



IMT-2030(6G)推进组
IMT-2030(6G)Promotion Group

6G 智能超表面技术

研究报告



2025

2025 年 11 月

版权声明 Copyright Notification

未经书面许可 禁止打印、复制及通过任何媒体传播

©2025 IMT-2030 (6G) 推进组版权所有

前 言

国际标准化组织 3GPP 于 2025 年 6 月正式启动 6G 标准化研究项目，全球 6G 发展将从愿景规划阶段迈入以实现关键技术突破、标准制定和实践应用为核心的新阶段。鉴于此，智能超表面任务组携手其成员单位的众多专家，联合编制了新版智能超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）研究报告。本报告将系统梳理 RIS 的工程化现状，深入分析其标准化影响，旨在为当前的 6G 标准化研究项目提供重要参考。

在众多潜在的核心技术中，智能超表面（RIS）因其独特优势，吸引了广泛关注。该技术采用可编程人工超材料，开创性地构建了智能电磁波传播环境，为未来移动通信网络开辟了全新范式。本报告聚焦于正在开展的 6G 标准化工作，旨在为 RIS 技术的标准化进程提供任务组的深度洞察与建议。关于 RIS 的部署场景，报告将聚焦 6G 标准化与规模商用的典型场景。其次，报告将重点分析 RIS 面临的核心挑战，深入探讨关键技术的最新研究进展，范围涵盖从单元级能效优化，到复杂环境下的信道估计、多用户干扰抑制，以及与去蜂窝 MIMO 等架构的联合设计，展示了最新的算法创新和理论突破。鉴于完备的信道模型是性能评估与优化的重要基石，我们将从标准化视角出发，深入探讨 RIS 信道建模的关键方面（包括级联信道、物理模型、近场特性等），并提出具体的标准化方案建议。在此基础上，报告将分析和前瞻 RIS 的标准化影响，明确潜在的 RIS 类型、设计原则以及可能纳入标准化的具体内容。最后，本报告还将展示 RIS 技术在测试及外场验证方面的最新成果，通过室内外覆盖增强、多用户调度等典型场景的实测数据，验证 RIS 方案的有效性与工程可行性。本报告旨在为 RIS 技术的标准化进程提供有力参考，进一步推动其标准化与产业化落地。

本报告由 IMT-2030（6G）推进组 RIS 任务组的众多专家共同编写完成。其中，前言、第一章及第七章由中兴通讯牵头撰写；第二章由中国联通、中国移动及中兴通讯牵头撰写；第三章由东南大学和北京交通大学牵头撰写；第四章由中国移动和北京邮电大学牵头撰写；第五章由中国电信和中兴通讯牵头撰写；第六章由中国联通和中兴通讯牵头撰写。我们衷心感谢各成员单位专家的辛勤付出，并感谢东南大学崔铁军院士、金石教授等资深专家的指导。

目 录

| | |
|--------------------------------------|----|
| 前 言 | I |
| 一、 概述 | 1 |
| 二、 典型部署场景 | 3 |
| (一) 构建多层网络架构 | 3 |
| (二) 提升网络能效 | 4 |
| (三) 使能中高频连续覆盖 | 5 |
| (四) 基于 RIS 的新型相控阵天线 | 6 |
| 三、 关键技术最新研究进展 | 7 |
| (一) 能量折中的传输设计 | 7 |
| (二) 多 RIS 系统信道估计 | 9 |
| (三) RIS 使能多用户组间信道正交化 | 10 |
| (四) RIS 辅助去蜂窝大规模 MIMO 系统联合优化设计 | 11 |
| (五) 圆柱形超表面辅助低复杂度传输方案 | 13 |
| 四、 信道建模 | 15 |
| (一) 标准化议题 | 15 |
| (二) 级联信道 | 15 |
| (三) 物理模型 | 17 |
| (四) 模型简化 | 20 |
| (五) 信道耦合 | 21 |
| (六) 路损模型 | 22 |
| (七) 近场信道 | 24 |
| 五、 标准化影响分析 | 27 |
| (一) 潜在 RIS 类型 | 29 |
| (二) 标准化设计原则 | 30 |
| (三) 潜在标准化工作 | 32 |
| 六、 RIS 测试及外场验证 | 35 |
| (一) 室内覆盖增强 | 35 |
| (二) 室外覆盖增强 | 38 |
| (三) 室外分布式多 RIS 测试 | 42 |
| (四) 室外多用户调度 | 44 |
| (五) 邻频干扰性能 | 45 |
| (六) 新型相控阵列多流天线 | 46 |
| 七、 结论 | 48 |
| 参考文献 | 49 |
| 贡献单位 | 52 |

图目录

| | |
|---|----|
| 图 1 基于 RIS 的多层异构网络 | 4 |
| 图 2 有/无 RIS 情况下功耗与能量效率对比 | 5 |
| 图 3 反射式 RIS 辅助室内外连续覆盖增强 | 6 |
| 图 4 基于 RIS 的新型相控阵列天线 | 6 |
| 图 5 EEPPE 方法原理图 | 8 |
| 图 6 仿真结果图 | 8 |
| 图 7 实测结果图 | 9 |
| 图 8 多 RIS 遮挡处理方案 | 10 |
| 图 9 不同遮挡环境下角度参数估计性能对比 | 10 |
| 图 10 不同 RIS 尺寸下 6 个 RIS 辅助 6 用户（均分 3 组）系统的等效信道矩阵可视化 | 11 |
| 图 11 基于深度学习-差分进化联合优化算法框架 | 12 |
| 图 12 网络利用率随 RIS 单元数目变化以及码长和数据包长优化性能对比 | 13 |
| 图 13 UCA-RIS 辅助的两用户下行传输系统 | 14 |
| 图 14 UCA-RIS 辅助的两用户下行传输系统性能与计算复杂度 | 14 |
| 图 15 传统通信模型与 RIS 辅助通信信道模型的比较 | 16 |
| 图 16 RIS 信道建模框架 | 16 |
| 图 17 RIS 等效辐射方向图 | 18 |
| 图 18 基于 RCS 的极化 RIS 单元方向图 ^[17] | 18 |
| 图 19 3GPP TR 38.901 中单个天线单元的辐射功率方向图 | 19 |
| 图 20 基于物理光学法的建模方案与基于 38.901 天线模型的建模方案比较 | 19 |
| 图 21 基于物理光学法的建模方案与基于 38.901 天线模型的建模方案比较 | 20 |
| 图 22 基于功率占比的多径簇删减实现效果 | 21 |
| 图 23 O_{RIS} 实测分布 | 22 |
| 图 24 RIS 辅助无线通信典型场景 | 22 |
| 图 25 室外广场测试 | 23 |
| 图 26 室内走廊测试 | 24 |
| 图 27 教室测试 | 24 |
| 图 28 位置可调 RIS 辅助的通信系统示意图 | 25 |
| 图 29 可视域模型示意图 | 26 |
| 图 30 标准化组织中 RIS 研究的时间线 | 29 |
| 图 31 RIS 辅助无线通信的基本框架示意图 ^[31] | 30 |
| 图 32 RIS 系统架构: (a) 网络控制型 RIS; (b) 终端控制型 RIS | 33 |
| 图 33 自行车场馆内测试环境 | 35 |
| 图 34 办公楼测试环境 | 36 |
| 图 35 O2I 覆盖测试环境 | 37 |
| 图 36 O2I 覆盖测试数据累计分布曲线图 | 37 |
| 图 37 土耳其室外单 RIS 覆盖增强测试环境 | 38 |
| 图 38 土耳其室外单 RIS 覆盖增强测试数据统计图 | 39 |
| 图 39 10GHz 频段的超大规模混合 RIS 的拉远覆盖增强测试环境 | 39 |
| 图 40 10GHz 频段的超大规模混合 RIS 的拉远覆盖增强测试结果 | 39 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| 图 41 塔下阴影测试场景 | 40 |
| 图 42 塔下阴影场景测试结果 | 40 |
| 图 43 隧道场景测试环境 | 41 |
| 图 44 桥梁场景测试环境 | 41 |
| 图 45 室外空旷场景分布式多 RIS 单用户移动性测试环境 | 42 |
| 图 46 室外空旷场景分布式多 RIS 用户移动性测试记录 | 43 |
| 图 47 连廊场景分布式多 RIS 单用户移动性测试环境 | 43 |
| 图 48 室外连廊场景分布式多 RIS 单用户移动性测试结果 | 44 |
| 图 49 室外多用户调度场景 | 45 |
| 图 50 RIS 对邻频用户影响的测试环境 | 46 |
| 图 51 RIS 对邻频用户影响的测试结果 | 46 |
| 图 52 新型相控阵列天线多流测试环境 | 47 |

一、概述

国际标准化组织 3GPP 于 2025 年 6 月正式启动 6G 标准化研究项目，这一具有里程碑意义的事件，标志着全球 6G 发展从愿景规划阶段，正式迈入以关键技术突破、标准化制定与实践应用为核心目标的新阶段。在此关键节点，智能超表面任务组携手任务组成员单位的众多专家，联合编制新版智能超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）研究报告。本报告将针对当前启动的 6G 标准化研究，全面梳理 RIS 工程化现状，深入分析其标准化影响，旨在为 6G 标准化研究项目提供至关重要的参考。

在众多 6G 潜在核心技术中，智能超表面技术（RIS）凭借其独特优势脱颖而出，吸引了学术界与产业界的广泛关注。该技术借助可编程的人工超材料，开创性地构建了智能电磁波传播环境，为未来移动通信网络的发展开辟了全新的范式。本研究报告紧密围绕正在开展的 6G 标准化工作，致力于为 RIS 技术的标准化进程提供来自 RIS 任务组的深度洞察与可行性建议。

在部署场景方面，报告将聚焦 6G 标准化与规模商用的典型场景，包括：

- **构建多层网络架构：** RIS 可通过灵活调整电磁波传播特性，优化网络拓扑结构，提升整体性能。
- **提升网络能效：** 其独特的电磁调控能力有助于降低能量损耗，实现绿色通信。
- **使能中高频连续覆盖：** 可有效克服高频信号传播损耗大的问题，显著拓展覆盖范围。
- **基于 RIS 的新型相控阵天线：** 为天线系统的性能提升与创新设计提供了新的思路。

其次，报告将聚焦 RIS 面临的核心挑战，深入探讨关键技术的最新研究进展。这一部分内容涵盖从单元级能效优化到复杂环境下的信道估计、多用户干扰抑制及与去蜂窝 MIMO 等架构的联合设计等多个关键领域。在单元级能效优化方面，研究人员致力于降低单个 RIS 单元的功耗，提高能源利用效率；复杂环境下的信道估计难题，通过引入先进的算法与模型，实现对信道特性的精准估计；多用户干扰抑制技术则通过优化信号传输策略，降低用户间的相互干扰，提升系统容量；与去蜂窝 MIMO 等架构的联合设计，更是充分发挥了 RIS 与其他先进技术的协同优势，实现系统性能的整体提升。这些研究不仅展示了最新的算法创新与理论突破，还通过大量的仿真与实测验证了其工程可行性。

鉴于完备的信道模型是准确评估 RIS 性能并进行有效优化的基石，我们将从标准化的专业视角出发，对 RIS 信道建模的关键方面进行深入探讨。这包括级联信道、物理模型、近场特性等多个重要方面。级联信道模型能够准确描述 RIS 与发射端、接收端之间的信号传播过程；物理模型则从微观层面刻画 RIS 单元的电磁特性；近场特性研究对于在近距离通信场景下准确评估 RIS 性能至关重要。在此基础上，我们将提出具体的标准化方案建议，为后续的标准化工作提供明确的方向与指导。

在此基础上，报告将对 RIS 标准化影响进行全面分析与前瞻。明确潜在的 RIS 类型，不同类型的 RIS 在功能、性能和应用场景上存在差异，准确界定其类型有助于针对性地制定标准化方案；总结设计原则，为 RIS 的设计与开发提供基本准则；详细梳理可能纳入标准化的具体工作内容，包括系统架构、控制信令、参考信号及波束管理等方面，确保标准化

工作的全面性与系统性。

最后，本报告还将全方位展示 RIS 技术在测试及外场验证方面的最新成果。通过室内外覆盖增强、多用户调度等典型场景的实测数据，直观地验证 RIS 方案的有效性与工程可行性。例如，在室内覆盖增强场景中，RIS 可有效改善室内信号盲区问题，提升信号强度与质量；在室外分布式多 RIS 测试中，多个 RIS 协同工作，实现更大范围的信号覆盖与优化；室外多用户调度场景则验证了 RIS 在多用户环境下的性能表现与干扰抑制能力。这些实测成果为 RIS 技术的实际应用提供了有力的数据支持。

本研究报告旨在为 RIS 技术的标准化进程提供有益的参考，进一步推动 RIS 技术的标准化及其产业化落地，助力 6G 通信技术的蓬勃发展。

本文的其余部分按以下方式组织：

第二章，典型部署场景：介绍 RIS 技术在 6G 网络中的典型部署场景，重点探讨其在构建多层网络架构、提升网络能效、使能中高频连续覆盖以及新型天线应用等方面的实际能力与未来前景。

第三章，关键技术最新研究进展：聚焦智能超表面技术从理论走向实践过程中面临的核心挑战，详细分析当前在能效优化、多 RIS 系统信道估计、多用户传输、去蜂窝 MIMO 系统联合优化以及新型 RIS 物理架构等关键技术领域的最新研究进展及其工程可行性。

第四章，信道建模：探讨对于 RIS 性能评估和方案优化至关重要的信道建模工作，首先总结标准化议题，然后重点讨论级联信道、物理模型、模型简化、信道耦合、路损模型和近场信道等 RIS 信道建模需重点考虑的几个方面。

第五章，标准化影响分析：进行 RIS 标准化影响分析，在总结潜在 RIS 类型的基础上，提出标准化设计原则和潜在标准化工作建议，旨在加速推动 RIS 技术融入全球 6G 标准化进程。

第六章，RIS 测试及外场验证：讨论 RIS 技术从理论向工程化应用发展的实践成果，详细介绍室内和室外覆盖增强、分布式多 RIS 测试、多用户调度、邻频干扰性能以及新型相控阵列多流天线等方面的外场验证与测试经验。

通过这些章节的详细探讨，我们希望为 RIS 技术的未来发展提供全面的视角与深刻的洞察。

二、典型部署场景

智能超表面（RIS）在实现国际电信联盟无线电通信部门（ITU-R）和第三代合作伙伴计划（3GPP）所设定的场景与设计原则方面，具备独特优势。

2023年，ITU-R WP5D发布的《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》^[1]，提出了6G的六大应用场景相关设计原则和能力指标。RIS能够很好地支持其中的泛在连接（覆盖性能指标）和可持续性（绿色能效）目标需求。

3GPP 6G SID（RP-251809）^[2]指出，6G标准化研究涉及的频段最高达52.6GHz，涵盖FR1（最高至7.125GHz）、FR1-FR2-1过渡频段（7.125GHz–24.25GHz）以及FR2-1（24.25GHz–52.6GHz）。其中，包括U6G（6.425–7.125GHz）在内的中高频段是未来6G的核心频段。针对这些目标频段，该文件提出了一系列研究目标，既充分吸纳了各方意见，又为未来6G标准化研究（6G SID阶段）预留了足够的灵活性。在这些目标中，RIS在实现6G SID（RP-251809）中的以下几方面具有独特优势：

- 能效与节能，同时针对网络和设备。
- 提升整体覆盖范围，尤其关注小区边缘性能及上行链路（UL）覆盖。
- 在中高频段进行6G部署时，复用现有的5G中频段（约3.5GHz）站址网络，力求达到与5G中频段相当的覆盖范围。

为实现6G提出的泛在连接及可持续性（低能耗）目标，传统有源基站及中继的有源相控阵天线面临巨大挑战。3GPP 6G SID进一步要求“在中高频段进行6G部署时，复用现有的5G中频段（约3.5GHz）站址网格，力求达到与5G中频段相当的覆盖范围”。为此，不得不采用更大尺寸的天线阵列以及必要密度的中继网元（包括RIS）来提供支持。

RIS凭借其低成本、低功耗和易于部署的特性，在支持上述要求方面具有独特优势。具体而言，RIS的独特优势能够很好地支撑以下几种典型应用场景：

- 构建多层网络架构；
- 提升网络能效；
- 使能中高频连续覆盖；
- 基于RIS的新型相控阵天线。

（一）构建多层网络架构

为解决6G网络中存在的覆盖盲区、小区边缘性能衰减、低空无人飞行器（UAV）覆盖及整体能耗控制等挑战，本方案提出引入基于辅助节点的多层异构网络架构^{[3][4][5]}。该架构通过部署无源/半无源节点（如RIS、网络控制中继器NCR），构建“宏基站层+辅助节点层”的双层网络，在确保无缝覆盖的同时，显著提升系统能效。

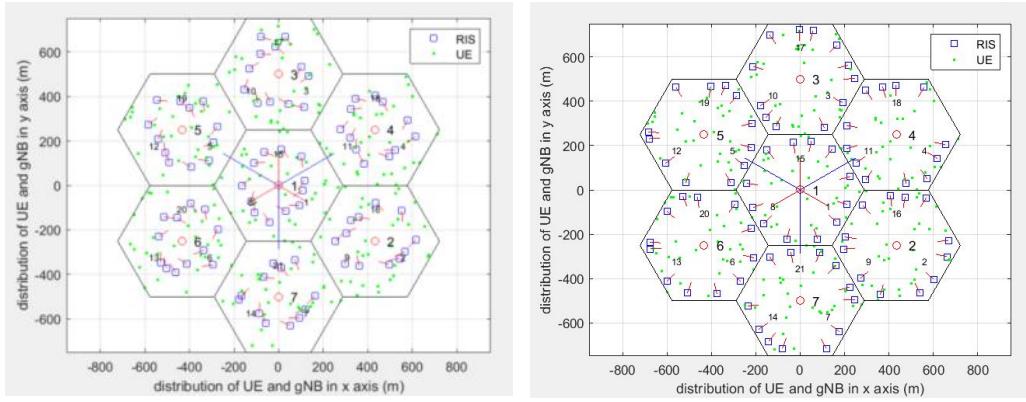


图 1 基于 RIS 的多层异构网络

辅助节点（以 RIS 为例）采用“随机分布与固定距离部署”相结合的混合模式，布设于收发点周边区域。具体部署距离需综合站间距、小区半径及实际评估需求进行动态调整，以优化电磁波反射路径。实测结果表明，引入 RIS 的双层网络相较于传统单 TRxP 网络，可实现 30% 以上的能量效率提升，在低负载场景下表现尤为显著。

节点配置需重点考虑分布密度、天线单元数量及工作频段等参数。例如，在 28 GHz 毫米波频段下，RIS 单元间距应不大于半波长 ($\leq \lambda/2$)，以抑制栅瓣效应；天线单元数则需根据覆盖目标动态设定，密集城区建议不少于 64 单元。参数取值与部署场景密切相关：郊区场景可将单元间距放宽至 λ ，而城区场景则建议压缩至 $\lambda/4$ ，以增强波束赋形能力。RIS 通过智能反射机制将电磁波导向目标用户，可将小区边缘信号强度提升 5–8 dB，有效改善室内外覆盖盲区。借助动态波束成形技术，RIS 可进一步提升系统频谱效率，在多用户 MIMO 场景中增益尤为明显。

建议在 6GR 部署中优先采用本架构，并分阶段推进实施：初期重点验证 RIS 与 NCR 的协同部署；中期扩展为多节点智能编排系统；远期目标为实现“宏基站—微节点—无源节点”三级架构的整体智能优化。本架构通过引入 RIS 等无源节点，在提升 6G 网络自适应能力的同时，也强化了其可持续性。

（二）提升网络能效

在 6G 网络中，除传统节能方案外，还可引入更具可持续性的辅助节点——无源/半无源 RIS。该类节点能够以近乎可忽略的功耗显著改善信道传播条件（如覆盖性能与多径特性），从而有效降低系统整体能耗^{[6][7]}。RIS 因功耗极低，被视为提升 MIMO 系统性能的高效路径。针对 RIS 的功率建模，通常可定义三种功率状态：深度睡眠、下行激活（active DL）与上行激活（active UL）。由于 RIS 采用被动反射机制，无需主动射频链支持，其在深度睡眠状态下的相对功率极低，且状态转换过程接近理想。而在下行/上行激活状态下，相对功率同样处于较低水平，具体数值取决于 RIS 的工作模式与硬件配置。例如，采用自适应波束成形的 RIS 单元功耗约为 0.4 毫瓦^[4]，而固定波束型 RIS 的功耗则可忽略不计。

为评估 RIS 在多层架构部署中的能效增益，我们开展了系统仿真，结果如图 7 所示。图中展示了系统功耗与能量效率随可达频谱效率的变化关系。仿真结果表明，引入 RIS 后

系统整体能量效率获得显著提升。通过调整基站天线配置、发射功率及 RIS 分布等参数进行多场景仿真，进一步验证了无源 RIS 在广泛部署条件下均具备稳定的能效提升能力。

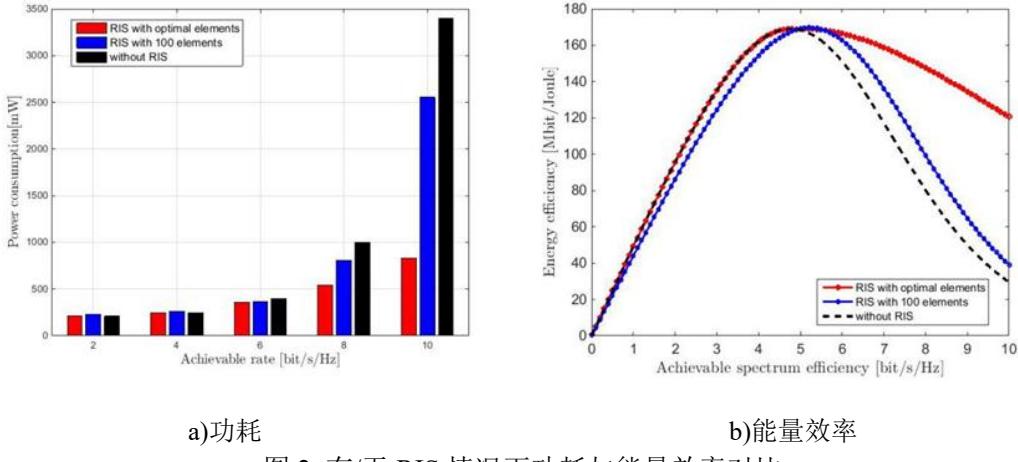


图 2 有/无 RIS 情况下功耗与能量效率对比

(三) 使能中高频连续覆盖

1. 基于反射式RIS辅助室外补盲场景

在室外覆盖场景中，由于基站与终端之间存在建筑物、树木绿植等障碍物，收发端之间可能不存在视距传输路径，导致接收信号质量较差。尤其是毫米波等高频电磁波，相较于低频信号，其传播与穿透损耗较大，受障碍物遮挡影响也更大，网络覆盖区域容易出现盲区或弱覆盖区域，不利于实现无线网络的泛在接入和深度覆盖。针对该场景，部署智能超表面设备，如图 3 所示，通过按需构造非视距反射路径，并以视距反射信道替代非视距直射信道，实现虚拟视距传输^[8]。

