



智能超表面技术 白皮书

智能超表面技术联盟 (RISTA)

2023年2月



白皮书主要贡献单位及贡献者详见下表，排名不分先后，按单位拼音顺序如下所示。

单位

姓名

北京交通大学，章嘉懿、艾渤
北京联想软件有限公司，包廷南
北京小米移动软件有限公司，池连刚、段高明
北京邮电大学，张建华、张宇翔、王莹
重庆邮电大学，李职杜
电子科技大学，袁晓军、李思贤、蔡畅、闫文静
东南大学，金石、程强、潘存华、唐万恺、陈伟聪、王静赫
罗德与施瓦茨，王立磊、Heinz Mellein
南昌大学，余礼苏、王玉皞、王正海、刘超良、郭吉昌
南京大耀信息科技有限公司，杨怿凡
南京航空航天大学，周福辉，吴雨航，吴启晖
南京邮电大学，吴伟、王梓
National and Kapodistrian University of Athens, George C. Alexandropoulos
Paris-Saclay University, Marco Di Renzo
Queen Mary University of London, 刘元玮
清华大学，杨帆、戴凌龙、许慎恒
上海交通大学，陈文、武庆庆、李振东
深圳市大数据研究院，沈超
是德科技，封翔
天津工业大学，戈立军
Technology Innovation Institute, 何继光, Aymen Fakhreddine, George C. Alexandropoulos
University of Bologna, Vittorio Degli Esposti
维沃软件技术有限公司，杨坤、姜大洁、秦飞
西安电子科技大学，李龙、张顺
西北工业大学，白旭东
香港中文大学（深圳），沈闾明、张纵辉
浙江大学，黄崇文、杨照辉、陈晓明、张朝阳
中国电信，孙震强、李南希
中国联通，刘秋妍、李小双、张忠皓、李福昌
中国移动，袁弋非、苏鑫
中信科通信股份有限公司，张鑫、孙文龙、苏昕、彭莹
中兴通讯，赵亚军、菅梦楠、陈艺骥、窦建武、张楠、郑爽、徐汉青、张琪

致谢 (Acknowledgement)

感谢智能超表面技术联盟 (RISTA) 全体成员单位的大力支持与积极贡献。

版权所有 ©智能超表面技术联盟 RISTA 2023

DOI: 10.12142/RISTA.202302001

摘要

智能超表面（RIS）是一种基础性创新技术，涉及超材料、电磁信息、界面电磁、电磁计算、控制论、无线通信等多学科内容。近年来，大量的理论创新和原型测试工作论证了智能超表面技术在低成本、低功耗和易部署等方面具有优势，并在 5G 和未来 6G 网络中都具有众多潜在机会和广阔的应用前景。本白皮书基于移动通信网络的发展趋势与挑战，探讨了智能超表面发展的机遇及其在 5G/6G 阶段的潜在应用；全面梳理了智能超表面的技术体系，包括基础理论、硬件结构与调控、系统建模与关键技术等多个方面；并对反射透射一体式智能超表面、有源智能超表面、基于 RIS 的新型大规模天线、基于 RIS 的收发机、基于 RIS 的空中计算等新型智能超表面进行了专门介绍；并对智能超表面项目研发、测试验证、标准生态的发展现状进行深度剖析。最后，从演进发展、标准产业和生态构建三个角度，探讨智能超表面技术的演进趋势。

目录

1.	概述	4
1.1.	移动通信网络发展趋势与挑战	4
1.2.	智能超表面概念及发展历程	5
2.	智能超表面应用	7
2.1.	5G 潜在应用	7
2.1.1.	覆盖补盲	7
2.1.2.	多流增速	8
2.2.	6G 潜在应用	9
2.2.1.	高频通信	9
2.2.2.	空间通信	10
2.2.3.	三维定位	12
2.2.4.	物联网	12
2.2.5.	无线边缘计算	13
2.2.6.	物理层安全	13
2.2.7.	信能同传	14
2.2.8.	频谱感知与共享	15
2.2.9.	全双工通信	17
2.2.10.	多小区通信系统	17
2.2.11.	多组多播传输	17
2.2.12.	轨道角动量	18
2.2.13.	语义通信	18
3.	智能超表面基础理论	20
3.1.	超材料理论	20
3.2.	电磁信息论	20
3.3.	界面电磁理论	21
4.	智能超表面硬件结构及调控	23
4.1.	智能超表面系统架构	23
4.2.	智能超表面类型	24
4.3.	智能超表面阵面设计	24
4.3.1.	电磁单元设计与优化	25
4.3.2.	阵列全波仿真与加工测试	25
4.4.	控制模块设计	26
4.4.1.	控制模块的码表提取	26
4.4.2.	控制模块的响应速度	27
4.4.3.	控制模块潜在功能需求	27
5.	智能超表面系统建模与关键技术	28
5.1.	RIS 辅助传输信号模型	28
5.2.	RIS 信道建模方法	28
5.2.1.	基于几何的统计性信道建模方法	28
5.2.2.	基于确定性的建模方法	30
5.2.3.	混合信道的建模方法及 RIS 物理模型抽象	32

5.3.	智能超表面辅助传输关键技术	34
5.3.1.	信道估计与反馈	34
5.3.2.	波束赋形	36
5.3.3.	AI 使能通信	39
5.4.	智能超表面增强多址技术	44
5.4.1.	RIS 辅助 TDMA 系统	44
5.4.2.	RIS 辅助 NOMA 系统	44
5.4.3.	RIS 辅助 OTFS 系统	45
5.4.4.	RIS 辅助分块多址接入系统	46
5.5.	智能超表面网络部署	46
5.5.1.	RIS 网络部署模式对比	47
5.5.2.	RIS 网络部署面临的挑战	47
6.	新型智能超表面	49
6.1.	反射和透射一体的智能超表面	49
6.1.1.	STAR 硬件设计与调控	49
6.1.2.	基于 STARS 的三维定位	50
6.2.	有源智能超表面	51
6.3.	基于 RIS 的新型大规模天线	52
6.4.	基于 RIS 的收发机	53
6.5.	RIS 使能空中计算	54
7.	智能超表面技术现状	57
7.1.	项目与研究	57
7.2.	测试与验证	59
7.2.1.	方法与环境	59
7.2.2.	测试与验证	62
7.3.	标准演进与生态构建	65
8.	智能超表面趋势展望	67
8.1.	迭代演进, 6G 技术 5G 化螺旋发展	67
8.2.	标准先行, 分阶段推进产业落地	67
8.3.	开放共赢, 构建融合发展生态圈	68
9.	结论	69
	参考文献	70

1. 概述

二十大报告指出，高质量发展是全面建设社会主义现代化国家的首要任务。移动通信网络是支持百行千业数字化转型升级、推动经济发展质量变革、效率变革、动力变革的关键基础设施。“高速泛在、天地一体、云网融合、智能敏捷、绿色低碳、安全可控”的智能化综合性数字信息基础设施是支撑经济社会发展的信息大动脉和数字新底座。但高度复杂的网络、高成本的硬件和日益增加的能源消耗成为未来移动通信面临的关键问题。

智能超表面技术具有低成本、低能耗、可编程、易部署等特点，通过构建智能可控无线环境，有机会突破传统无线通信的约束，给未来移动通信网络带来一种全新的范式，具有广阔的技术与产业前景。在当前和未来的落地应用中，需要厘清智能超表面技术在理论模型、应用技术、工程化研究和标准化推进等方面的面临诸多问题与挑战，需要包括智能超表面技术联盟（RISTA）、IMT-2030（6G）推进组在内的产业组织联合“产学研用”全产业链，共同推进智能超表面的技术研究、标准化及产业落地。

