

智能超表面技术在山地城市的

Application and Exploration of RIS Technology in
Mountainous Urban Areas

应用与探索

田洛,秦璐,方东旭(中国移动通信集团重庆有限公司,重庆 401121)

Tian Luo, Qin Lu, Fang Dongxu (China Mobile Group Chongqing Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

摘要:

深入探讨了RIS技术在山地城市的应用,并基于实际场景进行了仿真与部署研究,研究了RIS在山地城市特定场景下提升网络覆盖质量、优化信号传输效率以及解决非视距(Non-Line-of-Sight, NLOS)传输难题方面的应用,为智能超表面技术在山地城市的应用提供了参考。

关键词:

智能超表面;5G网络;山地城市;信号覆盖;用户感知

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.01.002

文章编号:1007-3043(2026)01-0005-04

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It deeply explores the application of RIS technology in the distinctive scenarios of mountainous cities and carries out simulation and deployment research based on actual scenarios. The application of RIS in improving the quality of network coverage, optimizing the efficiency of signal transmission and solving the problem of non line of sight (NLOS) transmission in specific scenes of mountain cities is studied, which provides a reference for the application of RIS technology in mountain cities.

Keywords:

RIS; 5G network; Mountainous cities; Signal coverage; User awareness

引用格式:田洛,秦璐,方东旭. 智能超表面技术在山地城市的应用与探索[J]. 邮电设计技术, 2026(1):5-8.

0 引言

在当今数字化时代,无线通信网络已成为现代社会不可或缺的信息基础设施。然而,山地城市的复杂地形给无线信号的覆盖带来了严峻挑战。这些城市特有的地形起伏、建筑物密集以及城市布局的不规则性,常常导致信号存在覆盖盲区和弱区,严重影响了通信质量和用户体验。

城市中的高层建筑、商业区、工业园区和隧道等环境,由于物业协调、投资回报和信号传播的局限性,

使得无线网络覆盖难以完善。这些问题凸显了传统无线通信技术在现代城市环境中的局限性。为了解决这一问题,本文提出了一种基于智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)技术的城市覆盖增强方案,期望能够提供一种高效、低成本的解决方案,以解决5G网络在城市环境中的覆盖问题,从而提升用户体验和网络质量^[1-6]。此外,本文还将为未来的6G网络技术发展提供一定的参考和启示。

1 智能超表面技术概述

1.1 基本原理

广义斯涅尔定律(Generalized Snell's Law)指出,

收稿日期:2025-11-07

具有空间变化相位响应和亚波长分离的二维光学谐振器阵列可以在光波(或更广义的电磁波)穿越介质界面时,将相位不连续性印刻在传播波上(见图1)。这意味着通过调整超表面的结构可以主动控制反射或折射波的相位分布,进而实现对电磁波传播路径的灵活控制。

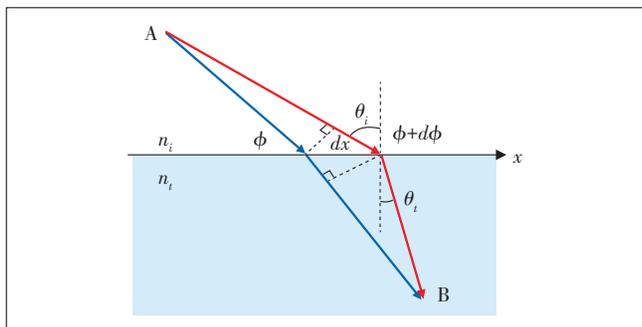


图1 广义斯涅尔定律原理

RIS技术是一种新型的电磁材料技术,它由大量亚波长尺寸的电磁单元组成,这些单元可以是金属、介质或可调元件的组合。每个电磁单元都可以通过调整其物理属性,如电容、电感或电阻,利用广义斯涅尔定律的原理来改变其对电磁波的响应。通过这种方式,RIS能够对入射的电磁波进行精确的控制,包括改变波的振幅、相位、极化状态以及传播方向。

RIS的工作原理基于电磁波与材料相互作用的物理机制。当电磁波入射到RIS时,每个单元的响应会综合起来,形成一个宏观的散射场,通信模型如图2所示。通过精确设计每个单元的电磁特性,可以控制这个散射场的分布,从而实现对电磁波的定向反射、透射或聚焦。这种动态调控能力使得RIS在无线通信领域具有广泛的应用潜力^[7]。