2. 基于反射式RIS室内补盲场景

室内场景中，如大型商场、体育场馆、写字楼、地下停车场等，由于障碍物遮挡、楼道转角遮挡等问题，信号易被墙体等阻挡，同样会产生覆盖盲区。与室外补盲相似，通过将 RIS 部署于室内天花板、楼道拐角等潜在的通信盲区内，可提升室内基站的覆盖性能，确保室内的连续、无缝覆盖。

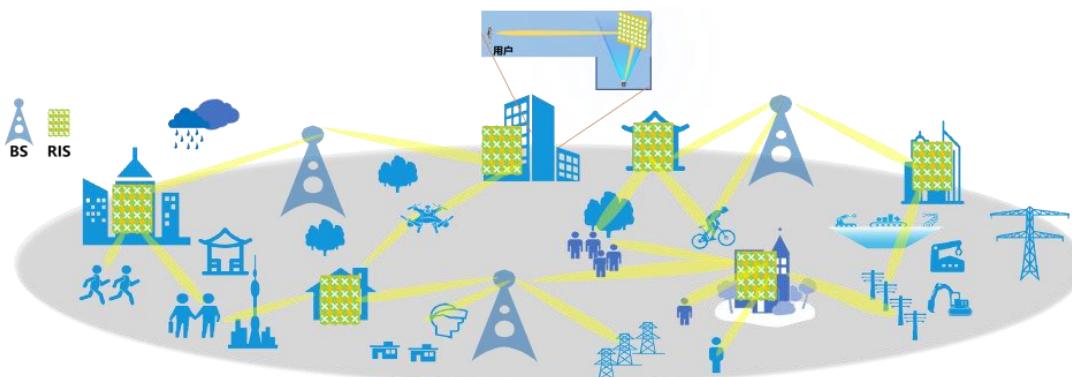


图 3 反射式 RIS 辅助室内外连续覆盖增强

(四) 基于 RIS 的新型相控阵天线

基于 RIS 的新型相控阵天线通常是 RIS 作为收发机的天线阵列，实现混合波束赋形架构的模拟波束赋形功能。射频调制信号通过电缆馈入 RIS 天线阵列，控制模块动态调控 RIS 阵元响应，形成目标模拟波束。基于 RIS 的毫米波天线阵列，具有阵列单元易扩展，模拟波束赋形增益较高，控制电路功耗较低（约 1W）的特点。此外，利用大功率功率放大器替代传统天线阵列的多通道芯片中的小功率功率放大器，可有效提升功率附加效率，具有绿色低功耗等技术优势。



图 4 基于 RIS 的新型相控阵天线

三、关键技术最新研究进展

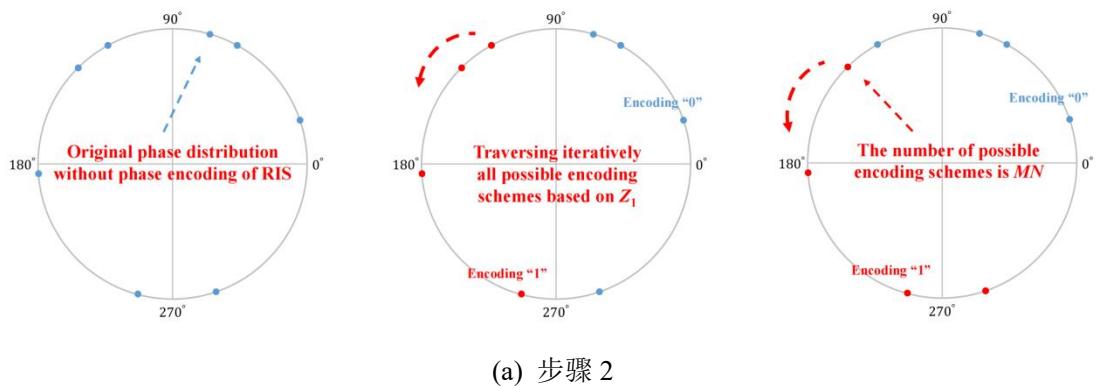
随着智能超表面技术从概念走向实践，其在 6G 通信系统中的巨大潜力正通过一系列前沿研究被逐步揭示与验证。然而，RIS 由大量无源单元构成的基本特性，也为系统设计与优化带来了信道估计、计算复杂度及多用户干扰等多方面的挑战。本部分将聚焦于这些核心挑战，呈现 RIS 关键技术领域最新研究进展。

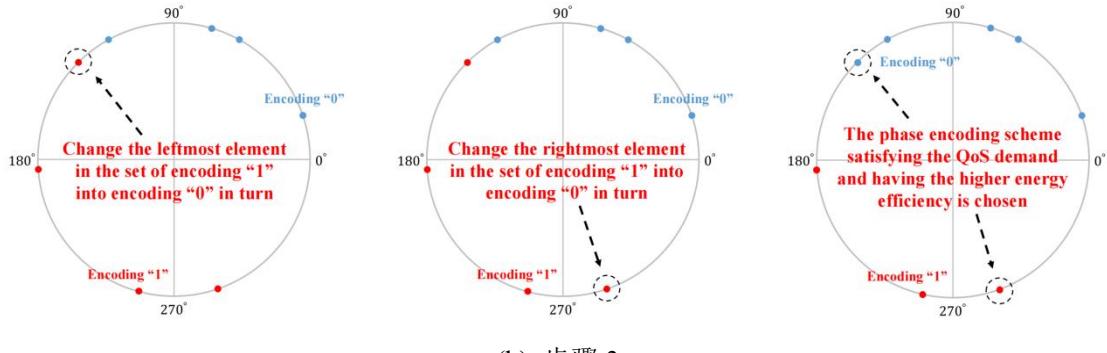
具体而言，本部分内容涵盖了从单元级能效优化到系统级联合设计的多个维度：首先，针对 RIS 的功耗问题，介绍了基于实测功耗模型的能效编码方法，突破了传统线性功耗假设的局限。其次，探讨了复杂遮挡环境下多 RIS 系统的信道估计难题，提出了基于张量分解的低复杂度估计算法与灵活的遮挡处理方案，显著提升了系统的鲁棒性。再次，分析了 RIS 如何通过定制化正交信道赋能多用户传输，利用分布式部署与相移优化，有效降低用户间干扰，提升空间复用能力。进而，面向去蜂窝大规模 MIMO 这一 6G 潜在架构，介绍了结合深度学习与进化算法的联合优化策略，以应对硬件损伤与电磁干扰下的波束赋形挑战。最后，探索了通过创新 RIS 物理架构（如圆柱形阵列）来划分用户服务区域，从而在保证性能的同时大幅降低优化复杂度的新路径。

这些研究进展不仅展示了 RIS 技术在理论创新与算法设计上的深度，也通过仿真与实测验证了其工程可行性，共同推动了 RIS 技术从实验室走向未来 6G 商用网络的进程。

（一）能量折中的传输设计

由于 RIS 由大量单元阵列构成，其功耗与波束增益之间始终存在显著的权衡关系。传统研究普遍假设 RIS 功耗与单元数、量化比特数线性相关，并忽略了不同相位编码状态对功率消耗的影响。这一假设在基于 PIN 二极管实现的 RIS 中并不成立。针对这一问题，研究[9]提出了一种基于实测功耗模型的能效离散相位编码方法（energy-efficient phase encoding, EEPE），旨在在功率约束与服务质量（quality of service, QoS）要求下，实现 RIS 系统能量效率最大化。





(b) 步骤 3

图 5 EEPE 方法原理图

该方法首先建立了 RIS 辅助单输入单输出 (SISO) 通信系统的波束增益、功耗与能效模型，并以能效最大化为目标，构建了离散相位编码优化问题。随后，提出的 EEPE 算法通过“三步式”流程实现编码设计优化：在第一步中，根据 RIS 的最大可用功率约束计算允许的最大“1”编码数量，以确定单元的功耗上限；在第二步中，基于相位分布矩阵与波束对齐原理，遍历所有满足约束的编码方案，选择在信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 高于 QoS 门限的条件下能效最高的相位矩阵；在第三步中，若当前方案的 SNR 超过 QoS 要求，则逐步减少“1”编码数量以进一步降低功耗，实现能效的二次优化。该算法的计算复杂度近似为线性 $O(MN)$ ，兼顾了计算效率与优化精度。EEPE 方法的部分步骤及原理如图 5 所示。

EEPE 算法通过量化“编码 1”的数量与功耗间的非线性关系，实现了波束增益与能耗之间的自适应平衡。仿真结果如图 6 所示，在相同 QoS 要求下，该方法相较于传统量化编码与动态阈值相位量化 (dynamic threshold phase quantization, DTPQ) 方法，可显著降低 RIS 总功耗约 54%，并提升能效约 100%。此外，为验证该算法的实用性，研究在 35 GHz 频段开展了两组室内实地试验。实测结果如图 7 所示，EEPE 方法在真实环境中能准确满足 QoS 约束、有效控制功耗上限，且其测得能效曲线与理论值高度一致，RIS 的能量效率随 QoS 要求和功率约束的增加呈下降趋势。测量结果同时验证了 EEPE 方法在调整甚至定制 RIS 的波束形成增益、功耗和能效方面的灵活性。

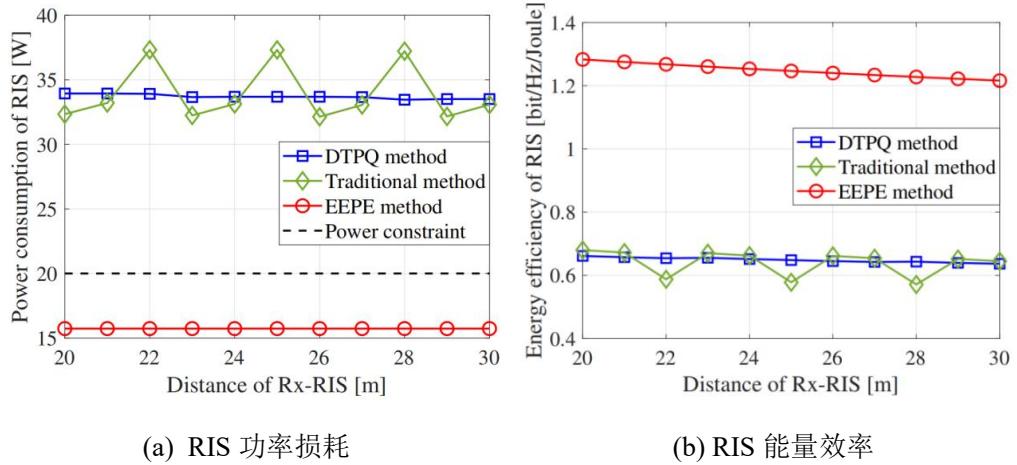


图 6 仿真结果图

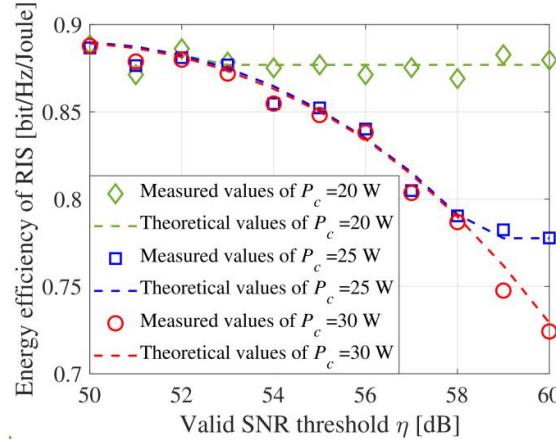


图 7 实测结果图

总体而言, EEPE 方法突破了传统模型中能耗线性假设的限制, 实现了基于实测功耗的能效自适应编码, 为 RIS 辅助通信系统的低功耗设计与 6G 绿色通信架构提供了新的技术路径与实验支撑。

(二) 多 RIS 系统信道估计

为充分发挥 RIS 辅助通信的潜能, 准确的信道状态信息至关重要。然而, 在多 RIS 协同场景下, 信道估计面临多重挑战。一方面, 多 RIS 的引入显著增加了传播路径, 扩大了待估信道的规模; 同时, 由于 RIS 本身不具备主动信号处理能力, 导致系统在导频开销、训练时长以及反馈信息量等方面的资源消耗大幅上升。另一方面, 在复杂传播环境中分布式部署大规模 RIS 阵列, 易受到遮挡等因素的干扰, 部分反射单元信号会出现严重衰减甚至失效, 进而导致信道估计性能显著下降。针对上述难题, 文献[10]考虑了遮挡环境下的 RIS 信道建模, 并提出了一种基于张量分解的多 RIS 辅助 OFDM 系统的信道估计算法。该方法通过引入遮挡因子建模, 构建表征多 RIS 遮挡状态的级联信道模型; 为降低信道矩阵的阶数与算法复杂度, 将多 RIS 划分为若干组别, 并设计了分组训练协议, 通过相邻时间帧接收信号作差来提取各 RIS 组的有效信号分量; 结合信道的结构稀疏特性, 构建三维张量信号模型, 并采用张量典型多项式分解(Canonical Polyadic Decomposition, CPD)算法恢复各因子矩阵, 在此基础上, 利用 K-均值(K-means)聚类算法估计多 RIS 的实际遮挡情况; 最后, 基于所估计的遮挡信息, 设计多种遮挡处理方案并用于信道恢复, 以实现各信道参数及完整信道的重构。

如图 8 所示, 根据多 RIS 遮挡情况与系统应用需求, 算法设计了三种遮挡处理方案: 1) 行/列删除方案: 对 RIS 阵面逐一进行处理, 消除局部失效单元的影响; 2) RIS 删除方案: 在保证系统整体性能的前提下, 删除大面积遮挡的 RIS, 适用于 RIS 相移优化等场景; 3) RIS 选择方案: 选择性反馈最优的 RIS 组信道, 适用于定位等场景。该设计能够根据不同的遮挡特性和应用需求灵活选择补偿策略, 从而在保证系统性能的同时显著提升算法的适用性与鲁棒性。

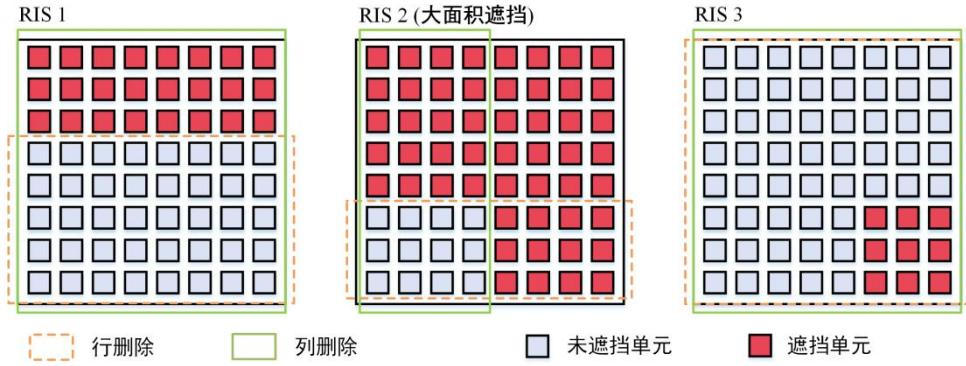
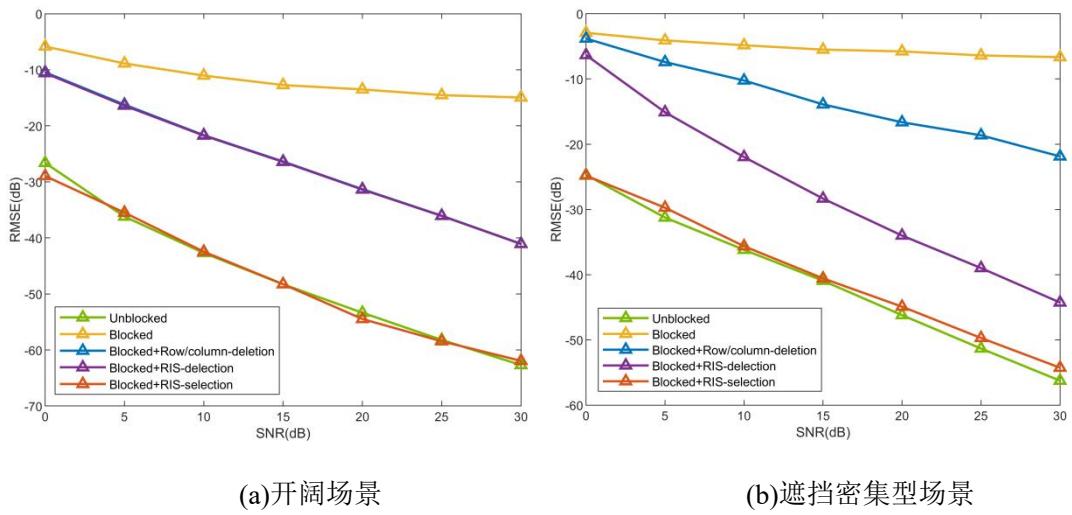


图 8 多 RIS 遮挡处理方案

如图 9 所示,展示了不同遮挡环境中信道角度参数估计性能随信噪比变化的趋势。在障碍物较少的开阔场景中,仅需对 RIS 阵面依次进行遮挡补偿;而在遮挡密集型环境中,则需综合考虑实际部署条件与多 RIS 调度策略,选择最优的遮挡处理方案。所提出的基于张量分解的信道估计方法能够以较低复杂度实现信道参数与遮挡状态的唯一性解耦与精确重构,在遮挡环境中显著提升了多 RIS 系统的信道估计精度与鲁棒性。



(a) 开阔场景

(b) 遮挡密集型场景

图 9 不同遮挡环境下角度参数估计性能对比

(三) RIS 使能多用户组间信道正交化

无线通信网络中多用户(User Equipment, UE)系统能传输的最大流数取决于多用户信道的秩,在无 RIS 辅助的系统中,通常认为信道是不可控的,传输流数需要被动根据信道变化进行相应调整。在多用户场景中使用经典的联合空分复用传输 (Joint Spatial Division and Multiplexing), 传输流数等于前波束成型(Pre-beamforming, PBF)矩阵的维度,该维度的选取与 PBF 的设计取决于各用户组信道自相关矩阵的主要特征值数量,并且前提是保证不同组信道自相关矩阵的特征矩阵相关正交。由于传播环境中散射体和用户分布的不确定性,要满足不同用户组信道相互正交的条件需要基站 (Base Station, BS) 配备大规模天线,通过阵列渐进正交行实现。然而在一些用户组信道强相关的场景中,例如用户相对于 BS 成线分布,用户或者用户组无法通过到 BS 的角度信息加以区分, JSDM 将会失效。在无线通信系

统中引入 RIS 可丰富无线传播环境，重塑多用户信道提供更多复用增益。在 RIS 辅助的系统中，尽管 BS-UE 的信道仍是不可控的，但 RIS 所级联的信道却是可以通过反射系数来调控。特别地，在 BS-UE 直接链路被阻挡时，信道受 RIS 调控的自由度最大，能够实现秩任意可控的无线信道。利用 RIS 对无线信道的定制能力，文献[11]为多用户 JSDM 传输设计了一种低复杂度的实现方式。

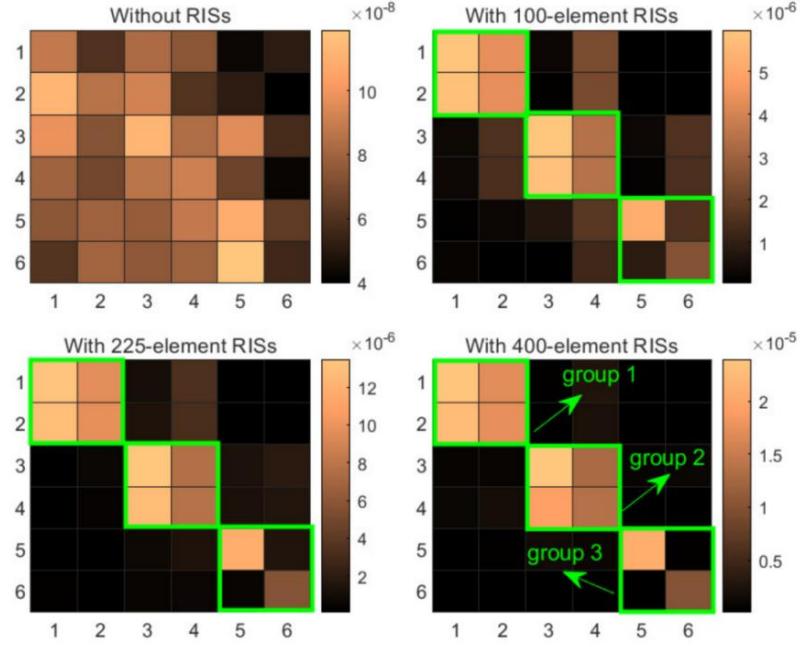


图 10 不同 RIS 尺寸下 6 个 RIS 辅助 6 用户（均分 3 组）系统的等效信道矩阵可视化

考虑到实际部署场景中，RIS 通常放置于 BS 的视距范围内以更好发挥其对信号的调控能力，强视距传播使 BS 到单个 RIS 的信道秩亏，难以实现多用户传输。因此，文献[11]在网络中部署了分布式 RIS 用于服务不同用户组。为了实现端到端多用户等效信道的正交性，可将 RIS 置于 BS 的 DFT 方位角方向，令 BS 至每一个 RIS 的信道相互正交。在该部署策略下，JSDM 传输无需进行复杂的高维矩阵分解操作，使用简单的 DFT 波束赋形即可获得 PBF 设计，将端到端高维信道矩阵降维至流数/用户数。此外，该 PBF 不要求 BS 配备大规模数字架构天线，可通过更低成本的数模混合天线架构实现。除了位置部署，RIS 还可通过调整其电磁反射特性重塑无线信道。为此，文献[11]推导了多用户信道相关矩阵与 RIS 反射系数的闭式关系，利用统计信道信息优化分布式 RIS 的相移以便最小化不同组用户信道的相关性。如图 10 所示，当系统中部署 6 块 RIS 用于辅助多用户传输时，若无 RIS，等效信道矩阵呈现不规则的结构。而在 RIS 的辅助下，除了信道能量得以提升外，多用户等效信道呈现块对角化，不同用户组的信道相关性低，组间干扰显著降低。随着 RIS 尺寸的增大，大规模单元带来的波束渐进正交性进一步降低了用户间干扰，使得等效信道的块对角化更加明显。

（四）RIS 辅助去蜂窝大规模 MIMO 系统联合优化设计

由于 RIS 的无源特性以及级联信道特性，信道获取始终面临精度不足与复杂度过高的

双重挑战。在大规模多天线去蜂窝架构中,这一问题还受到硬件非理想性(如相位估计误差)和外部电磁干扰的叠加影响,进一步降低了系统的可靠性和时延性能。为应对这一难题,研究[12]提出一种基于深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)与差分进化(differential evolution, DE)相结合的波束赋形-码长联合优化算法,其框架如图11所示。该算法在发射功率与RIS相位约束下,通过联合优化AP的波束赋形矩阵与RIS的反射相位矩阵,以最大化系统频谱效率。整体算法由初始化阶段与训练阶段组成。在初始化阶段,清空经验回放记忆库,并随机初始化actor、critic及其对应的目标网络参数,同时生成波束赋形和RIS相位初始矩阵,为训练过程提供起点。在训练阶段,DDPG算法通过不断交互实现策略学习:系统根据当前状态由actor网络输出动作,并获得即时奖励与新状态;经验样本被存储并用于网络参数更新,critic网络根据Q值评估策略效果,actor网络利用梯度信息优化决策,以最大化长期累积奖励。

