



专题：6G 智能超表面

基于智能超表面辅助的组网分析

刘秋妍¹, 李贝¹, 曹艳霞¹, 姚赛彬², 蒋振伟², 莫潇豪², 王亚峰³

(1. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100048;

2. 中国联合网络通信有限公司上海分公司, 上海 201900;

3. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 在5G-Advanced (5G-A) 和6G阶段, 智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 作为一种面向网络深度覆盖需求的辅助型技术, 能够在满足网络稳定连续覆盖、多流增速等需求的基础上提供低成本、低功耗的解决方案。基于对RIS技术定位的分析, 提出了基于智能超表面辅助的高低频协同组网架构, 分析了基站与智能超表面协同部署的比例, 针对智能超表面阵面引入邻频干扰的问题, 提出了基于定制化带宽设计抑制邻频干扰方案, 且面向基于基站与智能超表面协同组网, 开展系统级仿真验证, 验证不同终端分布条件下, 智能超表面部署位置和阵元数对系统性能的影响。仿真测试结果表明, 基于RIS辅助的网络能够明显提升边缘和弱覆盖区域, 从而提升整个通信系统网络性能。

关键词: 无线网络; 智能超表面; 组网技术; 干扰消除

中图分类号: TN929

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024174

Analysis of reconfigurable intelligent surface assisted networking

LIU Qiuyan¹, LI Bei¹, CAO Yanxia¹, YAO Saibin², JIANG Zhenwei², MO Xiaohao², WANG Yafeng³

1. Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100048, China

2. Shanghai Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Shanghai 201900, China

3. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Network assisted with reconfigurable intelligent surface is a kind of low-cost and low-power solution which can provide stable, continuous and ubiquitous connection to satisfy deep coverage requirements in 5G-Advanced (5G-A) and 6G era. A kind of reconfigurable intelligent surface assisted high and low frequency collaborative network architecture based on the positioning analysis of reconfigurable intelligent surface technology was proposed. The proportion of base station and reconfigurable intelligent surface collaborative deployment was analyzed.

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-01

通信作者: 李贝, libei@chinaunicom.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2022YFB2902400); 中国联合网络通信有限公司核心攻关项目 (No.V91F232DTB0000)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902400), China Unicom Key Technology Research Program (No.V91F232DTB0000)

Furthermore, a interference reduction based on bandwidth design scheme was proposed to reduce adjacent frequency interference. System level performance simulation of network assisted with reconfigurable intelligent surface was verified to analyze the impact of reconfigurable intelligent surface deployment location and number of array elements under different UE distribution conditions. The simulation results show that the RIS-assisted network can significantly improve the edge and weak coverage area, so as to improve the network performance of the whole communication system.

Key words: wireless network, reconfigurable intelligent surface, network technology, interference cancellation

0 引言

移动通信系统自诞生以来,对无线信道环境中的路径损耗、多径衰落等现象只能采取被动适应的手段,空口常常成为限制网络性能的关键^[1-2]。智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)具有独特的低成本、低能耗、可编程、易部署的特点^[3-4],其通过动态调控阵元状态,调控电磁波在空间中的传播特性,能够在一定程度上重构无线传播环境,实现对无线环境的智能调控,可大幅降低天线阵列部署的成本、功耗、体积和质量,有机会解决高度复杂的网络、高成本的硬件和日益增加的能源消耗等未来无线通信面临的关键问题,加速全社会数字化转型,提升经济效益,实现国家绿色转型和新格局下的“碳达峰、碳中和”目标^[5-6]。此外,与RIS相关技术在国内产业链中已具备自主可控能力,对抢占未来6G技术制高点、完善国产移动通信产业链以及支撑社会经济高质量发展具有重要意义。

1 RIS技术定位

RIS技术采用少量有源器件甚至全无源器件的设计理念^[7],以及通过采用超材料和可拼接部署方式,既可以作为收发机侧的组成部分,也可以作为一种信道侧网络辅助设备。该技术不仅可以应用于传统网络深度覆盖场景,还可以与毫米波/太赫兹高频通信、通感一体、全双工、涡旋电磁波、物理层安全等技术实现融合应用^[8-11]。然而,由于频谱政策、相关技术的产业成熟度持续演进,在5G-Advanced(5G-A)和6G阶段,面