1.1. 移动通信网络发展趋势与挑战

5G 商用化进程启动已满三年，在“十四五”规划纲要的指导下，5G 网络的发展速度远超同期的 3G 网络和 4G 网络。截至 2022 年 6 月，全球已有 86 个国家和地区部署 220 多张 5G 商用网络，为 5 亿用户提供 5G 网络服务；截至 2022 年 11 月，中国已累计开通 5G 基站超 228.7 万个¹，所有地级市城区、县城城区和 96% 的乡镇镇区实现 5G 网络覆盖。5G 网络作为“高速泛在、云网融合、智能敏捷、安全可控”的智能化综合性数字信息基础设施，建设运营服务每年直接带动经济总产出超 1 万亿元，间接带动经济总产出超 3 万亿元，是经济社会发展畅通信息大动脉和数字新底座。在标准演进方面，3GPP 第 2 版 5G 国际标准（3GPP Rel-16）以及第 3 版 5G 国际标准（3GPP Rel-17）已陆续于 2020 年 6 月和 2022 年 6 月冻结，聚焦基础功能的进一步增强、新特性引入、垂直行业扩展等主要方向。

随着 5G 网络建设的逐步加速，其对社会和生产所带来的改变将逐步明朗，但用户的需求不断演进，更优质的业务体验，更多垂直行业业务的拓展，都将驱动移动通信网络不断向前发展。未来，数字孪生、全息交互、感知互联等新型业务需求对移动网络覆盖深度、泛在接入能力、空口传输速率、端到端时延、设备连接数以及内生智能等级等方面提出了更高要求。与此同时，在国家绿色转型和新发展格局下，“碳达峰、碳中和”等人与自然和谐发展也已经成为移动通信网络发展的新目标。因此，工作频段更高、天线规模更大、设备能耗更低、智能水平更强是下一代未来移动通信网络发展的重要趋势。与此同时，移动通信网络发展也面临诸多挑战。

（1）高频信道环境恶劣：相较于低频信号，高频信号的传播与穿透损耗较大，受障碍物

¹ 数据来源：中国政府网，http://www.gov.cn/shuju/2022-12/30/content_5734174.htm

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。

(2) 天线规模发展受限：伴随天线规模的增加，天线制造工艺与成本、信道测量与建模难度、信号处理运算量、参考信号开销等方面都会显著增加，对天线系统的一体化和集成度提出了更高的要求。因此，超大规模天线技术走向实用化的前提是低成本、低功耗、高可靠和易部署^[1]。

(3) 能耗负担日益加剧：目前 5G 基站能耗是 4G 基站能耗的数倍。未来，全社会数字化转型的加速将进一步加大对移动通信网络的算力需求，如何有效降低设备能耗是影响下一代无线网络技术选型的关键因素之一。

(4) 被动适应无线环境：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。内生智能、动态重构等网络需求也逐渐从核心网侧下沉到无线接入侧。按需智能动态重构无线信道环境将是构建下一代移动通信网络新范式的核心问题。

1.2. 智能超表面概念及发展历程

近年来，智能超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）因其能够灵活操控信道环境的电磁特性，一经出现就吸引了学界和业界广泛的关注。RIS 通常由大量精心设计的电磁单元排列组成，通过给电磁单元上的可调元件施加控制信号，可以动态地控制这些电磁单元的电磁性质，进而实现以可编程的方式对空间电磁波进行主动的智能调控，形成幅度、相位、极化和频率可控制的电磁场，如图 1 所示。RIS 的引入，使得无线传播环境从被动适应变为主动可控，从而构建了智能无线环境^[2]。另外，作为超材料的二维实现，RIS 天然具有低成本、低复杂度和易部署的特性，有机会用以解决未来移动通信网络发展面临的需求与挑战。。

从 2020 年开始，国内学术与产业界联合，开展了一系列的 RIS 产业推进活动，极大促进了 RIS 的技术研究与工程化进展。2020 年 6 月，IMT-2030（6G）推进组无线技术组成立了“RIS 任务组”。同年 9 月，中兴通讯和中国联通联合国内外十多家企业和高校，在中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）TC5-WG6 完成“RIS 研究项目”立项。2021 年 9 月 17 日，IMT-2030（6G）推进组在 6G 研讨会 RIS 分论坛上正式发布业界首个《智能超表面技术研究报告》。9 月 24 日，中兴通讯、东南大学、中国联通等联合举办“第一届智能超表面技术论坛”²大会，会议主题为“使能智能无线环境，重构未来移动通信网络”^[3]。2022 年 4 月 7 日，智能超表面技术联盟（RIS Tech Alliance, RISTA）³成立暨第一届会员大会在北京顺利召开，标志着智能超表面技术联盟正式成立^[4]。

目前，业界在 RIS 的材料工艺、理论研究、实现算法及工程试验等方面已有一定积累与进展。作为一个极具潜力的方向，RIS 有机会在 5G-Advanced（5G-A）网络中提前落地，并为未来 6G 网络带来全新的网络范式^[5]。近期，产业界在现网中针对 RIS 技术进行了一系

²智能超表面技术论坛，<http://www.risforum.com>

³智能超表面技术联盟，<http://www.risalliance.com>

列的测试验证工作^{[6]-[10]}，众多测试结果表明，RIS 的部署可以有效提高无线网络的容量和覆盖性能。

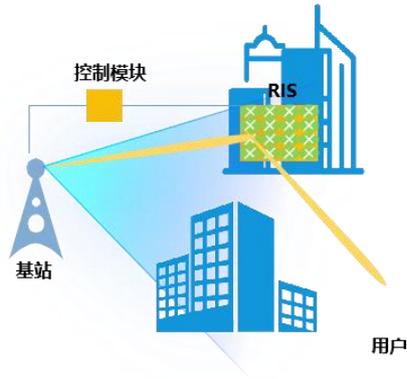


图 1 智能超表面概念示意图

RIS 作为一种动态电磁参数调控技术，在多个领域已经初步展示了其强大的性能。但是，RIS 在规模商用前仍然在技术研究、工程应用、网络部署和标准化等方面面临诸多问题与挑战，需要包括智能超表面技术联盟（RISTA）、IMT-2030（6G）推进组在内的产业组织联合“产学研用”全产业链，共同推进智能超表面的技术研究、标准化及产业落地。

2. 智能超表面应用

智能超表面具备与波形、调制、编码、多址等大多数底层技术解耦的特性，具备 6G 技术 5G 阶段应用的可能。由于 5G 网络已经大规模商用部署，要最小化智能超表面对 5G 现网的改造需求。因此，在 5G-A 阶段，面向 5G 网络精细化运营维护、深度覆盖和提速扩容的需求，基于智能超表面辅助的 5G 网络覆盖补盲和多流增速将是典型应用方式。面向 6G，智能超表面具有与毫米波/太赫兹高频通信、通感一体、全双工等多个前沿技术领域相结合的可能。本白皮书在前期研究的基础上，进一步根据智能超表面技术的发展阶段以及 5G 和 6G 网络演进趋势，分析智能超表面在 5G 和 6G 网络中的潜在应用。

2.1. 5G 潜在应用

2.1.1. 覆盖补盲

传统的蜂窝部署可能存在覆盖空洞区域，如在高大建筑物的阴影区域，在密集城区场景下的街道信号覆盖，或者室内外和公共交通工具内外的信号接驳等场景。针对上述场景，可将 RIS 部署在基站与覆盖盲区之间，通过有效的反射/透射使传输信号到达覆盖盲区，从而提升覆盖性能。

(1) 室外宏站覆盖补盲

在室外宏站覆盖场景中，由于基站与终端之间存在建筑物、植被等障碍物，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，产生覆盖盲区。