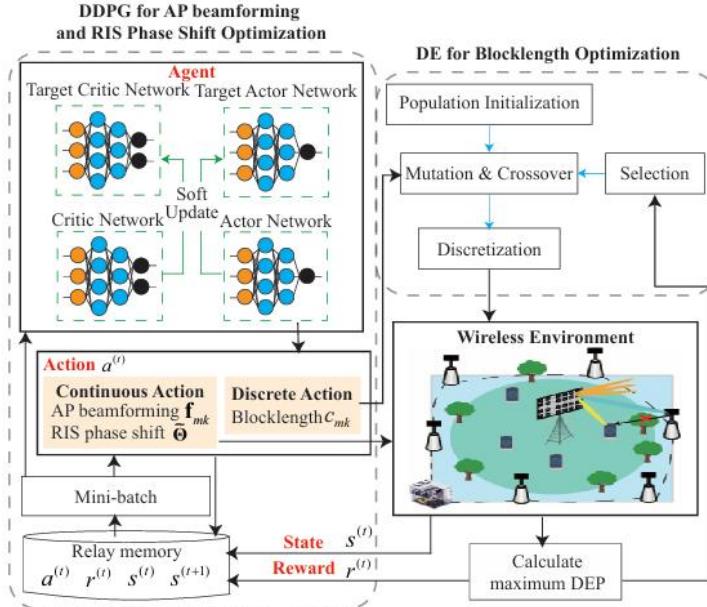


图11 基于深度学习-差分进化联合优化算法框架

为提高训练稳定性,采用软更新机制同步目标网络。与此同时,DE算法并行运行,用于优化离散变量,即传输码长。其过程包括种群初始化、变异、交叉与选择操作,通过模拟自然进化过程持续提升解的适应度。为了处理离散变量,所有候选解在每一代中都会被离散化并限定在可行范围内,从而确保解的有效性与稳定性。DE通过自适应调节搜索范围与交叉概率,实现了全局探索与局部收敛的平衡。

DDPG与DE算法通过统一的目标函数实现协同优化。前者负责连续变量(波束赋形与RIS相位)的学习与更新,后者在相同环境下优化离散变量(传输码长),二者共享基于最大解码错误概率(decoding error probability, DEP)的性能评估指标。每一轮迭代中,DDPG生成连续决策,DE在其基础上搜索最优离散参数,联合动作被应用于系统环境,计算得到统一的性能反馈。该设计实现了连续与离散变量的协同优化,有效提升了算法的收敛速度与全局最优性。

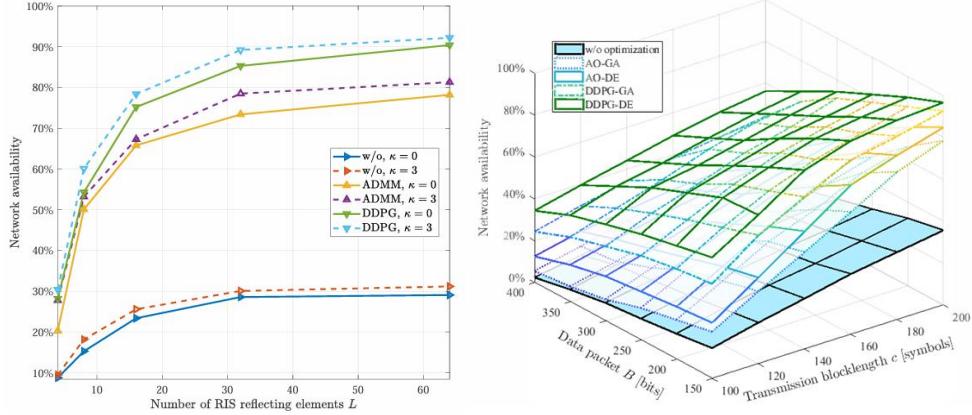


图 12 网络利用率随 RIS 单元数目变化以及码长和数据包长优化性能对比

图 12 展示了系统网络利用率随 RIS 反射单元数量的变化趋势。在发射功率较高的场景下，硬件损伤对系统性能的影响更加显著。值得注意的是，尽管增加 RIS 反射单元数量可有效缓解由电磁干扰与信道反射失真引起的性能退化，但同时也会放大相位误差造成的影响。此外，相较于增大数据包长度，增大码长能更有效提升系统性能。

（五）圆柱形超表面辅助低复杂度传输方案

由于 RIS 具备无源反射特性，若要实现对无线信道的有效重构，器件需具有足够大的物理孔径与单元规模；此时在单元级可控架构下，待优化的相移变量数随单元数量的增长而急剧增多，导致计算复杂度显著上升。进一步地，在单 RIS 同时服务多用户的场景中，即使不考虑用户间干扰，RIS 对各链路均产生调空作用，使得各单元相位的设计在多用户之间形成强耦合，从而将问题转化为跨用户的联合优化任务，复杂度与求解难度同步增加。因此，研究[13]提出了一种基于均匀柱面（uniform cylindrical array, UCA）阵列架构的新型 RIS 辅助多用户下行传输的低复杂度传输方案设计。如图 13 所示，展示了一个 UCA-RIS 辅助的两用户下行传输系统，此时由于 RIS 物理架构的改变，当两用户处于不同方位时，两用户在 RIS 上的可视区域（visible region, VR）不尽相同，因此可以将 RIS 上的单元划分为两类：单用户独有单元和多用户共有单元。此时以最大化系统的总遍历频谱效率为目标，可以采用基于梯度下降的方式对多用户共有部分单元的相移进行迭代优化，然而对于单用户的独有的单元，可以通过推导出的闭式解直接对单元的相移进行设置，从而将这部分单元的剔除整个迭代优化过程，进一步降低多用户场景下单元相移的计算复杂度。此时单用户独有单元最优相移设置所具有的物理意义即是使经过此单元反射后抵达某用户的信号与经过共有部分单元反射后的叠加信号完全对齐相位并不对其他用户产生影响，进而使得系统的总遍历频谱效率达到最大。另外，在每一次对多用户共有单元的相移进行迭代优化的过程中，都可以对单用户独有单元的相移进行配置从而使得优化函数一定在当前满足局部最优，进一步加速迭代优化过程。

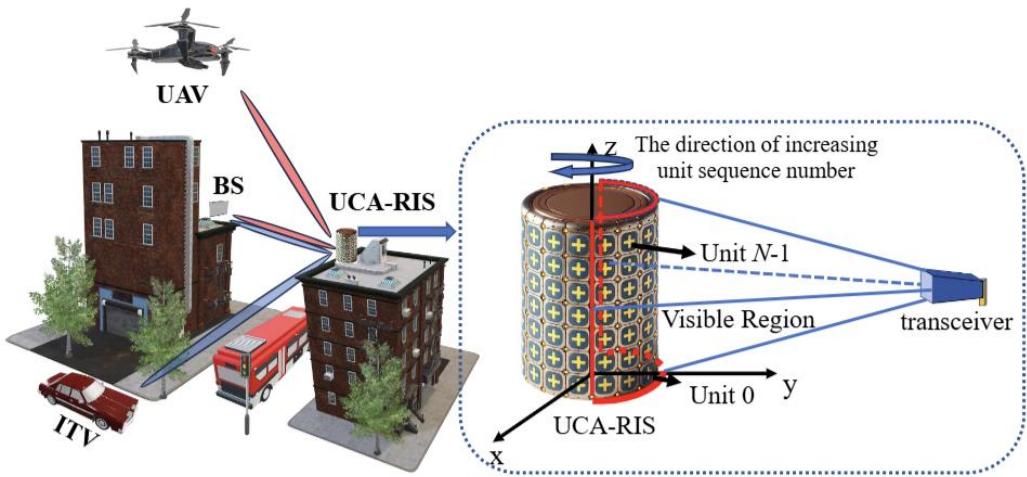


图 13 UCA-RIS 辅助的两用户下行传输系统

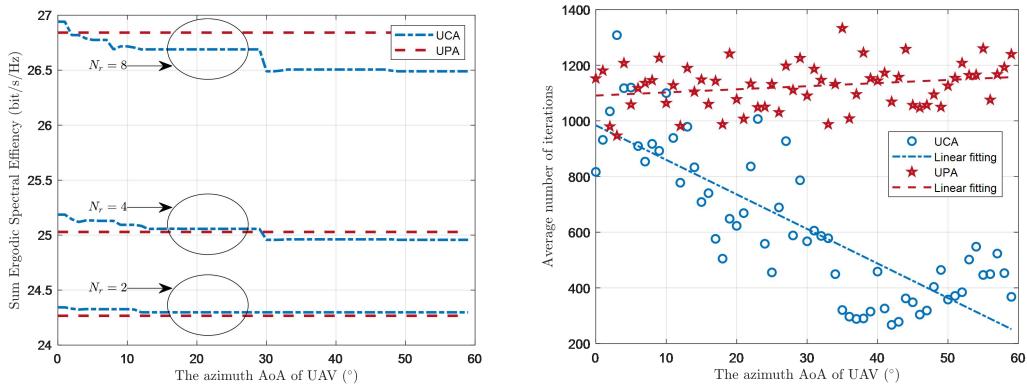


图 14 UCA-RIS 辅助的两用户下行传输系统性能与计算复杂度

图 14 展示了当两用户的信号到达方位角关于 RIS 对称分布的情况下，系统性能与计算复杂度与方位角之间的关系。当 RIS 层数不高且方位角较小且靠近 BS 时，RIS 采取 UCA 架构系统性能甚至优于 UPA 架构，这表明划分用户在 RIS 上的 VR，使某个单元只服务于一个用户而不对其他用户产生影响，在降低计算复杂度的同时甚至可以提高系统性能。然而，随着方位角的增大，尤其是在层数更多的情况下，采取 UCA 架构的系统性能会劣于 UPA 架构。虽然单用户独占可以避免干扰，但无法弥补因与基站重合 VR 内单元数降低造成阵列增益的降低，最终导致总体性能下降。采用 100 次的数值仿真中的平均迭代次数来衡量系统的计算复杂度，可以看出在 RIS 配置为 UPA 架构下，平均迭代次数几乎保持不变；相反，在 UCA 架构下，随着方位角的增大，迭代次数呈下降趋势。这是因为两用户分别独有单元的数量会随方位角的增加而增多，而这些单元无需进行梯度计算，其相移可直接由闭式解计算得到，从而降低优化复杂度，证明了改变 RIS 物理架构对于降低系统计算复杂度的有效性。

四、信道建模

完备的信道模型对于新技术的性能评估和方案优化都是至关重要的。对于智能超表面技术而言，基于信道建模，利用仿真技术可评估 RIS 在不同频段（如 6GHz 以下及毫米波频段）的性能表现，优化单元设计、控制算法及波束赋形策略以提升通信系统性能，并为推动 6G 标准化的工作提供关键技术支撑与数据支持。

3GPP Release 19 启动了面向 6G 潜在技术需求的信道建模工作，主要涵盖了通感一体化（ISAC）信道建模和 7 到 24GHz 频段信道模型验证。针对 RIS 的信道建模可以从 3GPP TR 38.901^[14]（5G）信道模型出发，基于 Release 19 及以后的信道建模工作进行演进与增强。

在本章中，首先总结目前 3GPP 标准化工作中信道建模相关可以借鉴的议题，然后按照标准化议题框架，给出 RIS 信道建模需重点考虑的几个方面：RIS 的级联信道模型（大尺度和小尺度）、RIS 物理模型、模型简化和新特性。

（一）标准化议题

目前为止，在 3GPP RAN WG1 会议所通过的 ISAC 信道建模议题中，RIS 信道建模可以借鉴的议题总结在表 1 中，涉及以下五个方向：

- 目标信道建模—RIS 级联信道建模；
- 目标建模—RIS 物理模型；
- 模型简化—RIS 级联信道模型简化；
- 目标信道与背景信道耦合—RIS 级联信道与 BS-UE 信道耦合；
- 模型新特性。

表 1 3GPP ISAC 标准化进程所讨论议题与 RIS 方案对比

| ISAC 信道建模 | | RIS 信道建模 | |
|-------------|--|----------------------|-----------|
| 议题 | 讨论重点/方案 | 对应议题 | 对应章节 |
| 目标信道建模 | 目标信道是级联卷积还是单点 | RIS 级联信道建模 | （二）（三）（四） |
| 目标建模 | 基于 RCS 的方案进行目标建模，RCS 分为大小尺度 | RIS 物理模型 | （三） |
| 模型简化 | 簇、径删减或者多径匹配的简化方案 | RIS 级联信道简化 | （五） |
| 目标信道与背景信道耦合 | 目标信道与背景信道需要做功率归一化 | RIS 级联信道与 BS-UE 信道耦合 | （六） |
| 新特性 | 空间一致性 | 新特性 | （七） |
| ISAC 建模特殊问题 | 单站信道建模、EO 建模、目标微多普勒、目标遮挡、典型目标 RCS 分类建模、RCS 随机性 | \ | \ |

（二）级联信道

RIS 辅助通信链路的信道建模框架与传统通信建模框架有所不同。如图 15 所示，传统通信信道仅关注发射端（基站）与接收端（用户设备）之间的链路。相比之下，RIS 辅助通信的信道建模需要考虑三个相互关联的组成部分：基站-RIS 信道、RIS-用户设备信道以及 RIS 本身的物理模型。

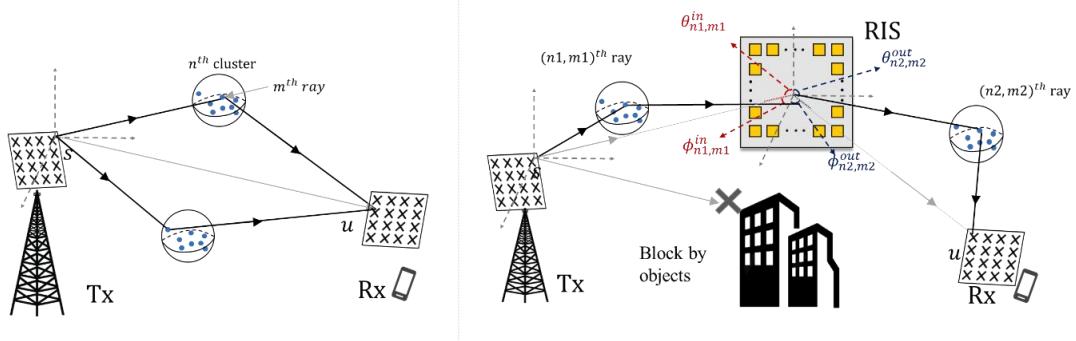


图 15 传统通信模型与 RIS 辅助通信信道模型的比较

因此，与传统通信信道相比，RIS 信道建模的核心在于通过高精度且低复杂度的建模方法，准确捕捉传播环境中的信道特性，同时实现跨广泛频率、带宽和各种应用场景的信道仿真。为实现这一目标，RIS 信道建模必须满足以下要求：

首先，高精度链路建模需要对基站-RIS 和 RIS-用户设备链路进行独立建模，同时考虑多链路间的相互关系，以准确反映信道中的路径损耗和散射特性。

其次，RIS 的高精度相移建模需考虑其散射模式、理想相移和角度依赖性，同时纳入实际环境中存在的非理想量化效应。

此外，该模型应能模拟复杂场景，包括城市微小区（UMi）、城市宏小区（UMa）、室内热点（InH）和工业物联网（IIoT），并允许灵活调整基站、用户终端和 RIS 的位置。

RIS 信道建模框架基于 3GPP TR 38.901 增强如图 16 所示。

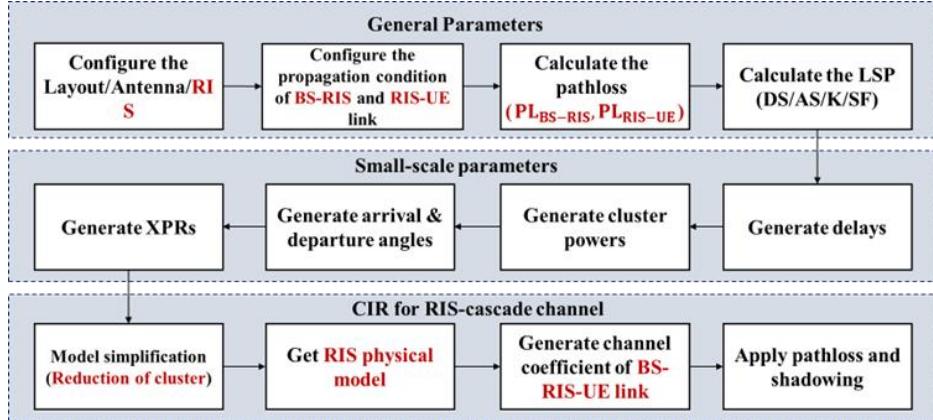


图 16 RIS 信道建模框架

基于 GBSM 模型原理，通过扩展 3GPP TR 38.901 中的通信信道模型，可以推导出 BS-RIS-UE 链路的快速衰落模型。以此为基础框架，若基站配备 S 根发射天线、用户终端配备 U 根接收天线，则基站第 s 根天线通过 RIS 到达用户终端第 u 根天线的信道响应系数可表示为^[15]：

$$\begin{aligned}
h_{u,s}^{ris}(t, \tau) = & \sum_{n_1, m_1}^{N_1, M_1} \sum_{n_2, m_2}^{N_2, M_2} \sqrt{P_{n_1, m_1} P_{n_2, m_2}} \begin{bmatrix} F_{rx,u}^v(\theta_{n_2, m_2}^{rx}, \phi_{n_2, m_2}^{rx}) \\ F_{rx,u}^h(\theta_{n_2, m_2}^{rx}, \phi_{n_2, m_2}^{rx}) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n_2, m_2}^{vv}) & \sqrt{\kappa_{n_2, m_2}^{-1}} \exp(j\Phi_{n_2, m_2}^{vh}) \\ \sqrt{\kappa_{n_2, m_2}^{-1}} \exp(j\Phi_{n_2, m_2}^{hv}) & \exp(j\Phi_{n_2, m_2}^{hh}) \end{bmatrix} \\
& \cdot \begin{bmatrix} F_{ris}^{vv}(\phi_{n_1, m_1}^{in}, \theta_{n_1, m_1}^{in}, \phi_{n_2, m_2}^{out}, \theta_{n_2, m_2}^{out}) & F_{ris}^{vh}(\phi_{n_1, m_1}^{in}, \theta_{n_1, m_1}^{in}, \phi_{n_2, m_2}^{out}, \theta_{n_2, m_2}^{out}) \\ F_{ris}^{hv}(\phi_{n_1, m_1}^{in}, \theta_{n_1, m_1}^{in}, \phi_{n_2, m_2}^{out}, \theta_{n_2, m_2}^{out}) & F_{ris}^{hh}(\phi_{n_1, m_1}^{in}, \theta_{n_1, m_1}^{in}, \phi_{n_2, m_2}^{out}, \theta_{n_2, m_2}^{out}) \end{bmatrix} \\
& \cdot \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n_1, m_1}^{vv}) & \sqrt{\kappa_{n_1, m_1}^{-1}} \exp(j\Phi_{n_1, m_1}^{vh}) \\ \sqrt{\kappa_{n_1, m_1}^{-1}} \exp(j\Phi_{n_1, m_1}^{hv}) & \exp(j\Phi_{n_1, m_1}^{hh}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{tx,s}^v(\theta_{n_1, m_1}^{tx}, \phi_{n_1, m_1}^{tx}) \\ F_{tx,s}^h(\theta_{n_1, m_1}^{tx}, \phi_{n_1, m_1}^{tx}) \end{bmatrix} \\
& \cdot \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}(\mathbf{r}_{n_2, m_2}^{rx} \cdot \mathbf{d}_u^{rx} + \mathbf{r}_{n_1, m_1}^{tx} \cdot \mathbf{d}_s^{tx})\right) \cdot \exp(j2\pi f_{n_2, m_2} t) \cdot \delta(\tau - \tau_{n_1, m_1} - \tau_{n_2, m_2}).
\end{aligned} \tag{1}$$

其中参数如表 2 所示。

表 2 参数列表

| 参数 | 描述 | 参数 | 描述 |
|--|---|--|---|
| λ | 波长 | $\mathbf{r}_{n_2, m_2}^{rx}, \mathbf{r}_{n_1, m_1}^{tx}$ | 接收器和发射器相应路径的单位方向向量 |
| $n_i, m_i, i \in \{1, 2\}$ | BS-RIS 和 RIS-UE 子信道中簇和径的编号 | $\mathbf{d}_u^{rx}, \mathbf{d}_s^{tx}$ | 天线 u 和 s 的位置向量 |
| P_{n_2, m_2} | 路径的功率 | $p_1, p_2 \in \{v, h\}$ | 垂直和水平极化方向 |
| $\phi_{n_1, m_1}^{in}, \theta_{n_1, m_1}^{in}, \theta_{n_1, m_1}^{tx}, \phi_{n_1, m_1}^{tx}$ | BS-RIS 子信道中 $(n_1, m_1)^{th}$ 路径的到达方位角(AoA)、俯仰角(ZoA)、出发方位角(AoD) 和 ZoD | $F_{rx,u}^v, F_{rx,u}^h, F_{tx,s}^v, F_{tx,s}^h$ | UE (v) 和 BS (h) 天线在 v 和 h 极化下的辐射方向图 |
| $\phi_{n_2, m_2}^{rx}, \theta_{n_2, m_2}^{rx}, \theta_{n_2, m_2}^{out}, \phi_{n_2, m_2}^{out}$ | BS-RIS 子信道中路径中的 AoA, ZoA, AoD, ZoD 的角度 | $F_{ris}^{p_1 p_2}$ | 整个 RIS 的辐射方向图 |
| $\Phi_{n_i, m_i}^{p_1 p_2}, i \in \{1, 2\}$ | 以 p_1 极化出发、以 p_2 极化到达的 $(n_i, m_i)^{th}$ 路径的随机相位 | $\kappa_{n_i, m_i}, i \in \{1, 2\}$ | 路径的交叉极化功率比 |
| f_{n_2, m_2} | $(n_2, m_2)^{th}$ 路径的多普勒频移。 | $\tau_{n_i, m_i}, i \in \{1, 2\}$ | 路径延迟 |

(三) 物理模型

RIS 的物理模型定义了 RIS 阵列单元的辐射方向图，也可以类比为 ISAC 中的雷达截面积 (Radar Cross Section, RCS)。目前，RIS 的建模方法包括以下几种：

(1) 基于等效辐射方向图的物理模型^{[15][28]}: 该模型通过等效辐射方向图表示 RIS 对信号的响应。首先利用物理光学推导 RIS 单元的场分布，然后应用等效原理计算单元的二次辐射。定义并计算每个 RIS 单元的辐射方向图，最终形成 RIS 的整体辐射方向图。