向规模化商用落地的需求,RIS被定位为一种面向网络深度覆盖需求的辅助型技术,其高价值应用仍聚焦在低成本稳定连续覆盖补盲、多流增速等场景^[12-13]。

1.1 收发机侧

在收发机侧,既可以采用RIS来增强基站有源天线单元(active antenna unit, AAU)能力,也可以采用基于RIS设计简化的发射机架构。基于RIS增强AAU方案在现有AAU上集成反射式或透射式RIS,可以提升天线阵面口径增益或扩展覆盖角度,技术成熟度较高,可有效解决边远郊区、广场或体育馆等区域广覆盖的问题。基于RIS架构设计的收发信机,通过RIS调控与信息调制的联合设计,有效简化收发信机架构,目前该技术路线成熟度还有待通过更多对比测试进行深入的分析验证^[14]。

1.2 信道侧中低频网络

随着移动通信网络逐渐步入5G-A阶段,Sub 6 GHz频段的5G基站已完成大规模商用部署。为了充分利用已有的站址资源并考虑室外宏基站覆盖室内(outside to inside, O2I)场景中的建筑物穿透损耗,如在密集城区,现有3.5 GHz小区半径通常被设定为350~500 m。全国很多城市基于Sub 6 GHz频段的5G网络覆盖率从90%提升到99%以上,并且由于低频信号具有较好的散射绕射性能,现有5G网络中,在信道侧基于RIS满足低成本深度覆盖的需求场景不及全网的5%~10%,并且大部分深度覆盖需求集中在O2I室内深度覆盖、电梯井、矿井、地下车库等封闭环境或者电网、油田等场景^[15]。



1.3 信道侧毫米波网络

高频通信在传输带宽方面具有显著优势，具有支持大带宽高速传输的能力，因此，以FR2频段为代表的毫米波频段是移动通信网络部署的潜在频段^[16]。但是，相较于中低频信号，高频信号的传播与穿透损耗较大，受障碍物遮挡影响也更大。例如，毫米波频段信号几乎无法穿透混凝土和红外反射玻璃灯材质的障碍物，针对树叶、人体、车体等障碍物，毫米波频段信号的穿透损耗也均在 10 dB 以上，过大的穿透损耗将导致覆盖范围内的受遮挡区域通信质量发生显著恶化，网络覆盖区域容易出现盲区或弱覆盖区域。RIS 作为一种低成本、低功耗的信道环境调控节点，按需构造非视距反射路径或改变电磁波透射特性，可有效解决障碍物遮挡产生的室内外盲区问题，提升室外宏基站穿透玻璃覆盖室内的网络质量，丰富小区边缘用户散射环境，提高小区边缘用户传输性能，以低成本、低功耗方式实现深度覆盖和提速扩容。

2 RIS 辅助的组网分析

2.1 RIS 辅助的高低频协同组网架构

为了充分利用频率资源，为用户提供连续稳定的高质量网络服务，未来 6G 网络将有可能与 5G 网络长期共存，并延续 5G 网络架构设计思路，采用高中低频协同组网实现全连接覆盖。基于 RIS 辅助的高中低频协同组网架构如图 1 所示，优先中频资源，实现 6G 的重点区域连续覆盖，重耕已有低频资源实现全域连接，利用毫米波、太赫兹等高频资源实现热点补充，满足高速率、

大带宽、低时延等极致连接场景的应用需求，并针对网络中出现的盲区，采用 RIS 实现低成本覆盖补盲。密集城区楼宇林立，需要考虑建筑物墙体穿透损耗的 O2I 覆盖场景较多，导致中频段网络小区半径大多只有 300~400 m，与毫米波视距（light of sight, LOS）径向拉远测试距离基本相当，因此，未来密集城区毫米波基站部署具有与中频段基站 1:1 部署的条件。但是，与中频段电磁波相比，毫米波频段的电磁波具有易受障碍物遮挡、穿透损耗大、绕射能力差等特性，因此，在高低频协同组网架构中，当毫米波不满足 LoS 传输条件时，如 O2I 覆盖或非视距（non-light of sight, NLOS）传输时，透射式或反射式 RIS 节点的协同部署，可以辅助毫米波网络实现深度覆盖增强，以低成本、低功耗方式为用户提供连续稳定的高质量网络服务。

