。研究证实,这种跨越时间与频率 2 个维度的协同优化框架,能够获得比孤立优化各个部分更高的频谱效率。然而,构建此框架的主要难点,在于需要求解一个彼此耦合、高度复杂的非凸优化问题。

目前,求解该问题通常采用交替优化策略,即将原问题拆分为几个子问题,然后轮流迭代更新 RIS 相位、UAV 的位置和发射功率。这种方法的计算量非常庞大。对于传统的交替优化算法,其计算复杂度为 $O(N_f N_t N^2 M^2)$,其中 N_f 表示频域子载波数量, N_t 表示时域时隙数量, N 表示 RIS 元件, M 表示基站天线,这种尺度随系统维度增加。当系统规模扩大时,计算量急剧增长,对实时应用构成了巨大挑战。具体而言,在使用半定松弛技术处理智能表面相位时,每次迭代的计算量大致与元件数量的立方成正比;而优化无人机轨迹的计算量,则与天线数量的平方乘以空间维度成正比。

如何降低计算复杂度已成为实际部署的关键问题。逐元素优化通过利用被动 RIS 实现的对角结构将 RIS 相位计算复杂度从 $O(N^3)$ 降低到 $O(N^2)$ 。机器学习方法则进一步加速了优化过程,经离线和大量信道样本训练的神经网络可实现 0.01~0.1 s 的推理时间,远快于传统迭代方法的 1~10 s^[69]。低计算复杂度算法在元件和天线数适中时可保持亚秒级优化,但随着系统规模扩大,性能会因算法简化而下降。

有研究人员对计算复杂度和性能之间的关系进行了研究,将某些变量的分析解与其他变量的数值优化相结合的混合方法有效平衡了准确性和速度。图 2 展示了实施时频优化的不同 RIS 架构的综合性能比较。STC-RIS 通过时间调制实现的联合距离-角度波束成形,比被动 RIS 实现 22% 更高的频谱效率。STC-RIS 的频率分集增益在频率选择性信道中特别明显,性能改善随可分辨路径数量以对数尺度增长。

BD-RIS 架构通过引入元件间可控连接展示了其优越性能。全局被动 BD-RIS 相比传统对角 RIS 实现了 15%~20% 更高的和速率提升,同时保持相

似的功耗。非对角散射矩阵为优化提供额外自由度。组连接 BD-RIS 在性能和计算复杂度间取得良好平衡,计算复杂度为 $O(N^2 g)$,其中 g 表示组大小,更具实际可行性。

具有放大能力的有源 RIS 配置在低 SNR 区域部分有显著增益。STAR-RIS 提供高达 15 dB 的有源增益,同时实现双向覆盖。在每元件静态功耗低于 20~25 dBm 时,其能效优势得以保持,超过该阈值后被动架构更为适用。后续可以通过采用最优元件选择算法,仅激活 40%~50% 的元件工作于有源模式以维持系统性能,同时降低功耗。

经过检验,与传统无 RIS 系统相比, BD-RIS 在和速率方面实现 2~4 倍提升,在郊区场景中覆盖范围扩展 40%~60%,尤其在非视距条件下通过构建虚拟视距路径,性能增益更为显著。其与速率分割多址 (RSMA, rate-splitting multiple access) 的联合优化后,在干扰受限场景中, RIS-RSMA 方案相比 RIS-NOMA 性能提升 18%~25%。这些经过验证的性能改进将时频优化的 UAV-RIS 系统确立为下一代无线网络的变革性使能技术。

2.3 功能域创新架构

本节对提升智能反射面性能的三大前沿技术路径进行阐述, RIS 从被动反射向主动智能演进,分别聚焦于通过引入有源放大器来克服信道衰减,从离散阵列到连续孔径的设计范式变革,以及通过集成感知单元与先进算法实现高效的信道估计与环境感知,最终向自主决策的智能化方向发展。这三者共同构成了未来 6G 网络中高性能、高智能 RIS 系统的核心技术支柱。

2.3.1 信号增强技术

有源 RIS 技术有效缓解了传统被动 RIS 的“双重衰落”问题,为 6G 部署提供了可行路径。其主要架构包括集中式有源 RIS (CA-RIS, centralized active RIS)、放大滤波 RIS (AF-RIS, amplifying and filtering RIS) 和混合有源-被动 RIS。其中 CA-RIS 主要通过多个反射单元间共享放大器,在最大限度保持性能的同时降低硬件复杂度。研究表明,子连接架构中单个放大器可服务 4~8 个单元,相比全连接结构复杂度降低 50%~80%,并在 4 GHz 频段实现 9.6 dB 的净增益,改善了被动 RIS 架构中的乘性衰落效应。AF-RIS 在放大基础上引入频率选择性,兼具信号增强与干扰抑制功能。其信号处

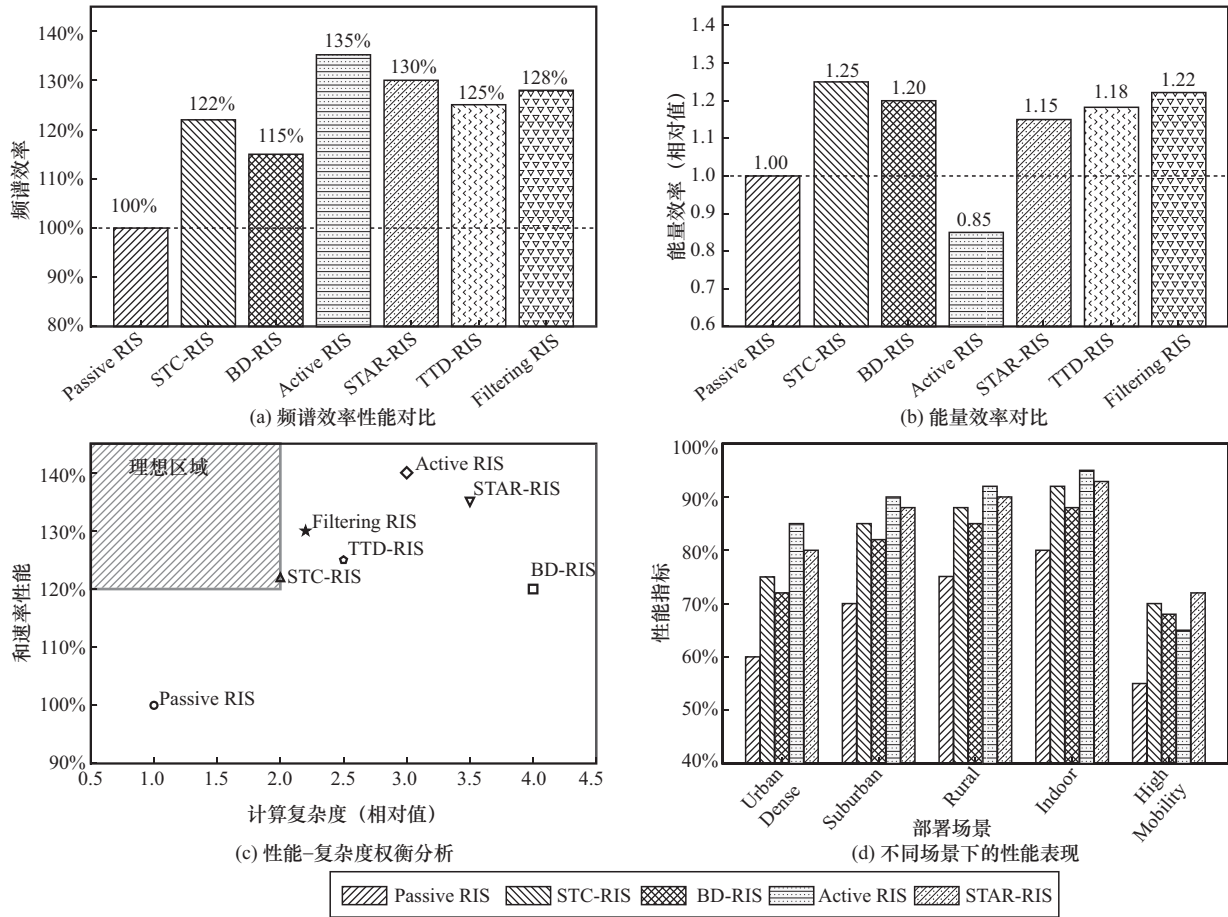


图2 时频域创新性能对比

理链包括电磁波接收、高Q滤波、PIN二极管2 bit相位控制、选择性放大与再辐射，相比传统NOMA方案提升了数据速率与抗干扰能力。混合有源-被动RIS通过策略性激活部分单元实现性能与功耗的平衡。仅激活10%~20%单元即可达全有源配置85%~95%的性能，功耗降低50%~70%。整体最优激活比例取决于功率预算、信道条件与性能需求。通过采用功率感知的稀疏反射波束成形与动态激活策略，系统能够根据业务需求和信道状态的变化，灵活调整有源单元的数量，最终达成能效的最优化。在链路预算方面，有源RIS改善显著，实验数据显示，相较于完全被动的系统，它能实现20~40 dB的信噪比提升，因其仅经历RIS至用户的单级路径损耗。大规模部署研究表明其在典型无线场景中具有显著容量增益。

大规模MIMO系统中的有源RIS集成展现出一定的优势。在接收端采用低分辨率模数转换器(ADC, analog-to-digital converter)的大规模MIMO上行链路中，有源RIS能够有效补偿量化噪声，实

现40 dB的接收功率提升。理论上的渐近分析揭示了二者在信噪比提升上的根本差异：被动RIS带来的信噪比增益与天线单元数量的平方成正比（即二次方缩放），而有源RIS则表现为线性缩放。尽管线性增长在理论上不及二次方，但由于有源系统能够显著降低噪声项的影响，使其在实际的、规模有限的阵列配置下，反而能持续保持性能优势^[70]。覆盖扩展能力表明有源RIS在RIS-USER距离达数百米时仍然有效，而被动RIS在超过50 m后性能严重退化。

2.3.2 天线优化融合

可重构全息表面(RHS, reconfigurable holographic surface)通过连续孔径建模实现了对电磁波的精确操控，为6G网络提供了超越传统离散天线阵列的技术路径。连续孔径的数学表征遵循辐射积分方程，即

$$G(\theta, \phi) = \iint A(x, y) \exp [jk(x \sin \theta + y \sin \phi)] dx dy \quad (7)$$