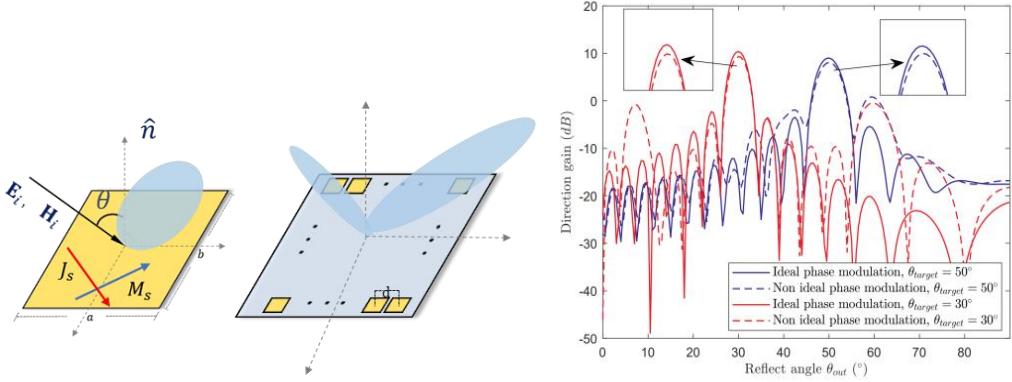


图 17 RIS 等效辐射方向图

(2) 基于电磁理论的 RCS 模型^{[16][17]}: 这种方法利用电磁理论建立不同极化条件下的精确 RCS 模型。这种建模方法准确描述了 RIS 单元在复杂电磁环境中的反射特性，为评估 RIS 性能提供了理论基础。

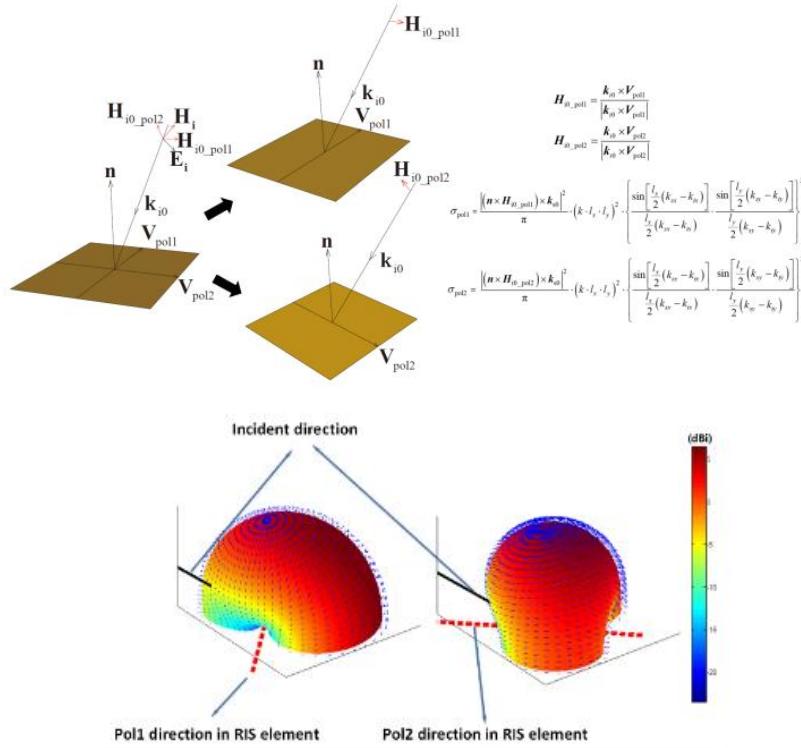


图 18 基于 RCS 的极化 RIS 单元方向图^[17]

(3) 简化余弦辐射方向图模型^[18]: 该模型采用简化的天线辐射方向图假设，并采用 $\cos^\alpha \theta$ 模型来描述 RIS 元件的方向特性。虽然这种方法计算简单，适用于系统要求较低的场景，但其准确性可能不如基于电磁理论的 RCS 模型。

(4) 3GPP TR 38.901 中的单天线单元模型^[14]: 该标准定义的天线单元辐射方向图是通

过特定公式计算得出的数学模型，用于表征天线在水平与垂直方向上的辐射特性。相较于余弦模型，TR 38.901 采用的模型具有更高的复杂度与精确度，其综合考虑了 3dB 波束宽度、旁瓣衰减等更多参数。

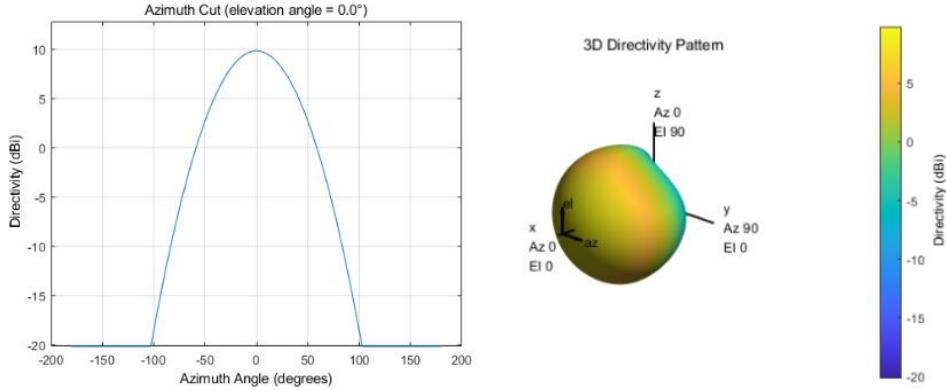


图 19 3GPP TR 38.901 中单个天线单元的辐射功率方向图

通过比较不同物理模型之间的差异，对简化模型（如 TR 38.901 中的模型）的参数进行修改，以实现高效且可用的物理建模。如图 20 所示，基于“物理光学”方法的模型和“38.901”天线模型两种方法获得的 RIS 等效辐射方向图的差异。当入射波垂直于 RIS 面板（与法线重合）且在 TR 38.901 方法中将 RIS 的阵列单元增益设置为 5dBi 时，两种模型的辐射方向图几乎相同；当入射波倾斜时，两种模型会出现一些差异。

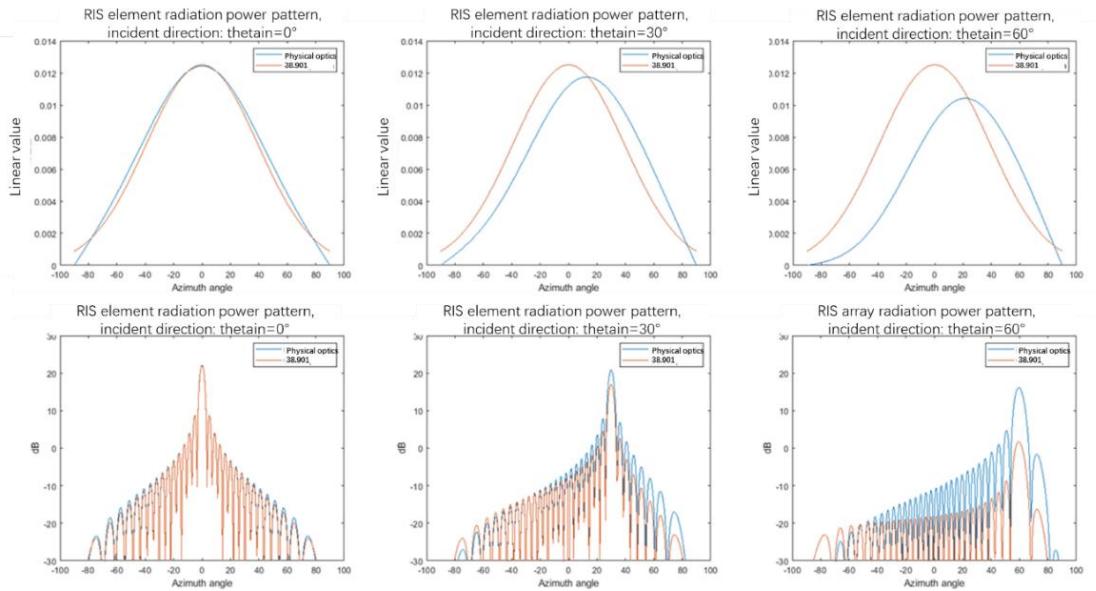


图 20 基于物理光学法的建模方案与基于 38.901 天线模型的建模方案比较

(5) 基于电磁仿真的角度依赖反射系数幅度-相位响应模型^[25]：利用 CST Microwave Studio 中的频域求解器，对具有三层结构（上层为对称金属贴片并桥接可变电容二极管，中层为高频介质板，下层为铜板）的 RIS 单元进行电磁建模与仿真。通过参数扫描，在不同入射角条件下收集反射系数数据。具体而言，在入射角 $\theta_{\text{inc}} \in \{0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ\}$ 及不同可变电容值的条件下，提取 S 参数以获得反射系数的幅度与相位特性。

基于电磁仿真数据，并在传统非理想相移模型的基础上，提出了 RIS 反射单元的入射

角依赖的幅度-相位响应模型：

$$\beta_m(\theta_m) = (1 - \beta_{\min}) \left(\frac{\sin(\theta_m - \varphi) + 1}{2} \right)^{\alpha_{\text{fit}}} + \beta_{\min} \quad (2)$$

其中，最小幅度 β_{\min} 、水平偏移 φ 及曲线陡峭度 α_{fit} 由电磁仿真数据与 MATLAB 非线性拟合获得。模型参数随入射角变化规律明确，拟合结果与 CST 仿真匹配。该模型能够真实反映 RIS 单元的角度响应特性，为后续反射面结构设计与信道建模提供了有效的理论支撑。

| θ_{inc} | β_{\min} | φ | α_{fit} |
|-----------------------|----------------|-----------|-----------------------|
| 0° | 0.8385 | 1.0478 | 1.0094 |
| 10° | 0.8329 | 1.1070 | 1.0735 |
| 20° | 0.8157 | 1.1604 | 1.1224 |
| 30° | 0.7824 | 1.1567 | 1.0879 |
| 40° | 0.7292 | 1.2816 | 1.1861 |
| 50° | 0.6446 | 1.3262 | 1.1795 |

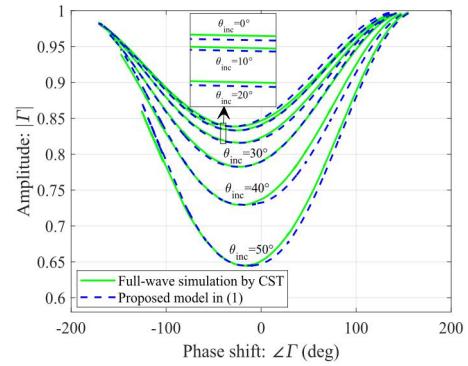


图 21 基于物理光学法的建模方案与基于 38.901 天线模型的建模方案比较

(四) 模型简化

第(二)节提出的所有快衰落模型都基于 BS-RIS-UE 链路，该链路由 BS-RIS 和 RIS-UE 子信道级联而成。虽然卷积级联方法可以准确描述该链路的信道模型，但带来了模型复杂度高的挑战：如果在射线级别进行完全卷积，其中 BS-RIS 信道包含 $N_1 \cdot M_1$ 条射线，RIS-UE 信道包含 $N_2 \cdot M_2$ 条射线，那么最终的目标信道将需要进行 $N_1 \cdot M_1 \cdot N_2 \cdot M_2$ 次计算，这可能导致无法接受的仿真时间成本。因此，有必要探索降低级联信道复杂度的方法。

可以考虑以下两种简化方法，如表 3 所示：

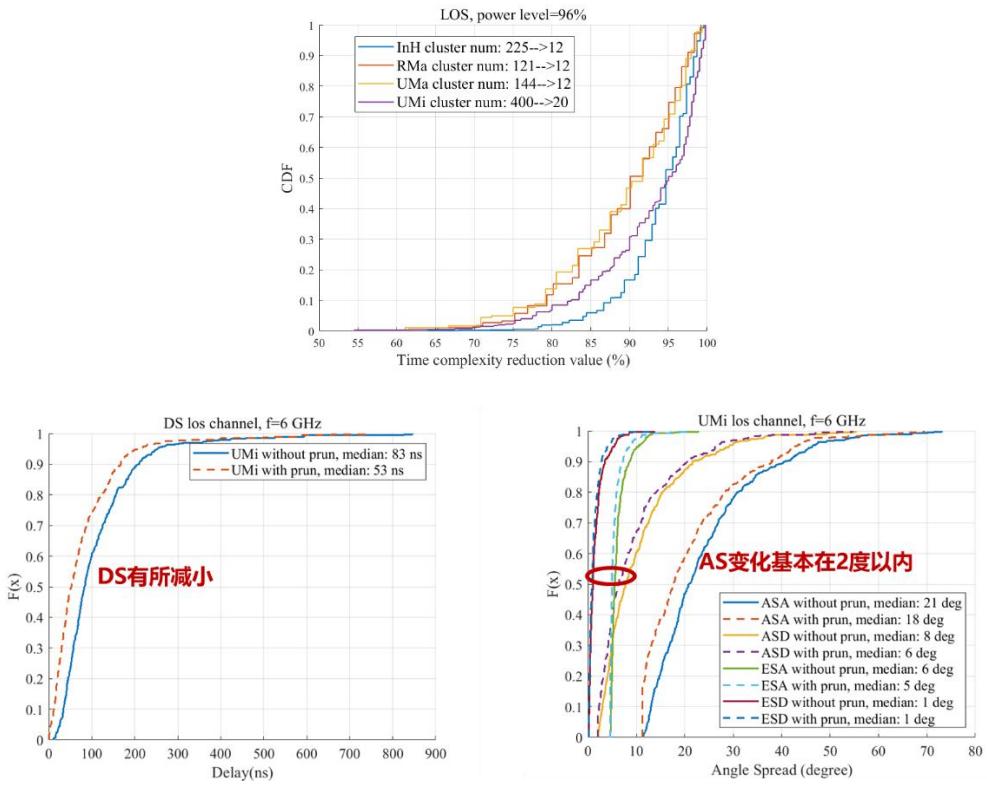
方案 1：保留子信道中功率占比最高的簇，其余的在射线级别进行卷积，效果如所示。

方案 2：按功率降序排列子信道簇，设置 25dB 功率阈值，并在卷积过程中进行剪枝。

表 3 潜在的简化方法

| 分类 | 基于功率（比例/阈值）的簇删减 | |
|------|----------------------|----------------------|
| 顺序 | 卷积之前删减 | 卷积期间删减 |
| 方案 | 方案 1：基于功率比 | 方案 2：基于 25dB 门限 |
| 期望效果 | $N_{m1}M_1N_{m1}M_2$ | $N_{m2}M_1N_{m2}M_2$ |

这些方法可考虑用于实施图 22 中的步骤 9“模型简化（减少簇）”。建议优先考虑方案 1 和方案 2，因为它们能在高效计算的同时有效保留信道的主要特征。方案 1 优先保留高功率簇以确保重要路径不受影响，而方案 2 则通过功率阈值控制复杂度并简化信号。两种方法在性能和计算负担之间实现了良好平衡，因此适用于大规模仿真场景。



图(a)为1000次仿真的模型简化比R的CDF结果,图(b)(c)为删减后级联信道相较于全卷积信道的时延扩展和角度扩展变化。

图 22 基于功率占比的多径簇删减实现效果

(五) 信道耦合

BS-RIS-UE 级联信道与 BS-UE 直连信道耦合时, 引入新参数功率控制因子 O_{RIS} 建模级联信道对直连信道路损的影响。

级联信道和直连信道耦合时, 需要增加一个功率控制因子, 表达式如下:

$$\begin{aligned} PL_{\text{cou}} &= PL_{\text{cas}} + PL_{\text{dir}} \\ PL_{\text{dir}} &= O_{\text{RIS}} \cdot PL_{\text{env}} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, PL_{cou} : RIS 整体信道的路损; PL_{cas} : Tx-RIS-Rx 级联信道的路损; PL_{dir} : Tx-Rx 直连信道的路损; PL_{env} : 不存在 RIS 时的背景信道路损, 建模时复用 38.901 模型。

实测得到 O_{RIS} 是一个随机量, 符合正态分布^[26], 且受目标与 Tx、Rx 的 LOS 状态相关。

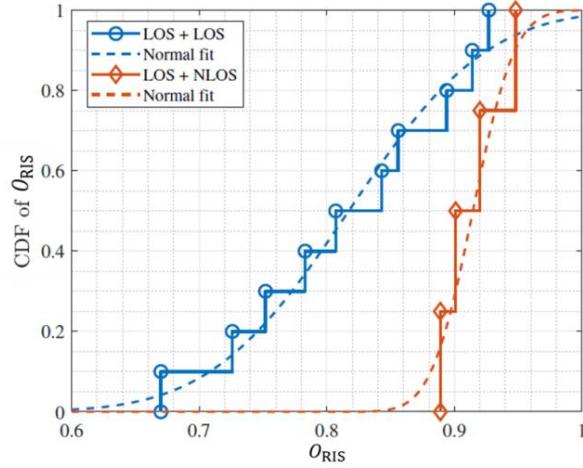


图 23 O_{RIS} 实测分布

(六) 路损模型

智能超表面具备操控电磁波的能力，因此包含 RIS 的无线信道特性具有重要的研究价值。先前的一些研究[19][20]探讨了实际场景中 RIS 辅助无线信道的路径损耗特性，并提出了改进的 Floating-intercept (FI) 和 Close-in (CI) 模型。然而，这些开创性研究忽略了 RIS 阵列增益对路径损耗的影响，且仅在特定 RIS 编码下进行，因此现有路径损耗模型在不同编码和近场下的拟合效果不佳。为了解决这个痛点，一种考虑 RIS 阵列增益的 FI 路径损耗模型在[21]中被提出，简记为 RIS-FI 模型。

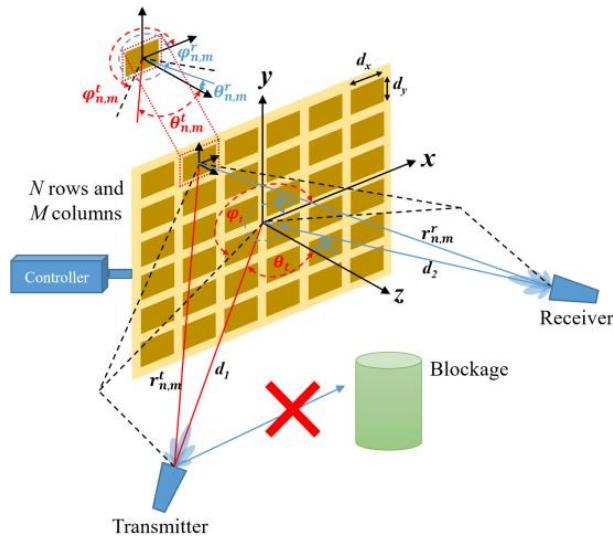


图 24 RIS 辅助无线通信典型场景

RIS 辅助无线通信典型场景如图 24， M 和 N 分别是 RIS 单元的列数和行数； d_1 和 d_2 分别是从发射天线和接收天线到 RIS 中心的距离； θ_t 和 θ_r 分别是从发射天线和接收天线到 RIS 中心的仰角； φ_t 和 φ_r 分别是从发射天线和接收天线到 RIS 中心的方位角； d_x 和 d_y 分别是每个单元沿 x 轴和 y 轴的尺寸； $r_{n,m}^t$ 和 $r_{n,m}^r$ 分别是从发射天线和接收天线到第 n 行第 m 列单元的距离； $\theta_{n,m}^t$ 和 $\theta_{n,m}^r$ 分别是从发射天线和接收天线到第 n 行第 m 列单元的仰角； $\varphi_{n,m}^t$ 和 $\varphi_{n,m}^r$

分别是从发射天线和接收天线到第 n 行第 m 列单元的方位角。

RIS 自由空间路径损耗模型如下^[18]:

$$\begin{aligned} PL_{free\ space}^{RIS}(d_1, d_2) &= \frac{16\pi^2 (\cos\theta_i \cos\theta_r)^2 d_1^2 d_2^2}{G_t G_r (d_x d_y)^2} \times \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{F_{n,m}^{combine}} \Gamma_{n,m} \cos\theta_{n,m}^i \cos\theta_{n,m}^r e^{\frac{-j2\pi(r_{n,m}^i + r_{n,m}^r)}{\lambda}} \right|^2 \\ &= \frac{16\pi^2 (\cos\theta_i \cos\theta_r)^2 d_1^2 d_2^2}{G_t G_r (d_x d_y)^2 (G_{RIS})^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

其中, λ 表示波长, $\Gamma_{n,m}$ 表示第 n 行第 m 列单元的反射系数。 G_t 和 G_r 分别是发射天线和接收天线的增益, $F_{n,m}^{combine}$ 是发射天线、接收天线和 RIS 单元的归一化辐射方向图函数的乘积。 G_{RIS} 是 RIS 的阵列增益, 表达式如下:

$$G_{RIS} = \left| \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sqrt{F_{n,m}^{combine}} \Gamma_{n,m} \cos\theta_{n,m}^i \cos\theta_{n,m}^r e^{\frac{-j2\pi(r_{n,m}^i + r_{n,m}^r)}{\lambda}} \right|. \quad (5)$$

从上式不难看出, 影响路损的 3 个关键分量为 G_{RIS} , d_1 和 d_2 。基于此发现, 提出的 RIS-FI 模型为:

$$PL_{FI}^{RIS}(d_1, d_2) = b + 10n_1 \log_{10}(d_1) + 10n_2 \log_{10}(d_2) - 10a \log_{10}(G_{RIS}) + X_\sigma. \quad (6)$$

其中, b 为浮动截距, a 为 G_{RIS} 的环境指数, n_1 和 n_2 分别为 d_1 和 d_2 链路的路径损耗指数, X_σ 是对数正态随机变量。

在 RIS-FI 模型中, RIS 阵列增益分量 G_{RIS} 与 RIS 所有单元的反射系数以及收发天线到 RIS 单元的距离有关。因此, 独特的 Gris 分量使得 RIS-FI 模型不仅适用于不同种类的编码, 而且能够有效表征 RIS 远场和近场区域的路径损耗。

利用一块 512 单元工作频点为 2.6GHz 的 RIS 在室外广场、室内走廊和教室收集的测量数据验证了 RIS-FI 路径损耗模型的有效性。采集数据集中在 RIS 近场区域, 且 RIS 采用了[22] 中的近场聚焦与波束赋形两种类型的编码。从结果上看, 与其它 RIS 路径损耗模型相比, RIS-FI 模型在描述 RIS 近场区域和不同编码的路径损耗方面具有更高的准确性。

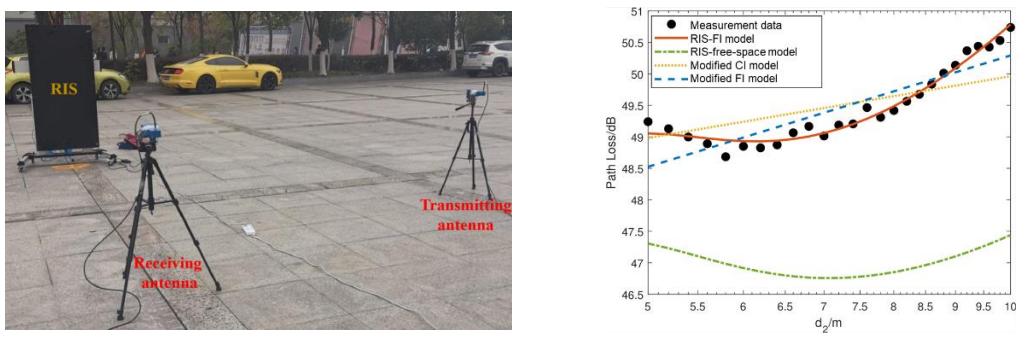
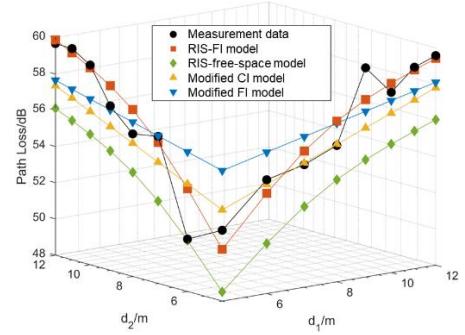