1.2 技术优势

RIS技术以其创新的设计和运作机制,具有显著

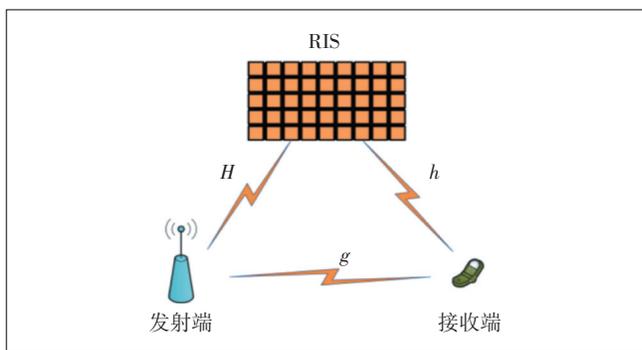


图2 RIS通信模型

的技术优势。首先,RIS技术通过智能调控电磁波的传播,有望重塑无线传播环境,打破传统无线环境中的随机性和不确定性,为移动通信网络提供更高的可控性和新的自由度。其次,由于RIS主要由成本效益高的无源元件构成,其在制造和维护方面具有显著的经济优势,有效降低了整体的部署和运营成本。此外,RIS技术部署灵活性高,易于安装和集成,能够适应多种环境,从而在城市高楼、室内空间或特殊结构中实现高效的信号覆盖。最后,RIS技术由于不需要功率放大器来处理接收信号,主要通过改变信号的方向来工作,因此产生的热噪声较低,从而进一步提高了通信系统的性能和信噪比。这些优势共同为RIS技术的应用提供了坚实的基础,并为未来通信技术的发展开辟了新的可能性。

1.3 适用场景

RIS技术凭借其创新特性,在多样化的应用场景中彰显了其广泛的应用前景。在密集城市环境中,RIS技术通过智能调节电磁波的传播路径,有效解决了高楼林立区域及室内空间的信号覆盖难题。对于如隧道和地下停车场这类传统无线通信难以触及的特殊结构,RIS技术以其低成本和高效性,提供了一种低成本且高效的信号覆盖方案(见图3)。

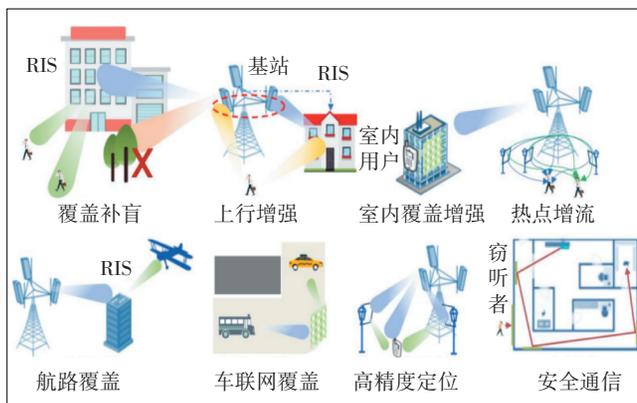


图3 RIS部署场景

在桥梁和滨江路等信号干扰复杂的场景中,RIS技术通过精确的智能调控,可以显著降低干扰,优化了信号接收质量。此外,RIS技术的触角已延伸至智能交通、远程医疗、物联网等前沿领域,为这些领域带来了定制化的无线通信解决方案。其在无人机和车联网领域的集成应用,可以实现广泛的航路信号覆盖和车联网覆盖的扩展。利用信号聚焦和干扰抑制技术,实现感知与高精度定位的融合、安全通信、减少电

磁污染,以及能量的收集与传输等功能。

2 智能超表面部署验证

2.1 场景选择

基于山地城市这种特殊、复杂的地理环境,对桥梁、滨江路、隧道、高层建筑等场景的网络覆盖提出了更高的要求。其中跨江大桥等大跨度结构由于其独特的物理特性,传统的基站覆盖很难满足这些区域的需求,且容易受到干扰,影响通信质量。本研究希望通过引入 RIS 技术,通过精确控制 RIS 元素的反射特性,优化信号传播路径,减少干扰,提高覆盖质量。

2.2 数据仿真

系统仿真性能评估是对 RIS 组网部署策略和效果的提前预演,通过模拟实际环境中小区用户的复杂通信环境,可以初探 RIS 对 5G 网络系统性能的影响^[8-15]。RIS 设备部署的节点位置或拓扑(见图 4)也会极大影响 RIS 的实际性能。RIS 面板挂高、面板倾角、方位角,与其他节点的相对距离和 RIS 面板朝向的评估验证对 RIS 性能衡量都较为重要。

本次选取某跨江大桥场景进行模拟仿真,RIS 可以横幅式部署(如桥塔横梁处下拉),垂直于桥面,采用透射方式,插损为 1~2 dB。由于角度问题,平行于桥梁放置没有增益,不建议平行于桥梁放置。仿真参数设置如下:频率为 3 GHz,带宽为 100 MHz,RIS 阵子增益为 5 dB。仿真结果如图 5 所示。仿真数据显示:

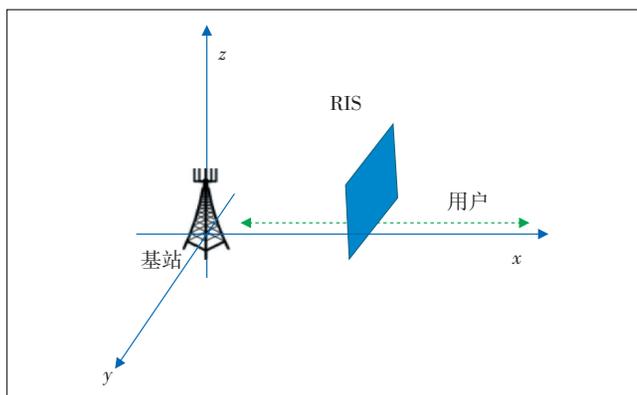


图 4 RIS 仿真评估对象

在桥梁部署 RIS 后,仿 RIS 级联链路的接收功率相对直连链路显著提升,在 RIS 板件附近的接收功率最高。

可以初步得到如下结论:在跨江大桥场景部署 RIS 可以提高 5G 无线网络系统的性能;与部署在小区中间位置相比,部署在小区边缘的智能超表面更能提升边缘用户的性能。

2.3 部署测试

根据理论和仿真数据结论,在选取跨江大桥部署 RIS 设备进行现场验证测试。该跨江大桥桥身长、跨度大,同时在桥面不具备基站施工建设条件,两岸基站由于阻挡无法完全覆盖,导致中心区域无主覆盖信号(见图 6)。

在 RIS 设备部署完成后进行验证测试,测试数据如表 1 所示,待优化区域的 RSRP 从 -95.7 dBm 提升到

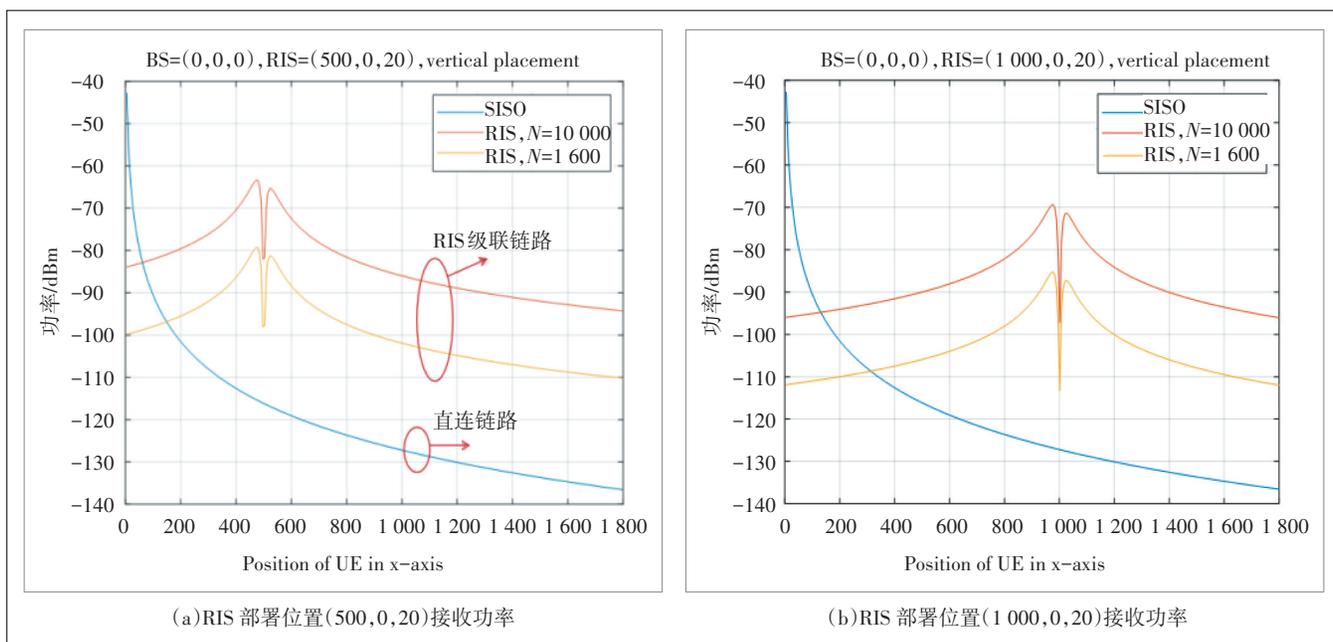


图 5 系统仿真数据



图6 RIS部署实例

表1 RIS部署前后评估指标对比

评估指标	SINR/dB	RSRP/dBm	上行用户速率/(Mbit/s)	下行用户速率/(Mbit/s)
部署前	4.1	-95.7	35.1	162.5
部署后	11.4	-89.6	76.6	230.5
提升幅度	7.3	6.1	41.5	58.5