2.2 基站与 RIS 协同组网

RIS 典型应用场景主要面向毫米波网络和少量中频段网络深度覆盖需求。未来密集城区毫米波基站如果与中频段基站采用三扇区共址部署，基站与 RIS 协同组网如图 2 所示。透射式 RIS 主要用于 O2I 覆盖增强场景，基站与反射式 RIS 覆盖参数见表 1，本文参考了辽宁联通和中国联通研究院携手中兴通讯完成的业界首个动态智能超表面 RIS 2.0 外场验证数据。一个尺寸为 0.5 m×0.5 m 的中型 RIS，其覆盖面积约占毫米波基站一个扇区的 1/10，一个 A3 纸张大小的小型 RIS，其覆盖面积大约是毫米波基站一个扇区的 1/100。中型 RIS 覆盖面积相对较大，适用于室外连片盲区覆盖增强场景，一个扇区内部署的中型 RIS 合

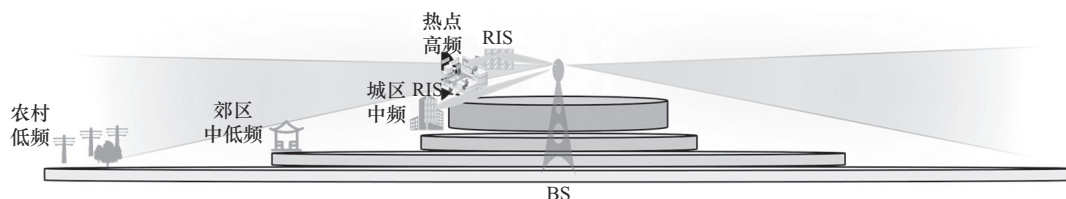


图1 基于RIS辅助的高中低频协同组网架构

理数量范围是 1~2 个。如果扇区内超过 20% 的连片区域存在覆盖盲区，需要联合基站配置和 RIS 部署实现无线网络优化。目前 RIS 阵面的水平波束角度通常为 $\pm 60^\circ$ ，与中型 RIS 相比，小型 RIS 的覆盖能力差异主要体现在径向拉远距离较短，适用于分散的小面积盲区或室内覆盖增强场景。由于一个扇区与中型 RIS 和小型 RIS 的覆盖面积比例约为 100:10:1，当一个扇区内存在大量覆盖盲区，部署小型 RIS 超过 10 个时，将有至少 2 个小型 RIS 覆盖区域处于相同的中型 RIS 覆盖区域内，可以认为局部区域存在连片盲区。因此，一个存在覆盖盲区的密集城区，在由中型 RIS 或小型 RIS 辅助基站协同组网的典型室外场景下，RIS 部署规模不会超过基站规模一个数量级。依据基站与 RIS 配比分析，未来商用阶段 RIS 设备的期望成本应比基站成本至少低一个数量级。

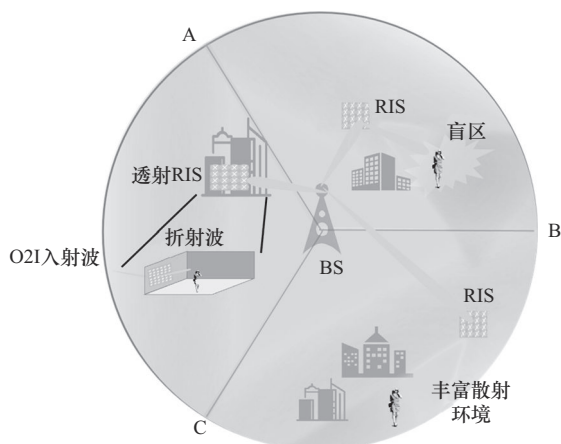


图2 基站与RIS协同组网

2.3 邻频干扰分析与抑制

RIS 技术自诞生以来，干扰一直是行业内关注的关键问题。运营商 A 部署的 RIS 对邻近的运营商 B 基站信号产生影响，有可能引入运营商 B

无法预期的邻频干扰。这种邻频干扰的产生主要是由 RIS 阵面的绝对带宽较宽造成的。在 RIS 原型系统研发阶段，为了满足不同运营商频段、不同场景的技术研究和测试验证，减少定制研发成本，绝大多数的 RIS 阵面的相对带宽较大。例如，中心频率 26 GHz 的毫米波 RIS 阵面绝对带宽通常设计为 4 GHz，中心频率 3.5 GHz 的 RIS 阵面响应带宽通常设计为 400 MHz。采用无源设计理念的被动式 RIS，对响应带宽内的入射信号缺乏主动选择能力，因此，对所有信号都执行相同的射频处理，导致引入干扰。