其中, $A(x,y)$ 表示连续孔径上的电流分布, 通过控制该分布可实现任意波束成形^[71]。电磁信息理论将香农信息论与电磁波传播物理相融合, 具备突破传统香农容量极限的潜力^[72]。在工程实现上, 准连续孔径模型通过将单元间距缩小至亚波长量级, 在满足实际硬件制造约束的同时, 使空间分辨率超越传统 $\frac{\lambda}{2}$ 阵列的限制^[73]。该体系下的有效自由度可通过奇异值序列计算, 为理解连续孔径系统的容量极限提供了理论依据^[72,74]。图案分割复用 (PDM, pattern division multiplexing) 是一种利用全息表面电流分布图案作为独立信息载体的多址技术。通过在连续孔径上生成多个正交的电流分布图案, PDM 可以在同一时频资源上同时服务多个用户, 进一步将电流分布建模为信息调制的基础载体, 显著提升了多用户容量界, 性能优于传统离散天线阵列^[75]。

在信道建模方面, 为应对大孔径带来的近场效应, 研究采用了更为精确的球面波传播模型, 突破了传统平面波假设的限制, 实现了在菲涅尔区内的精确建模^[76]。此外, 幅度控制优化框架的开发, 进一步凸显了超材料全息阵列的能效优势, 研究表明其能效可比传统相控阵提升 10~100 倍^[77]。

2.3.3 智能感知

集反射与接收功能于一体的混合 RIS, 标志着通信与感知一体化技术的重要进展。Albataineh 等^[78]提出了一种双元素混合架构, 结合传统反射单元与基于基板集成波导 (SIW, substrate integrated waveguide) 的感知单元, 在保持信号反射能力的同时实现了到达角检测。这种设计通过在单元资源上进行灵活分配, 为环境感知与信道状态获取 2 个目标提供了可调节的权衡。

在闭环信道估计方面, 一项重要的突破是信道子空间表征方法的提出。文献^[79]通过挖掘 RIS 信道固有的空间相关性并将其映射至低维子空间, 显著减少了所需导频长度。所提降维子空间最小二乘法仅依赖阵列几何信息而不需要用户统计先验信息, 实现了导频长度远少于 RIS 单元数的高效估计。

在降低导频开销方面, 多种创新技术展现出卓越效果。压缩感知方法使用正交匹配追踪和深度学习 U-Net 架构减少了 35% 的导频开销, 归一化均方误差相比传统方法改善高达 25%^[78]。基于双结构稀疏性的数学框架, 以感知矩阵 A 为核心, 实现了级联信

道的高效估计。半被动 RIS 通过集成少量射频链路, 可分别估计 BS-RIS 和 RIS-USER 信道而非整体级联信道, 从而将计算复杂度从高阶降至可接受水平。

最终, 环境感知与自主决策能力通过先进的机器学习技术得以实现。基于 Actor-Critic 的强化学习方法实现了自适应障碍感知 RIS 切换, 不需要先验环境知识即可自主运作。面向大型 RIS 系统的深度强化学习框架, 采用基于几何特性的码本设计与两步波束成形方案, 在保持性能的同时大幅降低了计算复杂度。

2.4 UAV 集成与性能对比

2.4.1 部署模式与架构适配性

UAV 与 RIS 的集成部署为 6G 网络架构带来了三维灵活性, 不同的创新架构在 UAV 平台上展现出各具特色的部署优势和技术挑战。本节系统分析各类 RIS 架构与 UAV 平台的协同部署策略, 为实际系统设计提供统一技术框架。

在地面辅助 RIS 模式中, RIS 阵列部署于地面基础设施, 用于增强 UAV 通信链路。该模式可依托地面稳定供电, 支持大规模阵列, 相比传统放大转发中继可实现高达 145% 的能效提升。特别是在城市峡谷环境中, RIS 阵列能够有效克服建筑物遮挡, 将信号覆盖扩展至传统阵列难以覆盖的区域。基于强化学习的联邦优化框架在保护用户隐私的同时实现了分布式部署优化, 适用于应急通信和灾害救援等需要快速部署的场景。UAV-RIS 模式将 RIS 直接集成于无人机平台, 实现对三维空间中信号的动态调控。尽管其受载荷限制, 且阵列规模通常限于 64~128 个元件, 但仍可提供动态三维覆盖能力。文献^[80]提出并分析了基于泊松点过程 (PPP, Poisson point process) 建模的分布式 RIS 系统, 系统性地推导了频谱效率表达式, 经过仿真实验验证, 仅需约 60~110 个 RIS 元件即可超越传统有源系统性能。文献^[81]采用深度强化学习方法联合优化 UAV 轨迹与 RIS 相位, 在单用户场景下实现了 81.5% 的能量收集效率。通过多 UAV 协同搭载分布式 RIS 单元, 可进一步克服单机载荷限制, 实现全景全角度反射能力, 适用于热点区域覆盖和临时大型活动的通信保障。分布式协同模式通过多个搭载 RIS 的 UAV 平台实现协同波束成形与资源分配。文献^[15]提出了一种基于鲁棒深度强化学习的能量收集 RIS 框架, 可在不确定环境下保持性能稳定。在算法求

解方面,多智能体深度强化学习能够在较快收敛的同时提高系统能效。引入联邦学习框架可以使各 UAV 不需要共享原始数据即可进行协同优化,有效保护了用户隐私。

在无人机通信系统中,不同类型 RIS 因其架构特性而展现出互补的优势。在空间域架构方面,不同类型 RIS 在 UAV 集成中呈现出差异化特征。STAR-RIS 凭借其双向传输能力,在 UAV 平台上展现出独特优势,可消除因机身遮挡造成的覆盖盲区,使单个 UAV 能够同时服务空中和地面用户。在城市环境实测的结果表明,其覆盖范围可拓展 145%。BD-RIS 虽具备优越的多流复用能力,但其高阶优化复杂度对 UAV 有限计算资源构成挑战,实际应用中多采用组连接架构作为折中。可移动 RIS 通过三维轨迹与相位联合优化,较固定部署实现 30%~40% 的系统容量提升。Liu 等^[83]对实际的角度依赖反射模型,提出了联合优化三维位置与三维朝向以最大化用户信噪比的方法,证明了复杂的三维朝向优化可简化为仅绕单轴的一维优化,并为此推导出了最优朝向的闭式解。进一步扩展了系统的优化自由度,在保持硬件复杂度可控的前提下显著提升了通信性能。

时频域架构能够较好地适应 UAV 平台的动态特性。STC-RIS 通过时变调制有效补偿多普勒效应,在 50 km/h 的相对速度下仍可维持通信链路稳定。TTD-RIS 能够缓解宽带系统中的波束偏斜问题,对毫米波 UAV 通信尤为重要。滤波 RIS 的频率选择性在频谱密集的城市环境中优势显著,其 20 dB 的带外抑制能力有效降低了 UAV 通信中的同频干扰。

功能域架构直接应对 UAV-RIS 系统面临的核心挑战。有源 RIS 通过信号放大克服了空地链路的显著路径损耗。混合架构通过智能激活 10%~20% 的有源元件,在维持通信性能的同时降低 50%~70% 功耗,适合中型无人机平台。全息 RIS 凭借其轻量化设计与低功耗特性,适用于长航时 UAV 任务。自感知 RIS 通过集成信道估计功能,可将导频开销降低 70%,减轻 UAV 的信令负荷。

2.4.2 综合性能评估

不同创新架构在实际部署中展现出差异化的性能优势。在时频域创新方面,STC-RIS 系统在 220 GHz 频段实现了 2.341 Gbit/s 的有效数据速率,并在 2 bit 编码配置下将到达角估计精度保持在 3° 以

内^[83]。TTD-RIS 通过频率无关的延迟补偿机制,在 100 MHz 带宽范围内保持了一致的波束成形增益。与传统相移器在宽带系统中出现的 50% 增益退化相比,表现出较为明显的性能提升^[61]。滤波 RIS 在保持 20 dB 带外抑制的同时,实现了 Q 因子 14 的频率选择性,为干扰管理提供了解决方案^[63]。

功能域创新展现出更为明显的性能提升。有源 RIS 系统相比被动架构可实现 20~40 dB 的 SNR 增益,在链路预算改善方面表现优异,适用于功率预算超过 10 dBm 的应用场景^[31]。混合 RIS 通过智能激活 10%~20% 的有源元件,在保持全有源配置 85%~95% 性能水平的同时,将功耗降低 50%~70%,实现了性能与能效的良好平衡。全息 RIS 的连续孔径设计相比传统离散阵列,在相同孔径面积下提供了 1.5~2 倍的有效自由度,亚波长元件间距 $\frac{\lambda}{4}$ 突破了传统 $\frac{\lambda}{2}$ 阵列的空间分辨率限制^[73]。自感知 RIS 通过集成接收功能,在非视距 (NLoS, non-line-of-sight) 场景的 3.5 GHz 频段实现了亚厘米级定位精度,85% 的情况下误差小于 5 mm^[78]。

3 统一数学建模与优化框架

3.1 三维统一信道模型

3.1.1 模型构建与参数化

随着 RIS 技术的演进,其架构日趋复杂,传统的对角相移模型已成为准确表征其性能的瓶颈,由此催生了对统一数学建模框架的迫切需求。统一信道模型的核心在于接收信号的建模,该模型通过 RIS 调制的多维度辅助路径共同构成。

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_d \mathbf{x} + \sum_{d \in \{S,T,F\}} \mathbf{H}_{r,d}^H \boldsymbol{\Psi}_d(\boldsymbol{\Xi}_d) \mathbf{G}_d \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{H}_d \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 表示基站到用户的直接信道, $\mathbf{H}_{r,d} \in \mathbb{C}^{N_d \times M}$ 和 $\mathbf{G}_d \in \mathbb{C}^{N_d \times K}$ 分别表示 RIS 到用户和基站到 RIS 的信道矩阵。关键创新在于散射算子 $\boldsymbol{\Psi}_d(\boldsymbol{\Xi}_d)$ 的多维参数化设计,其中 $\boldsymbol{\Xi}_d$ 表示维度 d 的配置参数集合。

1) 空间域、时频域和功能域参数定义

空间域参数定义了 RIS 元件的几何排列和波束成形特性。对于 N 个 RIS 元件,空间域散射矩阵 $\boldsymbol{\Psi}_s \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示入射波和散射波之间的空间变换关系。在 BD-RIS 架构中, $\boldsymbol{\Psi}_s$ 为对称酉矩阵,满足 $\boldsymbol{\Psi}_s = \boldsymbol{\Psi}_s^T$ 和 $\boldsymbol{\Psi}_s^H \boldsymbol{\Psi}_s = \mathbf{I}_N$ 的约束条件,通过 Takagi 分解,可将其表示为 $\boldsymbol{\Psi}_s = \mathbf{Q} \mathbf{\Lambda} \mathbf{Q}^T$,其中 \mathbf{Q} 为酉矩阵,

