面向5G网络覆盖增强的智能超表面技术应用研究

Research on Application of RIS for 5G Network Coverage Enhancement

莫潇豪(中国联通上海分公司,上海 200082)
Mo Xiaohao(China Unicom Shanghai Branch,Shanghai 200082,China)

摘　要:
智能超表面(RIS)可通过动态调控电磁单元状态重构无线传播环境,被视为下一代移动通信系统的关键技术之一。从智能超表面的基本原理出发,阐述其系统模型及应用场景,并针对网络覆盖增强场景进行了5G网络测试。通过RIS在地下停车场和非机动车库场景的测试,验证RIS能有效改善5G弱覆盖区域信号质量与用户体验,为RIS在5G现网的规模化应用提供了实测依据与优化方向。

关键词:
智能超表面;网络覆盖增强;实测验证
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.10.009
文章编号:1007-3043(2026)10-0053-05
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:
Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) can reconstruct the wireless propagation environment by dynamically adjusting the states of electromagnetic units, and is regarded as one of the key technologies for the next-generation mobile communication systems. Starting from the basic principles of RIS, the system model and application scenarios are expounded, and 5G network test for the network coverage enhancement scenario is conducted. Through tests of RIS in underground parking lots and non-motor vehicle garages, it is verified that RIS can effectively improve the signal quality and user experience in 5G weak coverage areas, providing practical test basis and optimization directions for the large-scale application of RIS in existing 5G networks.

Keywords:
RIS; Network coverage enhancement; Field test verification

引用格式:莫潇豪. 面向5G网络覆盖增强的智能超表面技术应用研究[J]. 邮电设计技术,2026(10):53-57.

1 概述

随着移动互联网和物联网的飞速发展,移动传输需求呈指数级增长。当前5G网络在sub-6 GHz频段已经实现了峰值千兆的传输速率,但高度密集的网络、高成本的硬件和日益增加的能源消耗会成为未来移动通信的关键问题。为了满足未来对绿色通信和可持续蜂窝网络发展的需求,使用智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface,RIS)重新配置无线传播环境的概念应运而生。RIS由大量低成本的无源器件组成,可以巧妙地反射电磁波以构建智能无线传播环境,是下一代移动通信的关键技术之一[1-3]。

近年来,在RIS的理论研究方面,研究人员提出了单元分组法、稀疏压缩感知法等信道估计方案[4-5],也通过交替优化框架解决波束优化的非凸问题[6-7]。在原型设计方面,清华大学、东南大学等团队已完成多频段、双极化的RIS原型开发[8-9],中国联通也在哈尔滨亚冬会实现了RIS的示范应用[10]。但目前面向5G现网的RIS测试验证还较少,尚未形成较为成熟的应用方案。

收稿日期:2026-08-19

2 智能超表面的基本原理

如图1所示，RIS主要由超材料表面和控制模块2个部分组成。RIS的基本原理是在超表面上集成有源元件（如开关二极管、变容二极管等）或可调节材料（如液晶、石墨烯等），通过改变外部激励，实现对电磁单元状态的动态调控，进而产生诸如非镜面反射、负折射、吸波、波束赋形以及极化转换等非常规的物理现象，最终实现对电磁波的动态调控[11]。

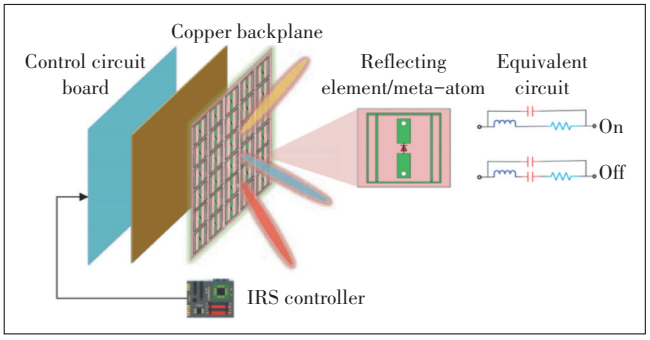


图1 智能超表面架构[12]