对于天线阵面带宽设计而言，绝对带宽与中心频率的比值，即相对带宽在 1%~20%，天线设计的技术难度和硬件成本的差异不大^[17]。目前研发 RIS 原型系统的工作频段集中在 2.6 GHz、3.5 GHz 和 4.9 GHz，国内运营商已获得授权的 Sub 6 GHz 频段，相对带宽为 1%~6%，具体见表 2。未来国内各运营商如果获得 400~800 MHz 的 24~28 GHz 毫米波频段资源，相对带宽为 1.5%~4%。因此，未来规模化商用阶段，依据不同运营商授权频率资源，定制化开发 RIS 阵面的中心频率和工作带宽，可有效抑制 RIS 阵面对带外信号的影响，降低运营商 RIS 部署引入的干扰，不会增加天线设计的技术难度，对 RIS 硬件成本的影响也较小。

2.4 基于 RIS 组网性能分析

在实际组网部署中，引入 RIS 技术需要考虑多小区以及多 RIS 联合部署方案。RIS 设备作为一种无源模拟设备，对无线信道的优化不仅会影响到服务小区的信道，还可能对其他小区的信道造成影响。因此，研究 RIS 技术在多小区以及多 RIS 环境的综合影响对推动 RIS 技术实际落地具

表1 基站与反射式 RIS 覆盖参数

节点类型	阵元数	覆盖角度/(°)	半径/m	覆盖面积/m ²
三扇区基站	256~1 024	120	300~400	100 000~150 000
小型 RIS	64×64	120	30~50	1 000~2 000
中型 RIS	128×128	120	100~120	10 000~15 000



表2 国内运营商已获得授权频段相对带宽

运营商	频段/MHz	绝对带宽/MHz	相对带宽
中国移动	2 515~2 675	160	6.2%
	4 800~4 900	100	2.0%
中国联通	3 500~3 600	100	2.8%
中国电信	3 400~3 500	100	2.9%
中国广电	4 900~4 960	60	1.2%
中国联通、中国电信、中国广电（共用）		100	3.0%

有重要意义。

通常作为中继节点的RIS部署位置对网络性能有很大影响，RIS对不同位置的用户产生的影响大小也不同。本文考虑不同的用户位置和RIS部署位置对系统性能的影响，将RIS与用户的分

布从3个场景进行分析：RIS放置在小区边缘，用户终端（user equipment, UE）在小区内均匀随机分布；RIS放置在小区中间，UE在小区边缘；RIS放置在小区边缘，UE在小区边缘。UE和智能超表面位置分布如图3所示。