\mathbf{A} 为对角相位矩阵。

时频域参数 T 和 F 捕获了 RIS 在时间和频率维度的动态特性。时域参数 T 描述了相位配置的时变特性, 对于 STC-RIS 系统, 反射系数可表示为

$$\Gamma(t) = \sum_{m=-M}^M a_m e^{jm\omega_m t + j\phi_m} \quad (9)$$

其中, a_m 和 ϕ_m 分别表示第 m 次谐波的幅度和相位。频域参数 F 则描述了 RIS 的频率选择性, 在宽带系统中尤为重要。最新研究表明, 通过设计频率选择性超表面, 可实现超过 20 dB 的带外抑制能力, 有效提升系统的频谱效率^[25]。

功能域参数 \mathcal{F} 定义了 RIS 的操作模式和功能特性。对于 STAR-RIS 系统, 功能域参数包括透射系数 $\beta_t^{(n)}$ 和反射系数 $\beta_r^{(n)}$, 满足能量守恒约束 $|\beta_t^{(n)}|^2 + |\beta_r^{(n)}|^2 \leq 1$ 。有源 RIS 的功率消耗模型为

$$P_{\text{element}} = V_{\text{bias}} I_{\text{tunnel}} = V_{\text{bias}} I_p \exp\left(-\frac{V_{\text{bias}}}{V_0}\right) \quad (10)$$

其中, P_{element} 表示该单元的功耗, V_{bias} 表示施加在隧道二极管上的直流偏置电压, I_{tunnel} 表示流经隧道二极管的隧道电流, I_p 表示隧道二极管的峰值电流, V_0 表示电流随电压变化的特征电压参数。关于隧道二极管负阻特性与公式变量的关联性, 这一特性主要体现在指数项, 隧道二极管的负阻区是指在某一电压范围内, 电流随电压增加反而减小的区域, 这正是指数衰减项所描述的行为。当偏置电压 V_{bias} 处于适当范围时, 隧道二极管工作在负阻区, 此时器件能够将直流偏置能量转化为射频信号的增益, 从而实现 6~10 倍的信号放大。特征电压 V_0 决定了负阻区的陡峭程度, 其值越小, 电流对电压变化越敏感, 负阻效应越显著。

2) 不同 RIS 架构的特定约束集合

不同 RIS 架构在物理实现与性能优化方面各具特点。BD-RIS 通过引入可控的单元间耦合扩展了优化自由度。基于图论建模的研究表明, 树连接 BD-RIS 能够在保持与全连接结构相当性能的同时显著降低计算复杂度, 其散射矩阵可通过电抗矩阵经由特定的复数变换关系得到。组连接 BD-RIS 提供了性能与复杂度的折中方案, 该方案将 N 个元件划分为 G 个组, 每组内部全连接, 组间独立, 形成块对角散射矩阵结构。

STAR-RIS 系统的约束集合包含 3 种操作协议。ES 协议允许连续功率分配, 透射和反射系数满足

$\alpha_t + \alpha_r = 1$ 的线性约束。MS 协议要求每个单元工作于纯透射或反射模式, 构成组合优化问题。TS 协议引入时域维度, 通过时分方式切换工作模式, 需联合优化时间调度与相移配置^[84]。研究表明, ES 协议在高信噪比环境下性能最优, 而 MS 协议在硬件复杂度方面更具优势。

有源 RIS 的约束集合需要考虑功率预算和稳定性条件。在单功放设计中, 总功率约束为

$$P_{\text{total}} = \frac{P_{\text{TX}}}{\eta_{\text{TX}} \alpha} + P_{\text{RIS}} + \frac{P_{\text{PA}}}{\eta_{\text{PA}}} + P_{\text{static}} \quad (11)$$

其中, η_{PA} 是功放效率, 通常在 30%~60%, P_{total} 是系统的总功率消耗, P_{TX} 是发射机的发射功率, η_{TX} 是发射机的效率, α 是与发射链路相关的功率分配或损耗系数, P_{RIS} 是 RIS 单元的功率消耗, P_{PA} 是功率放大器的输出功率, P_{static} 是系统的静态功耗, 包括控制电路、偏置网络等非射频部分的固定功率消耗。稳定性条件要求总阻抗的实部为正, 以防止振荡。隧道二极管设计需要考虑偏置点优化, 在负阻区域 $[-50 \Omega, -500 \Omega]$ 内选择工作点在最大化增益同时保持稳定性^[85]。

表 2 中性能增益相对于传统对角 RIS 在相关信道条件下的和速率提升。BD-RIS 的性能优势在强相关信道中更为显著, 而有源 RIS 在功率受限场景下表现突出。计算复杂度分析基于每次迭代的浮点运算次数, 实际运行时间取决于收敛速度和并行化程度。

3.1.2 模型普适性验证与实测分析

本文提出的三维参数化散射模型的普适性已在多种实际通信场景中得到广泛验证。最新的实验研究表明, 该模型能够准确描述从 sub-6 GHz 到太赫兹频段的 RIS 信道特性, 并在静态和动态环境下表现出优异的预测精度。

在不同频段的实测中, 三维参数化散射模型展现出良好的跨频段适应能力。在 6.9 GHz 工业场景下, Zhang 等^[86]基于 3GPP 标准的几何随机信道模型开展的验证表明, 该模型在路径时延、角度分布和功率特性等小尺度参数方面与实测数据高度一致, 其中路径功率预测误差小于 2 dB, 角度估计精度优于 3°。在毫米波频段的验证中, Coskun 等^[87]于 28 GHz 城市环境开展的 5G-Advanced 实际部署测试显示, RIS 辅助通信系统可实现 8~12 dB 的参考信号接收功率提升, 覆盖距离延伸至 150 m, 且模型预测值与实测结果之间的相关系数高达 0.92。

表2 各架构信道参数对比

架构类型	散射矩阵维度	相位约束	功率约束	计算复杂度	性能增益
对角 RIS	$N \times N$ 对角	$\theta_n \in [0, 2\pi)$	$\ \Psi\ _F^2 = N$	$O(N)$	基准
BD-RIS (全连接)	$N \times N$ 满秩	对称酉约束	无损约束	$O(N^3)$	+60%
BD-RIS (树连接)	$N \times N$ 稀疏	图结构约束	无损约束	$O(N^2)$	+58%
STAR-RIS (ES)	$2N \times 2N$	$\theta_t, \theta_r \in [0, 2\pi)$	$\alpha_t + \alpha_r = 1$	$O(N^2)$	+45%
有源 RIS (PA)	$N \times N$	$\theta_n \in [0, 2\pi)$	$P_{\text{total}} \leq P_{\text{max}}$	$O(N^2)$	+130%
有源 RIS (TD)	$N \times N$	相幅耦合	$P_n \leq P_{\text{bias}} I$	$O(N^3)$	+120%
STC-RIS	$N \times N$	二进制	P_{switch}	$O(N^2 L)$	+40%

此外, 在太赫兹频段的验证方面, Hou 等^[88]通过 220 GHz 原型系统测试实现了 2.341 Gbit/s 的有效数据传输速率, 进一步证明了该模型在极高频段通信场景中的有效性与适用性。

如果需要评估一个模型的普适性, 其在动态场景下的鲁棒性是一项核心衡量指标。Mursia 等^[89]通过办公室环境的实时信道测量, 验证了考虑互耦效应和散射体影响的阻抗模型, 在存在人员移动和环境动态变化的条件下, 主要多径分量的功率预测偏差可控制在 3 dB 以内。Wang 等^[90]提出了端到端深度学习框架, 太赫兹大规模 MIMO 系统中的信道外推方案在重构性能方面显著优于现有最佳方案, 同时显著降低了导频开销。

在复杂传播环境验证方面, 三维参数化散射模型在多径丰富场景中的表现尤为重要。Li 等^[91]在非互易 BD-RIS 辅助的全双工系统中, 通过多端口网络分析验证了模型在同时存在上下行链路干扰时的准确性。实验结果表明, 即使在结构散射与互耦效应共同作用下, 模型预测的信号功率与实测值之间的偏差仍低于 1.5 dB。

尽管三维参数化散射模型展现出良好的普适性, 但在某些极端条件下仍存在性能退化。对于超大规模 RIS (元件数 > 10 000), 近场效应的精确建模仍面临挑战, 需要开发更高效的混合场景建模方法。

3.2 多目标优化问题

RIS 辅助通信系统的设计本质上是一个多目标优化问题, 需要在系统容量、能源效率和其他功能需求之间进行权衡。其统一优化框架可以表述为

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}} \alpha C(\mathbf{x}) + \beta E(\mathbf{x}) + \gamma F(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{x} \in \mathcal{X} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{x} = \{\mathbf{W}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}\}$ 包含基站预编码矩阵 \mathbf{W} 、RIS 配置参数 $\boldsymbol{\theta}$ 和功率分配向量 \mathbf{p} 。权重系数 α 、 β 和 γ

反映了不同性能指标的相对重要性, 可通过帕累托优化或层次分析法确定。 \mathcal{X} 为架构特定约束集。

容量指标 $C(\mathbf{x})$ 通常采用和速率作为度量, 对于多用户系统, 有

$$C(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K \text{lb} \left[1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_0^2} \right] \quad (13)$$

其中, 有效信道 $\mathbf{h}_k = \mathbf{h}_{d,k} + \mathbf{H}_{r,k}^H \mathbf{O} \mathbf{g}_k$ 包含直接路径和 RIS 辅助路径。

能效指标 E 综合考虑传输功率和电路功耗, 即

$$E = \frac{C}{P_{\text{trans}} + NP_{\text{RIS}} + P_{\text{static}}} \quad (14)$$

其中, P_{RIS} 为每个 RIS 元件的功耗, 对于被动 RIS 约为 5~40 mW, 有源 RIS 可达 100~500 mW^[10], C 是系统容量或可达速率, 反映数据传输能力, P_{trans} 是传输功率, N 是 RIS 单元的数量, P_{static} 是系统静态功耗。该指标的物理意义在于衡量单位能量所能传输的信息量, 数值越大表示系统能效越高。

功能指标 $F(\mathbf{x})$ 涵盖了多种应用特定需求。对于物理层安全, $F(\mathbf{x}) = R_{\text{secure}} = [R_{\text{Bob}} - R_{\text{Eve}}]^+$ 表示安全容量, 其中 R_{Bob} 和 R_{Eve} 分别为合法用户和窃听者的速率。