与传统的无线通信模型相比，基于RIS的通信系统是在基站和用户之间新增了RIS，用户的接收信号为：

$$y = \left(\boldsymbol{d} + \boldsymbol{G\Phi H}\right)^{\mathrm{H}} s + n \quad (1)$$

其中，$\boldsymbol{d}$表示基站与用户之间的信道，$\boldsymbol{G}$表示RIS与基站之间的信道，$\boldsymbol{H}$表示RIS与用户之间的信道，$\boldsymbol{\Phi}$表示RIS的相移矩阵，s表示基站的发送信号，n则为高斯白噪声。RIS的应用场景包括覆盖增强[10]、小区边缘速率提升与干扰抑制[13]、安全通信[14]、高精度定位[15]等（见图2）。

3 智能超表面在5G现网的应用测试

RIS的应用场景广泛，但高精度定位感知和无线携能网络等场景都需要与基站进行数据和信令交互，其大规模的推广应用还须等待后续标准的制定。因此，本文将面向覆盖增强场景，从地下停车场和非机动车库2个易有弱覆盖区域的场景出发，验证智能超表面在现网的覆盖增强能力。

3.1 智能超表面设备参数

本次测试选用的RIS设备参数如表1所示，其工作频率为3.5 GHz，单元规模为256个，支持2 bit相位调控和双极化模式。在实际应用时，设备通过千兆网口与控制终端建立连接，并将预设控制码本烧录至设备以实现波束角度的精准调控。需要说明的是，所使用的RIS设备的法线方向为0°，无线信号与法线的夹角向右为正，向左为负。该设备有效的角度调控范围为±60°。