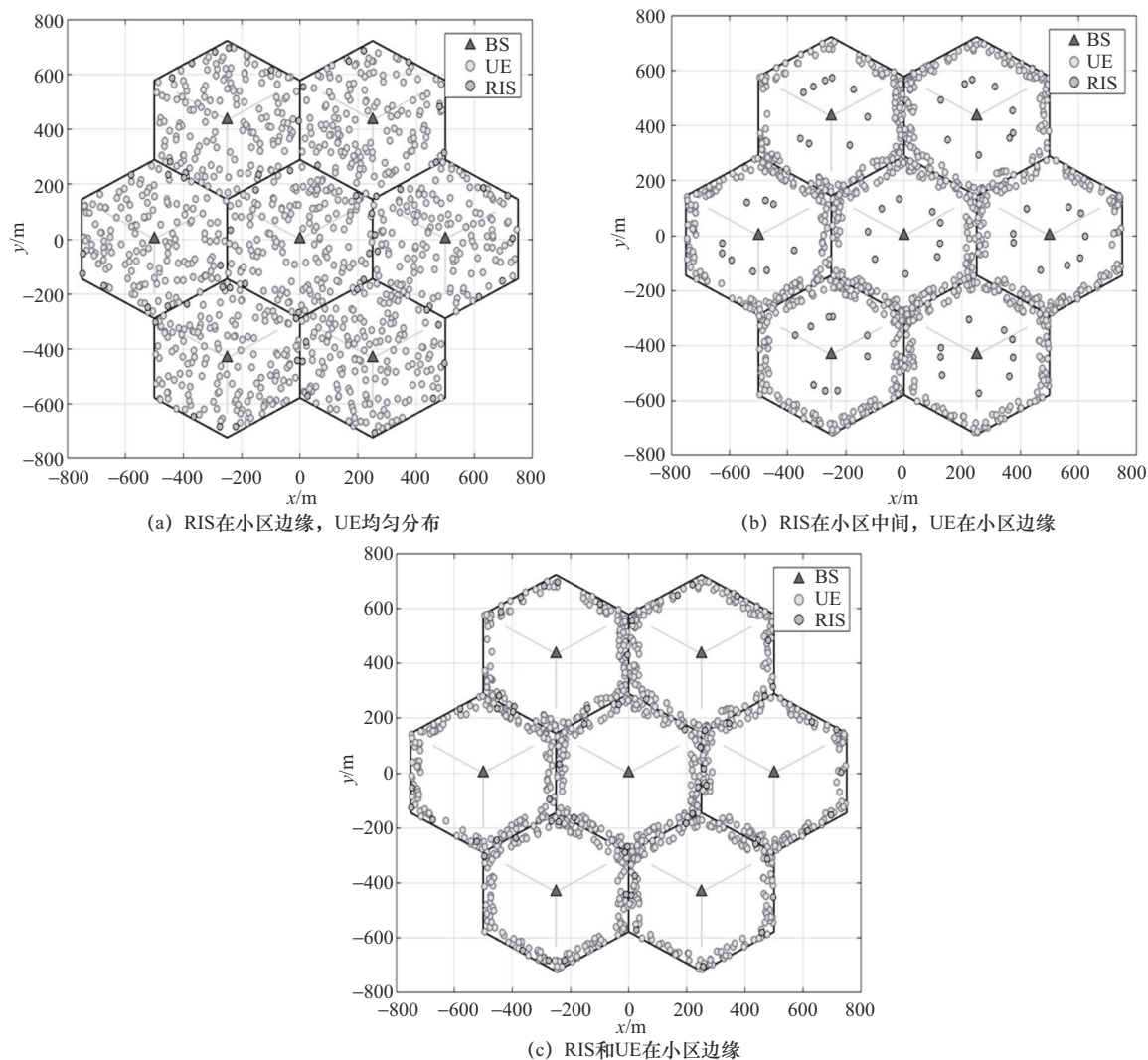


图3 用户和智能超表面位置分布

在RIS布置在小区边缘, UE在整个小区均匀分布的场景下, 不同阵元数信干噪比累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)曲线如图4所示。由图4可以看出, 在小区边缘布置RIS能够提升用户信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)分布, 适当增加RIS的阵子数, 能够获得更大的天线有效口径增益, 可以进一步提升接收信号质量。在针对边缘用户性能的分析中, 对比RIS部署在小区中间位置和小区边缘位置的仿真结果。RIS不同部署位置曲线如图5所示。由图5可以看出, 当RIS部署在小区边缘位置时, RIS距离边缘用户较近, 相比将RIS部署在基站和终端中间位置, 更能够提升用户的信干噪比分布。

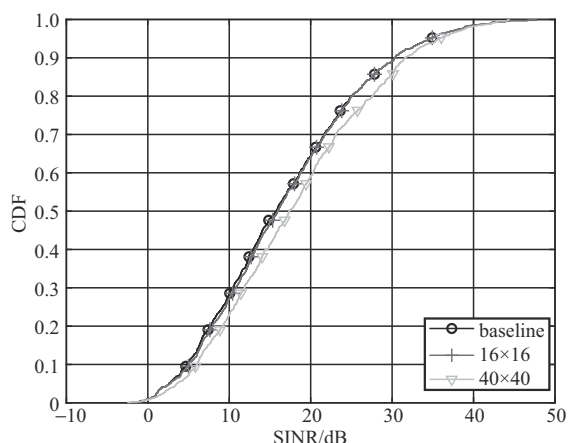


图4 RIS在小区边缘, UE均匀分布场景下不同阵元数信干噪比累积分布函数曲线

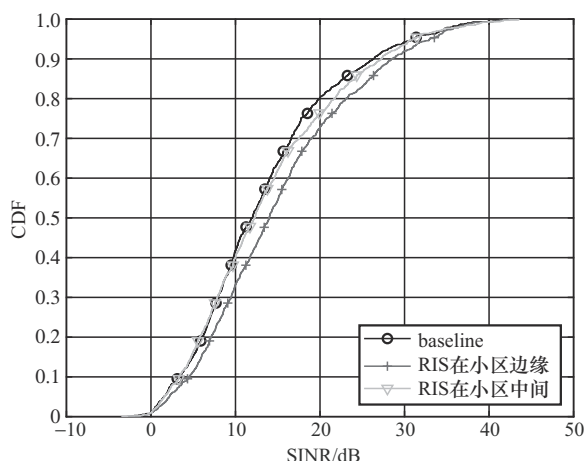


图5 RIS不同部署位置曲线

通过组网仿真分析得出, 基于RIS辅助的网络能够明显提升边缘和弱覆盖区域性能, 从而提升整个通信系统的网络性能。未来RIS设备可以大规模部署在无线组网环境中, 可以使用RIS模拟波束成形和基站数字波束成形的联合方案来优化用户的通信性能, 通过多RIS多基站的联合组网方案, 降低通信网络的部署成本。