4 算法-能源双轨协同设计

4.1 维度定制化算法

在 RIS 辅助通信系统中, 联合优化问题普遍呈现高度非凸特性, 直接求解计算复杂度极高。为解决这一难题, 三维交替优化框架通过将原问题分解为空间域、时频域和功能域 3 个子问题, 显著提升了求解效率。该框架的核心思想是在每一维度优化时固定其他变量, 从而将复杂的非凸问题转化为一系列可处理的子问题。

在空间域优化中, 算法重点针对基站预编码和 RIS 相移配置, 采用块坐标下降 (BCD, block coordinate descent) 方法, 并借助子阵列划分实现并行计算, 有效降低了计算复杂度。Ramezani 等^[92]针对 RIS 离散相移与有限容量前传等实际约束, 采用 BCD 并结合球面穷举搜索与下降 (SESD, spherical exhaustive search with descent) 算法, 直接在最离散集合中联合优化基站预编码与 RIS 相移配置, 以最小化总均方误差。该方法确保了每个子问题的全局最优解, 从而保证了算法的收敛性。STAR-RIS 中的透射与反射联合优化则采用统一流形近似与投影 (UMAP, unified manifold approximation and projection) 技术处理高维信道, 并借助模糊 C 均值聚类完成元件分配。在不确定环境下, 分布式鲁棒强化学习被用于联合优化无人机轨迹与波束成形, 为最坏情况系统性能提供保障。

时频域优化主要关注多载波资源分配与动态 RIS 相移配置。Li 等^[93]通过频率依赖导纳建模, 实现不同子载波的差异化散射矩阵配置, 频谱效率提升 15%~25%。Abbas 等^[94]提出的相位-频率轮廓方法, 通过闭式更新避免矩阵求逆, 将计算开销降低 60%~70%。尽管针对 STC 调制与 TTD 延迟补偿的算法研究仍较为有限, 但自适应深度强化学习结合新型损失函数 (ADRL-NLF, adaptive deep reinforcement learning with novel loss function) 的框架实现了 96.4% 的收敛性提升与 11.11%~22.22% 的能效增益^[81]。混合能量收集机制整合元件分割、时间切换和功率分割等多协议, 在单用户与多用户场景中分别实现 81.5% 和 73.2% 的能量

收集效率, 较传统方法提升 42%。针对宽带 RIS 离散真时延器的研究为时频算法在 ISAC 中的应用奠定了基础。

功能域优化致力于通信、感知与能量收集等多功能协同优化。Cheng 等^[82]的研究表明, 通过 RIS 旋转角度优化可以获得额外的自由度, 从而带来显著的性能提升。混合能量收集资源分配策略采用两阶段操作: 首先将所有 RIS 元件用于能量收集, 随后动态划分部分元件执行信号反射。该策略在实际多用户场景中结合能效深度确定性策略梯度 (EE-DDPG, energy-efficient deep deterministic policy gradient) 算法, 达到 73.2% 的能量收集效率^[32]。研究表明, 在低功率预算条件下, 较小的功率提升即可显著改善通信速率。为了定量评估不同算法的计算复杂度与能效权衡, 表 3 综合对比了近期研究中的主要优化算法性能。其中, N 为 RIS 元件数, M 为基站天线数, 能效为相对理论最优的百分比; 测试条件: $N = 256$, $M = 16$, $\text{SNR} = 10 \text{ dB}$, 用户数 $K = 4$ 。

4.2 跨维度协同优化

基于深度学习的优化方法为 RIS 辅助通信系统提供了新的解决方案。维度深度展开网络通过将传统迭代优化算法转化为可学习的神经网络层, 显著降低了计算复杂度。基于交替方向乘子法 (ADMM, alternating direction method of multipliers) 的深度展开方法将计算复杂度从 $O(N^3)$ 降至 $O(N)$, 在保持 95% 以上近似最优性能的同时大幅提升收敛速度。该网络的每一层对应一次 ADMM 迭代过程, 并通过可训练参数增强其表达能力, 有效融合了优化理论的严谨性与深度学习的自适应能力。

表 3 综合对比近期研究中的主要优化算法性能

算法类别	具体算法	计算复杂度	能效提升	适用场景	文献来源
传统优化	WMMSE	$O(N^3M)$	60%~65%	小规模静态	文献[95]
	SDR	$O(N^3)$	65%~70%	中等规模	文献[96]
	BCD	$O(N^3M)$	55%~60%	实时要求高	文献[97]
深度学习	DNN	$O(NM)$	75%~80%	大规模动态	文献[98]
	Transformer	$O(N^2)$	78%~82%	复杂场景	文献[99]
强化学习	EE-DDPG	$O(N^2 \log N)$	81.5%	能效优先	文献[100]
	TD3	$O(N^2)$	74.3%	多用户	文献[101]
	PPO	$O(NM)$	68%~70%	离散控制	文献[102-103, 116-117]
	LSTM-DDQN	$O(KSAH)$	23% ($M=128$)	时变信道	文献[105]

在模型架构方面, 基于 Transformer 的架构在信道预测与 RIS 相位优化中表现出卓越性能。序列到单一模型采用 4~8 个注意力头, 结合改进的前馈层和一维卷积网络, 有效捕捉局部信道模式, 即使在不完整 CSI 条件下仍可实现接近完美 CSI 的性能。在快速时变信道中, 该模型表现出优于 CNN-LSTM 混合结构的性能。此外, 纯 CNN 架构为端到端学习提供了实用且高效的解决方案, 其误码率表现甚至优于部分理论下限^[104]。CNN-自编码器以卷积层优化相位, 实现更低计算复杂度。RNN-LSTM 架构在动态无人机环境中表现出良好适应性, 实时操作可达约 85% 的最优性能^[105]。实验研究表明, 深度展开网络将传统交替优化的高阶复杂度降至线性水平^[106]。块坐标上升与连续凸近似方法结合可在 5~10 次迭代内收敛, 大幅减少计算时间^[107]。

在具体性能方面, 深度学习驱动的方法普遍实现了计算效率的显著提升。在大规模 RIS 系统中, 可实现毫秒级时延的实时优化。在 UAV-ARIS 辅助的车载通信系统中, 通过联合优化策略实现了 17.48% 的能效提升^[108]。STAR-RIS 辅助的 UAV-enabled MEC 网络通过长期时延最小化与系统稳定性优化, 实现了算法-能源协同设计在实际系统中的效益。

在实际部署系统中, UAV 轨迹、RIS 相位偏移与发射功率的联合优化带来了可观的能源节省。在采用 RSMA 的低地球轨道卫星通信系统中, 借助 UAV 搭载的全连接有源 BD-RIS 和深度强化学习策略, 实现了系统级的性能优化^[109]。

总体而言, 算法-能源双轨协同设计在 UAV-RIS 系统中取得了突破性进展。流形优化、深度展开网络与混合能量收集策略的融合, 能够在逼近最优性能的同时大幅降低计算复杂度。实验验证表明, 此类方法可保证 95% 以上的近似最优性能, 能量收集效率超过 80%, 计算复杂度降低数个数量级, 成为 6G 无线网络中具有关键作用的基础使能技术。

4.3 能效管理策略

RIS 辅助 UAV 通信系统的能效管理采用分层能耗模型, 为系统级功耗优化提供了精确的数学框架。

$$E_{\text{total}} = E_{\text{space}} + E_{\text{time-freq}} + E_{\text{function}} + E_{\text{UAV}} \quad (15)$$

空间域能耗 E_{space} 主要源于 RIS 元件的激活模式和物理分布, 研究表明采用部分元件选择性激活策略可有效提升系统能效。时频域能耗 $E_{\text{time-freq}}$ 涵盖了占空比控制和时隙操作, 智能占空比技术在高

密度场景下可以降低能耗, 同时保持比随机基线低的误检率。功能域能耗 E_{function} 主要包括优化算法所需的处理功率, 其计算复杂度从简单方法的低阶水平到高级深度强化学习的高阶水平不等, 这直接决定了由计算负载带来的能量消耗规模。

硬件实测数据有效验证了理论模型的准确性。具体而言, 被动 RIS 元件的功耗根据类型不同而有所差异: PIN 二极管型元件功耗范围为 5~10 mW, 变容二极管型则为 8~15 mW。有源 RIS 元件需要更高的功耗支持, 包括 6~20 mW 的基础功耗和 5~15 mW 的额外放大功耗。有源 RIS 系统的总功耗遵循特定的功耗模型, 可表示为

$$P_{\text{RIS,active}} = P_{\text{static}} + P_{\text{units}} + \zeta_{\text{RIS}} P_{\text{out}} \quad (16)$$

其中, 静态功耗 P_{static} 包括现场可编程门阵列 (FPGA, field programmable gate array) 和驱动电路的每元件 2~5 mW, 动态功耗 P_{units} 随激活单元数变化, 放大器效率 ζ_{RIS} 在 0.1~0.4 内。这种精确建模使系统能够根据实时需求动态调整功耗配置, 实现了 130% 的和速率增益, 而被动 RIS 仅达到 22%^[31]。

UAV-RIS 系统的能源管理采用人工智能驱动的自适应节能机制。例如, TD3 算法能够协同优化传输时延、MEC 能耗与 UAV 飞行能耗, 实现系统能效的整体提升。PPO 算法在管理休眠状态方面表现优异, 可在多小区 RIS 网络中以低于 DQN 基线的能耗实现有效控制。这类智能系统可执行复杂的休眠策略, 包括部分元件休眠、动态占空比调度和基于流量预测的功率管理。

深度强化学习框架在多种应用场景中展现出卓越效能。信任域策略优化 (TRPO, trust region policy optimization) 在高发射功率条件下表现优于其他深度强化学习算法。元强化学习凭借其动态环境更强的适应能力, 在较低服务质量 (QoS, quality of service) 阈值下可实现更高能效。基于优先级采样的分散协调对决深度 Q 网络 (PS-DC-DDQN, priority sampling decentralized coordinated double deep Q-network) 被应用于 RIS 辅助的 NOMA-UAV 系统, 可以提升资源分配效率。集成无线信息与功率传输技术与 UAV-RIS 系统结合, 可在多用户场景下实现高效能量收集, 通过捕获环境射频能量有效延长系统续航。

动态功率控制机制已从初期的简单开关控制逐步发展为能够实时响应信道条件、业务流量与能量

状态的优化框架。在有源 RIS 系统中, 基于阈值的动态控制策略用于优化基站发射功率与 RIS 输出信号之间的功率分配。在相位控制方面, 采用 2 bit 编码与 PIN 二极管切换可实现稳定的 90° 相位差, 而连续相位控制方案则具备理论上的无限分辨率。先进的幅度控制机制利用隧道二极管的负阻特性实现反射信号放大, 并通过线性代数模型刻画其固有的相位-幅度耦合关系。