图 2 基于 RIS 辅助的室外宏站覆盖补盲

针对上述场景，部署轻量化静态智能超表面设备将是一种低成本、低功耗、易部署的解决方案。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，如图 2 所示。

(2) 室外覆盖室内增强

在室外覆盖室内场景中，可将具有透射增强能力的智能超表面透明薄膜形态设备贴在门窗玻璃上，通过控制单元按需改变智能超表面的透射特性，从而形成期望的信号传输方向，

提升室外覆盖室内性能，如图 3 所示。

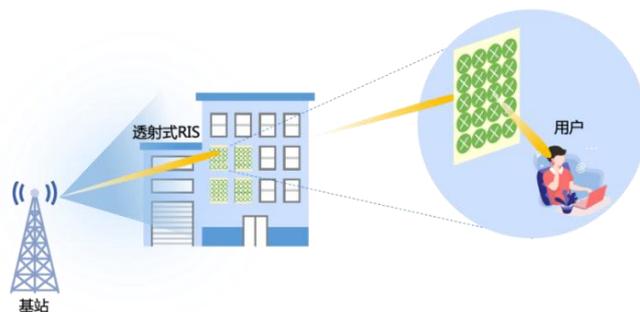


图 3 基于 RIS 辅助的室外宏站覆盖室内增强

(3) 室内覆盖补盲

室内场景中，由于障碍物遮挡、楼道转角遮挡等问题，同样会产生覆盖盲区。与室外补盲相似，通过在室内环境中部署智能超反射表面及控制单元，可实现虚拟视距传输，有效提升室内覆盖性能，如图 4 所示。

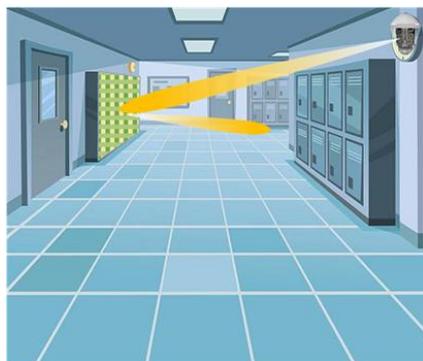


图 4 基于 RIS 辅助的室内覆盖补盲

2.1.2. 多流增速

对于业务密集的热点区域，可以通过 RIS 增加额外的无线通信路径与信道子空间，收发天线阵列间信道的空间相关特性将会得到很大的改善，可用于数据传输的子空间数目得到增加，从而提高信号传输的复用增益，显著提升系统及用户的传输性能。

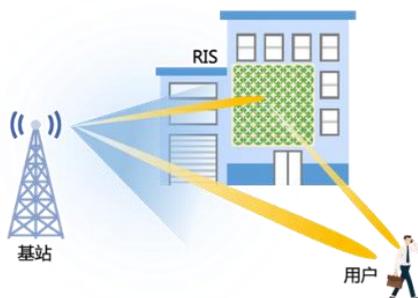


图 5 基于 RIS 辅助的多流增速

对于小区边缘区域，有用信号电平较弱且缺乏多径环境，终端侧的多天线能力无法充分发挥作用。通过在收发端之间增加智能超表面设备，为小区边缘用户按需创造复散射环境，可有效利用终端多天线能力，提升小区边缘用户的传输性能。

2.2. 6G 潜在应用

2.2.1. 高频通信

2.2.1.1. 毫米波和太赫兹通信

高频毫米波和太赫兹是 6G 潜在工作频段。高频信号最明显的特征就是路径损耗较大，受障碍物遮挡、雨雪天气、环境吸收等影响大。依据 3GPP TR 38.901 无线信道损耗模型，同等条件下 28GHz 毫米波信号的路径传输损耗比 3.5GHz 信号的路径损耗增大约 18dB。在穿透损耗方面，毫米波穿透损耗 3GPP 理论值及测试值如表 1 所示，对于低频毫米波信号而言，混凝土和红外反射玻璃材质的障碍物几乎无法穿透，树叶、人体、车体等障碍物对低频毫米波信号的穿透损耗均在 10dB 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，只有在普通玻璃和木门等少数材质障碍物条件下，低频毫米波信号的穿透损耗可能会大于 5dB 小于 10dB，仍然会导致覆盖范围内的受遮挡区域通信质量严重下降。而对于高频毫米波和太赫兹频段，障碍物会对无线信号造成数十 dB 的传播损耗。

表 1 高频信号穿透损耗 3GPP 理论值及实测值

材料	3GPP 高频信号穿透损耗模型 [dB]	毫米波穿透损耗理论值 [dB]	毫米波穿透损耗测试值 [dB]
标准多窗格玻璃	$L_{\text{玻璃}}=2+0.2f$	8-62	>5
红外反射玻璃	$L_{\text{红外反射玻璃}}=23+0.3f$	32-113	---
混凝土	$L_{\text{混凝土}}=5+4f$	125-1205	无法穿透
木头	$L_{\text{木头}}=4.85+0.12f$	8.45-40.85	6
树叶	---	---	16-20
人体	---	---	11-28
车体	---	---	17-23

为克服高频通信严重的路径损耗，基站和终端用户通常配备大规模天线阵列实现高增益的定向传输。强指向性的波束和信道稀疏性导致信道矩阵存在秩亏问题。在极端的强视距传播场景，信道秩甚至会降至 1，无法发挥多天线系统的空间复用增益。为解决高频通信的信道秩亏问题，可在基站和终端用户之间部署分布式智能超表面，利用智能超表面的信道定制能力^{[11]-[12]}，灵活塑造秩可调的信道矩阵，提升系统空间复用能力。未来，随着超材料天线的应用推广，智能超表面设备形态更加丰富多样，例如建筑物外墙装饰层，低成本、低功耗、易部署的智能超表面设备将成为高频通信提供有效的补充和延伸。

2.2.1.2. 可见光通信

可见光通信技术虽发展迅速，但同时也面临着一些亟待解决的关键性问题，通过利用 RIS 技术，可以有效提高可见光通信网络的性能。

- (1) 反射 RIS 辅助大规模接入可见光通信

在可见光通信系统中，在收发端之间除视距链路外，通过部署智能超表面，形成反射链路并实现对波束进行动态按需调控，可增强接收信号质量，提升通信容量，减少多用户通信之间的信号干扰^[13]，如图 6 所示。

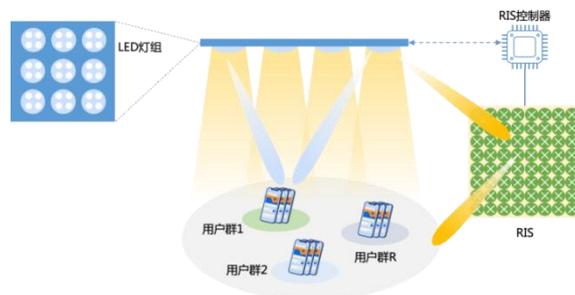


图 6 反射 RIS 辅助大规模接入可见光通信

(2) 透射 RIS 辅助可见光通信

透射 RIS 可加在 LED 信号发射端以及信号接收端，如图 7 和图 8 所示，基于液晶或智能透镜材料设计的 RIS，可以灵活调控信号方向，减少干扰信号的影响^{[14]-[15]}。而同时支持透射和反射能力的 RIS 阵面，可为非正交多址接入技术更好地在可见光通信中发挥作用提供了有利条件，有效提高通信系统总的通信容量。