图 25 室外广场测试



(a)场景照片

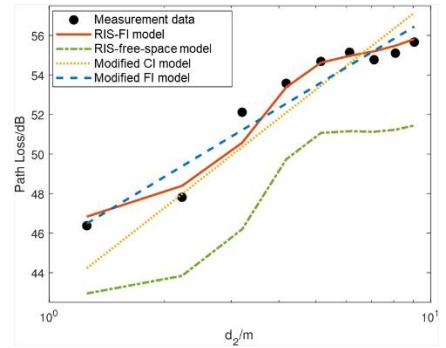


(b)不同模型拟合比较 (波束赋形编码)

图 26 室内走廊测试



(a)场景照片



(b)不同模型拟合比较 (波束赋形编码)

图 27 教室测试

(七) 近场信道

图 28 是位置可调 RIS 辅助的单输入单输出通信系统^{[23][24]}。其中的 RIS 能够在二维平面的特定区域内移动。发射机 (Tx, Transmitter) 和接收机 (Rx, Receiver) 位于位置可灵活调整的 RIS 前方的固定位置，且它们之间的直射路径被障碍物阻挡。建立一个三维坐标系，其原点 O 位于移动区域的中心。RIS 的移动区域位于 yoz 平面内。RIS 的单元数量为 $N = N_v \times N_z$ ，其中 N_v 和 N_z 分别是水平方向和垂直方向上的单元数量。单元之间的间距为 d 。RIS 中心 O_{ris} 的位置由 $\mathbf{l} = (0, l_y, l_z)^T \in \mathcal{L}$ 表示。在此假设多径分量由分布在收发器和 RIS 之间的多个散射体产生。具有相似到达角的散射体被归为不同的散射簇。

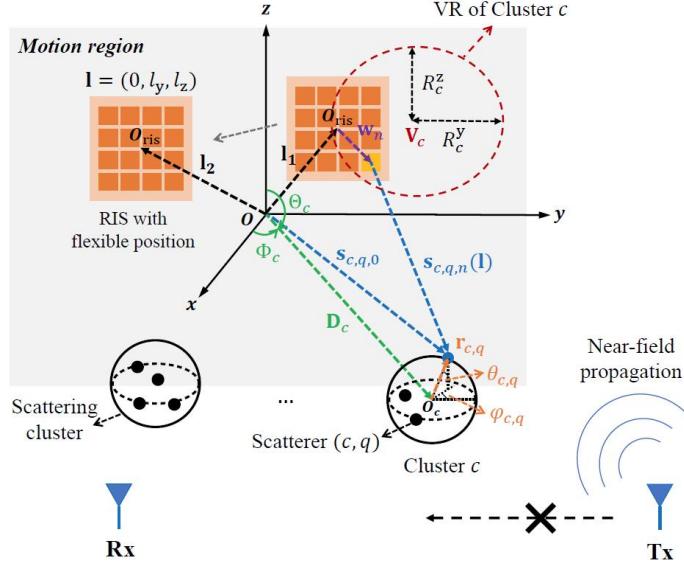


图 28 位置可调 RIS 辅助的通信系统示意图

以分段信道 Tx-RIS 为例，在 RIS 运动区域内构建近场信道模型。类似的方法也可等效地扩展到另一个分段信道 RIS-Rx。如图 4.1 所示，散射体分布在 C 个球面上，这些球面与 RIS 的距离各不相同。第 c 个半径为 r_c 的簇包含 Q_c 个散射体。在此假设所有簇的 Q_c 相等，即 $Q_c = Q, c \in \{1, \dots, C\}$ 。在运动区域中，原点 O 被用作参考点。基于 Saleh-Valenzuela (S-V) 模型，分段信道 \mathbf{h}_1 的第 n 个元素可建模为

$$h_{1,n} = \sum_{c=1}^C \sum_{q=1}^{Q_c} \xi_{c,n}(\mathbf{l}) \frac{g_{c,q} e^{j\psi_{c,q}}}{\sqrt{Q_c}} \frac{\|\mathbf{s}_{c,q,0}\|}{\|\mathbf{s}_{c,q,n}(\mathbf{l})\|} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\|\mathbf{s}_{c,q,n}(\mathbf{l})\| - \|\mathbf{s}_{c,q,0}\|)}, \quad (7)$$

其中 $\xi_{c,n}(\mathbf{l}) \in [0,1]$ 表示为第 c 个簇引入的可视域因子。该因子的详细建模将在下面的小节中阐述。 λ 是载波频率的波长。 $g_{c,q}$ 和 $\psi_{c,q} \sim U[0, 2\pi)$ 分别表示来自第 c 个簇中第 q 个散射体传播路径的幅度和相位。幅度满足 $\sum_{a=1}^Q \tilde{a} \xi_{c,q}^2 / Q = \gamma_c$ ，其中 γ_c 是第 c 个簇的归一化功率。此外， $\mathbf{s}_{c,q,0}$ 表示从参考点到第 (c, q) 个散射体的位置向量。 $\mathbf{s}_{c,q,n}(\mathbf{l})$ 表示 RIS 位于 \mathbf{l} 处时第 n 个单元到第 (c, q) 个散射体的位置向量，其表达式为

$$\mathbf{s}_{c,q,n}(\mathbf{l}) = \mathbf{D}_c + \mathbf{r}_{c,q} - \mathbf{l} - \mathbf{w}_n \quad (8)$$

其中， $\mathbf{D}_c = D_c [\sin \Theta_c \cos \Phi_c, \sin \Theta_c \sin \Phi_c, \cos \Theta_c]^T$ 是第 c 个簇中心的位置向量。在上述表达式中， $\Phi_c \in [-\pi/2, \pi/2)$ 和 $\Theta_c \in [0, \pi)$ 分别是方位角和仰角。 D_c 是簇中心 O_c 与原点之间的距离。第 c 个簇中第 q 个散射体的位置向量为 $\mathbf{r}_{c,q} = r_c [\sin \theta_{c,q} \cos \varphi_{c,q}, \sin \theta_{c,q} \sin \varphi_{c,q}, \cos \theta_{c,q}]^T$ ，其中 $\varphi_{c,q} \in [-\pi, \pi), \theta_{c,q} \in [0, \pi)$ 分别是相对于 O_c 的第 (c, q) 个散射体的方位角和俯仰角。将第 n 个单位单元相对于 O_{ris} 的位置向

量定义为 $\mathbf{w}_n = [0, (n_y - (N_y + 1)/2)d, (n_z - (N_z + 1)/2)d]^T$ ，其中 $n_y = \lfloor n/N_y \rfloor + 1$ ，
 $n_z = \lfloor n/N_z \rfloor + 1$ 。

考虑到RIS的运动区域往往显著大于散射体的可视域，这自然会引入空间非平稳效应，可以采用一组过渡函数对可视域进行建模。

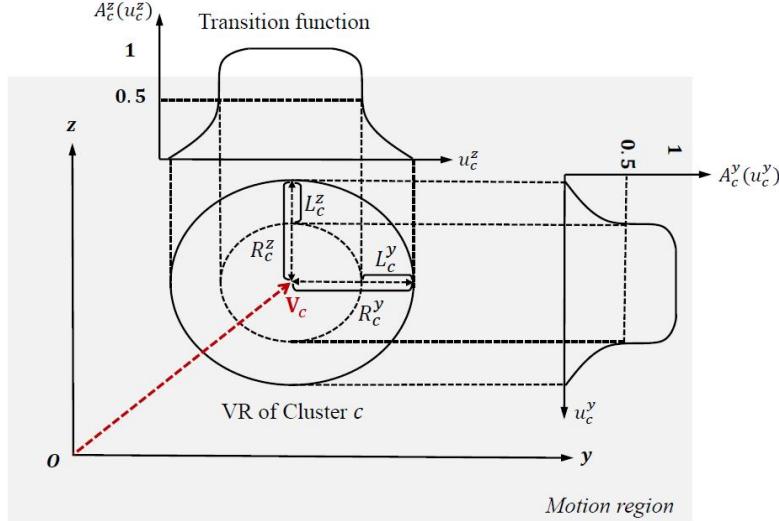


图 29 可视域模型示意图

图 29 是可视域模型示意图，在此假设运动区域中的可视域为一个椭圆。令 $\mathbf{v}_c = (0, v_c^y, v_c^z)^T$ 为第 c 个簇的可视域中心位置， $u_c^{\cdot}, \cdot \in \{y, z\}$ 是可视域中心与位于 (l_{\cdot}, w_n^{\cdot}) 处的单位单元之间的距离，其中 l_{\cdot} 和 w_n^{\cdot} 分别是位置向量 \mathbf{l} 和 w_n 在 y 轴或 z 轴方向上的坐标分量。 R_c^{\cdot} 是第 c 个簇的可见区域范围， L_c^{\cdot} 是当过渡函数从 0 变化到 0.5 时 u_c^{\cdot} 的长度，它们决定了非平稳现象的变化速度。第 c 个簇在 y 轴和 z 轴方向上的过渡函数 $A_c^{\cdot}(u_c^{\cdot})$ 表示为

$$A_c^{\cdot}(u_c^{\cdot}) = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctan \left[\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\lambda L_c^{\cdot}}} (L_c^{\cdot} + u_c^{\cdot} - R_c^{\cdot}) \right] \quad (9)$$

$$u_c^{\cdot} = l_{\cdot} + w_n^{\cdot} - v_c^{\cdot}$$

上式是菲涅耳积分的一种近似，描述了在全导电边缘一定距离处的场强，因此适用于模拟实际环境中快速且平滑的功率变化。通过将过渡函数 $A_c^y(u_c^y)$ 和 $A_c^z(u_c^z)$ 相乘，可定义可视域因子为

$$\xi_{c,n}(\mathbf{l}) = A_c^y(u_c^y) A_c^z(u_c^z) \quad (10)$$

五、标准化影响分析

近年来，标准化组织陆续启动了关于 RIS 的系列研究工作，其中包括欧洲电信标准化协会 (ETSI, European Telecommunications Standards Institute) 和中国通信标准化协会 (CCSA, China Communications Standards Association)，如图 30 所示。

在 ETSI 中，RIS 产业规范组 (ISG, Industry Specification Group) 通过三个阶段系统性推进 RIS 技术标准化，以支撑 6G 网络的发展。

第一阶段为 2021-2023 年，目标包括技术潜力分析、验证、成熟度评估及标准化需求研究，目前已发布 3 份核心研究报告。

(1) ETSI GR RIS 001 《RIS 用例、部署场景及需求》^[28]，该报告定义 11 个具体用例，涵盖容量增强、覆盖扩展、定位精度提升、安全增强、可持续性优化等场景；分析室内、室外及混合环境的部署挑战；研究 RIS 在毫米波频段抗阻塞、抗窃听及无线信息与能量同传中的应用。

(2) ETSI GR RIS 002 《RIS 技术挑战、架构及对标准化的影响》^[29]，该报告提出两种主要部署架构，其中集成式对应 RIS 替代传统大规模 MIMO 的移相器和功放，降低成本和功耗，分布式对应 RIS 作为动态调节的散射体，增强弱覆盖区域信号。同时，该报告讨论控制信息交互需求，分析对现有接口的潜在影响。

(3) ETSI GR RIS 003 《RIS 通信模型、信道模型、信道估计及评估方法》^[30]，该报告讨论 RIS 单元模型，基于周期性边界条件，建立反射系数优化模型，并支持近场和远场路径损耗模型。同时，该报告定义 RIS 辅助信道的空间影响区域和频率影响带宽，量化 RIS 在空间和频域的效能，并分析 RIS 间干扰、恶意 RIS 窃听场景，提出动态空间影响区域 (AoI, Area of Influence) 和频率影响带宽 (BoI, Bandwidth of Influence) 的协同优化方法。

第二阶段为 2023-2025 年，目标为维护一阶段成果，并新增研究领域及初步规范框架。在研项目包括：

(1) 《RIS 实现与实际考量》，讨论硬件设计，包括单元操作原理、超表面结构、控制器及电源，分析反射/折射/吸收型 RIS 的仿真与原型试验结果。

(2) 《RIS 辅助通信的多样性与复用》，分析时域、频域、极化域及空间域的多样性增益，探索 RIS 与波束赋形、天线阵列选择技术的协同效果研究。

(3) 《多功能 RIS 建模、优化与操作》，研究同时透射反射 RIS (STAR-RIS, Simultaneous Transmission and Reflection RIS) 及感知型 RIS 的建模，探索信道模型、相位优化、资源分配策略。

(4) 《RIS 近场信道建模与机制》，分析大孔径 RIS 的近场传播场景，提出波束聚焦优化、动态相位调整等技术解决方案。

(5) 《RIS 标准化测试：可重构智能表面测试标准》，定义测试参数包括波束精度、反射效率、环境适应性等，制定统一测试方法论，覆盖任何 RIS 设计与实现。

第三阶段计划为 2025-2027 年，目标为推动 3GPP 标准化，完成最终规范及实际部署支持。核心计划包括与 3GPP 协同，研究 RIS 与网络控制中继 (NCR, Network-Controlled Repeater)

的功能复用及差异化需求；探索 RIS 在通感一体化（ISAC, Integrated Sensing and Communication）、FR3 频段等领域的应用；标准化路径研究，计划在 2025 年 3GPP 6G 研讨会中重新评估 RIS 优先级，争取纳入 5G-A 及 6G 标准。

ETSI ISG RIS 通过分阶段研究，系统性地推进 RIS 技术从理论模型到标准化落地的全过程。当前工作聚焦于硬件实现、多样化应用及测试标准化，未来需加速与 3GPP 的协同，确保 RIS 在 6G 网络中发挥关键作用。

在 CCSA 方面，2020 年 8 月，CCSA TC5WG6 通过新立项《智能超表面无线技术研究》，旨在面向智能超表面无线技术展开研究，包括对 5G-A 和新一代无线通信系统的研究，从而为后 5G/新一代无线通信系统的研发打下基础，并支撑向 ITU 等国际组织输入，推动国际上正式启动新一代无线通信系统的研究工作。

该研究围绕智能超表面无线技术展开研究，聚焦 5G-A 及新一代通信系统，全面分析其技术特性、应用场景及发展前景。技术研究涵盖硬件架构、信道建模、空口技术及融合创新等方向。硬件层面，基于二极管、液晶、石墨烯等材料的器件方案各有优势，适配不同频段与场景需求；信道测量与建模针对不同部署场景的信道特性展开，为空口技术设计提供支撑；波束赋形、信道估计等关键技术通过与人工智能结合，有效降低系统复杂度。该报告总结国内外产学研机构已开展大量的实验验证，东南大学、清华大学等搭建原型机系统，中国联通、中国移动完成 5G 外场试验，结果显示其能显著提升信号强度与吞吐量，例如 5G 中频非视距场景下边缘用户速率提升 40% 以上。

2023 年 4 月，在“智能超表面无线技术研究”项目结束后，中兴通讯联合三大运营商在 CCSA TC5WG6 成立新研究项目“智能超表面工程化关键技术研究”。“智能超表面无线技术研究”项目主要在理想 RIS 假设下开展信道建模、信道估计与反馈、波束赋形等学术研究，侧重理论方案设计，缺乏对 RIS 实际应用中硬件非理想性、复杂场景适配等工程化挑战的研究。本项目则针对这些未解决问题，重点探索 RIS 在真实部署中的关键技术与落地难题。

新立项围绕 RIS 工程化应用展开全面研究，重点攻克实际部署中的关键技术与核心挑战。在硬件层面，分析中低频、毫米波等不同频段及反射型、透射型等工作模式的 RIS 技术特征，探究 PIN 管、液晶、石墨烯等调控方式下单元响应相关性、量化误差、双极化缺陷、互耦效应及非平整面板等硬件非理想因素对性能的影响，明确不同场景适用的 RIS 类型及性能指标。在信道建模与信号处理方面，结合复杂动态环境的实测数据，构建基于几何统计、确定性及混合模型的差异化信道模型，解决无源 RIS 信道状态信息获取难题；设计近场码本与低开销波束训练方案，优化波束管理、信道估计及反馈机制，提升多场景下的信号调控精度与效率。针对不同频段特性，中低频段重点解决大面板尺寸引发的近场效应，高频段则聚焦路损严重、分子吸收、色散效应等挑战，开发频段适配的器件设计与算法补偿技术。在部署与组网设计中，探讨集中式与分布式部署模式的成本效益、信令开销及干扰协调策略，结合用户分布、传播条件及频谱共存需求优化 RIS 位置与网络拓扑，解决多运营商同频/邻频干扰及实时控制难题。此外，构建 RIS 技术指标与评价体系，开发系统级仿真与验证平台，研究功耗优化、偏差校准、工程维护及动态管控机制，为 3GPP 标准化研究提供

实测数据与技术支撑，推动 RIS 从理论验证向应用迈进，助力新一代通信网络实现高效覆盖、容量提升与能耗优化。

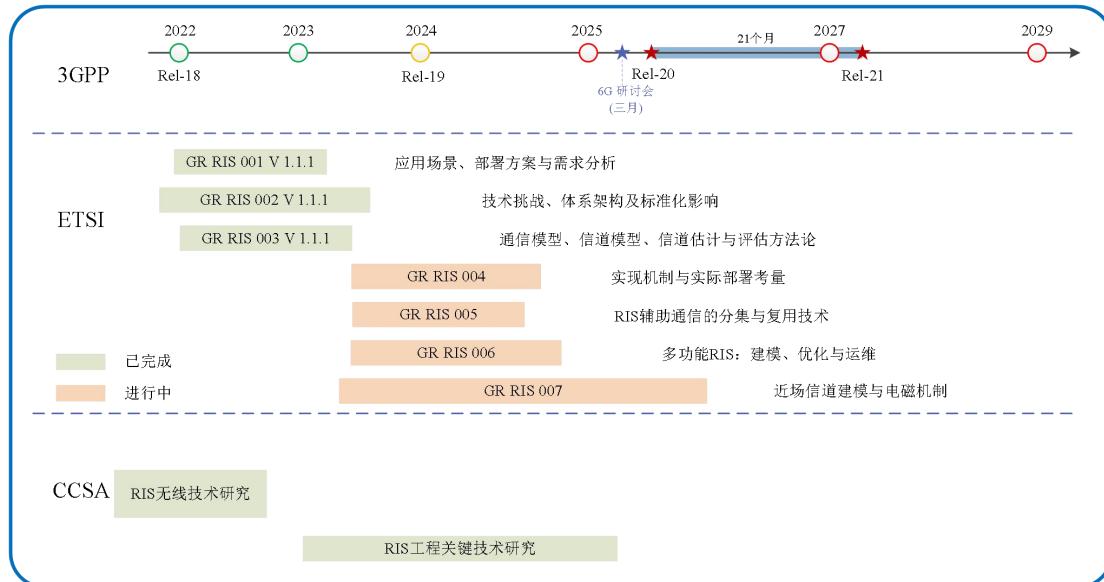


图 30 标准化组织中 RIS 研究的时间线

国际电信联盟 (ITU, International Telecommunication Union) 的无线电通信部门 (ITU-R) 内，设有专门的国际移动通信 (IMT, International Mobile Telecommunications) 工作组，该组在全球 6G 愿景的顶层设计与国际标准协调中发挥着关键作用。在具体研究项目与工作进展方面，ITU-R 相关研究可追溯至 2021 年 2 月发布的《IMT 未来技术趋势》报告，该报告将“可控无线电环境”列为未来发展的潜在驱动因素之一。随后，ITU-R 在 2023 年发布了《IMT 面向 2030 及未来发展的框架和总体目标建议书》，在这一框架中，RIS 被视作实现相关愿景的潜在使能技术之一，其通过动态调控无线传播环境以提升网络覆盖、系统容量与能效的特性，也逐步受到产业界的关注。

目前，ITU-R 关于 RIS 的研究正逐步从愿景阶段转向应用探索，后续工作预计将更多聚焦于 RIS 信道建模、实时控制机制、恶劣天气适应性等工程实践问题，旨在为后续相关工作提供顶层参考。

(一) 潜在 RIS 类型

从对基站 (BS, Base Station) 与用户设备 (UE, User Equipment) 的潜在标准化影响角度来看，RIS 一般可分为三类，分别为 FT-RIS (全透明 RIS, Fully Transparent RIS)、HT-RIS (半透明 RIS, Half Transparent RIS) 和 NT-RIS (非透明 RIS, Non-Transparent RIS) [31]。从用户的角度看，FT-RIS 与 HT-RIS 均对 UE 透明，而 NT-RIS 则对 UE 非透明。需要特别说明的是，此处的“透明”概念并非指物理材料的透光特性，而是从标准化维度定义，特指 RIS 无需在通信协议层面被基站或 UE 识别与交互即可完成其信号转发功能的这一特性。

对于 FT-RIS，由于基站与 UE 均无法感知其存在，因此无需进行额外的通信协议设计，这意味着它不会对现有标准规范产生影响。整个通信系统会将其视为环境的一部分，如墙体。

FT-RIS 的一项潜在应用是提升特定小区的覆盖性能，如图 31(a)所示。相较于中继器、转发器等类似技术，FT-RIS 的一个显著优势在于其完全无需能耗。然而，该技术也存在一些固有局限。首先，它通常需要针对特定目标场景进行定制化设计，这种产品形态可能限制其大规模应用。其次，在覆盖范围与波束增益之间存在难以兼顾的权衡问题。由于 FT-RIS 需将信号能量集中到一个更明确的方向上，以补偿路径损耗并提高接收信号功率，这必然导致其实际覆盖范围相对有限。若希望扩大覆盖范围，则需采用更大尺寸的 RIS 面板，而这又会削弱其部署灵活性。综上所述，鉴于 FT-RIS 对标准化体系没有影响，本技术报告将不将其作为重点讨论对象。

对于 HT-RIS，其架构在保持对 UE 透明的同时，引入了基站侧的控制能力。如图 2(b)所示，该配置通过基站调度实现分时协同传输。为实现此功能，HT-RIS 需包含以下核心功能组件：用于实时配置 RIS 单元的专用控制器，以及建立并维持基站-RIS 间控制链路的集成通信模块。其中，供电方案是工程实践面临的关键挑战之一。若采用有线供电，将严重制约部署灵活性——这本身构成一个悖论，因为既有的有线基础设施本可用于部署其他网络增强方案^[32]。近期实测数据显示，基于 PIN 二极管的 RIS 板，在 100 至 1000 个单元处于激活状态下的对应功耗范围为 5.8W 至 14.8W^[33]。这一功耗预算有望通过控制器的优化与超材料技术的进步而逐步降低。若能成功应用能量采集技术（例如太阳能或射频能量采集）来解决供电问题，将从根本上重塑 HT-RIS 的应用可行性。