能量收集技术的引入进一步提升了系统的可持续性。混合能量收集策略通过协同利用射频能量与太阳能, 可显著延长 UAV 续航时间, 效果优于单一电池供电方案。不规则 RIS 结构支持能量收集与信号反射模式的动态切换, 在满足通信 QoS 的前提下最大化能量捕获。最新研究通过联合优化 UAV 轨迹、RIS 相位与能量收集调度, 构建了以能效最大为目标的混合整数非线性规划模型, 并在满足通信 QoS、功率与能量约束的条件下实现了高效求解^[32]。

图 3 展示了不同优化算法在计算复杂度与能效之间的权衡关系。高计算复杂度算法 $O(N^5)$ 实现 80%~85% 的能效, 而低计算复杂度算法仅实现 60%~65% 的能效。深度强化学习算法 (如 EE-DDPG) 对于有源 RIS 的嵌套分数规划需要 $O(I_{am}(2I_{nest}MN^5 + I_{din}K^4))$ 的计算复杂度, 收敛通常发生在 100~10 000 次迭代内。顺序分数规划将计算复杂度降低到 $O(I_{am}(I_{seq}MN^4 + I_{din}K^4))$, 同时保持竞争性性能, 被动 RIS 变体进一步将计算复杂度降低到 $O(I_{am}(I_{ncst}N^3 + I_{din}K^4))$ 。

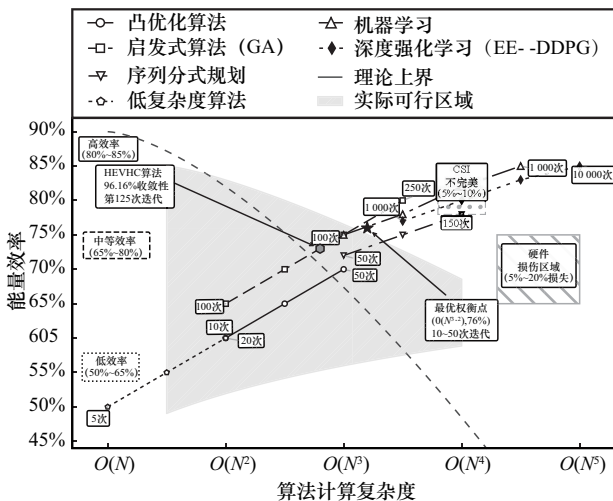


图 3 算法计算复杂度与能效权衡曲线

实验验证表明, 混合能效虚拟层次聚类 (HEVHC, hybrid energy-efficient virtual hierarchical clustering) 算法在第 125 次迭代时展现出卓越性能, 其收敛性较穷举搜索优化算法提升 96.16%, 充分证明了智能算法设计在克服传统暴力方法局限性方面的有效性。凸优化方法在简化问题模型中表现稳定, 能在 10~50 次迭代内保证获得全局最优解, 实现 60%~70% 的能效水平, 但其应用范围受限于问题的可凸化程度。相比之下, 机器学习方法虽然需要 100~1 000 个训练回合才能达到收敛状态, 但收敛后可提供 75%~85% 的持续高效性能, 展现出更好的长期优化潜力。遗传算法等传统启发式方法通常需要约 250 次迭代和 10 个种群才能达到 65%~80% 的能效水平, 在计算复杂度与能效间实现了较好平衡。

此外, 硬件损伤对系统性能的影响不容忽视。信道状态信息不完善等因素会导致 5%~10% 的能效损失, 而多种损伤因素的综合效应可能使系统总体性能下降高达 20%。这一发现突显了在实际系统设计中考虑硬件非理想特性的重要性, 也指明了未来算法改进的方向应更加注重对实际约束条件的适应性。

5 性能评估与架构选择决策

5.1 多维性能指标体系

UAV-RIS 系统的性能评估需构建涵盖通信、感知与能效的多维度指标体系。在通信方面, 短包通信的端到端时延需控制在 5~15 ms, RIS 相位优化算法的处理时延应低于 1 ms, 以满足高实时性业务需求。在感知方面, ISAC 系统可实现 95%~98% 的感知准确率; 通过波束成形优化, 能够在达到 90% 以上检测概率的同时, 将虚警率控制在 5% 以下, 体现出较高的感知可靠性^[10]。在能效方面, 系统优化展现出一定的潜力。帕累托优化可有效协调多目标间的权衡关系, You 等^[11]建立的理论框架揭示了能效与频谱效率之间的权衡规律, 研究表明在 RIS 辅助的多用户 MIMO 上行链路中, 系统最优工作点通常位于 70%~80% 最大频谱效率区间, 此时能效与频谱效率达到较优平衡。

为进一步实现系统性能的全面评估, 可采用多维度评估框架, 通过雷达图对能耗、硬件复杂度、通信性能、成本效益、部署灵活性与覆盖能力等 6 个关键维度进行可视化表征。权重配置需依据具体应用场景确定, 如在城市热点场景中容量权重较

高，而物联网应用中能效权重可设为 0.5。该系统还集成实时性能监控功能，持续跟踪瞬时吞吐量、平均时延、能耗效率与覆盖质量等关键性能指标，为系统动态优化提供反馈依据。

5.2 场景驱动的架构选择

RIS 辅助 6G 网络的架构选择需要系统性的决策框架来评估不同部署场景下的性能需求、约束条件和实现复杂度。近年来的研究建立了综合性的需求映射矩阵，将 5 种主要 RIS 架构类型（STAR-RIS、BD-RIS、Active RIS、Holographic RIS 和 Hybrid RIS）与具体应用场景进行优化匹配。多准则决策方法采用层次分析法进行架构间的成对比较，通过 TOPSIS（technique for order preference by similarity to ideal solution）方法基于理想解的接近度对备选方案进行排序，并运用目标规划实现特定目标水平的多目标优化。

需求映射矩阵的构建涵盖 2 个核心维度：覆盖需求和能耗约束^[31]。STAR-RIS 在需要 360° 全空间覆盖的场景中表现优异，通过独立控制透射和反射波实现了双向服务能力，适合室外到室内的穿透场景。BD-RIS 则借助非对角散射矩阵提供更多干扰管理自由度，在密集城区环境中较传统对角结构实现了显著的和速率提升。

在约束条件评估方面，研究建立了清晰的决策边界。硬件复杂度约束显示，当 RIS 单元数超过 256 时，有源架构面临功耗与散热挑战，此时混合 RIS 通过部分激活有源单元可实现性能与能耗的有效平衡。此外，BD-RIS 全连接架构需较高的导频

开销，而基于张量分解与压缩感知的技术可有效降低 98% 的导频开销^[112]。

架构选择决策树如图 4 所示，采用分层决策机制，基于场景特征进行系统性筛选。第一层根据覆盖范围需求进行初步筛选：全空间覆盖需求导向 STAR-RIS 或智能全向表面（IOS, intelligent omnidirectional surface）选择，半空间覆盖则考虑传统架构。第二层分析用户分布密度：高密度场景优先选择 BD-RIS 以充分利用其增强的空间复用能力，低密度场景则根据链路预算选择被动 RIS 或有源 RIS。第三层考虑能量约束：严格功率限制下选择被动 RIS，当功率预算充足时 Active RIS 可提供显著的性能增益。第四层评估移动性需求：高移动性场景需要可旋转或流体 RIS 以实现动态波束跟踪，静态或低移动性场景则可采用固定配置。

在 6G 网络部署中，不同场景下的 RIS 架构选择呈现出明显的差异化特征。密集城区环境下的实测数据显示，土耳其伊斯坦布尔的 28 GHz 外场试验采用动态可重构智能表面，成功实现了参考信号接收功率 8~12 dB 的提升，并将有效覆盖范围扩展至 150 m^[113]。BD-RIS 凭借其非对角散射矩阵特性与干扰对齐策略，有效支持了多流复用传输，其中部分放大方案较全放大方案能效提升 20.3%^[87]。STAR-RIS 可同时服务街道两侧用户，在室外实现 35 dB 功率增益^[52]。

中国移动在江苏的实地测试进一步验证了 RIS 在 3 种典型场景中的性能表现：室外宏站至室内穿透增强带来 15~20 dB 的信号提升；室内覆盖范围

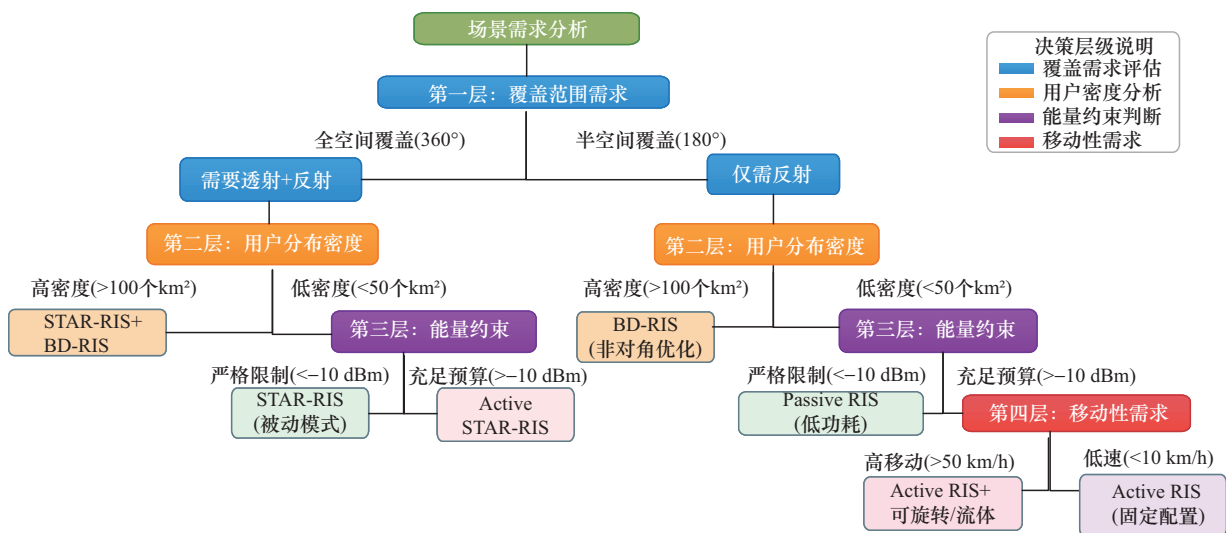


图 4 架构选择决策树

扩大 2.5 倍; 非视距室外场景中吞吐量提升 2~3 倍^[14]。值得注意的是, 多 RIS 协同部署方案已能支持 50 km/h 的移动速度, 通过动态波束选择机制有效维持了高速移动环境下的连接稳定性^[15]。