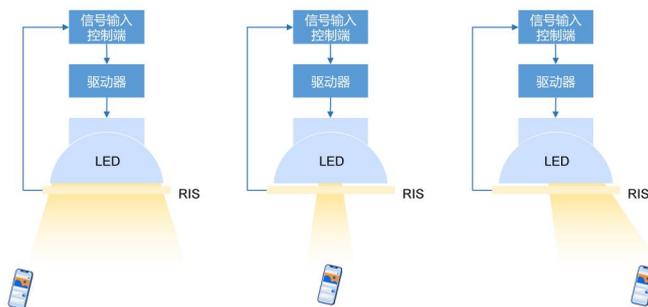


图 7 透射 RIS 辅助可见光通信

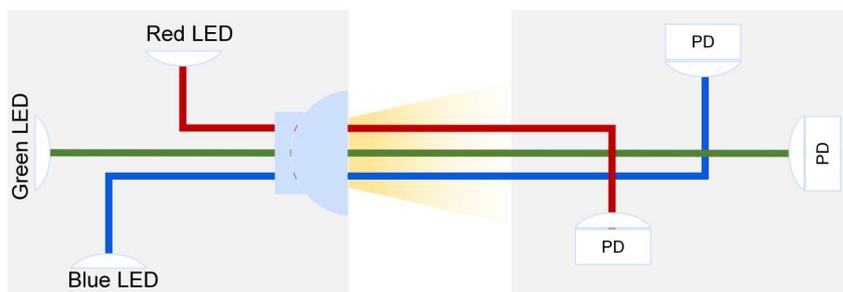


图 8 透射 RIS 辅助波分复用可见光通信

2.2.2. 空间通信

非地面网络 (Non Terrestrial Network, NTN) 空间通信是地面蜂窝通信技术的重要补充，利用卫星通信网络与地面 5G 及 6G 网络进行深度的融合，从而不受地形地貌的限制提供无处不在的覆盖能力，尤其是传统地面网络极难到达的地区，实现空、天、地、海多维空间的

一体化网络连通具有重要的现实意义^[16]。

2.2.2.1. 卫星通信

在卫星通信系统中，由于卫星链路传输距离较远，需要足够的发射功率与天线增益才能抵消信号传播过程中的路损。然而，为了避免对其他区域造成干扰，又需要在目标区域以外的区域，信号增益足够低。将 RIS 应用于卫星通信，可以替代传统相控阵，以更轻的质量、更小的体积实现更大规模的天线阵列。使用具备储能功能的 RIS，还可以取代卫星上的太阳能电池板，储存日照辐射的能量，用于信号发射。除此之外，RIS 还可以用于毫米波卫星通信系统的增强信号覆盖。

为了实现 5G 及 6G 所具备的低时延星载通信，就需如 STARLINK 一样构建低轨卫星移动通信与空间互联网系统，这样庞大的低轨卫星星座采用传统航天运载体系显然难以在短周期内实现，必须要采用堆叠式卫星架构，一般单箭需达 60 星，以最大化地发挥运载效能，海量的卫星部署对低成本、低面密度和超低剖面的相控阵系统之需求愈发强烈。基于现有 RIS 系统的相控阵天线由于摒弃了传统相控阵中单元相移所需要的 T/R 组件，可以极大地降低系统的成本及重量，其中，实现馈电调相一体化的集成式超低剖面自激励 RIS 系统^[17]，对推动低轨巨型星座的快速部署具有重要的意义。

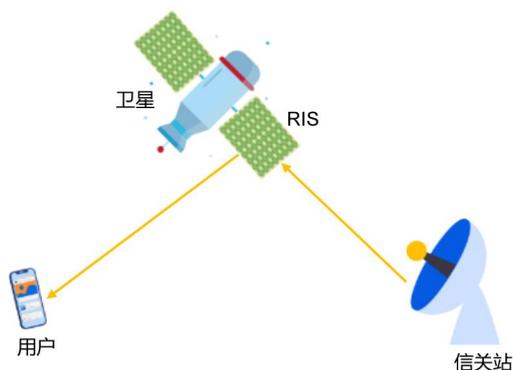


图 9 基于 RIS 的卫星通信场景

2.2.2.2. 无人机通信

无人机由于具有成本低、移动性高、覆盖范围广以及与用户短程视距链路通信等优势，在无线通信领域发挥着重要作用。其中，无人机既可以充当空中基站，也可以充当中继，来实现信息的传递。然而，在实际场景中，由于城市环境过于复杂，不但衰减较大，障碍物以及窃听者的存在会严重降低无人机通信网络的通信质量和安全率，从而产生安全风险。将 RIS 技术与无人机相结合，利用 RIS 反射信息的特点，可以在该通信网络中构建新的信息传输路径、并扩大信号的覆盖范围，极大简化无人机通信的信道建模，减小算法复杂度；同时借助其被动波束赋形的特点，通过优化无人机的信号发射功率、飞行轨迹以及 RIS 相移，能够进一步提升无人机通信的传输性能，或是分用户实现信号叠加和信号削弱，进而实现安全通信^{[18]-[19]}。

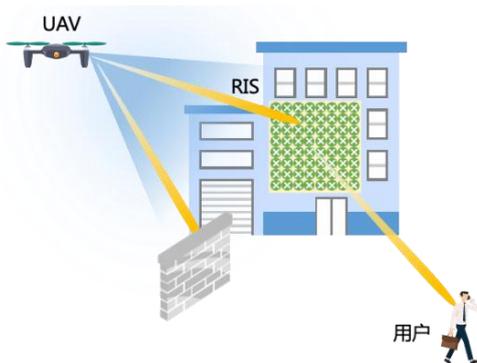
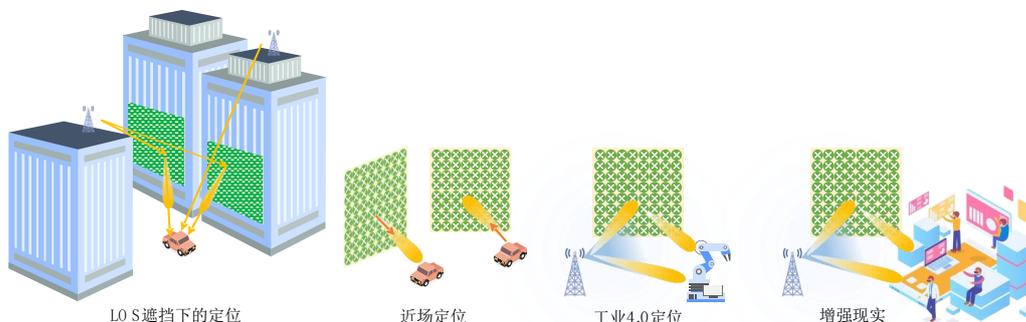


图 10 基于 RIS 辅助的无人机通信场景

2.2.3. 三维定位

在三维定位中，RIS 不仅可以与基站一起充当参考节点，还能提供虚拟视距（Light of Sight, LoS）路径，从而实现精准定位。在自动驾驶中，如图 11 所示，即使 LoS 路径被暂时阻断，RIS 也能保证不间断的定位及通信服务，而大型的 RIS 可以利用导频信号的波前曲率来提供近场定位。此外，RIS 也可以在变极化、信号吸收和透射式等多种模式下工作，可以为三维定位提供更大的灵活性和适应性，RIS 的相位值可以根据环境的变化而实时重新配置，从而提升了定位系统的准确性。另外，可以通过预配置基站或者 RIS 位置信息及参考信号来提高三维定位的准确性和鲁棒性^{[20]-[25]}。

图 11 基于 RIS 定位的应用场景^[21]

2.2.4. 物联网

RIS 在物联网（Internet of Things, IoT）网络环境下有许多有前景的应用。例如，利用 RIS 建立虚拟卸载链路，可以提高卸载链路信道增益，从而将更多的数据卸载到边缘服务器，使得数据可以得到更高效地处理。