NT-RIS 对基站与终端均“可见”，可视为 HT-RIS 的功能增强形态。从网络部署维度看，引入 NT-RIS 需定义新的接口与协议，以实现其与基站、终端及其他 RIS 等网络节点的互联。从功能实现维度来看，NT-RIS 至少具备以下增强能力（如图 2(c)所示）：其一是 RIS-UE 链路信道状态信息（CSI, Channel State Information）估计——NT-RIS 可主动向 UE 发送参考信号，通过获取 RIS-UE 链路的 CSI，辅助基站实现发射端预编码矩阵与 RIS 端波束赋形的联合优化；其二是基于 UE 触发的 RIS 激活——终端可激活附近的 RIS 以提升链路效率。然而，这些增强功能是以系统复杂度和硬件成本的提升为代价的。此外，设计 NT-RIS 与其他网络节点间的新接口，可能需要额外的过程与信令。由此，NT-RIS 在初始阶段的成本可承受性可能不足。

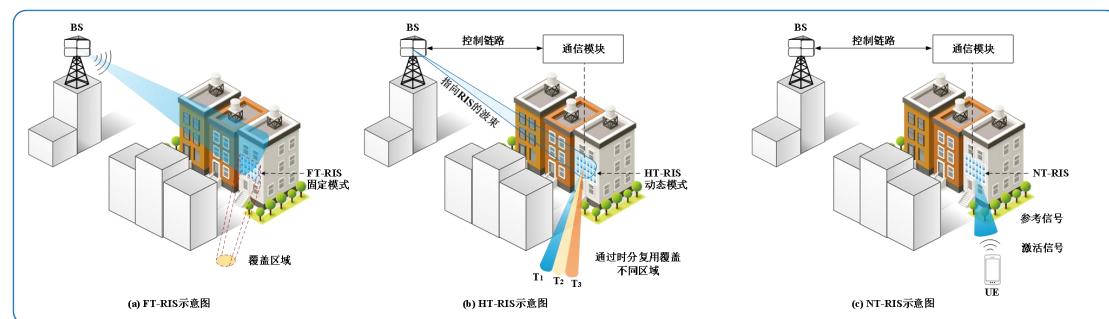


图 31 RIS 辅助无线通信的基本框架示意图^[31]

（二）标准化设计原则

为满足 ITU 的技术要求, 无线通信系统必须确保安全性、可控性、高效性及有效的干扰管理能力。本节提出若干总体设计原则以指导标准化工作。

(1) 安全原则

安全性是 RIS 系统标准化的基石, 这源于 RIS 具备与传统射频设备不同的网络交互特性。为确保仅合法可信的 RIS 设备可参与网络运行, 身份识别与授权^[34]成为不可或缺的环节。为此, 需构建专门针对 RIS 特定部署与运营模式的安全框架, 集成可靠的认证机制、接入控制方案及安全信令传输体系。

对于网络控制型 RIS, 其身份识别与授权流程可参考 3GPP Rel-18 为 NCR 建立的模型^[35]。具体流程包括: 网络初始化阶段基站广播 RIS 支持信息, RIS 执行随机接入流程, 在完成无线资源控制 (RRC, Radio Resource Control) 连接建立后, RIS 上报其身份标识与能力参数, 基站将此信息转发至具备 RIS 处理能力的接入与移动性管理功能 (AMF, Access and Mobility Management Function) 实体完成验证授权。获得授权后, RIS 即可参与网络协调的波束赋形与资源调度。

对于终端控制型 RIS, 需确保只有获授权的 UE 能够控制 RIS^[36]。实现方式包括: UE 主动请求 RIS 控制权, 或由网络根据预定义准则主动分配 RIS 控制权限给特定 UE。在两种方式下, RIS 配置均需通过安全性信令进行, 并且 RIS 必须验证控制实体的合法性后方可接受指令。

为降低安全风险, 每个 RIS 需具备唯一可验证的身份标识。所有控制信息(包括基站-RIS 与终端-RIS 链路) 均应采用完善的安全协议进行保护, 防止篡改、欺骗及未授权访问。此外, 系统需支持细粒度接入控制, 使网络能基于具体场景、使用范围及时间有效期等维度动态实施控制策略。

通过建立完善的身份识别与授权流程, 网络可实现对 RIS 部署的全面可视化管控, 有效防范未授权设备干扰无线通信, 为 RIS 辅助通信的可靠实施奠定基础。

(2) 可控性原则

总体而言, RIS 需在受控模式下运行, 其控制主体主要包括网络侧与终端侧两种类型。

在网络控制型模式下, RIS 的行为完全由网络侧主导。网络依据实时的调度状态、信道条件等多维因素动态决策, 并向 RIS 下发具体的波束指示, 明确其信号转发所采用的波束。在此架构下, RIS 仅需接收并执行来自网络的控制信令即可确定转发波束, 无需具备本地计算最优波束的能力, 从而显著降低了设备实现复杂度。

在终端控制型模式下, 控制权则转移至用户设备。网络可通过授权机制, 允许特定 UE 在其附近 RIS 的指定工作频段内进行配置。获得授权后, UE 能够根据自身实时的通信需求, 生成相应的控制信息并直接发送至 RIS, 从而实现更为灵活个性化的链路增强。

(3) 简化原则

从标准化设计与硬件设计两方面推进 RIS 的简化, 将有利于该技术的后续应用。

在标准化设计层面, 应注重控制标准化工作的复杂度以促进进程, 优先考虑对现有技术成果的复用。例如, 可基于 ISAC 中感知信道模型与 RIS 级联信道在结构上的相似性, 为 RIS 信道建模提供参考。在某些应用场景中, 当 RIS 仅实现基础波束转发功能时, 可将其视

为一类中继设备（如 NCR），此类情况的标准化工作可直接参照 NCR 现有规范。此外，在标准化初期，建议以构建统一的 RIS 控制框架为目标，使该框架能够前瞻性地兼容不同的 RIS 权重配置、多种类型、单/多节点部署模式及配置周期等变量。

在硬件设计层面，简化 RIS 结构同样有助于标准化推进。实际部署中，RIS 并非始终需要开启全部功能，因此适当降低功能配置（即采用“精简能力”的 RIS）往往能在保持相当性能的前提下提升能效。例如，若 RIS 仅需增强局部区域覆盖，则无需具备全域覆盖能力。综上，在覆盖需求相对明确或性能要求适中的场景下，采用低比特量化等简化设计的 RIS 硬件即可满足系统要求。

(4) 分步原则

RIS 的标准化工作宜采用分阶段推进的策略，以确保其系统性发展。

在初始阶段，工作重心应放在三个关键领域：界定 RIS 的核心功能范畴、制定关键性能指标体系、完成基础技术验证。该阶段的目标场景可优先考虑室内覆盖增强与室外热点区域。

待这些基础要素成熟后，后续标准化工作应着力制定动态控制协议、实现多 RIS 协同机制，并建立与特定场景适配的性能评估方法。这些技术进展将推动 RIS 在超密集网络、高速移动环境及低空覆盖等场景中的实际应用。

在更成熟的阶段，可逐步引入 AI 驱动的控制接口及能效优化等增强功能。这种循序渐进的推进方式既能确保标准化工作的全面性，又能在各部署时间节点保持技术可行性与市场适用性。

(5) 一致性原则

将 RIS 引入现有网络时，必须确保其与网络系统的协调一致性，其中工作带宽与时间粒度是需重点考虑的两个方面。

在工作带宽方面，RIS 的有效工作带宽应至少覆盖网络的工作带宽范围。与此同时，必须严格限制 RIS 对工作带宽以外电磁波的影响，确保将带外能量泄漏控制在最低水平，避免对其他运营商的授权频段造成干扰。

在时间粒度方面，RIS 需要与网络系统保持精确的时间对齐。无线通信系统采用多级时间粒度架构，包括帧级、子帧级、时隙级和符号级等，RIS 需根据自身能力支持相应层级的同步精度。为此，RIS 必须准确获取网络的帧结构信息，并建立与网络侧的高精度同步机制。

（三）潜在标准化工作

本节将围绕网络控制型与终端控制型两类 RIS 架构，系统探讨其潜在的标准化研究方向。

(1) 系统架构

截至目前，3GPP 已先后标准化了集成接入与回传（IAB, Integrated Access and Backhaul）、射频中继器（RF repeater）及 NCR 等多种中继相关技术。在这些技术中，RIS 的系统架构与 NCR 最为接近，其主要区别体现在两个方面：首先，在基站、RIS 与用户设备构成的链路

中, RIS 仅有一条转发链路, 而非 NCR 采用的双转发链路结构; 其次, 两者实现信号转发的核心实体存在本质差异——RIS 依赖近无源电子元件 (如 PIN 二极管) 实现波束调控, 而 NCR 则通过传统天线与射频组件构建转发波束。

本研究重点分析两种典型 RIS 架构: 网络控制型 RIS 与终端控制型 RIS。对于网络控制型 RIS, 其系统架构如图 32(a)所示, 包含两个核心功能实体: 负责通过控制链路实现 RIS 与基站间信令交互的通信实体, 以及负责通过转发链路在基站与终端间经由 RIS 转发上下行信号的转发实体。对于终端控制型 RIS, 如图 32(b)所示, 其功能实体组成与网络控制型基本一致, 核心区别在于控制机制——通过将 RIS 在逻辑上视为特殊基站或终端, 可基于不同接口协议建立控制链路。此类架构适用于如住宅、办公区、购物中心等场景的个性化传输增强。

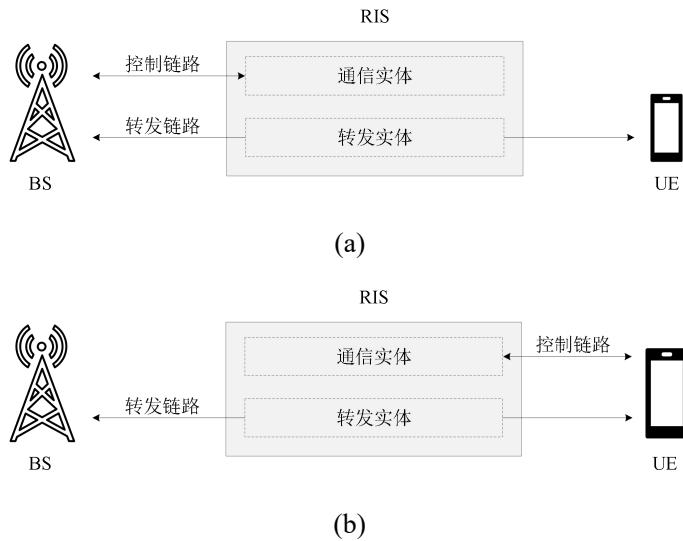


图 32 RIS 系统架构: (a)网络控制型 RIS; (b)终端控制型 RIS

需要强调的是, 当单小区内部署多个 RIS 时, 必须建立完善的协同机制, 以有效规避互干扰并保障系统性能。

(2) 控制信息

控制信息设计是 RIS 标准化的核心环节, 决定了系统功能实现与性能潜力。考虑到 RIS 可能由数百至数千个单元组成, 若由基站对每个单元进行独立控制将产生巨大的信令开销, 这在工程实践中难以实现。为此, 可行的替代方案是采用波束级的控制机制, 即对 RIS 的整体转发波束进行调控。

对于网络控制型与终端控制型 RIS, 均可通过波束索引来指示期望的 RIS 波束。该指示方式可根据实际调度需求, 采用动态、半静态或周期性的配置模式。波束索引的设计可融入传输配置指示 (TCI, Transmission Configuration Indicator) 的现有框架, 并通过简单的波束扫描流程来确定最优波束^[37]。

在基础控制功能之外, 还可引入增强型控制信息: 包括用于控制 RIS 是否进入节能模式的开关指令, 以及指示具体上下行时隙与符号的 TDD 配置信息。针对上述增强型控制机制, 为进一步平衡成本、功耗与性能的关系, 可考虑采用混合架构——部分波束向量固定而部分可配置。在此类架构下, 则需要配套设计多级波束指示机制。

(3) 参考信号

当 NCR 融入 5G 无线网络以扩展蜂窝覆盖时，其设计目标是对 UE 保持透明。系统采用波束训练流程，候选波束集通过操作、管理与维护（OAM, Operation, Administration and Maintenance）进行配置，且不影响参考信号（RS, Reference Signal）的既有设计。考虑到 RIS 单元矩阵规模庞大，波束训练过程将涉及大量候选波束，从而需要扩展参考信号的端口与资源。为降低 6G 协议设计中的 RS 开销与时间成本，可考虑采用支持分层式 RIS 波束集的多步波束训练方案^[38]。

在 6G 网络中，RIS 的应用将超越覆盖增强范畴，进一步扩展至多用户相干传输与辅助感知等场景，这些应用要求对 RIS 波束进行更精细的操控。因此，需要在信道测量期间有效区分 RIS 级联信道与普通散射路径，并获取更为丰富的信道信息，例如频域特性以及 RIS 侧的到达角（AoA, Angle of Arrival）与离开角（AoD, Angle of Departure）。受文献[39]提出的时空调制技术启发，可在每个 CSI-RS 符号/资源上叠加额外的相位信息，例如时域正交覆盖码（OCC, Orthogonal Cover Code），进而借助 OCC 解压缩处理来估计 RIS 级联信道的 CSI。此外，可将不同的 OCC 码字配置至不同的 RIS 子阵列，通过分析子阵列间的相位变化，最终确定 RIS 侧的 AoA 与 AoD 参数。

(4) 波束管理

RIS 的引入使得基站到终端的等效链路被分解为基站-RIS 和 RIS-终端两段子链路。任一链路上的波束失败都将导致整条链路中断，这使得 RIS 系统的波束失败恢复更具挑战性。由于 RIS 不具备信号处理能力，无法检测并上报其所在链路的波束失败事件，终端仅能感知并上报整条等效链路的波束失败。然而，终端无法判断具体是哪一段子链路出现连接失败，因而需要对两条子链路的所有新波束或波束组合进行检测，导致测量工作量显著增加。在终端能力受限时，不仅新波束的检测概率会大幅降低，所发现新波束的质量也往往难以保证。因此，必须增强面向 RIS 系统的级联波束失败恢复机制。

一种可行的解决方案是赋予 RIS 简易的信号发送功能，使其能够向终端发送特定的 RIS 波束测量信号。通过终端对 RIS 波束质量的测量反馈，网络可以辅助判断波束失败发生的具体区段，从而降低恢复时延与复杂度，实现快速波束切换，并有效应对高频通信中的波束阻塞问题。

本章从标准化视角剖析了全透明 RIS（FT-RIS）、半透明 RIS（HT-RIS）与非透明 RIS（NT-RIS）三类潜在形态，阐释了它们对基站与终端的不同影响机制及适用场景。在此基础上，提出了指导 RIS 标准化设计的五大总体原则，包括确保可信设备接入与安全信令传输的安全原则、保障 RIS 受控运行的可控性原则、推动现有标准复用与硬件设计简化的简化原则、分阶段实施技术验证与场景拓展的分步原则，以及实现工作带宽和时间粒度与现有系统协同的一致性原则。最后，系统性地探讨了四个关键标准化方向：涵盖网络控制与终端控制双模式的系统架构设计、控制信息与信令机制、参考信号方案，以及应对级联链路失效的增强波束管理技术。

六、RIS 测试及外场验证

面向 5G/5G -A 网络现状和 6G 网络演进趋势，近年来，界内不断推进智能超表面技术从理论模型向工程化应用研究，产业研用联合开展了大量智能超表面技术原型验证工作，积累了丰富而宝贵的数据和经验。

（一）室内覆盖增强

1. 体育场馆场景

（1）测试环境

杭州亚运会自行车场馆，占地面积 2500 平方米，场地大小约为长 85 米，宽 32 米。场馆内部署 AAU，受障碍物遮挡存在覆盖盲区。通过在看台区域部署 RIS，AAU 与 RIS 之间的距离为 14m，RIS 到体育场中心区域近点的角度为-7°，距离为 40m~45m 之间，RIS 全面的覆盖整个中心区域如图 33 所示。

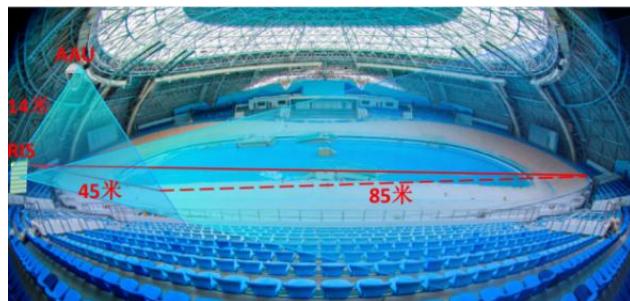


图 33 自行车场馆内测试环境

（2）测试数据分析

测试终端从距离 RIS 较近到较远的多个位置进行拉远测试，选取覆盖中心区域的横向和纵向最大移动范围的 6 个点进行 RSRP，SINR 和吞吐量等指标对比测试，如表 4 所示。

表 4 室内场馆覆盖增强测试数据

| Beam ID | 有 RIS | | | | 无 RIS | | | | 有无 RIS 对比 | | | |
|---------|---------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| | SS-RS RP(dBm) | SS-SINR (dB) | DL-Tput (Mbps) | UL-Tput (Mbps) | SS-RS RP (dBm) | SS-SINR (dB) | DL-Tput (Mbps) | UL-Tput (Mbps) | SS-RS RP 提升(dB) | SS-SINR 提升(dB) | DL-Tput 提升(%) | UL-Tput 提升(%) |
| 2050 | -65.86 | 27.95 | 3138.38 | 536 | -75.21 | 18.19 | 1362.56 | 398.92 | 9.35 | 9.76 | 130.33 | 34.56 |
| 2066 | -69.07 | 27.46 | 2896.05 | 535.76 | -80.32 | 19.69 | 1418.42 | 377.57 | 11.25 | 7.77 | 104.17 | 41.90 |
| 2071 | -73.01 | 24.81 | 2528.21 | 534.46 | -91.54 | 9.01 | 373.08 | 197.79 | 18.53 | 15.8 | 577.66 | 170.22 |
| 2072 | -72.11 | 22.94 | 2028.48 | 536.72 | -87.998 | 6.83 | 354.76 | 167.83 | 15.87 | 16.11 | 471.79 | 219.80 |
| 2075 | -72.43 | 24.6 | 3165.02 | 536 | -92.02 | 8.25 | 273.79 | 230.79 | 19.59 | 16.35 | 1052.72 | 132.67 |
| 2078 | -72.41 | 22.43 | 2118.03 | 534.43 | -95.12 | 6.78 | 222.55 | 121.22 | 22.71 | 15.65 | 851.71 | 340.88 |

部署 RIS 时，RIS 下的各波束间切换顺畅，基站到 RIS 下切换也顺畅，RIS 波束可以及时准确跟随用户，信号强度保持稳定。六个点位的 RSRP，SINR，上下行吞吐量均有大幅度提升，在远点 RSRP 最多能够提升 22dB，近点也有将近 10 dB 增益。在波束 ID2075 点位处，用户上下行速率分别提升约 130% 与 1050%，可以说明自行车赛场内部署动态 RIS 后无线网络覆盖用户速率得到了显著提升。

2. 办公楼场景

(1) 室内覆盖测试环境

办公楼场景测试分别针对办公区、教学区和实验区搭建测试环境, 如图 34 所示。泰国 Advanced Info Services (AIS) 办公区已部署毫米波测试基站, 由于墙体、工位隔断、办公家具等障碍物遮挡, 办公区内存在室分基站覆盖盲区^[40]。东南大学九龙湖校区教三教学楼已部署 Sub6GHz NR 商用基站, 但是由于天井、承重墙、走廊等结构设计, 教学区部分教室和走廊存在大量盲区^[40]。西安电子科技大学实验区部署 5.8GHz WiFi 网络和 RIS, 实验区内部通过隔断分隔成多个实验室, 墙体、隔断及大型实验仪器等障碍物导致实验区内存在较多盲区。

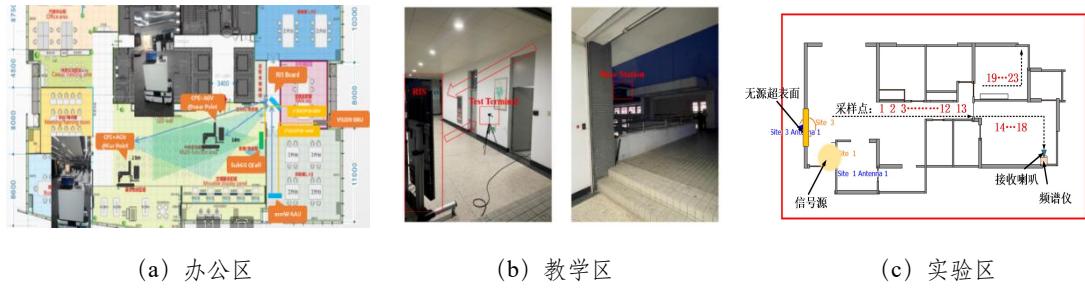


图 34 办公楼测试环境

(2) 室内覆盖测试数据分析

泰国 AIS 办公区分别开展定点测试和移动拉远测试, 测试结果如表 5 示。部署 RIS 时, 终端在基站和 RIS 下各波束之间切换顺畅, RIS 波束可以及时准确跟随用户, 信号强度保持稳定。无论是定点测试还是动态拉远测试, 毫米波网络中, 部署 RIS 后, RSRP 和 SINR 可提升约 20dB, 小区边缘吞吐量可提升 121%~280%; Sub6G 网络中, 部署 RIS 后, RSRP 可提升约 6dB。

表 5 办公楼测试数据对比

| RIS-UE 定点距离 | 有 RIS | | | 无 RIS | | | 有无 RIS 对比 | | |
|------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| | SS-RSRP (dBm) | DL-Tput (Mbps) | UL-Tput (Mbps) | SS-RSRP (dBm) | DL-Tput (Mbps) | UL-Tput (Mbps) | SS-RSRP 提升(dB) | DL-Tput 提升(%) | UL-Tput 提升(%) |
| 办公区毫米波频段 14 米 | -68 | 1550 | 266 | -90 | 700 | 80 | 22 | 121% | 232.5% |
| 办公区毫米波频段 23 米 | -71 | 1500 | 266 | -92 | 400 | 70 | 21 | 275% | 280% |
| 动态拉远 | SS-RSRP (dBm) | DL-Tput (Mbps) | SINR (dB) | SS-RSRP (dBm) | DL-Tput (Mbps) | SINR (dB) | SS-RSRP 提升(dB) | DL-Tput 提升(%) | SINR 提升(dB) |
| | -63.8 | 1576.5 | 27.8 | -87.5 | 418.9 | 11.7 | 23.7 | 276% | 16.1 |
| 教学区 Sub6G 频段 | -74.07 | / | / | -80.23 | / | / | 6.16 | / | / |
| 居民住宅 5.8G 采样点 2 | -44.56 | / | / | -51.37 | / | / | 6.81 | / | / |
| 居民住宅 5.8G 采样点 12 | -47.27 | / | / | -65.31 | / | / | 18.04 | / | / |
| 居民住宅 5.8G 采样点 16 | -63.33 | / | / | -79.29 | / | / | 15.96 | / | / |
| 居民住宅 5.8G 采样点 22 | -79.27 | / | / | -90.07 | / | / | 10.8 | / | / |