郊区场景中的技术方案更加注重覆盖与能效的平衡。有源 RIS 在此展现出独特优势, 能够有效克服远距离通信中的双重衰落问题, 特别是高空平台搭载型 RIS 为应对超远距离路径损耗提供了创新解决方案^[53]。可旋转 RIS 实现 160° 波束转向, 在 5.8 GHz 边缘计算中降低 47.3% 能耗^[116]。此外, 可移动 RIS 通过三维轨迹与相位的联合优化, 相比固定部署方案进一步提升了系统覆盖灵活性和容量性能。

在室内热点环境中, 全息 RIS 与混合架构表现突出。1 100 个元件的 RIS 在 5.8 GHz 频段成功穿透 30 cm 混凝土墙, 实现 26 dB 的增益效果^[60]。混合有源-被动 RIS 架构根据信道条件智能切换工作模式, 在保持性能的同时优化了功耗。

表 4 总结了场景与架构的最优映射关系。密集城区推荐 BD-RIS 与 STAR-RIS 组合以实现高容量全

空间覆盖, 郊区场景采用 Active RIS 与可移动 RIS 配置以平衡覆盖与能效, 在室内热点部署场景中, 单纯的全息可重构智能表面 (Holographic RIS) 虽能提供极致的空间复用和波束聚焦, 但其无源特性在应对严重穿墙损耗时存在局限。引入混合有源-无源中继器 (HAPR, hybrid active-passive repeater) 作为辅助, 可以弥补了这一短板, 其混合特性避免了传统有源中继的高能耗与噪声积累问题, 实现了性能与效率的最佳权衡。这种场景驱动的架构选择确保了 RIS 技术在不同环境下的最优性能表现。

6 挑战与未来研究方向

RIS 系统中的三维联合优化属于 NP-hard 问题, 严重制约其实时部署能力。计算复杂度主要源于主动与被动波束成形及功率分配间的多维耦合, 这个问题在 BD-RIS 架构中尤为突出。全连接 BD-RIS 虽性能最优, 但互连复杂度高, 硬件开销大^[117]。相比之下, 基于图论构建的树连接 BD-RIS, 以较低复杂度实现近似全连接性能, 更适合大规模部署场景^[49]。

在实时性方面, 毫米波与太赫兹频段的信道相

表 4 场景与架构的最优映射关系

部署场景	场景特征	推荐 RIS 架构	关键性能指标	技术优势	部署考虑	TRL 等级
密集城区	高用户密度 (>100 个/km ²) 严重 NLOS 遮挡 多径传播环境 建筑立面可用	主架构: BD-RIS + STAR-RIS 辅助: TRIS/ARIS 混合部署	RSRP 改善: 8~12 dB 吞吐量提升: 2~3 倍 覆盖扩展: 150 m 室外功率增益: 35 dB	BD-RIS 非对角矩阵优化多用户干扰 STAR-RIS 实现 360° 全空间覆盖 支持 50 km/h 移动速度	建筑立面安装 28 GHz 毫米波优先 多 RIS 协同必要 SSB 索引 0~15 动态切换	TRL7-8 (2025-2027 商用)
郊区覆盖	低用户密度 (<50 个/km ²) 大范围覆盖需求 功率预算充足 地形复杂多变	主架构: Active RIS + 可移动 RIS 辅助: 可旋转 RIS	能效提升: 47.3% 覆盖半径: 2.5 倍扩展 波束转向: 160° 系统容量: +30%~40%	Active RIS 克服双重衰落 可移动 RIS 三维轨迹优化 机械转台支持动态调整	元件数 < 256 优选 功率 > -10 dBm 时部署 HAPS 平台适用 5.8 GHz 频段优选	TRL5-6 (2026-2029 商用)
室内热点	超高容量需求 短距离传输 穿墙损耗严重 多运营商共存	主架构: Holographic RIS 辅助: HAPR (混合有源-被动)	穿墙增益: 26 dB 信号改善: 18 dB QoS 影响: 最小化 Wi-Fi 提升: >5 dB	全息表面亚波长分辨率 HAPR 智能模式切换 近场精确波束聚焦	1 100~4 096 元件阵列 3.75~5.8 GHz 频段 $\frac{\lambda}{4}$ 元件间距 30 cm 混凝土墙适用	TRL4-5 (2026-2030 商用)
日常公路	高移动性 (>50 km/h) 线性覆盖拓扑 切换频繁 车联网需求	主架构: 可旋转 RIS + Active RIS 辅助: 流体 RIS	移动支持: 50 km/h 切换成功率: 95% 时延降低: 40% 覆盖连续性: 99%	可旋转 RIS 动态跟踪 流体 RIS 快速重构 Active RIS 补偿快衰落	100 Hz 更新率 亚 100 ms 重构速度 路侧杆塔部署 C-V2X 集成	TRL4-5 (2027-2030 商用)
工业园区	高可靠低时延 AGV 密集部署 金属遮挡严重 定位精度要求	主架构: BD-RIS + Active RIS 辅助: IOS (智能全向表面)	可靠性: 99.999% 时延: <1 ms 定位精度: <10 cm 能效: +22%	BD-RIS 增强空间复用 Active RIS 保障链路质量 IOS 全向信号增强	IP65 防护等级 不需要专用电源 TCO 降低 78% 统计优化算法	TRL6-7 (2025-2027 商用)

干时间仅毫秒级,要求算法响应极快。为此,设计端到端深度学习方法通过离线训练降低在线计算负担,可以有效支持集成感知与通信波束成形^[118]。当 RIS 单元数超 10 万时,近场效应成为主导,远场假设失效,信道估计开销随基站天线数呈二次增长。为此研究人员提出了面向极大规模 RIS 的码本与波束训练方法,以便于更好地区分远场和近场传播特性^[119]。分布式控制是应对超大规模 RIS 部署的另一关键路径,图神经网络赋能的多 RIS 协同表现优异,但在高频段中,多面板间同步问题依旧存在。虽然联邦学习可降低通信开销达 16 倍,但在超大规模实时优化中其收敛速度仍受限^[120]。

面向 6G 时代, RIS 技术研究正朝着系统级集成与智能化协同的方向快速发展,呈现出软硬件深度协同、跨层协议融合及环境智能化三大趋势。空间-时频联合优化成为研究重点,物理启发神经网络通过将麦克斯韦方程嵌入深度学习框架,实现了电磁调控的精准建模并显著降低了仿真需求,其有效性已在太赫兹实验中得到验证^[121];全息 RIS 通过亚波长单元逼近连续孔径,为 6G 网络提供了新的思路; STAR-RIS 可集成波束控制与调制,推动物理层融合。

语义通信与 RIS 技术的融合是另一重要发展方向。在 RIS 增强的语义频谱共享网络中,基于强化学习的资源分配方法显著提升了系统性能;通过端到端学习框架对语义编码与 MIMO 预编码进行联合优化,可使任务型通信的准确率较传统方法提升 15%~20%^[122]。在人工智能设计方面,神经形态 RIS 推动了硬件与算法的深度融合, RISnet 架构将互耦效应与不完全信道状态信息纳入网络设计,能够高效处理规模达数千单元的 RIS,并将计算复杂度降至传统方法的十分之一^[123];深度强化学习支持 RIS 辅助的 NOMA 网络实现多智能体分布式决策,结合扩散模型增强信道状态信息获取能力,其收敛速度明显优于传统方法。

RIS 技术演进主要体现在 3 个方面:在智能化与自治化方面,数字孪生技术通过建立高保真虚拟映射,有效降低了信道状态信息获取开销,并提升了波束成形与干扰管理的稳健性;在能量可持续性方面, STAR-RIS 混合架构、噪声调制技术及智能相移策略共同推动了零能耗通信的发展;在跨域协同方面, RIS 与认知无线电、无人机通信及非地面网

络实现深度融合,通过智能频谱共享、空-地资源联合优化及立体化覆盖架构,全面提升整体网络能力。预计 2030 年后, RIS 将进一步与 UAV 平台、太赫兹 MIMO 及全息表面等新兴技术结合,推动无线通信从“适应信道环境”向“主动塑造环境”转变,为 6G 及未来数字生态系统提供关键基础支撑。

7 结束语

本文对面向 6G 网络的 RIS 辅助 UAV 通信系统进行了系统性研究。在三维创新架构方面,从空间域、时频域和功能域 3 个维度归纳了 RIS 技术演进路径;在统一数学建模方面,通过散射算子参数化和多目标优化框架,建立了不同架构的一致性描述方法;在算法-能源协同设计方面,从维度定制化算法、跨维度协同优化和能效管理策略 3 个层面总结了双轨优化方法;在架构选择决策方面,基于场景特征、性能需求和资源约束,构建了系统化的部署框架。最后,对未来的无人机与 RIS 结合面临问题进行总结,提出了未来可能的发展研究方向,为后续相关研究提供框架选择与算法研究的参考基础。

参考文献:

- [1] DANG S P, AMIN O, SHIHADA B, et al. What should 6G be?[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(1): 20-29.
- [2] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 28-41.
- [3] 张在琛, 江浩. 智能超表面使能无人机高效通信信道建模与传输机理分析[J]. *电子学报*, 2023, 51(10): 2623-2634.
ZHANG Z C, JIANG H. Channel modeling and characteristics analysis for high energy-efficient RIS-assisted UAV communications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(10): 2623-2634.
- [4] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向 6G 的无人机通信综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(3): 781-789.
CHEN X Y, SHENG M, LI B, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781-789.
- [5] ALHAMAD R, BOUJEMAA H. Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces (STAR-RIS) with hybrid solar, RF and wind energy harvesting[J]. *Wireless Personal Communications*, 2024, 138(3): 1799-1813.
- [6] 卢为党, 曹明锋, 高原, 等. 基于智能反射面辅助的无人机中继系统安全通信方法[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(7): 2273-2280.
LU W D, CAO M F, GAO Y, et al. Secure communication method based on intelligent reflection surface assisted UAV relay system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(7): 2273-2280.
- [7] ZHANG Z J, DAI L L, CHEN X B, et al. Active RIS vs. passive RIS: which will prevail in 6G?[J]. *IEEE Transactions on Communications*,