除此之外，RIS 还能够同时增强多小区物联网中服务基站收集的信号，以减少大规模物联网设备之间的小区间干扰。将 RIS 集成到 6G 物联网应用中，如智能建筑，可以帮助建立室内和室外实体之间的接口，促进智能建筑中的私人家庭的访问。将 RIS 集成到用于监视和远程健康监测的人体姿势识别系统中，通过对 RIS 的状态进行周期性调控，相对于随机配置和不可配置的环境，系统可以获得最优的传播链路，从而创建多个独立路径，积累人体

姿态的有用信息，从而更好地估计人体姿态。

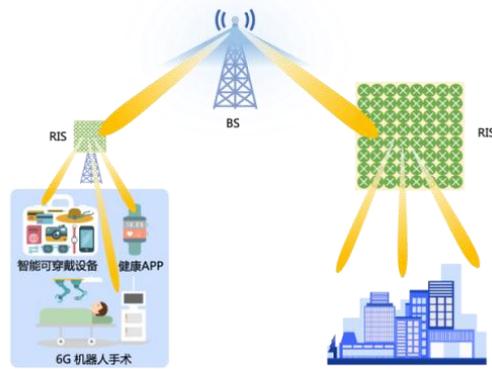


图 12 基于 RIS 辅助的物联网应用场景

2.2.5. 无线边缘计算

在未来新型应用诸如虚拟现实（Virtual Reality, VR）中，计算量需求较大的图片或视频处理任务需要实时处理。由于 VR 设备有限的功率和硬件支持能力，这些任务一般很难在本地执行。为了解决这个问题，VR 设备可以将这些计算量较大的任务卸载到网络的边缘计算节点以辅助其计算。然而，对于一些特殊场景，VR 设备和边缘节点之间会出现直通链路信道质量差的情况，导致任务上传速率慢，从而带来较大的卸载时延。为了解决这个问题，可以将 RIS 安装在 VR 设备和边缘节点之间的合适位置^[26]，从而提高卸载信道质量和降低卸载时延。

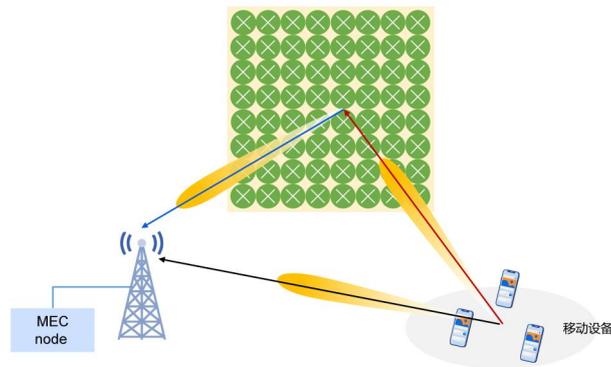


图 13 RIS 赋能的无线边缘计算

2.2.6. 物理层安全

由于无线传输的广播特性，无线传输容易受到安全的威胁，比如恶意攻击或安全信息泄露等。传统的安全通信技术采用上层的加密通信协议来保证传输安全。然而，该方案需要较复杂的安全密钥交换和管理协议，增加了通信时延和系统复杂度。而物理层安全技术可以避免复杂的密钥交换协议，受到了广泛的研究关注。为了最大化安全速率，一般采用人工噪声或者波束赋型的技术。然而，当合法用户和窃听用户在相同传播方向时，仅采用以上两个技术的系统性能会受限。为了解决这个问题，可以在网络中部署 RIS^{[27]-[28]}。通过合理地优化基站预编码和 RIS 的反射系数，经过 RIS 的反射信号可以在合法用户端得到增强，同时在

窃听用户处得到衰减。

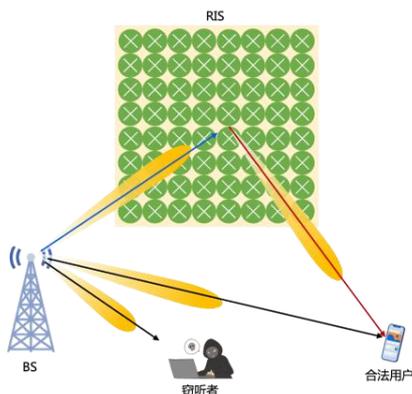


图 14 RIS 赋能的物理层安全

2.2.7. 信能同传

电磁波能够同时传递信息和能量,高效无线能量传输与收集的理论与技术是当前的热点领域,是电磁场、微波、电路与系统、电力电子、能量转换等多学科交叉的应用基础研究^[29]。目前数据传输的能量和信息是分立处理的,数能同传的统一设计将充分利用射频/微波频谱和网络基础设施进行通信和供电^{[30]-[33]}。数能同传的系统方案可以分为三大类,即无线携能通信(Simultaneously Wireless Information and Power Transfer, SWIPT)、无线供能通信(Wireless Powered Communication, WPC)与 WPC-SWIPT 系统。

基于 RIS 的 SWIPT 系统如图 15 所示,其中 RIS 作为一个多阵元发射机实现信息信号和能量信号同步传输。具体来说,RIS 的电磁单元对基站发送的能量信号和信息信号的相位、幅度和极化方向的实时调控,并将调控后的信号分别反射到相应能量接收机和信息接收机。能量接收机和信息接收机分别将接收到的信号用作能量接收和信息解调。相较于传统 SWIPT 系统,基于 RIS 的 SWIPT 系统无需射频链,可以极大地降低阵列体制无线通信发射机的设计复杂度、硬件成本和功耗。

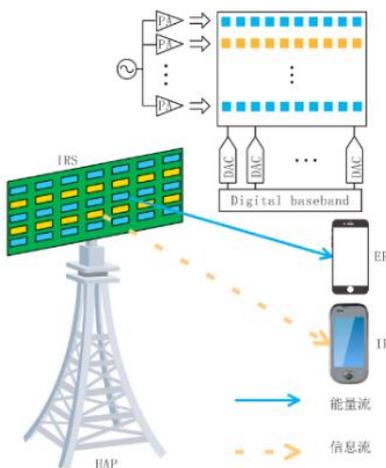


图 15 基于 RIS 的 SWIPT 系统

基于 RIS 的 WPC 系统如图 16 所示,在混合基站(Hybrid Access Point, HAP)上部署配备大规模阵列单元的 RIS,用于下行无线能量波束成形和上行信息接收。其工作原理为:

将单位时间分为下行无线能量传输阶段和上行无线信息传输阶段。在下行无线能量传输阶段，能量受限设备收集由 RIS 调制射频能量信号并进行存储；在上行无线信息传输阶段，能量受限设备利用收集的能量发送信息给 RIS，RIS 通过对接收信号进行波束赋形处理并将其反馈给 HAP。该系统有以下优势：（1）以低成本、低复杂度方式实现下行能量波束对准和增强上行接收信号强度；（2）有助于延长能量受限设备的运行寿命，实时、迅速信息反馈。