3.2 在地下停车场场景的应用

本节选取了上海某大楼的地下停车场作为测试

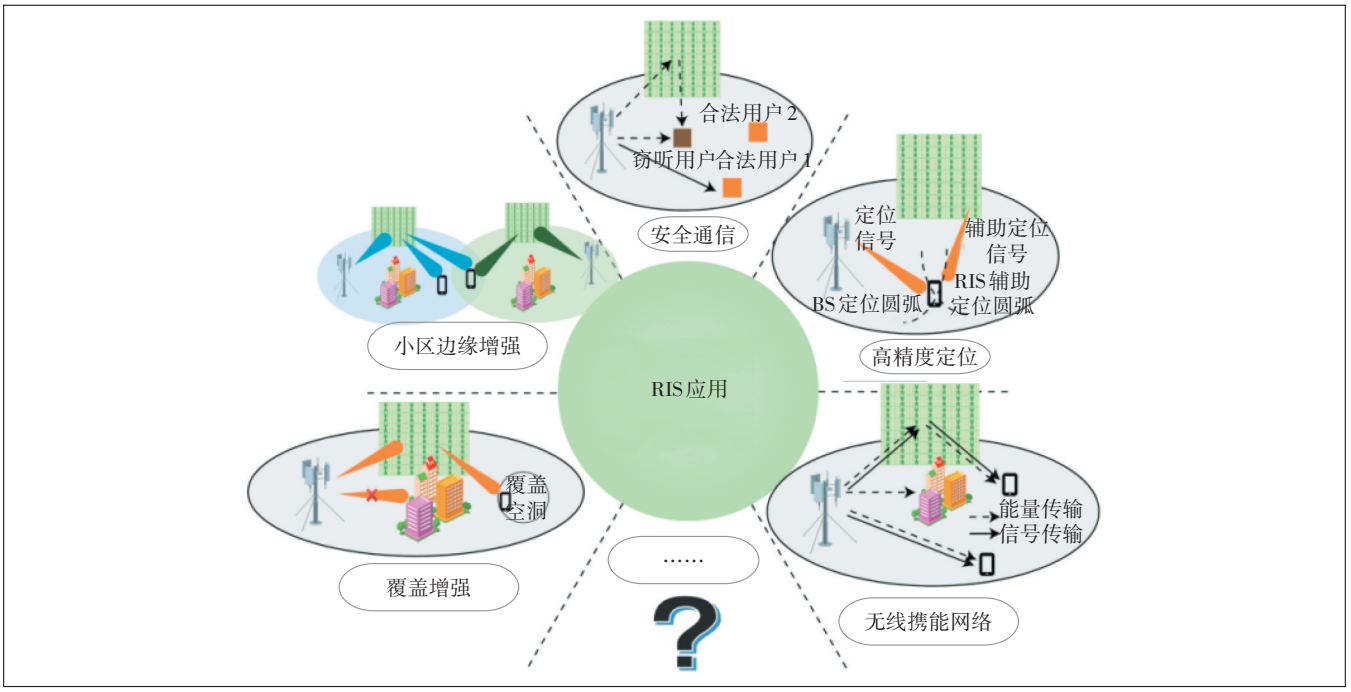


图2 智能超表面的典型应用

表1　智能超表面设备参数

设备参数	值
工作频率/GHz	3.5
阵列规模	16×16
调控分辨率/bit	2
极化类型	双极化
调控范围/°	±60
控制类型	千兆网口
平均功耗/W	6

场景，选择该场景的原因有以下2点：一是地下停车场是城市建筑的标配设施，具有一定的普遍性；二是车辆遮挡、墙体阻隔易导致信号衰减，容易造成5G弱覆盖，且在该场景下，用户需要实现导航定位、支付结算、应急通信等基础通信服务，弱覆盖问题将会直接影响用户体验。

该地下停车场已经部署了5G室分系统，整体覆盖良好，但仍有部分路段具有弱覆盖现象，实验前的测试（下称“前测”）结果如图3所示，存在信号强度小于−100 dBm的弱覆盖区域。

选定图3中的弱覆盖路段进行测试验证。根据前期室分信源建设的图纸以及现场查勘，确定覆盖该路段的信号来自于左边拐角的室分信源，因此选择将RIS部署在拐角处，把信号反射至所需覆盖路段，其场景俯视图如图4所示。经过测定，室分信源天线距离RIS板2 m，并选取5个定点进行测试（C1~C5），主要测试步骤如下。