- 2023, 71(3): 1707-1725.
- [8] LIU K Z, ZHANG Z J, DAI L L, et al. Active reconfigurable intelligent surface: fully-connected or sub-connected? [J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 26(1): 167-171.
- [9] NGUYEN N T, NGUYEN V D, WU Q Q, et al. Hybrid active-passive reconfigurable intelligent surface-assisted multi-user MISO systems[C]// *Proceedings of the 2022 IEEE 23rd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication (SPAWC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [10] 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.
- [11] GUO H Y, LIANG Y C, CHEN J, et al. Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 3064-3076.
- [12] SALEH A M, OMAR S S, EL-HALEEM A M A, et al. Trajectory optimization of UAV-IRS assisted 6G THz network using deep reinforcement learning approach[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 18501.
- [13] MOHSIN M A, RIZWAN H, JAZIB M, et al. Deep reinforcement learning optimized intelligent resource allocation in active RIS-integrated TN-NTN networks[C]// *Proceedings of the 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-7.
- [14] HU H, ZHAO S H, HUANG Y C, et al. Energy efficiency maximization for IRS-assisted UAV short packet communication[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 9124.
- [15] PENG H R, WANG L C. Energy harvesting reconfigurable intelligent surface for UAV based on robust deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(10): 6826-6838.
- [16] MOHSAN S A H, KHAN M A, ALSHARIF M H, et al. Intelligent reflecting surfaces assisted UAV communications for massive networks: current trends, challenges, and research directions[J]. *Sensors*, 2022, 22(14): 5278.
- [17] SINGH S K, AGRAWAL K, SINGH K, et al. RSMA for hybrid RIS-UAV-aided full-duplex communications with finite blocklength codes under imperfect SIC[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(9): 5957-5975.
- [18] LIU X, LIU Y W, CHEN Y. Machine learning empowered trajectory and passive beamforming design in UAV-RIS wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 39(7): 2042-2055.
- [19] LIU Y, LIU X, MU X, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: principles and opportunities[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(3): 1546-1577.
- [20] KISHK M A, ALOUINI M S. Exploiting randomly located blockages for large-scale deployment of intelligent surfaces[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(4): 1043-1056.
- [21] YAN W J, YUAN X J, HE Z Q, et al. Passive beamforming and information transfer design for reconfigurable intelligent surfaces aided multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1793-1808.
- [22] SALEM A, WONG K K, ALEXANDROPOULOS G, et al. A first look at the performance enhancement potential of fluid reconfigurable intelligent surface[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2502.17116, 2025.
- [23] CHEN X Q, ZHANG L, ZHENG Y N, et al. Integrated sensing and communication based on space-time-coding metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 1836.
- [24] AN J C, XU C, NG D W K, et al. Adjustable-delay RIS is capable of improving OFDM systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(7): 9927-9942.
- [25] LIANG J C, ZHANG L, LUO Z J, et al. A filtering reconfigurable intelligent surface for interference-free wireless communications[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 3838.
- [26] 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.
- [27] 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[J]. *电波科学学报*, 2024, 39(4): 741-747.
- 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[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2024, 39(4): 741-747.
- [28] CHEN Y B, WANG Y, WANG Z C. Reconfigurable intelligent surface aided high-mobility millimeter wave communications with dynamic dual-structured sparsity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(7): 4580-4599.
- [29] ALCANTARA D C, OLIVEIRA D V C D, ARAÚJO G T D, et al. Circuit-based modeling approach for channel estimation in RIS-assisted communications[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2506.07124, 2025.
- [30] TARIQ M, AHMAD S, JAN M A, et al. Deep learning aided intelligent reflective surfaces for 6G: a survey[J]. *ACM Computing Surveys*, 2024, 57(3): 1-37.
- [31] ZHI K D, PAN C H, REN H, et al. Active RIS versus passive RIS: which is superior with the same power budget?[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(5): 1150-1154.
- [32] SALIM M M, RABIE K M, MUQAIBEL A H. Energy-efficient UAV-mounted RIS for IoT: a hybrid energy harvesting and DRL approach[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2504.15043, 2025.
- [33] NGUYEN N T, NGUYEN V D, VAN NGUYEN H, et al. Fairness enhancement of UAV systems with hybrid active-passive RIS[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(5): 4379-4396.
- [34] XU Y Q, QI H Q, WANG Z Q, et al. Wireless-powered mobile crowd-sensing enhanced by UAV-mounted RIS: joint transmission, compression, and trajectory design[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2407.21280, 2024.
- [35] RAHMATOV N, BAEK H. RIS-carried UAV communication: current research, challenges, and future trends[J]. *ICT Express*, 2023, 9(5): 961-973.
- [36] NWUFO C, SIMPSON O, SUN Y C. Reconfigurable intelligent surfaces (RIS) and their role in next-generation wireless networks: an overview[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2025, 36(6): e70164.
- [37] WEINBERGER K, TEWES S, MÜLLER J, et al. Flying intelligent surfaces: joint adjustment of position and configuration for UAV-mounted RIS[C]// *Proceedings of the 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-5.
- [38] ADHIKARI B, KHWAJA A S, JASEEMUDDIN M, et al. Energy efficient RIS-assisted UAV networks using twin delayed DDPG technique[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(12): 18423-18439.
- [39] YAN J J, XU Y C, YUAN H H, et al. UAV onboard STAR-RIS service

- enhancement mechanism based on deep reinforcement learning[J]. *Sensors*, 2025, 25(6): 1943.
- [40] KHAN W U, LAGUNAS E, MAHMOOD A, et al. Integration of beyond diagonal RIS and UAVs in 6G NTN: enhancing aerial connectivity[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2025, 32(3): 56-63.
- [41] SALAH M. Floating meta-bubbles: aerial gateway and routing on the sky[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2024(1): 61.
- [42] 周涛, 许魁, 夏晓晨, 等. 具有可移动阵元的同时透射和反射可重构智能超表面辅助隐蔽通感一体化系统: 联合主动和柔性被动波束成形优化[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(4): 991-1003.
- ZHOU T, XU K, XIA X C, et al. Movable-element simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface-assisted integrated sensing and covert communication system: joint active and flexible passive beamforming design[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(4): 991-1003.
- [43] LIU Y W, MU X D, SCHOBER R, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR)-RISs: a coupled phase-shift model[C]//Proceedings of the ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 2840-2845.
- [44] LI Q C, EL-HAJJAR M, SUN Y S, et al. Achievable rate analysis of the STAR-RIS-aided NOMA uplink in the face of imperfect CSI and hardware impairments[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(10): 6100-6114.
- [45] 邵凯, 王泓谕, 王光宇. STAR-RIS 辅助的通信系统中混合场波束成形方案设计[J]. *通信学报*, 2025, 46(7): 109-118.
- SHAO K, WANG H Y, WANG G Y. Design of hybrid field beamforming scheme for STAR-RIS-aided communication systems[J]. *Journal on Communications*, 2025, 46(7): 109-118.
- [46] MEGAHED A, EL-HALEEM A M A, ELMESALAWY M M, et al. Deep learning optimization of STAR-RIS for enhanced data rate and energy efficiency in 6G wireless networks[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 26311.
- [47] ZHU H C, LIU Y W, WU Y C, et al. A unified framework for STAR-RIS coefficients optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2024, 72: 5107-5122.
- [48] 王鸿, 李培淇, 李鹤一, 等. 组连接超对角可重构智能表面辅助的通信系统低功耗传输方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2025, 47(7): 2073-2079.
- WANG H, LI P Q, LI H Y, et al. Research on low-power transmission method for group-connected beyond-diagonal reconfigurable intelligent surface-assisted communication systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(7): 2073-2079.
- [49] NERINI M, SHEN S P, LI H Y, et al. Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces utilizing graph theory: modeling, architecture design, and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 9972-9985.
- [50] ZHOU X H, FANG T Y, MAO Y J. A novel Q-stem connected architecture for beyond-diagonal reconfigurable intelligent surfaces[C]//Proceedings of the ICC 2025 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2025: 6880-6885.
- [51] KHATIWODA N R, DAWADI B R, JOSHI S R. Joint placement optimization and sum rate maximization of RIS-assisted UAV with LEO-terrestrial dual wireless backhaul[J]. *Telecom*, 2025, 6(3): 61.
- [52] MA B. Joint interference alignment and beyond diagonal RIS design for maximizing SNR in MIMO device-to-device communications[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 18129.
- [53] ALOTAIBI J, OUBBATI O S, ATIQUZZAMAN M, et al. Optimizing disaster response with UAV-mounted RIS and HAP-enabled edge computing in 6G networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2025, 241: 104213.
- [54] LIU Z, LI H Y, CLERCKX B. Non-reciprocal beyond diagonal RIS: sum-rate maximization in full-duplex communications[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2411.18523, 2024.
- [55] YAO J T, ZHENG J C, WU T, et al. FAS-RIS communication: model, analysis, and optimization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(6): 9938-9943.
- [56] ZHAO K, SONG Z Q, XIONG J. Optimal deployment strategy for reconfigurable intelligent surface under LoSD via joint active and passive beamforming[J]. *Entropy*, 2023, 25(7): 1073.
- [57] SUN Y N, XU H, NING B Y, et al. Sum-rate optimization for RIS-aided multiuser communications with movable antennas[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 14(2): 450-454.
- [58] ZHENG Y N, ZHANG L, CHEN X Q, et al. Rapid diagnostics of reconfigurable intelligent surfaces using space-time-coding modulation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025: e07430.
- [59] LI H Y, SHEN S P, CLERCKX B. A dynamic grouping strategy for beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces with hybrid transmitting and reflecting mode[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(12): 16748-16753.
- [60] PEI X L, YIN H F, TAN L, et al. RIS-aided wireless communications: prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(12): 8627-8640.
- [61] MONEMI M, RASTI M, YAZDANI O, et al. Beam squint mitigation in wideband hybrid beamformers: full-TTD, sparse-TTD, or non-TTD[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2506.19381, 2025.
- [62] YU Q M, DAI L L. Near-field wideband beamforming for RIS based on Fresnel zones[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(7): 5126-5138.
- [63] HU Q Q, YANG H P, ZENG X T, et al. Methodology and design of absorptive filtering reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(6): 5301-5306.
- [64] NEUDER R, SPÄTH M, SCHÜßLER M, et al. Architecture for sub-100 ms liquid crystal reconfigurable intelligent surface based on defected delay lines[J]. *Communications Engineering*, 2024, 3: 70.
- [65] WANG B W, DELBARI M, NEUDER R, et al. Liquid crystal-based RIS loss-trade-off analysis[J]. *arXiv Preprint*, arXiv: 2508.11489, 2025.
- [66] SONG R G, YIN H F, PEI X L, et al. Design and prototyping of filtering active STAR-RIS with adjustable power splitting[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(9): 6462-6476.
- [67] XIANG M, XIAO Y, DENG J X, et al. Simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable array (STAR-RA) with independent beams[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(10): 8338-8343.
- [68] ZHANG C, LUO Y, YAN N N, et al. A reconfigurable metasurface with precise phase distribution for both transmission and reflection functions[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(9): 7154-7163.
- [69] KYAW K T, SANTIPACH W, MAMAT K, et al. Neural network based optimization of transmit beamforming and RIS coefficients using channel covariances in MISO downlink[J]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2025, 191: 155656.
- [70] PENG Z J, ZHU J C, LU Z C, et al. Active RIS-aided massive MIMO uplink systems with low-resolution ADCs[J]. *IEEE Wireless Commu-*