(3) O2I 覆盖测试环境

针对室内覆盖增强的 O2I 覆盖测试环境如图 35 所示。5G 商用基站工作频率为 2.6 GHz 的, 基站与用户之间的直接路径受到墙体严重阻挡, 使得用户位于信号弱覆盖区域。在基站与用户之间部署 RIS, 使基站至 RIS、RIS 至用户都存在不受阻挡的直接路径。所使用 RIS 工作频段为 2.6 GHz, 调控方式为 1 比特调相。RIS 控制器与用户终端之间存在一条无线数

据反馈链路以根据信号参数动态调整 RIS 编码配置。RIS 基于带有角度信息的预设码本进行波束扫描，估计入射至智能超表面信号的到达角以及强度，然后利用低复杂度启发式多波束相位叠加方法，将从不同方向上入射的多个波束，汇聚反射至目标方向上，进一步提升目标区域的信号质量^[41]。

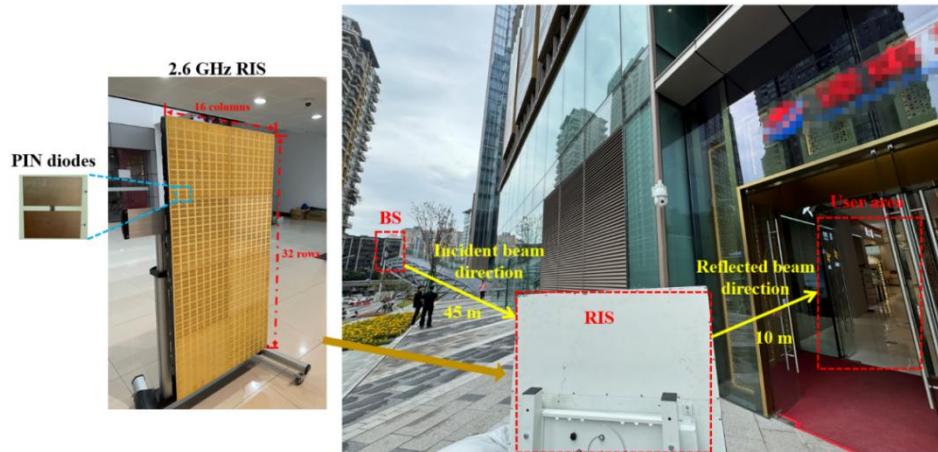


图 35 O2I 覆盖测试环境

(4) O2I 覆盖测试数据

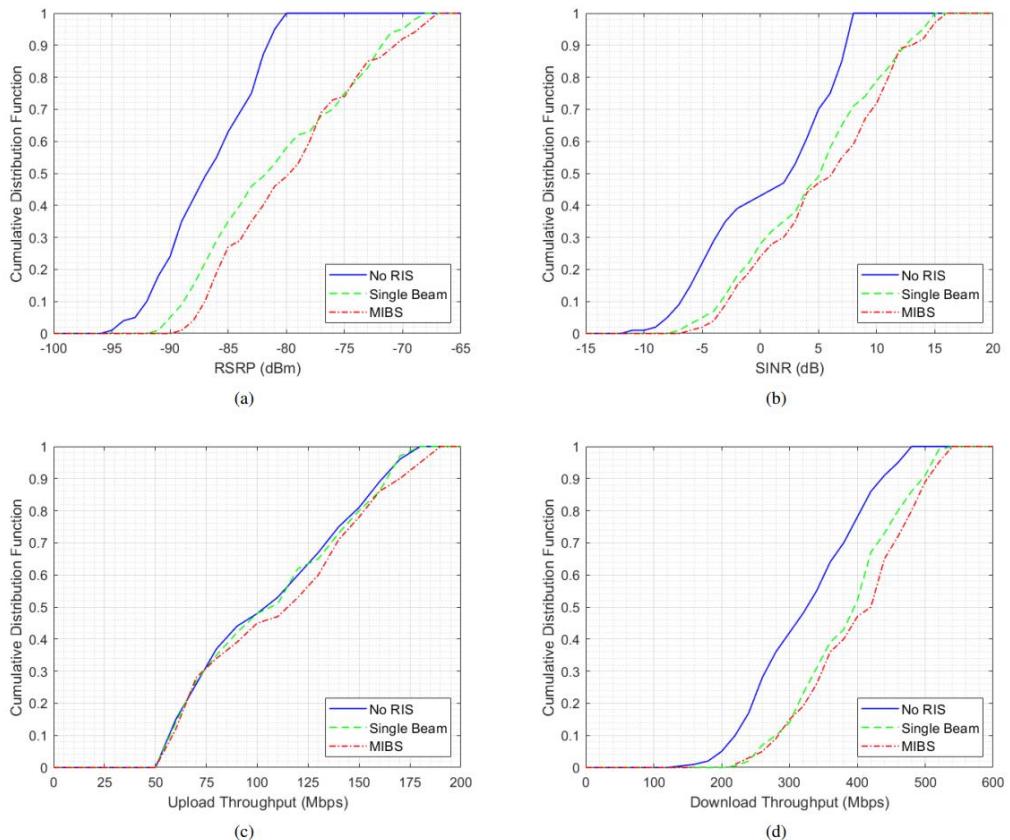


图 36 O2I 覆盖测试数据累计分布曲线图

O2I 覆盖测试在用户区域设置 9 个测试点，针对未部署 RIS、部署单波束相移 RIS 和多

波束相移 RIS 三种场景分别测量参考信号接收功率 (RSRP)、信干噪比 (SINR) 以及上下行吞吐率等数据。测量数据的累计分布曲线如图 36 所示，在四项关键信号参数上，所提出算法所带来的提升都大于单波束方案，平均 RSRP 增益为 6.76 dB，SINR 增益为 4.9 dB，下行吞吐率提升幅度为 31.7%。实测结果表明，在 5G 现网环境中部署智能超表面并使用所提出算法进行相移设计，相比于单波束方案能够进一步提升信号覆盖强度与质量，优化各项参数，实现低复杂度优化。

(二) 室外覆盖增强

1. 城区场景

1.1. 毫米波频段

(1) 测试环境

土耳其部分小区存在建筑物、绿植等障碍物遮挡严重等问题，导致毫米波小区边缘大量区域与基站之间无法满足视距传播条件，如图 37 绿色区域所示。通过部署 RIS，使基站和小区边缘区域都能与 RIS 保持视距传播，通过 RIS 调整信号传播方向和强度，增强边缘区域信号，提升用户数据传输速率，保障通信质量。



图 37 土耳其室外单 RIS 覆盖增强测试环境

(2) 测试数据分析

土耳其室外 RIS 覆盖增强测试结果如表 6 和图 38 所示。终端动态拉远测试，在基站和 RIS 下各波束之间切换顺畅，平均 RSRP 提升约 12-16dB，物理层吞吐量平均提升约 500%~1800%。基于基站和 RIS 间动态协同，RIS 波束可以及时准确跟随用户，信号强度保持稳定，显著提高基站 NLOS 区域的覆盖质量。

表 6 土耳其室外单 RIS 覆盖增强测试数据对比

| 拉远距离 | 有 RIS | | 无 RIS | | 有无 RIS 对比 | |
|-----------|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| | SS-RSRP (dBm) | DL-Tput (Mbps) | SS-RSRP (dBm) | DL-Tput (Mbps) | SS-RSRP 提升(dB) | DL-Tput 提升(%) |
| 0-120 米 | -74.15 | 1403.23 | -86.92 | 233.66 | 12.77 | 500 |
| 120-240 米 | -79.07 | 1095.9 | -95.97 | 55.96 | 16.9 | 1858 |

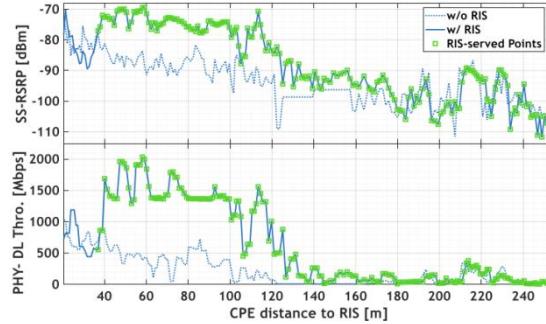


图 38 土耳其室外单 RIS 覆盖增强测试数据统计图

1.2. 厘米波频段

(1) 测试环境

图 39 是 10GHz 频段的超大规模混合 RIS 的拉远覆盖增强测试环境。测试地址位于合庆里商业步行街，街道长度总长为 320m；超大规模混合 RIS 所包含的单元数为 16800，阵列尺寸为 $3.44m \times 1m$ ，放置在街道入口处；BS 与 RIS 的距离为 6m，并以 20° 波束入射到 RIS 表面。



图 39 10GHz 频段的超大规模混合 RIS 的拉远覆盖增强测试环境

(2) 测试数据分析

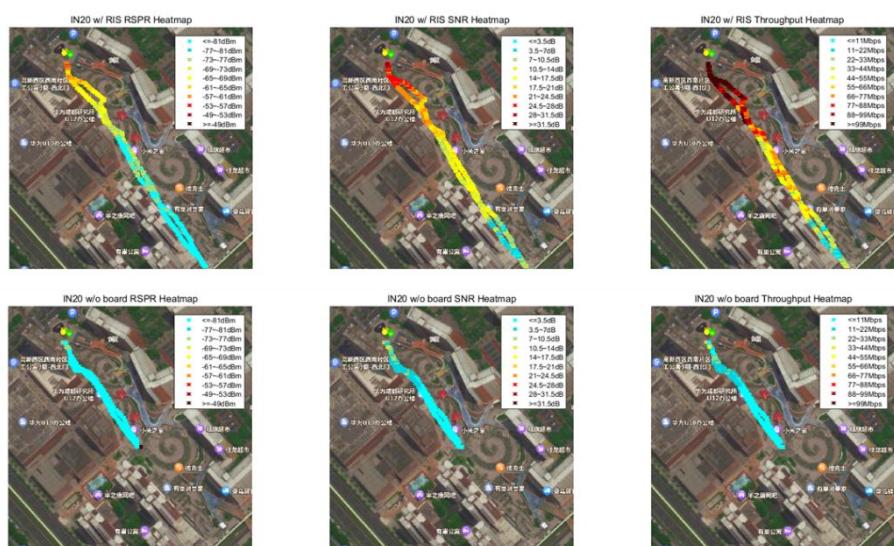


图 40 10GHz 频段的超大规模混合 RIS 的拉远覆盖增强测试结果

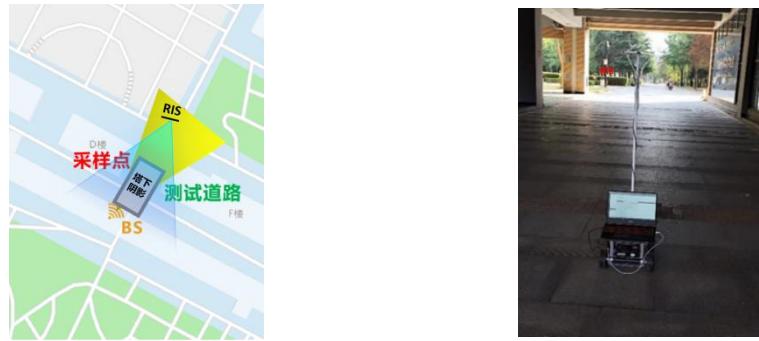
10GHz 频段的超大规模混合 RIS 的拉远覆盖增强测试如图 40 所示。终端沿商业街径向

拉远；与无 RIS 相比，平均 RSRP 提升约 15dB，终端可接入距离可以从 220m 扩展到 320m 以上。因此，RIS 可以有效提升基站的覆盖距离。

2. 塔下阴影场景

(1) 测试环境

由于受到基站天线下倾角和辐射方向的限制，在基站下方往往存在弱覆盖区域，即塔下阴影。针对塔下阴影场景的测试如图 41 所示。基站位于 5 楼的楼顶，高度约为 24m，楼底有一条行人的通道，通道长度约为 18m。RIS 部署在十字路口，基站与 RIS 中心之间的方位角为 45°，俯仰角为 20°，塔下阴影区距离 RIS 约 35 米~55 米。



(a) 塔下阴影测试二维部署图

(b) 塔下阴影测试 RIS 与接收端

图 41 塔下阴影测试场景

(2) 测试数据分析

塔下阴影测试结果如图 42 所示。测试终端从非塔下阴影区域动态拉远到塔下阴影区域，可以在基站和 RIS 下各波束之间切换顺畅。在非塔下阴影区域，RIS 对测试终端接收信号质量影响较小。在塔下阴影区域（距离 RIS35 米~55 米），RSRP 提升约 5-10dB。基于基站和 RIS 间动态协同，RIS 波束可以及时准确跟随用户，信号强度保持稳定，显著提高基站在塔下阴影区域 NLOS 区域的覆盖质量。

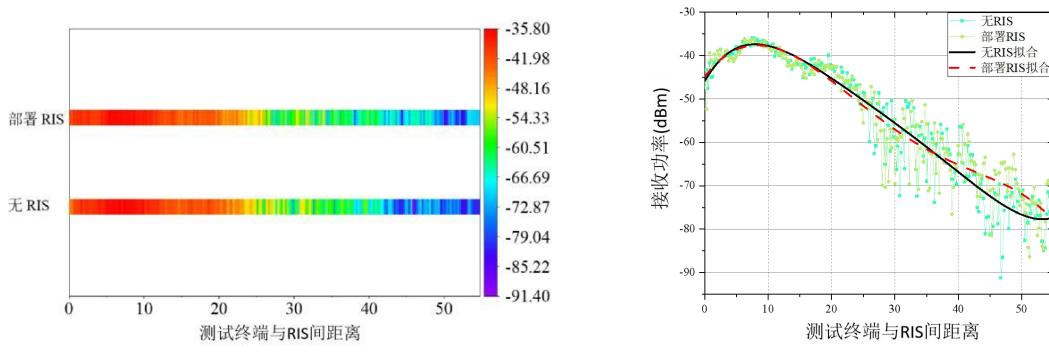


图 42 塔下阴影场景测试结果

3. 隧道桥梁场景

(1) 隧道场景测试环境

现网隧道场景中，由于隧道距离跨度大，纵深长，隧道内高密闭性的特点，网络覆盖通

常存在隧道口信号快衰，隧道内存在连片覆盖盲区等问题。本次隧道场景测试环境如图 43 所示，隧道口已部署 Sub6G 的 5G 基站，新增部署 RIS 设备 1 台，RIS 水平入射角为 14° ，垂直入射角为 26° ，水平出射角为 1° ，基站信号在 RIS 阵面处的 RSRP 为 -50dbm 。

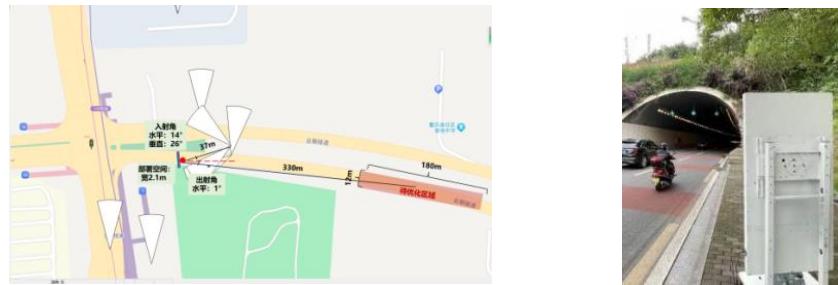


图 43 隧道场景测试环境

（2）隧道场景测试数据分析

隧道场景测试结果如表 7 所示。由于隧道内未部署 5G 基站，通过在隧道口部署 RIS，将隧道外宏站 5G 信号反射到隧道内弱覆盖区域，接收端 RSRP 提升 3.36dB ，SINR 提升 2.31dB ，上行速率增益 22.64Mbps ，下行速率增益 50.68Mbps 。此外，通过后台指标分析，RIS 板部署不会对现网基础性能指标造成影响，小区干扰指标无明显变化。

表 7 隧道场景测试数据

| | SS-RSRP (dBm) | SS-SINR (dB) | 用户 DL-Tput (Mbps) | 用户 UL-Tput (Mbps) | 平均干扰 (dbm) |
|-------|------------------|-----------------|----------------------|----------------------|---------------|
| 无 RIS | -82.06 | 15.92 | 617.34 | 69.32 | -110.25 |
| 有 RIS | -78.7 | 18.23 | 667.82 | 91.96 | -110.87 |
| 对比 | 3.36 | 2.31 | 50.48 | 22.64 | -0.62 |

（3）桥梁场景测试环境

现网桥梁场景中，由于桥梁跨度较大，桥梁结构遮挡，桥梁中心区域覆盖差信号杂乱，且存在难立杆、难接电等问题，导致桥梁中间路段通常存在弱覆盖区域。江北朝天门大桥测试环境如图 44 桥梁场景测试环境所示，桥头已部署 5G 杆站，RIS 位水平入射角和出射角均为 75° ，垂直入射角为 5° ，基站信号在 RIS 阵面处的 RSRP 为 -55dbm 。



图 44 桥梁场景测试环境

（4）桥梁场景测试数据分析

桥梁场景测试结果如表 8 所示。部署 RIS 后，测试终端接收信号 RSRP 提升 3.96dB ，SINR 提升 3.04dB ，上行速率增益 10.26Mbps ，下行速率增益 63.54Mbps 。此外，通过后台指标分析，RIS 板部署不会对现网基础性能指标造成影响，小区干扰指标无明显变化。

表 8 桥梁场景测试数据

| | SS-RSRP (dBm) | SS-SINR (dB) | 用户 DL-Tput (Mbps) | 用户 UL-Tput (Mbps) | 平均干扰 (dbm) |
|-------|---------------|--------------|-------------------|-------------------|------------|
| 无 RIS | -90.35 | 2.65 | 287.28 | 32.92 | -111.47 |
| 有 RIS | -86.39 | 5.69 | 350.82 | 43.18 | -111.65 |
| 对比 | 3.96 | 3.04 | 63.54 | 10.26 | -0.18 |

(三) 室外分布式多 RIS 测试

1. 空旷场景用户移动性测试

(1) 测试环境

用户在空旷场景分布式多 RIS 辅助网络下的移动性测试环境如图 45 所示。楼顶部署 AAU，覆盖区域 1，区域 2 和区域 3 是 AAU 的覆盖盲区。分别在区域 2 和区域 3 部署受网络侧控制的 RIS1 和 RIS2，实现分布式协同覆盖增强^{[16][17]}。在用户移动性测试场景中，测试终端在 AAU、RIS1 和 RIS2 联合覆盖的区域 1、区域 2 和区域 3 之间往返移动。

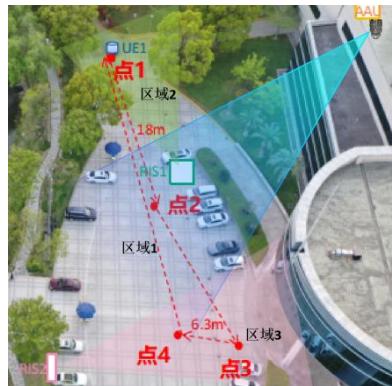


图 45 室外空旷场景分布式多 RIS 单用户移动性测试环境

(2) 测试数据分析

测试终端在区域 1、区域 2 和区域 3 之间的切换性能，并选取分布区域 1、区域 2 和区域 3 的四个定点测试接收信号质量，其中点 4 位于 AAU 和 RIS2 重叠覆盖区，测试结果如图 46 和表 9 所示。未部署 RIS 时，终端 1 在 AAU 视距覆盖的区域 1 内接收信号 RSRP 约-65 dBm，上性和下行吞吐量约 500 Mbps 和 2800 Mbps；在 AAU 非视距覆盖的区域 2 和区域 3 内，终端接收信号 RSRP 约-80dBm ~ -90 dBm，上性和下行吞吐量约 100 Mbps 和 500 Mbps。部署 RIS1 和 RIS2 之后，测试终端在 AAU、RIS1 和 RIS2 之间实现微秒级波束切换，在 RIS1 覆盖的区域 2 内和 RIS2 覆盖的区域 3 内，接收信号 RSRP 提升至-70dBm ~ -75 dBm，上性和下行吞吐量提升至 500 Mbps 和 2800 Mbps。在测试过程中，由于测试终端转向背对 AAU 或 RIS 波束方向，瞬间出现 RSRP 和吞吐量下降的情况。

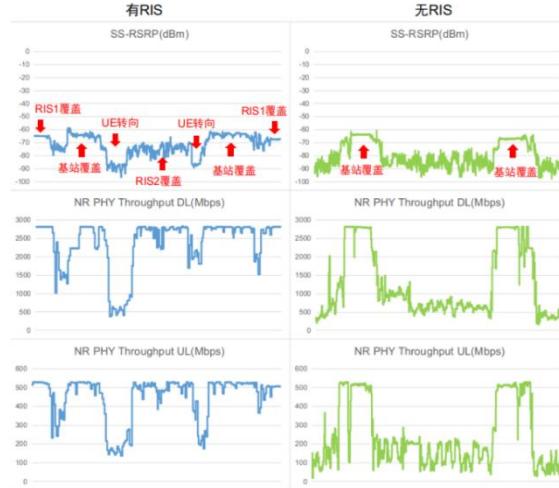


图 46 室外空旷场景分布式多 RIS 用户移动性测试记录

表 9 室外空旷场景分布式多 RIS 用户移动测试结果

| case1 | 分布式RIS设备 | | | | 无RIS | |
|------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
| | 接收功率 (RSRP/dBm) | 上行/下行吞吐率 (Mbps) | RIS#1 波束信息 | RIS#2 波束信息 | 接收功率 (RSRP/dBm) | 上行/下行吞吐率 (Mbps) |
| 时间/参考点1 的地理坐标 | -71 | DL 2766 | 34 | | -87 | DL 478 |
| | | UL 486 | | | | UL 135 |
| 时间/参考点2 的地理坐标 | -65 | DL 2800 | 61 | | -64 | DL 2792 |
| | | UL 511 | | | | UL 516 |
| 时间/参考点3 的地理坐标 | -74 | DL 2446 | 13 | -93 | DL 609 | DL 609 |
| | | UL 443 | | | | UL 59 |
| 时间/参考点4 的地理坐标 | -70 | DL 2595 | 19 | -67 | DL 2800 | DL 2800 |
| | | UL 480 | | | | UL 502 |

2. 连廊场景用户移动性测试

(1) 测试环境

用户在分布式多 RIS 辅助连廊场景下的移动性测试环境如图 47 所示。测试场景为典型的楼宇间的风雨连廊场景。RIS#1、RIS#2 的反射波束是动态可调的，RIS#3 的发射波束是固定的。BS 直接覆盖 S4 区域，RIS#1 的动态波束覆盖 S1 区域，RIS#1 的动态波束与 RIS#3 的静态波束相结合覆盖 S2 区域，RIS#2 的动态波束覆盖 S3 区域。UE 的移动路径为依次经过 S1、S2、S3、S4 的环形路径。