a）首先进行部署前测试，当不放置RIS时，采用

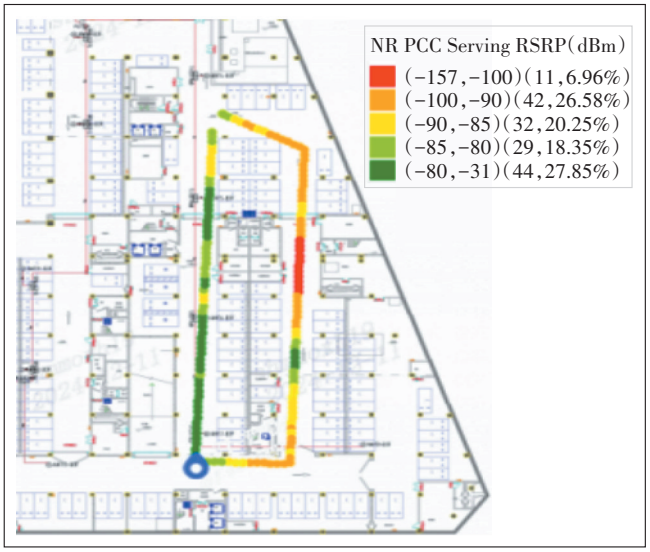


图3　地下停车场前测数据

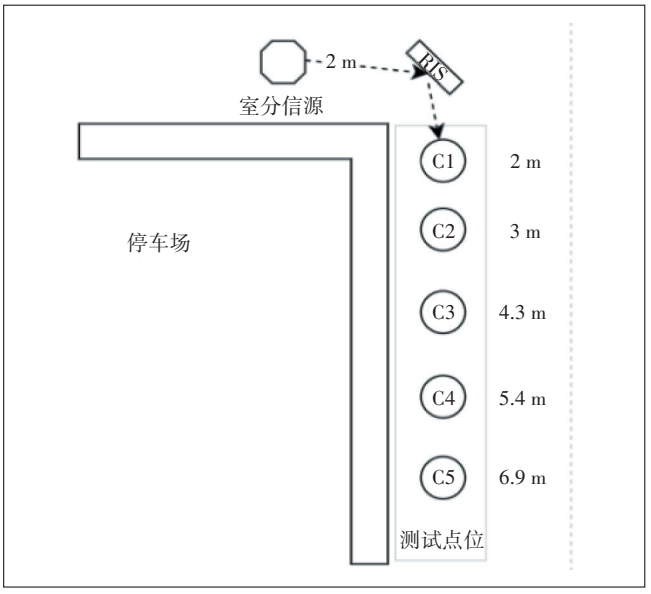


图4　地下停车场测试场景

PHU软件在各点位持续测试30 s，测试网络覆盖质量（RSRP、SINR）和体验速率（上/下行速率、MCS）等指标。

b）根据信号源天线位置调整RIS码本，将RIS的反射角度设置为120°。

c）部署RIS后，在每个测试点位上进行测试，再次记录网络性能指标。

该场景下得到的测试数据如表2所示。测试结果表明，部署RIS后，5个点位的RSRP平均提升8.0 dB，

表2　地下停车场RIS增强测试数据

部署前后	点位	覆盖质量		体验速率/(Mbit/s)			
		RSRP/dBm	SINR/dB	Thr. DL	Thr. UL	MCS. DL	MCS. UL
部署前	C1	−85.40	31.28	316.14	42.83	20.95	16.52
	C2	−87.80	30.37	330.07	31.82	21.10	17.23
	C3	−91.60	27.97	271.65	19.74	19.30	14.42
	C4	−92.93	26.47	318.91	19.74	19.72	16.76
	C5	−98.95	21.45	306.58	19.81	19.56	18.12
部署后	C1	−78.63	33.60	310.98	76.55	20.21	24.13
	C2	−81.12	33.05	325.12	61.58	21.17	23.78
	C3	−84.52	31.56	358.45	38.64	21.18	20.13
	C4	−85.38	31.56	308.51	28.96	20.20	17.66
	C5	−87.04	30.41	319.37	29.77	20.00	18.50
增益	C1	6.77	2.32	−5.16	33.72	−0.74	7.61
	C2	6.68	2.68	−4.95	29.76	0.07	6.55
	C3	7.08	3.59	86.80	18.90	1.88	5.71
	C4	7.55	5.09	−10.40	9.22	0.48	0.90
	C5	11.91	8.96	12.79	9.96	0.44	0.38

SINR平均提升4.5 dB，下行速率平均提升15.8 Mbit/s，上行速率平均提升20.3 Mbit/s，有效提升了弱覆盖区域的信号强度和用户体验。同时，C1、C2和C4点位的下行速率有所下降，经分析，C1点位是由于MCS调制阶数下降导致，而C2和C4点位是因为下行调度次数不足，与测试终端和测速服务器相关，属于异常数据。

3.3 在非机动车库场景的应用

本节选取上海某居民区的地下非机动车库作为测试场景，该类场景是典型的网络弱覆盖场景。地下非机动车库多为封闭空间，墙体厚实且无专门的室分系统，信号覆盖普遍较差。此类居民区配套设施在城市中分布广泛，相应业务需求包括基础语音通信、应急呼叫及简单数据传输，覆盖优化需求迫切。

该非机动车地下车库呈“L”型，内部无室分覆盖，通向外部的入口区域覆盖良好，深处区域基本无5G网络覆盖，甚至呈现脱网状态（见图5）。针对该类场景，通过部署RIS将外部信号引入地下非机动车库，达到增强信号强度的目的。

在实际测试中，将RIS部署在“L”型车库的拐角位置，该点位选择的核心原则是兼顾2个方向的信号覆盖，最大化利用RIS的反射角度。测试选取9个定点，覆盖车库入口、中部及深处区域，点位间距根据空间布局设定为2~5.2 m（见图6）。