3 RIS技术面临的挑战

近年来, 产学研用针对RIS应用场景、单点性能进行了大量的理论分析和原型系统仿真测试, 验证了RIS作为一种低成本低功耗设备, 具有改善无线信道环境、增强网络深度覆盖的能力。然而, 组网与干扰协调一直是移动通信网络建设运维的核心, RIS设备的引入, 不仅对无线信道环境产生影响, 对无线网络架构、设备管理、组网策略、干扰协调等问题都带来了全新的挑战。

目前, 移动通信网络工作频段在6 GHz以下, 收发端天线阵列维度较低, 无线网络组网和优化设计主要位于远场区域。随着移动通信网络工作频段不断提升, 小区半径逐渐减小, 智能超表面阵列维度和有效口径不断提升, 近场效应成为RIS辅助的高频通信场景不可忽略的重要因素。近场效应基于球面波假设, 考虑了电磁波幅度和相位的非线性变化, 与传统远场假设相比, 近场条件下的RIS应用场景、信道建模、码本设计、信道估计与波束成形等方面都会有所不同。

被动式RIS采用无源阵面设计理念, 缺乏主动估计信道状态、获取波束控制信息等能力。大量的仿真分析和测试验证表明, 基于网络侧控制RIS是一种对RIS的体积、成本和功耗影响较小的方案, 通过基站与RIS协同, 该方案为终端提供透明接入、无缝覆盖网络。基于网络侧控制RIS的核心部分是在转发阵面和控制模块的基础上, 集成轻量化终端模组, 接收基站下发的低速控制信息。Sub 6 GHz频段, 针对物联网、车联网和工业互联



网等场景的窄带蜂窝物联网 (narrow band-Internet of things, NB-IoT) 和简化能力 (reduced capability, RedCap) 等轻量化终端技术需求明确并且已开展标准化工作。但是, 以低成本、低速率为目标轻量化终端与高频通信大带宽高速传输的技术定位相违背, 因此, 针对高频设计的轻量化终端的市场需求和标准化趋势有待进一步分析探索。

4 结束语

本文提出在 5G-A 和 6G 阶段, RIS 的技术定位是一种面向网络深度覆盖需求的辅助型技术, 其高价值应用仍聚焦在低成本稳定连续覆盖补盲、多流增速等场景。在基于智能超表面辅助的高低频协同组网架构下, 典型密集城区室外场景下, RIS 部署规模不会超过基站规模一个数量级, RIS 设备的期望成本应比基站成本至少低一个数量级。针对 RIS 阵面引入邻频干扰的问题, 通过定制化 RIS 阵面带宽设计可有效抑制系统间邻频干扰。通过对基站与智能超表面协同组网进行系统级仿真, 本文验证了不同终端分布条件下, 随着阵元数增加, RIS 辅助的网络能够明显提升边缘和弱覆盖区域网络性能, 从而提升整个通信系统的网络性能。

参考文献:

- [1] 中国联合网络通信有限公司. 中国联通 6G 白皮书[R]. 2021. China Unicom. China Unicom 6G white paper[R]. 2021.
- [2] 中国联合网络通信有限公司. 中国联通 6G 业务白皮书[R]. 2023. China Unicom. China Unicom 6G service white paper[R]. 2023.
- [3] 马红兵, 张平, 杨帆, 等. 智能超表面技术展望与思考[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 70-77. MA H B, ZHANG P, YANG F, et al. Reflections on reconfigurable intelligent surface technology[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(3): 70-77.
- [4] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 等. 智能超表面技术研究报告[R]. IMT-2030(6G)推进组, 2021. CUI T J, JIN S, ZHANG J Y, et al. Research report of reconfigurable intelligent surface[R]. IMT-2030 (6G) Promotion Group, 2021.
- [5] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 等. 智能超表面技术研究报告(第二版)[R]. IMT-2030(6G)推进组, 2022. CUI T J, JIN S, ZHANG J Y, et al. Research report of reconfigurable intelligent surface (2nd edition)[R]. IMT-2030 (6G) Promotion Group, 2022.
- [6] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 等. 智能超表面典型应用、挑战与关键技术[R]. IMT-2030(6G)推进组, 2023. CUI T J, JIN S, ZHANG J Y, et al. Typical application, challenge and key technology of reconfigurable intelligent surface[R]. IMT-2030(6G)Promotion Group, 2023.
- [7] 程强, 崔铁军. 电磁超材料[M]. 南京: 东南大学出版社, 2022. CHENG Q, CUI T J. Electromagnetic meta-material[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2022.
- [8] 刘秋妍, 李福昌, 张忠皓, 等. 智能超表面技术 5G 化演进探讨[J]. 邮电设计技术, 2021(12): 14-17. LIU Q Y, LI F C, ZHANG Z H, et al. Research on 5G evolution of reconfigurable intelligent surface technology [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(12): 14-17.
- [9] 智能超表面技术联盟(RISTA). 智能超表面技术白皮书[R]. 2023. RISTA. Reconfigurable intelligent surface white paper[R]. 2023.
- [10] 章嘉懿. 6G 多天线与智能超表面技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2023. ZHANG J Y. 6G MIMO and reconfigurable intelligent surface[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2023.
- [11] 袁弋非, 苏鑫, 顾琪, 等. 智能超表面(RIS)技术初探[M]. 北京: 电子工业出版社, 2023. YUAN Y F, SU X, GU Q, et al. A tentative study on reconfigurable intelligent surface[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2023.
- [12] 未来移动通信论坛(FuTURE 论坛). 智能超表面研究进展与网络部署挑战白皮书[R]. 2024. FuTURE. White paper of research progress and network deployment challenges of reconfigurable intelligent surface[R]. 2024.
- [13] 赵亚军, 戴凌龙, 张建华, 等. 6G 近场技术白皮书[R]. 2024. ZHAO Y J, DAI L L, ZHANG J H, et al. 6G near field white paper[R]. 2024.
- [14] 刘秋妍, 吕轩, 李佳俊, 等. 智能超表面赋能 5G-A/6G 网络的思考[J]. 无线电通信技术, 2024, 50(2): 288-293. LIU Q Y, LYU X, LI J J, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted 5G-A/6G network[J]. Radio Communications Technology, 2024, 50(2): 288-293.
- [15] 中国移动通信集团有限公司. 面向网络协作的智能超表面技术白皮书[R]. 2023. China Mobile. White paper on intelligent metasurface technology for network collaboration[R]. 2023.
- [16] 李贝, 刘秋妍, 狄子翔, 等. 6G 网络智能超表面技术探索[J]. 移动通信, 2023, 47(11): 22-27. LI B, LIU Q Y, DI Z X, et al. Exploring reconfigurable intelligence surface in 6G networks[J]. Mobile Communications,

2023, 47(11): 22-27.

- [17] JOHN D K, RONALD J M. 天线(第三版)[M]. 章文勋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017.

JOHN D K, RONALD J M. Antennas: for all applications, third edition[M]. translated by ZHANG W X. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.

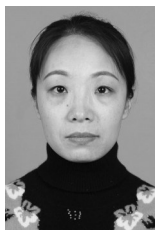
[作者简介]



刘秋妍(1984-), 女, 博士, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为智能超表面、区块链等 5G-Advanced 和 6G 创新技术研究与应用验证。



李贝(1983-), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院正高级工程师, 主要研究方向为网络智能运营、移动通信新技术。



曹艳霞(1980-), 女, 中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 5G/6G 组网技术。



姚赛彬(1982-), 男, 中国联合网络通信有限公司上海分公司高级工程师, 主要从事无线网前沿技术研究及管理工作。



蒋振伟(1984-), 男, 中国联合网络通信有限公司上海分公司高级工程师, 主要从事无线网络优化及 5G-Advanced 技术研究工作。



莫潇豪(1993-), 男, 博士, 中国联合网络通信有限公司上海分公司工程师, 主要研究方向为大规模 MIMO、稀疏信号处理、智能超表面、无线近场通信。



王亚峰(1974-), 男, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信系统基础理论、B5G 及 6G 的关键技术研究和性能评估、无线网络规划与优化。