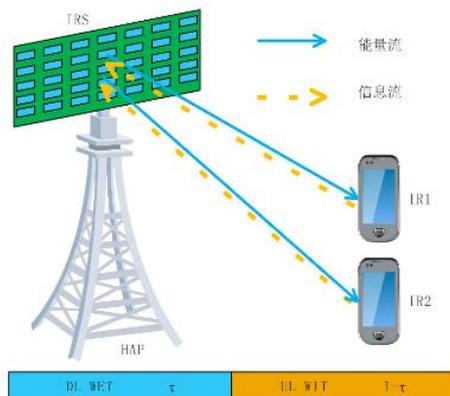


图 16 基于 RIS 的 WPC 系统

基于 RIS 的 WPC-SWIPT 系统如图 17 所示，将一个单位时隙分为两个传输阶段：无线能量传输阶段与无线信息与功率同传阶段。在第一阶段（无线能量传输阶段），功率站与 RIS 发射能量信号给无线能量用户，无线能量用户进行能量采集，将采集的能量存储在电池中。在第二阶段（无线信息与功率同传阶段），无线能量用户停止能量采集，利用第一个阶段采集的能量为远端信息接收机传输信息。基于功率分流协议，信息接收机将接收到的信号分为两个部分即能量采集部分与信息解码部分。该系统具有以下优势：（1）RIS 的部署增强了无线能量信号的传输，为 WPC 网络的实现提供了可能；（2）扩大网络覆盖面积，为蜂窝边缘用户提供高质量通信服务；（3）两个传输阶段都采用了能量采集技术，推动低功耗设备能够随时随地在移动中通信和供电。

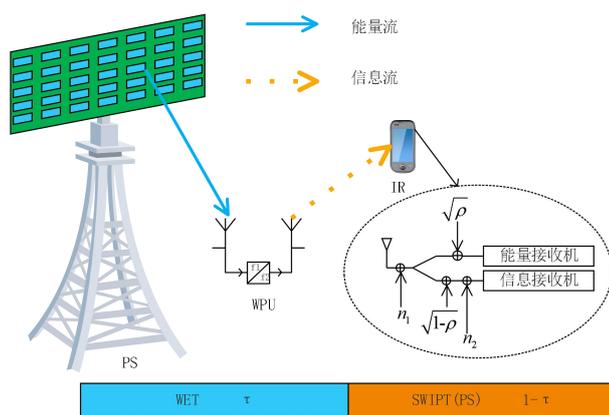


图 17 基于 RIS 的 WPC-SWIPT 系统

2.2.8. 频谱感知与共享

频谱感知技术是指在基于机会接入或感知增强的频谱共享网络中，次级用户对目标授权

频段的数据进行检测与采集，利用不同的检测技术对授权频段是否有信号占用进行判断，以实现频谱空洞的探知并实时共享主用户频谱的技术。主要的频谱感知技术有能量检测、匹配滤波检测、特征值检测、循环平稳特征检测等。在 RIS 辅助的频谱共享网络中，共有三种接入机制使得多个频谱共享用户共存，分别为基于功率控制的频谱共享、基于机会接入的频谱共享以及基于感知增强的频谱共享。其中，由于基于功率控制的频谱共享网络内缺少频谱感知的过程，难以保障主网络的服务质量。因此，基于频谱感知的另两种接入机制成为 RIS 辅助频谱共享网络的首选。

在 RIS 辅助的频谱感知中，通过动态调整 RIS 相位，可增强来自自主用户的信号，从而提升次级用户的接收信噪比，实现高精度的频谱感知。研究[34]证明 RIS 辅助的频谱感知能有效提升在能量检测算法下单用户频谱感知、多用户频谱感知以及分集接收的平均检测概率。此外，RIS 辅助的频谱感知可有机结合于频谱共享网络，实现频谱感知精确度与信息传输性能的协同提升，进一步提升 RIS 辅助的频谱共享网络的频谱效率[35]。

频谱共享网络通常指在同一频段下有多种通信网络共存，包括获得（频谱管理委员会、电信运营商等）授权的主用户通信网络和接入权限较低的次级用户网络。RIS 的可重构信道特性有利于缓解主用户收发机和次级用户收发机之间的干扰问题，从而提升整个系统的频谱效率。一种典型的 RIS 辅助的频谱共享网络如图 18 所示，在主次用户的下行通信中，对于主用户接收机，RIS 引入的反射信道既能增强来自主用户发射机的有用信号，也能抑制来自次级用户发射机的干扰信号；而对于次级用户接收机，RIS 引入的反射信道既能增强来自次级用户发射机的有用信号，也能抑制来自主用户发射机的干扰信号。

RIS 辅助的频谱共享网络可应用到多种场景，例如，美国 3.5GHz 的公民宽带无线电业务（CBRS）频段，以及 3GPP 的 LTE-U、NR-U 等频谱共享技术标准。美国 3.5GHz 的 CBRS 频段允许多运营商共存，等同于多种主用户网络与次级网络共存，提高了次级用户的接入要求，即需要不干扰多种主用户网络的正常通信。在该场景中，RIS 反射系数以及部署位置的设计可有效降低次级用户发射机对多种主用户接收机的干扰，同时还能提高次级用户的通信速率[36]-[40]。3GPP 提出的 LTE-U 或 NR-U 通常在 5GHz 和 60GHz 免认证频段上以相同的优先权与 Wi-Fi 技术竞争接入机会，等价于同一频段下有多种次级网络共存，RIS 反射系数、部署位置等参数的调整可提升多种次级网络的整体频谱效率[37]-[39]。RIS 和频谱共享技术都具有部署灵活的特性，这有利于在实际系统中低成本和高弹性地应用 RIS 辅助的频谱共享网络，适应未来复杂多变的通信场景。

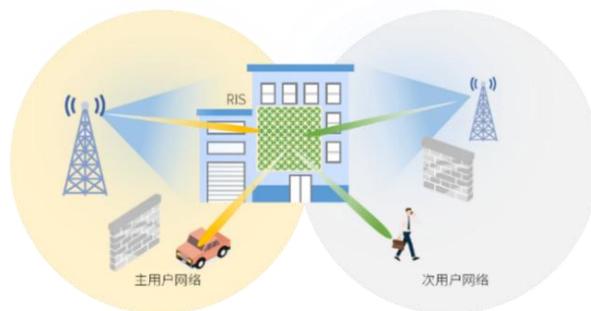


图 18 智能超表面辅助的频谱共享网络示意图

2.2.9. 全双工通信

全双工技术解除传统双工机制对收发信机频谱资源利用的限制,有助于进一步提高频谱效率和系统的灵活性,理论上同时同频全双工可提升一倍的频谱效率。但是,基于传统基站设计理念的上下行链路同时同频传输信号,会存在严重的自干扰和交叉干扰问题,需要在设备和网络部署时采取一定的干扰抑制和消除手段。与传统的基站或中继设备相比,基于 RIS 的无线设备能够在不引入自干扰的情况下实现全双工模式的传输^{[41]-[42]}。

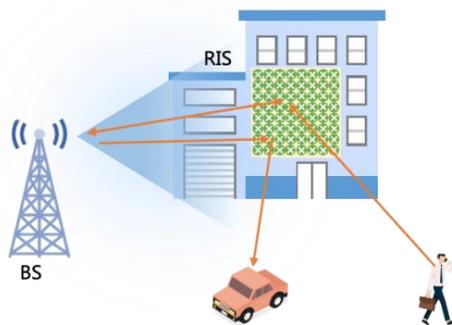


图 19 基于 RIS 辅助的全双工通信场景

2.2.10. 多小区通信系统

为了最大化通信系统的频谱效率,多小区中的多个基站一般会复用相同的频谱资源,这将带来多小区干扰问题,对小区边缘用户的影响尤为明显。为了解决这个问题,可以将 RIS 安装在小区边缘处^[43],通过合理的优化 RIS 反射相位值和多基站预编码,RIS 不仅可以增加接收到的有用信号功率值,还可以有效消除相邻小区的干扰信号。