测试步骤参照3.2节执行，同步记录覆盖质量与

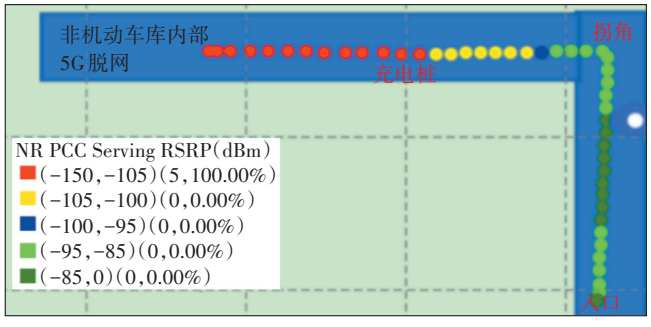


图5 非机动车库前测结果

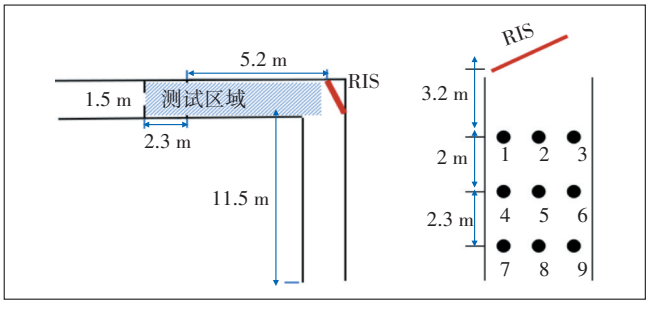


图6 非机动车库测试场景

体验速率指标，测试结果如表3所示。从表3可以看出，RIS的引入可使2处脱网的点位重新入网，其余7个点位RSRP的平均增益为3.71 dB，SINR的平均增益为1.11 dB，下行速率平均提升约8.05 Mbit/s，上行速率平均提升3.00 Mbit/s，其中4号点位提升最为明显，RSRP的增益为8.51 dB，下行速率提升34.69 Mbit/s。非机动车库2号、7号点位的指标下降，源于车库内非机动车流动导致的信号遮挡以及“L”型结构带来的反射信号衰减，长时间监测显示脱网点位未再次断连，异常指标未持续恶化。

3.4 测试总结分析

在上述2个场景的测试过程中，充分验证RIS在5G弱覆盖场景的应用优势。一方面，网络覆盖改善效果显著，地下停车场场景RSRP平均提升8.0 dB，成功解决非机动车库的脱网问题，可快速填补覆盖盲区；

表3 非机动车库RIS增强测试数据

部署前后	点位	覆盖质量			体验速率/(Mbit/s)		RANK
		RSRP/dBm	SINR/dB	CQI	Thr. DL	Thr. UL	
部署前	1	-105.66	8.65	11.4 0	106.84	2.58	2.47
	2	-97.00	11.64	12.83	130.20	14.20	2.55
	3	-102.07	4.52	12.50	106.39	20.19	2.28
	4	-116.25	1.58	10.83	53.27	1.19	1.52
	5	5G脱网					
	6	-111.57	3.55	10.00	29.80	0.23	2.30
	7	-115.53	5.88	11.3	42.63	0.50	1.13
	8	5G脱网					
	9	-117.42	4.48	11.33	52.33	0.36	2.29
部署后	1	-104.38	6.52	12.38	114.05	5.73	2.80
	2	-96.72	6.49	14.09	118.58	23.15	2.33
	3	-99.39	7.41	14.05	101.85	19.76	2.03
	4	-107.74	5.33	10.14	87.96	4.99	2.75
	5	-105.16	8.09	12.84	92.89	6.72	2.85
	6	-109.29	7.56	10.39	78.32	2.69	2.45
	7	-111.11	7.07	9.34	14.22	2.38	1.27
	8	-109.01	8.88	10.08	73.49	3.10	2.18
	9	-110.92	7.66	9.99	62.85	1.56	1.79
增益	1	1.28	-2.13	0.95	7.21	3.15	0.33
	2	0.28	-5.15	1.26	-11.62	8.95	-0.22
	3	2.68	2.89	1.55	-4.54	-0.43	-0.25
	4	8.51	3.75	-0.69	34.69	3.8	1.23
	5	5G重新入网					
	6	2.28	4.01	0.39	48.52	2.46	0.15
	7	4.42	1.19	-1.96	-28.41	1.88	0.14
	8	5G重新入网					
	9	6.50	3.18	-1.34	10.52	1.20	-0.50