图 47 连廊场景分布式多 RIS 单用户移动性测试环境

(2) 测试数据分析

用户在连廊场景分布式多 RIS 辅助网络下的环形路线移动性测试结果如图 48 所示。在 BS-NLOS 区域, RSRP 平均值与无 RIS 场景相比可以提升 4.56dB~13.98dB(S1 区域:13.98dB, S2 区域: 7.21dB, S3 区域: 4.56dB), 下行吞吐平均值则是无 RIS 场景下的 1.22~4.95 倍 (S1 区域: 2.66 倍, S2 区域: 4.95 倍; S3 区域: 1.22 倍); 在 BS-LOS 区域, 分布式 RIS 不影响移动用户性能。因此, 分布式 RIS 采用频分导频方案, 在不增加波束扫描时间的情况下实现 BS 与多 RIS 的协同, 在 BS-NLOS 区域实现移动用户性能的提升; 同时相位可调+相位固定结合的两跳 RIS 可以低成本、低功耗地大幅度提升极弱覆盖区(或者覆盖盲区)的移动用户性能。

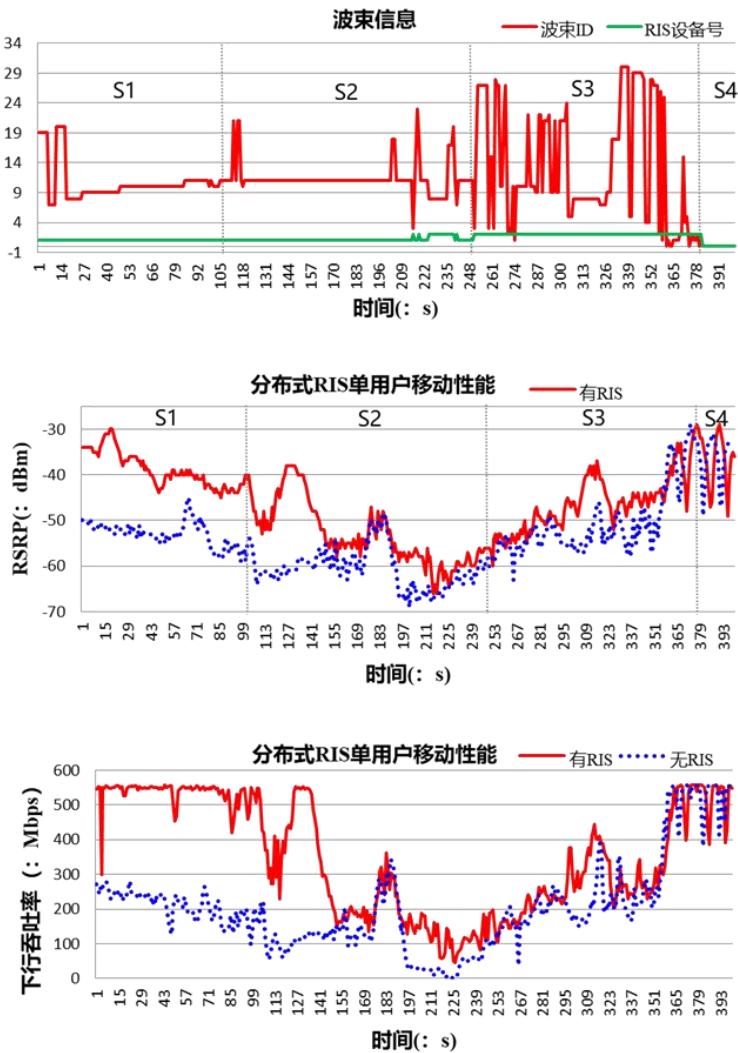


图 48 室外连廊场景分布式多 RIS 单用户移动性测试结果

(四) 室外多用户调度

(1) 测试环境

单用户在分布式多 RIS 辅助网络下的移动性测试环境如图 49 所示。楼顶部署 AAU, 区

域 1 为 AAU 视距覆盖，区域 2 是 AAU 的非视距覆盖盲区。在区域 2 部署受网络侧控制的 RIS，实现与基站间协同覆盖增强与多用户调度。

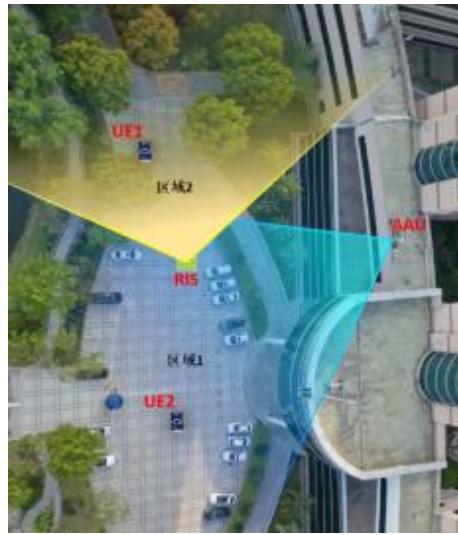


图 49 室外多用户调度场景

(2) 测试数据分析

测试终端 1 和测试终端 2 在 AAU、RIS 联合覆盖的区域 1 和区域 2 之间移动，并通过时分或空分模式接入 AAU 或 RIS 波束，测试结果如表 10 所示。单个测试终端接入 RIS 时，接收信号 RSRP 约-73 dBm，上性和下行峰值吞吐量约 266 Mbps 和 1700 Mbps；当两个测试终端以时分模式接入 RIS 或 AAU 时，RIS 覆盖区域测试终端接收信号 RSRP 约-73 dBm，上性和下行吞吐量约 125 Mbps 和 840 Mbps，AAU 覆盖区域测试终端接收信号 RSRP 约-58 dBm，上性和下行吞吐量约 130Mbps 和 850 Mbps，即两个测试终端在时域共享无线资源，上下行吞吐量与其占用的无线资源比例相当。当两个测试终端分别接入 RIS 和 AAU 并实现 MU-MIMO 配对成功时，两个测试终端均可以实现峰值吞吐量；当 RIS 关闭时，位于区域 2 的终端 RSRP 约-96 dBm，上性和下行峰值吞吐量约 17Mbps 和 40 Mbps。

表 10 室外多用户调度测试数据

| 模式 | 终端 | 锚点 | SS-RSRP (dBm) | DL-Tput (Mbps) | UL-Tput (Mbps) |
|-------|-----|-------------|---------------|----------------|----------------|
| 单用户 | UE1 | RIS | -73 | 1700 | 266 |
| | UE2 | RIS | -72 | 1700 | 266 |
| 时分多用户 | UE1 | RIS | -73 | 845 | 125 |
| | UE2 | RIS | -73 | 842 | 124 |
| | UE1 | RIS | -73 | 835 | 125 |
| | UE2 | AAU | -58 | 850 | 130 |
| 空分多用户 | UE1 | RIS | -73 | 1664 | 263 |
| | UE2 | AAU | -58 | 1702 | 264 |
| | UE1 | AAU(RIS 关闭) | -96 | 40.8 | 17.2 |
| | UE2 | AAU | -58 | 1364 | 193 |

(五) 邻频干扰性能

(1) 测试环境

RIS 对邻频用户影响的测试环境如图 50 所示。RIS 协同基站 BS#1 和邻频基站 BS#2 共址部署；BS#1 的中心频点为 10.25GHz，工作带宽为 400MHz；BS#2 的中心频点为 10.124GHz，工作带宽为 400MHz。BS#1 的波束、BS#2 的波束可通过 RIS 分别覆盖 UE1、UE2；UE1 和 UE2 同步移动。测试条件包括 BS#1、BS#2 同步以及 BS#1、BS#2 不同步。



图 50 RIS 对邻频用户影响的测试环境

(2) 测试数据分析

RIS 对邻频用户影响的测试结果如图 51 所示。由于 RIS 波束的覆盖增强作用，无论两基站是否同步，RIS 协同用户的性能（RSRP、下行吞吐率）和邻频用户的 RSRP 均得到提升；但是邻频用户的下行吞吐会受两基站同步情况的影响。当两基站同步时，在 RIS 波束覆盖范围内，邻频用户下行吞吐平均提升约 125Mbps；当两基站不同步时，邻频用户下行吞吐平均下降约 180Mbps。两基站不同步时邻频用户性能下降的原因在于 RIS 波束扫描使邻频数据信道为时变的，用有限密度的 DMRS 导频所估计的信道不准确，使得部分时隙译码异常。测试结果表明，未来在部署动态 RIS 时，需要充分考虑其对邻频用户的干扰。

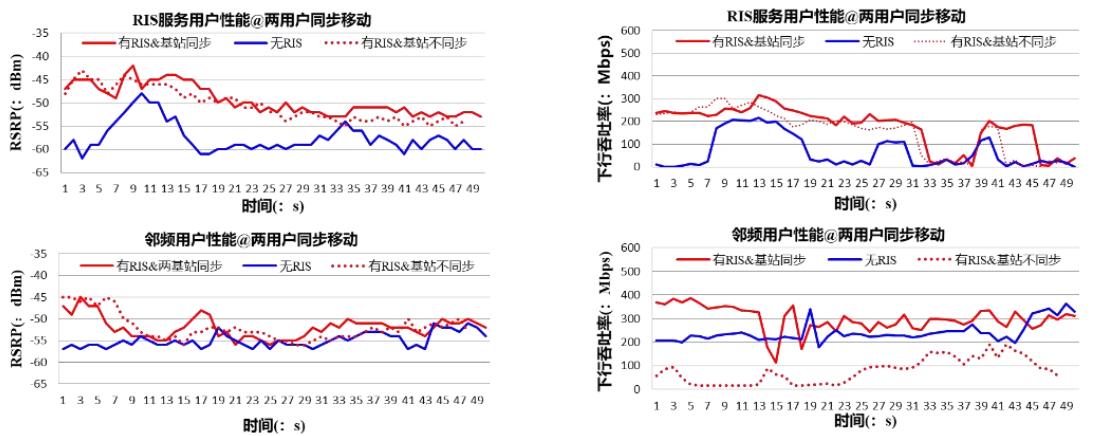


图 51 RIS 对邻频用户影响的测试结果

(六) 新型相控阵列多流天线

(1) 测试环境

新型相控阵列天线多流测试环境如图 52 所示。基于 RIS 架构的毫米波相控阵列天线由两块 RIS 阵列拼装集成，工作带宽为 200MHz，波束配置周期 20ms，帧结构配置为 DDDSU，S 配置 10:2:2，可同时配置两路模拟波束赋形。

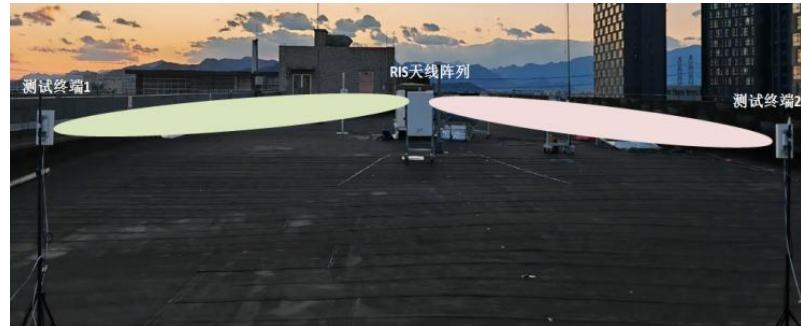


图 52 新型相控阵列天线多流测试环境

(2) 测试数据分析

新型相控阵列天线多流测试结果如表 11 所示，集成两块 RIS 阵列的新型相控阵天线可以同时同频服务两个用户数据传输，200MHz 带宽下，用户下行传输速率约 500Mbps。

表 11 新型相控阵列天线多流测试结果

| 终端 | SS-RSRP (dBm) | DL-Tput (Mbps) | 波束信息 |
|-----|------------------|-------------------|------|
| UE1 | -69.26 | 530.32 | 16 |
| UE2 | -70.19 | 519.64 | 0 |

七、结论

国际标准化组织 3GPP 于 2025 年 6 月正式启动 6G 标准化研究项目，标志着全球 6G 发展已从愿景规划阶段，迈入以关键技术突破、标准化制定与实践应用为核心目标的新阶段。本报告围绕 6G 关键技术——智能超表面（RIS），进行了系统而深入的研究，全面探讨了其技术特征、应用场景与发展路径。

RIS 凭借其可编程人工超材料的特性，通过构建智能可控的电磁波传播环境，在众多 6G 候选技术中展现出独特优势。报告详细阐述了 RIS 在典型部署场景中的技术价值，包括构建多层网络架构、提升网络能效、实现中高频连续覆盖、开发基于 RIS 的新型相控阵天线等。这些应用方向不仅体现了 RIS 对 6G 网络性能的强大支撑能力，也展示了其在扩展网络功能、创造新型服务方面的巨大潜力。

在关键技术研究方面，报告聚焦 RIS 从理论走向实践过程中的核心挑战，系统梳理了从单元级能效优化到系统级联合设计的最新进展。具体包括：基于实测功耗模型的能效编码方法突破了传统线性功耗假设的局限；复杂遮挡环境下多 RIS 系统的信道估计难题通过张量分解等低复杂度算法得到了有效解决；通过定制化正交信道与分布式部署优化实现多用户干扰抑制；面向去蜂窝大规模 MIMO 架构的联合优化策略有效应对了硬件损伤与电磁干扰挑战；创新圆柱形阵列等物理架构在保证性能的同时显著降低了优化复杂度。这些研究成果通过充分的仿真与实测验证，展现了 RIS 技术从实验室走向商用的工程可行性。

在信道建模领域，报告基于 3GPP Release 19 及后续演进方向，深入探讨了 RIS 信道建模的关键要素，包括级联信道特性、物理模型构建、模型简化方法、信道耦合机制、路损模型表征以及近场信道特性等。这些研究工作为 RIS 性能准确评估与方案优化奠定了坚实基础，为后续标准化工作提供了重要的技术依据。

针对标准化进程，报告系统分析了 RIS 标准化影响与发展前瞻，明确了潜在 RIS 类型划分，总结了标准化设计原则，并在系统架构、控制信令、参考信号及波束管理等关键领域提出了具体建议。这些分析为凝聚产业共识、加速 RIS 融入全球 6G 标准提供了清晰路径。

通过室内外覆盖增强、分布式多 RIS 测试、多用户调度、邻频干扰性能验证及新型相控阵列多流天线等系列外场测试，报告以充分的实测数据验证了 RIS 技术在改善网络覆盖、提升系统容量、增强传输可靠性等方面的工程价值，为 RIS 技术的产业化推广提供了有力支撑。

总之，本报告从典型部署场景、关键技术进展、信道建模、标准化路径及外场验证等多个维度，为 RIS 技术在 6G 中的发展提供了全面且深入的洞察。我们坚信，随着标准化工作的持续推进和工程技术的不断成熟，RIS 必将在 6G 时代发挥重要作用，为未来通信技术的发展注入新的动能，最终实现从关键技术突破到规模化商用的跨越式发展。

参考文献

- [1] ITU, Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond, Step. 2023.
- [2] 3GPP, RP-251809 New SID: Study on 6G Radio. 3GPP TSG RAN Meeting #108, Prague, Czech Republic, June 9-13, 2025.
- [3] CMCC, RP-252094 Requirements for 6G Network Topology, 3GPP TSG RAN Meeting #109, Beijing, China, September 15–18, 2025.
- [4] ZTE Corporation, Sanechips. RP-252021 General views on 6G deployment scenarios. 3GPP TSG RAN Meeting #109, Beijing, China, September 15-18, 2025.
- [5] Y. Zhao, et al. RIS-Enabled UAV Communications and Sensing: Opportunities, Challenges, and Key Technologies. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking. (Minor Revision)
- [6] ZTE Corporation, Sanechips. R1-2506831 Discussion on energy efficiency for 6GR. 3GPP TSG RAN WG1 #122bis, Prague, Czech, Oct 13th – 17th, 2025.
- [7] ZTE Corporation, Sanechips. R1-2505607 Discussion on energy efficiency for 6GR, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #122, Bengaluru, India, August 25th – 29th, 2025.
- [8] RISTA. RIS Technology White Paper [W], 2023.2. DOI:10.12142/RISTA.202302001.
- [9] J. Sang, J. Lan, et al., “Energy-efficient encoding for ris-assisted communication system under measurement-based power consumption: Method and field trials,” China Communications, 2025, vol. 22, no. 4, pp. 281-295.
- [10] H. Liu, Y. Lin, Y. Hu, X. Li, H. Xu and S. Jin, "Channel estimation, blockage processing and localization for multi-RIS assisted OFDM systems," IEEE Trans. Commun., early access, Oct. 2025.
- [11] W. Chen, C.-K. Wen, W. Tang, X. Li, and S. Jin, "Joint spatial division and multiplexing with customized orthogonal group channels in multi-RIS-assisted systems," IEEE Trans. Wireless Commun., early access, 2025.
- [12] Y. Lu, J. Zhang, J. Zheng, H. Xiao and B. Ai, "Performance Analysis of RIS-Assisted Communications With Hardware Impairments and Channel Aging," IEEE Trans. Commun., vol. 72, no. 6, pp. 3720-3735, Jun. 2024.
- [13] Teng W, Chen W, Zuo Y, et al. "Cylindrical RIS-Assisted Low-Complexity Transmission With Differentiated Visible Regions Exploiting Statistical CSI," IEEE Wireless Communications Letters, 2025,early access.
- [14] 3GPP, "Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz.," Technical Specification (TR) 38.901, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 03 2022. Version 17.0.0.
- [15] H. Gong, et al, "How to Extend 3-D GBSM to RIS Cascade Channel With Non-Ideal Phase Modulation?," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 13, no. 2, pp. 555-559, Feb. 2024.
- [16] J. Dou, et al. "On the channel modeling of intelligent controllable electro-magnetic-surface.", Chinese journal of radio science, 2021, 36(3): 368-377. (in Chinese)
- [17] W. Miao, J. Dou, et al., "Physical modeling of reconfigurable intelligent surface for channel modeling," China Communications, 2025, vol. 22, no. 2, pp. 128-142. DOI: 10.23919/JCC.fa.2023-0541.202502.
- [18] W. Tang, et al., "Path Loss Modeling and Measurements for Reconfigurable Intelligent Surfaces in the Millimeter-Wave Frequency Band," IEEE Trans. Commun., vol. 70, no. 9, pp. 6259-6276, Sept. 2022.
- [19] Y. Li et al., "Path loss modeling for the RIS-assisted channel in a corridor scenario in mmWave bands," in 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2022, pp. 1478–1483.

- [20] J. Sang et al., "Multi-scenario broadband channel measurement and modeling for sub-6 GHz RIS-assisted wireless communication systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 6, pp. 6312-6329, 2024.
- [21] M. Zhou et al., "A Floating-Intercept Path Loss Model Considering RIS Array Gain in Practical Environments," *IEEE Trans. Commun.*, pp. 1-1, 2025, doi: 10.1109/TCOMM.2025.3624177.
- [22] W. Tang et al., "Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 421-439, 2020.
- [23] Y Ren, X Teng, M Zhou, et.al. "Flexible-position multi-state RIS-assisted wireless communication: channel modeling and spatial characteristic measurements," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025, early access.
- [24] Y Ren, X Teng, M Zhou, et.al. "Near-field channel modeling and measurement of fluid multi-state RIS-assisted wireless communication," *2025 101st Vehicular Technology Conference (VTC)*. Norway, 2025: 1-5.
- [25] B. Xu, T. Zhou, F. Gao, T. Xu and H. Hu. "RIS-Aided MIMO Communications: Angle-Dependent Amplitude-Phase Response Model and Capacity Analysis." *IEEE Wireless Communications Letters*, 2025, 14(2): 290-294.
- [26] W. Chen, et al., "An empirical study of ISAC channel characteristics with human target impact at 105 GHz," *Electronics Letters*, vol. 60, no. 17, p. e70017, 2024, doi: 10.1049/ell2.70017.
- [27] Y. Zhang et al., "A Unified Deterministic Channel Model for Multi-Type RIS With Reflective, Transmissive, and Polarization Operations," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, doi: 10.1109/TVT.2025.3605727.
- [28] ETSI GR RIS 001, V1.1.1, "Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Use Cases, Deployment Scenarios and Requirements", April 2023.
- [29] ETSI GR RIS 002, V1.1.1, "Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Technological challenges, architecture and impact on standardization", August 2023.
- [30] ETSI GR RIS 003, V1.1.1, "Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS); Communication Models, Channel Models, Channel Estimation and Evaluation Methodology", June 2023.
- [31] N. Li, Z. Cheng and J. Zhu, "Reconfigurable Intelligent Surface Assisted Wireless Transmissions: Basic Principles and Potential Protocol Design," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 10-15, December 2024.
- [32] Q. Wu et al., "Intelligent Reflecting Surfaces for Wireless Networks: Deployment Architectures, Key Solutions, and Field Trials," in *IEEE Wireless Communications*, 2025.
- [33] J. Wang et al., "Reconfigurable Intelligent Surface: Power Consumption Modeling and Practical Measurement Validation," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 72, no. 9, pp. 5720-5734, Sept. 2024.
- [34] 3GPP TS 33.501, V 19.2.0, "Security architecture and procedures for 5G system." March 2025.
- [35] 3GPP TS 38.300, V 18.5.0, "Physical Channels and Modulation," March 2025.
- [36] IMT-2030 (6G) Promotion Group, "Research Report on Intelligent Metasurface Technologies for 6G," 2024.
- [37] F. Wang et al., "Flexible Coverage Control of Reconfigurable Intelligent Surface with Ring-Type Codebook," in *2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Dubai, United Arab Emirates, 2024, pp. 1-6.
- [38] J. Wang et al., "Hierarchical Codebook-Based Beam Training for RIS-Assisted mmWave Communication Systems," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, issue 6, Jun. 2023.

- [39] L. Zhang et al., “Space-time-coding digital metasurfaces,” in *Nature Communications*, no. 4334, 2018.
- [40] J. Li, B. Gao, Z. Yu, C. Li, W. Tang, L. Liang, X. Li, S. Jin, Q. Cheng, and T. J. Cui, “Coverage Enhancement of 5G Commercial Network based on Reconfigurable Intelligent Surface,” in Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall’ 22), Beijing, China, Sept. 2022.
- [41] J. Li, W. Tang, H. Qian, W. Chen, X. Su, X. Zhou, Y. Yuan, X. Li, S. Jin, and T. J. Cui, “Phase Shift Design for Multiple Incident Beams in Low Complexity RIS under 5G Commercial Networks: Simulation and Measurement,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, early access.

贡献单位

*排名不分先后，按照单位名称拼音的首字母排序。

| 序号 | 主要贡献单位 |
|----|---------------------|
| 1 | 北京交通大学 |
| 2 | 北京理工大学 |
| 3 | 北京联想软件有限公司 |
| 4 | 北京邮电大学 |
| 5 | 东南大学 |
| 6 | 都科摩（北京）通信技术研究中心有限公司 |
| 7 | 华为 |
| 8 | 华中科技大学 |
| 9 | 清华大学 |
| 10 | 上海大学 |
| 11 | 上海交通大学 |
| 12 | TCL 鸿鹄实验室 |
| 13 | 维沃移动通信有限公司 |
| 14 | 西安电子科技大学 |
| 15 | 西北工业大学 |
| 16 | 信通院 |
| 17 | 中国电信 |
| 18 | 中国联通 |
| 19 | 中国铁塔 |
| 20 | 中国移动 |
| 21 | 中信科移动 |
| 22 | 中兴通讯 |
| 23 | 重庆邮电大学 |



联系方式

邮箱: imt2030@caict.ac.cn

COPYRIGHT@2025 IMT-2030(6G)PROMOTION GROUP.

ALL RIGHTS RESERVED.