- nications Letters, 2025, 14(1): 73-77.
- [71] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Reconfigurable holographic surface: holographic beamforming for metasurface-aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 6255-6259.
- [72] OUYANG C J, LIU Y W, ZHANG X Q. On the performance of continuous aperture array (CAPA)-based wireless communications[C]// Proceedings of the GLOBECOM 2024 - 2024 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2024: 193-198.
- [73] DI B Y, ZHANG H L, HAN Z, et al. Reconfigurable holographic surface: a new paradigm for ultra-massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2025, PP(99): 1.
- [74] SHAO R W, WU J W, LI J C, et al. Dual-channel near-field holographic MIMO communications based on programmable digital coding metasurface and electromagnetic theory[J]. Nature Communications, 2025, 16: 915.
- [75] ZHANG Z J, DAI L L. Pattern-division multiplexing for multi-user continuous-aperture MIMO[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(8): 2350-2366.
- [76] MONEMI M, FALLAH M A, RASTI M, et al. Toward near-field 3D spot beam focusing: possibilities, challenges, and use cases[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2025, 20(2): 95-103.
- [77] HUANG C W, HU S, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: opportunities, challenges, and trends[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(5): 118-125.
- [78] ALBATAINEH Z. Reducing pilot overhead with distributed neural networks in RIS-aided downlink channel estimation[J]. Results in Engineering, 2025, 26: 105036.
- [79] HAGHSHENAS M, RAMEZANI P, MAGARINI M, et al. A new channel subspace characterization for channel estimation in RIS-aided communications[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1523-1528.
- [80] 李光辉, 李文海, 马盼盼, 等. 分布式 RIS 赋能的多用户毫米波大规模 MIMO 系统频谱效率分析[J]. 电子学报, 2025, 53(7): 2500-2512.
LI G H, LI W H, MA P P, et al. Spectral efficiency analysis of distributed-RIS-empowered multi-user mmWave massive MIMO systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2025, 53(7): 2500-2512.
- [81] NGUYEN T L, KADDOUM G, DO T N, et al. Statistical characterization of RIS-assisted UAV communications in terrestrial and non-terrestrial networks under channel aging[C]// Proceedings of the ICC 2024-IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2024: 635-640.
- [82] CHENG Y J, PENG W, HUANG C W, et al. RIS-aided wireless communications: extra degrees of freedom via rotation and location optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6656-6671.
- [83] LIU C H, MEI W D, CHEN Z. Joint 3D orientation and location optimization for UAV-mounted intelligent reflecting surface[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2024-2024 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2024: 2725-2730.
- [84] MU X D, LIU Y W, GUO L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 3083-3098.
- [85] 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.
- [86] ZHANG J W, ZHANG Y X, JIANG T, et al. Cascaded channel modeling and experimental validation for RIS assisted communication system[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2412.07356, 2024.
- [87] COSKUN A F, KOCAOGLU A T, ARSLAN E, et al. Experimental performances of mmWave RIS-assisted 5G-advanced wireless deployments in urban environments[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2506.06525, 2025.
- [88] HOU Y Z, WANG G N, CHEN C, et al. 220 GHz RIS-aided multi-user terahertz communication system: prototype design and over-the-air experimental trials[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2502.16970, 2025.
- [89] MURSIA P, MAZLOUM T, MUNOZ F, et al. Empirical validation of the impedance-based RIS channel model in an indoor scattering environment[C]//Proceedings of the 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-4.
- [90] WANG Y, GAO Z, CHEN S, et al. Deep learning-based channel extrapolation and multiuser beamforming for RIS-aided terahertz massive MIMO systems over hybrid-field channels[J]. Intelligent Computing, 2024, 3: 65.
- [91] LI H Y, CLERCKX B. Non-reciprocal beyond diagonal RIS: multiport network models and performance benefits in full-duplex systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(11): 12221-12234.
- [92] RAMEZANI P, KHORSANDMANESH Y, BJÖRNSON E. MSE minimization in RIS-aided MU-MIMO with discrete phase shifts and fronthaul quantization[C]//Proceedings of the 2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [93] LI H Y, NERINI M, SHEN S P, et al. Beyond diagonal reconfigurable intelligent surfaces in wideband OFDM communications: circuit-based modeling and optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(4): 3623-3636.
- [94] ABBAS O, NADEEM Q U A, MARKLEY L, et al. Unit cell phase-frequency profile optimization in RIS-assisted wide-band OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(1): 735-748.
- [95] RENZO M D, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2450-2525.
- [96] XU Y Q, LI Y, ZHANG J A, et al. Joint beamforming for RIS-assisted integrated sensing and communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(4): 2232-2246.
- [97] HU J L, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Reconfigurable intelligent surface based uplink MU-MIMO symbiotic radio system[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 22(1): 423-438.
- [98] DAI L L, JIAO R C, ADACHI F, et al. Deep learning for wireless communications: an emerging interdisciplinary paradigm[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(4): 133-139.
- [99] SALIM M M, RABIE K M, MUQAIBEL A H. Energy-efficient irregular RIS-aided UAV-assisted optimization: a deep reinforcement learning approach[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2504.15031, 2025.
- [100] PUSPITASARI A A, LEE B M. TD3 algorithm-based SWIPT with UAV-RIS assistance for MIMO communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 74(4): 6284-6293.
- [101] CHAUDHARY S, BUDHIRAJA I, CHAUDHARY R, et al. Proximal policy optimization based sum rate maximization scheme for STAR-RIS-assisted vehicular networks underlying UAV[J]. Alexan-

- dria Engineering Journal, 2025, 118: 700-710.
- [102] XIAO K, YU Z W, WANG J X, et al. Proximal policy optimization algorithm for enhancing energy harvesting in UAV-assisted communications with RIS[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.
- [103] WU M, GUO K F, LI X W, et al. Deep reinforcement learning-based energy efficiency optimization for RIS-aided integrated satellite-aerial-terrestrial relay networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(7): 4163-4178.
- [104] GINIGE N, RAJATHEVA N, LATVA-AHO M. A CNN-based end-to-end learning for RIS-assisted communication system[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2503.13976, 2025.
- [105] LI J, XUE H J, WU M, et al. Energy efficiency performance in RIS-based integrated satellite-aerial-terrestrial relay networks with deep reinforcement learning[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2023(1): 121.
- [106] MO X H, GUI L, YING K, et al. Low complexity joint hybrid precoding for RIS-assisted wideband wireless systems[J]. Digital Signal Processing, 2023, 140: 104138.
- [107] MIHERTIE H D, WANG Z Q. Resource allocation for UAV-RIS-assisted RSMA system with hardware impairments[J]. Computer Networks, 2025, 266: 111336.
- [108] ZHAO H T, XU Z R, NI Y Y, et al. Optimization strategy of UAV-ARIS assisted vehicular communication system[J]. IET Communications, 2024, 18(18): 1179-1190.
- [109] YEGANEH R S, BEHROOZI H. Energy efficient RSMA-based LEO satellite communications assisted by UAV-mounted BD-active RIS: a DRL approach[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2505.04148, 2025.
- [110] RIHAN M, ZAPPONE A, BUZZI S, et al. Energy efficiency maximization for active RIS-aided integrated sensing and communication[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2024, 2024(1): 20.
- [111] 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, 2020, 69: 1407-1421.
- [112] ZHENG Y, WANG D. Multi-criteria decision making and recommender systems[C]//Proceedings of the 28th International Conference on Intelligent User Interfaces. New York: ACM Press, 2023: 181-184.
- [113] KHAN W U, AHMED M, SHEEMAR C K, et al. Survey on beyond diagonal RIS enabled 6G wireless networks: fundamentals, recent advances, and challenges[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2503.08423, 2025.
- [114] KHAN W U, SHEEMAR C K, LAGUNAS E, et al. Beyond diagonal RIS: a new frontier for 6G Internet of things networks[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2502.03637, 2025.
- [115] YUAN Y F, CHEN Q M, XU L F, et al. Field trial of reconfigurable intelligent surface with statistics-based optimization for 5G commercial networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2024, 31(3): 390-397.
- [116] LI B, YANG D D, LIU L. Rotatable RIS-assisted edge computing: orientation, task offloading, and resource optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(8): 13290-13295.
- [117] XIONG R J, MI T B, LU J L, et al. Optimal beamforming of RIS-aided wireless communications: an alternating inner product maximization approach[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2405.06442, 2024.
- [118] WANG Z Q, LUO Z Q, LEI Y T. RIS-assisted integrated sensing and communication beamforming based on end-to-end deep learning[J]. Physical Communication, 2025, 72: 102782.
- [119] FILHO J C M, ABRÃO T, HOSSAIN E, et al. Reconfigurable intelligent surfaces-enabled intra-cell pilot reuse in massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(8): 9446-9459.
- [120] ELBIR A M, COLERI S. Federated learning for channel estimation in conventional and RIS-assisted massive MIMO[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(6): 4255-4268.
- [121] ZHANG Z, QIU J H, ZHANG J W, et al. Physics-informed machine learning for efficient reconfigurable intelligent surface design[J]. arXiv Preprint, arXiv: 2501.11323, 2025.
- [122] CAI C, YUAN X J, ZHANG Y A. End-to-end learning for task-oriented semantic communications over MIMO channels: an information-theoretic framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2025, 43(4): 1292-1307.
- [123] PENG B L, BESSER K L, SHEN S P, et al. RISnet: a domain-knowledge driven neural network architecture for RIS optimization with mutual coupling and partial CSI[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(5): 4469-4482.

作者简介



阎庆昕 (2000-), 女, 山西太原人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为 RIS 辅助通信、神经架构、强化学习。



胡冰 (1989-), 女, 河南驻马店人, 博士, 南京邮电大学副教授、研究生导师, 主要研究方向为机器学习、网络智能控制与安全优化、移动边缘计算、智慧物流与智能交通控制理论及应用等。



王恩良 (1998-), 男, 江苏南京人, 南京邮电大学博士生, 主要研究方向为神经架构、深度学习。



孙知信 (1964-), 男, 安徽宣城人, 博士, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网技术与应用、人工智能、计算机网络及安全。