另一方面，RIS部署灵活且功耗低，可快速部署于各种建筑表面，可使用多种通信体制，且平均功耗仅6 W，远低于传统通信辅助设备，但也存在着如下局限性。

a）静态部署适配性有限。本次测试采用固定码本配置，目前RIS无法根据实时信号变化动态调整参数，且需要根据当前的几何模型，计算RIS的码本和方位角。

b）覆盖范围存在限制。受设备阵列规模与无源特性影响，RIS的有效覆盖长度和宽度有限，无法满足大型地下空间的全覆盖需求。

c）增益效果依赖入射信号强度。地下停车场场景的RIS增益明显大于非机动车库场景，原因是到达RIS处信号的大小不同。由于RIS是无源器件，无法主动放大信号，到达RIS处的信号强度与测试点位的信号强度的落差越大，增益就会越大。

d）RIS原型设备成本偏高。目前，RIS技术仍处于原型验证阶段，尚未完成能力与形态的标准化定型，导致现有设备定制化程度较高，难以实现大规模量产，进而使得设备成本高于传统直放站。

4 总结

本文围绕RIS在5G网络覆盖增强中的应用展开研究，通过现网实测验证了RIS技术的实用价值。研究结果表明：RIS在5G现网中覆盖增强效果明显，能有效解决地下停车场、非机动车库等弱覆盖场景的覆盖问题，同时指出当前RIS应用存在静态部署无法与基站协同调控、覆盖范围有限等局限性，须通过后续技术升级与标准制定突破瓶颈。本文实测验证了RIS在5G现网应用的可行性，后续还须围绕设备动态化、调控协同化、标准统一化方向进行研究，推动RIS从现网试点走向规模化落地。

参考文献：

[1] Huang C W, Zappone A, Alexandropoulos G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 4157-4170.

[2] Basar E, Di Renzo M, De Rosny J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE Access, 2019, 7: 116753-116773.

[3] Di Renzo M, Zappone A, Debbah M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2450-2525.

[4] Wei X H, Shen D C, Dai L L. Channel estimation for RIS assisted wireless communications—part II: an improved solution based on double-structured sparsity [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(5): 1403-1407.

[5] Mo X H, Gui L, Sang X C, et al. Wideband sparse cascaded channel estimation for RIS-assisted wireless systems [C]//2022 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Nanjing: IEEE, 2022: 495-500.

[6] Wu Q Q, Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5394-5409.

[7] Liu R, Li M, Liu Q, et al. Joint symbol-level precoding and reflecting designs for IRS-enhanced MU-MISO systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(2): 798-811.

[8] Dai L L, Wang B C, Wang M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results [J]. IEEE Access, 2020, 8: 45913-45923.

[9] Chen X Y, Ke J C, Tang W K, et al. Design and implementation of MIMO transmission based on dual-polarized reconfigurable intelligent surface [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(10): 2155-2159.

[10] 冀岩琦，孙雷剑，王贵峰. 智能超表面技术在哈尔滨亚冬会示范验证与应用研究[J]. 通信管理与技术，2025(1)：32-37.

[11] Liaskos C, Nie S, Tsioliaridou A, et al. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 162-169.

[12] Wu Q Q, Zhang R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network [J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.

[13] Mo X H, Gui L, Ying K, et al. Low complexity joint hybrid precoding for RIS-assisted wideband wireless systems [J]. Digital Signal Processing, 2023, 140: 104138.

[14] Hong S, Pan C H, Ren H, et al, Robust transmission design for intelligent reflecting surface-aided secure communication systems with imperfect cascaded CSI [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(4): 2487-2501.

[15] Sang X C, Gui L, Ying K, et al. Cooperative integrated communication and positioning design via rate-splitting multiple access and channel estimation enhancement [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2025, 24(3): 1786-1800.

作者简介：
莫潇豪，工程师，博士，主要研究方向为6G前沿技术、智能超表面、超大天线阵列和稀疏信号处理等。