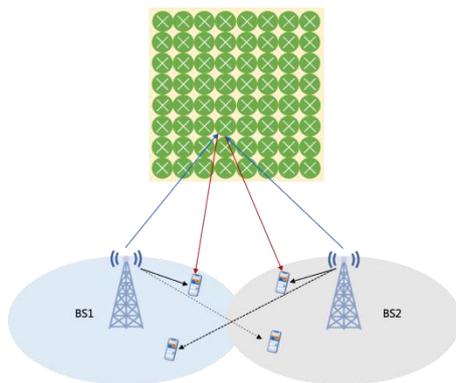


图 20 基于 RIS 辅助的多小区通信系统

2.2.11. 多组多播传输

多组多播应用是通信系统的重要组成部分,可以有效降低传统单播传输系统的高数据流传输压力。典型的多组多播应用包括视频会议,视频游戏以及重大体育赛事转播。在多组多播通信传输系统中,每个组的用户共享相同的传输内容,因此每个组的传输速率将受组内信道质量最差用户的制约。为了解决这个问题,可以将 RIS 安装在该系统中,通过合理地优

化设计 RIS 的反射系数，可以牺牲组内信道质量好的用户信道来提高瓶颈用户的信道质量，从而提高组内的整体传输速率^[44]。

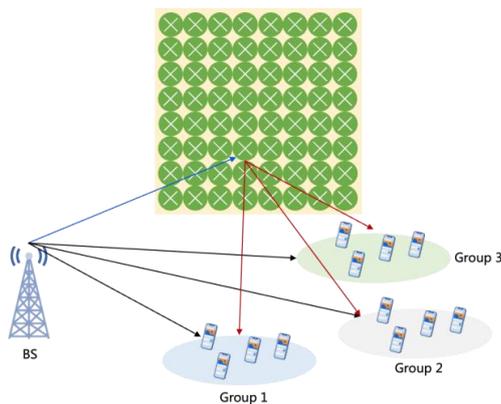


图 21 基于 RIS 辅助的多组多播传输系统

2.2.12. 轨道角动量

由于轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)涡旋电磁波的螺旋相位波前比传统电磁波平面相位波前多一个全新的空间分布维度，OAM 技术有望突破传统通信中的香农极限，缓解现今频谱资源紧张、频段拥塞的问题。OAM 涡旋电磁场的生成方式有很多种，其中一种典型的方法便是基于智能超表面的涡旋电磁场的生成方法。通过反射型和透射型智能超表面，既可以产生双极化双频段多模态 OAM 涡旋电磁波，也可以实现 OAM 涡旋电磁波的线极化和圆极化灵活转换^{[45]-[49]}。

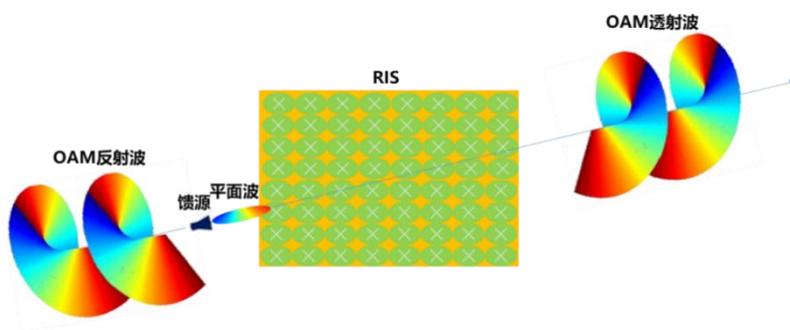


图 22 基于 RIS 辅助的轨道角动量 (OAM) 涡旋生成示意图

2.2.13. 语义通信

语义通信是未来的潜在通信方式之一，通过收发端共享部分知识库，通常采用人工智能的方法来挖掘传输信息间的关系，从而将冗余信息删除，提炼重要的信息，达到了信息压缩的目的。为了进一步地提高通信效率，可以将 RIS 安装在语义通信系统中，通过合理地优化设计 RIS 反射角以及发射端提取语义信息的压缩比，可以更好地自适应提高语义通信系统的效率^[50]。

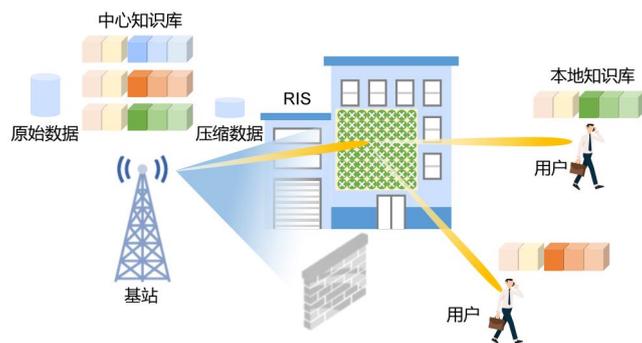


图 23 基于 RIS 辅助的语义通信系统

3. 智能超表面基础理论

智能超表面是一个多学科融合技术，在智能超表面诞生之前，以超材料理论和界面电磁理论为代表的相关基础理论已发展了半个多世纪，为智能超表面理论体系的建立打下坚实基础。在关键技术方面，与智能超表面相关的相控阵、可编程逻辑门等技术也均有其他领域应用的案例。因此，虽然智能超表面相关概念在近 10 年才被提出并被业内视为一种潜在 6G 关键技术，但已有的理论与技术基础支撑了智能超表面研究的快速发展。

3.1. 超材料理论

广义来说，RIS 是超材料（或称电磁超材料）的一个分支。超材料可以分为三维超材料和二维超表面。而超表面又分为固定参数超表面和可调超表面。RIS 一般被认为属于可调超表面，有时也会把固定参数超表面作为 RIS 研究的一个特例去考虑。超材料最初是以“左手材料”和“双负媒质”的名称为人所知。1967 年，Viktor Veselago 教授发表了一篇俄语论文，并于 1968 年被翻译成英文发表^[51]，首次提出了左手材料的概念，即介电常数 ϵ 和磁导率 μ 均为负的材料。作者在论文中系统地分析了双负媒质中电磁波的传播特性，理论预测了多个新奇的异常调控现象。1996 年，John B. Pendry 爵士用周期排布的开口谐振环实现并验证了负介电常数^[52]，并在 1999 年通过周期性排布实现并验证了负磁导率^[53]。而最早人工电磁表面（即超表面）为 1999 年 Daniel F. Sievenpiper 教授提出的蘑菇型结构高阻抗表面^[54]。2000 年，David R. Smith 教授基于 Pendry 爵士工作基础，实现并验证了同时具备负介电常数和负磁导率的复合左手材料。

三维超材料可以用传统等效媒质参数（介电常数和磁导率）来描述材料的电磁特性，但不再适用于分析二维超表面^[55]。针对超表面的二维结构特性，研究人员陆续提出多种理论进行分析和建模，其中最具代表性的是 2011 年 Federico Capasso 教授团队提出的广义斯涅耳定律（Generalized Snell's law）^[56]。广义斯涅耳定律很好地刻画了电磁超表面物理特性，如公式（1）和（2）所示

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i dx = \frac{\lambda_0 d\varphi}{2\pi dx} \quad (1)$$

$$\sin \theta_t - \sin \theta_i dx = \frac{\lambda_0 d\varphi}{2\pi m_i dx} \quad (2)$$

其中，公式（1）是广义斯涅耳折射定律，公式（2）广义斯涅耳反射定律， λ_0 是信号波长， n_i 和 n_t 是入射和出射界面折射率， θ_i 和 θ_t 是入射角和出射角。