-89.6 dBm, 提升了 6.1 dBm, SINR 从 4.1 dB 提升到 11.4 dB, 提升了 7.3 dB。待优化区域 5G 信号强度和信号质量明显提升。待优化区域 5G 上下行用户速率分别从 35 Mbit/s、162 Mbit/s 提升至 76 Mbit/s、230 Mbit/s。

实地部署测试进一步证实了 RIS 技术对特殊场景的覆盖补充效果, 诸如跨江大桥等区域由于信号传播环境的复杂性, 传统通信技术难以实现有效覆盖。通过引入 RIS 技术, 智能调控电磁波的反射和透射, 有效地增强了这些区域的信号强度, 提高了网络的连通性和稳定性。

此外, RIS 技术的应用不仅增强了覆盖, 还对用户体验产生了积极影响。在实际部署后, 网络速率得到显著提升, 用户的网络连接更加稳定, 用户满意度得到提升。这些成果不仅为 5G 网络的持续优化和扩展提供了强有力的技术支撑, 也为未来 6G 通信技术的发展奠定了基础。

3 结束语

RIS 已被确认为 5G 增强版 (5G-Advanced) 及未来 6G 的关键技术之一, 其在解决 NLOS 信号覆盖盲区以及满足特殊场景下的通信需求方面具有重要作用。本研究对 RIS 的工作原理进行了阐述, 并进一步验证了其在山地城市环境中部署的可行性。通过综合评估多种应用场景发现: RIS 的部署极大地提升了网络

覆盖水平。尽管如此, 关于 RIS 在信号覆盖补充、反射板的选取、最佳角度的确定以及可能的信号阻挡和干扰问题等方面, 鉴于不同场景的特殊性, 仍需进行更深入的探讨和研究。

参考文献:

- [1] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: 3GPP TR 38.901[S/OL]. [2025-03-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [2] 3GPP. NR; base station (BS) radio transmission and reception; 3GPP TS 38.104[S/OL]. [2025-03-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [3] 3GPP. Radio frequency (RF) and radio distribution technologies for UMB; stage 2: 3GPP TR 38.804 [S/OL]. [2025-03-17]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [4] ZHAO L, LI H, et al. Intelligent reflecting surface aided wireless communication: a tutorial on concepts, performance, and future directions [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021 (1): 68-86.
- [5] TANG W K, CHEN X Y, CHEN M Z, et al. Path loss modeling and measurements for reconfigurable intelligent surfaces in the millimeter-wave frequency band [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(9): 6259-6276.
- [6] 李福昌, 张忠皓, 刘秋妍, 等. 智能超表面技术在 5G 网络中的应用 [J]. 电信科学, 2021, 37(1): 96-103.
- [7] 马向进, 韩家奇, 乐舒瑶, 等. 可重构智能超表面设计及其无线通信系统应用 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(2): 258-268.
- [8] 张建华, 刘元伟, 李福昌. 面向 5G/B5G 的智能超表面技术综述 [J]. 电子学报, 2020, 48(1): 1-16.
- [9] 王文博, 张朝阳, 王光义. 基于智能超表面的 5G 网络覆盖增强技术 [J]. 移动通信, 2020, 44(23): 1-6.
- [10] 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.
- [11] 张朝阳, 王文博, 王光义. 基于智能超表面的 5G 网络覆盖补充技术研究 [J]. 电信技术, 2021(1): 1-5.
- [12] 王光义, 张朝阳, 王文博. 智能超表面技术在 5G 网络中的应用研究 [J]. 信息通信技术, 2021, 15(1): 1-6.
- [13] 张忠皓, 李福昌, 刘秋妍. 智能超表面技术在 5G 网络中的关键技术研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47(1): 1-5.
- [14] 韩家奇, 马向进, 乐舒瑶. 面向 5G/B5G 的可重构智能超表面技术 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(1): 1-10.
- [15] 张建华, 刘元伟, 李福昌. 智能超表面技术在 5G/B5G 网络中的应用与挑战 [J]. 通信学报, 2020, 41(12): 1-14.

作者简介:

田洛, 高级工程师, 学士, 主要从事移动通信无线网络业务相关咨询工作; 秦璐, 工程师, 学士, 主要从事移动通信网络业务咨询、管理相关工作; 方东旭, 正高级工程师, 硕士, 主要从事移动通信无线网络业务优化工作。