3.2. 电磁信息论

初期电磁超表面通常利用连续或准连续的表面极化率、表面阻抗、幅度和相位等参数来表征界面上的电磁特性，这些表征方式都是从物理层面来研究超表面，可以称之为“模拟超

表面”。2014年，东南大学崔铁军教授团队提出了“数字编码与可编程超材料/超表面”的概念，创新性地利用二进制编码的形式来表征超表面^[57]，标志着超表面从模拟时代进入数字时代。对可调超表面的可调物理特性数字化编码后，可以借用在计算机科学领域中已成熟的编码理论和软件算法对超表面的物理参数的调控进行优化设计，也方便更好地利用人工智能（Artificial Intelligence, AI）算法进行智能调控^[58]。2017年，崔铁军教授团队发表论文归纳总结已有研究，提出了“信息超材料/超表面”的概念体系^[59]。

2008年，F. K. Gruber 教授首先提出了 MIMO 空间复用通信信道的自由度的电磁信息论概念，用于分析大规模 MIMO 系统的性能^[60]。通过对发射源的电流分布进行球面波分解，获得了不同天线阵列增益和功率限制下的最佳球面波模态通信信道空间 MIMO 自由度。2021年，清华戴凌龙教授团队分析了一维（1D）线天线的电磁空间自由度极限^[61]。

2020年，崔铁军院士团队从信息论角度，建立码本几何空间信息熵 I_1 与远场散射方向图的物理空间熵 I_2 之间的关系^[62]

$$I_1 + I_2 \leq \ln(4\pi S/e^2\lambda^2) \quad (3)$$

2022年，中山大学与美国伊州理工大学的廖少林团队从电磁理论出发，成功推导出二维（2D）空间电磁场空间自由度和激励电流空间自由度的傅里叶频谱关系，为二维智能超表面的空间电磁容量提供了理论支撑。另外，该团队还提出了面向复杂电磁环境的本地物理光学循环迭代（Local Iterative Physics Optics, LIPO）矢量计算电磁学算法（Computational Electro-Magnetic, CEM），把电磁无线通信信道的模拟准确度提升了3个量级以上，同时运算速度提升了2个量级以上，该算法可用于智能超表面信道模型的构建。

3.3. 界面电磁理论

作为一个新的电磁学研究方向，界面电磁（Surface Electromagnetics, SEM）理论旨在通过对二维界面上不同种类电磁现象进行分析与解释，指导各种电磁表面设计与优化。

电磁学是一门描述电磁场随时间和空间变化规律的基础科学。因此，电磁场振荡的空间维数可以用来区分不同的电磁现象和相应理论方法，如图 24 所示。麦克斯韦方程组作为一个统一的基本定理，考虑了三维空间变化，用于描述所有宏观和微观电磁现象，但其分析和计算极为复杂。作为一种极致简化特例，当器件或电磁现象的空间变化在三个空间维度中都远小于波长时，电路理论被证明是一种准确而高效的零维现象电磁理论方法，电阻、电感和电容是在具有电压和电流源的电子电路中的典型元件。传输线理论则已经成为微波电路和光波导等一维电磁现象研究的一块基石^[63]。特性阻抗和传播常数是描述这些一维现象的关键参数。处理二维电磁现象的界面电磁理论尚未得到充分发展。我们需要定义一般表面的特征参数，导出麦克斯韦方程组的简化定理。最近发现表面磁化率和表面孔隙率是理想的本征参数。此外，应用适当的界面电磁理论来分析和设计前沿的电磁表面仍然是一个挑战。

根据不同的电磁场属性，以下三组电磁表面的特性，受到了研究者的广泛关注。

(1) 空间波控制

平面电磁波作为空间电磁波的最基本形式，包含频率、传播方向、极化方向、幅度和、和

相位等 5 种基本属性。平面波照射到人工电磁表面上，通过特定的界面设计，散射电磁波能够具有不同的特性，从而实现有效的电磁波调控。进行幅度-频率控制的典型示例是频率选择表面^{[64]-[65]}和吸波表面^{[66]-[69]}，其工作原理是周期性的电磁表面发生共振时，会使得特定频段和入射方向的电磁波产生全反射或全透射。相位-频率控制电磁表面也称相移表面，通常在准周期或可重构电磁表面中使用相合成方法设计，利用表面相位分布来补偿入射波或散射波的空间相位差，实现波束聚焦、赋形、扫描等功能。极化控制是电磁波相比电路信号的额外自由度，包含极化选择与极化转换。经典的结构包括栅网、线圆转换器等，不同的极化电磁表面的设计大致都基于极化分解与合成的思路。

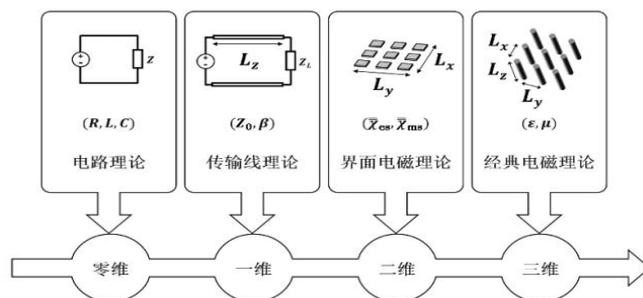


图 24 界面电磁学的学科定位

(2) 表面波操控

电磁表面除了对空间波的控制，还可以用来操纵表面波。对表面波的操控主要分为三个方面：滤波、修改传播路径、与空间波的相互转换。像 HIS^[70]和 EBG^[71]这样的特定周期性表面在一个频率范围内显示出带隙性能，因此可以视为表面波的带阻滤波器。基于转换光学的概念，超透镜可以设计导波的传播方向。漏波天线等则能够使沿表面切向传播的表面波向外辐射，产生空间波^{[72]-[73]}。

(3) 有源和非线性功能

有源或非线性提供了一种高效的方式来实现可重构特性。PIN 二极管，变容二极管和机电系统 (Micro Electromechanical System, MEMS) 是最常用于可重构电磁表面中的控制装置，用于实现时空联合调制。此外，电磁表面可以用作空间电路，例如空间功率合成器^{[74]-[76]}，网格混合器^[77]，放大反射器阵列^{[78]-[79]}和网格振荡器^[74]。另一方面，在光学区域中，电磁表面具有更多的非线性特性。一些具有代表性的非线性光学特性包括^[80]：二次谐波，三次谐波，自发参数下变频，和差频生成，四波混频，非线性相位控制，非线性开关和路由等。

4. 智能超表面硬件结构及调控

4.1. 智能超表面系统架构

智能超表面硬件架构主要包含三大部分，即馈电模块、可重构电磁表面和控制模块。

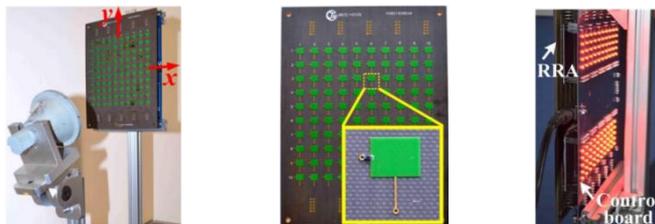


图 25 馈电模块、可重构电磁表面和控制模块

馈电模块是整个系统的信号输入源，主要功能是将待发射电磁信号馈入到可重构电磁表面。目前，根据馈电模块的馈入与输出方式不同，可以分为远场反射式、远场透射式、近场透射式以及有源无源集成式等多种模式。其中，远场反射式和远场透射式两种馈电模块，既可以采用同一系统中的馈源天线主动发射方式，也可以采用被动接收来自其他信号源远程电磁波的方式。这种情况下，虽然馈电模块不存在物理实体，但仍然是整个系统的重要组成部分。

可重构电磁表面是系统中对电磁波进行调控的主体，通常由周期或准周期排布的电磁单元组成，每个电磁单元通过集成 PIN 二极管、变容二极管等非线性器件可对控制模块给出的低频控制信号进行响应，改变局部单元的电磁特性，进而调控来自馈电模块的高频通信信号。

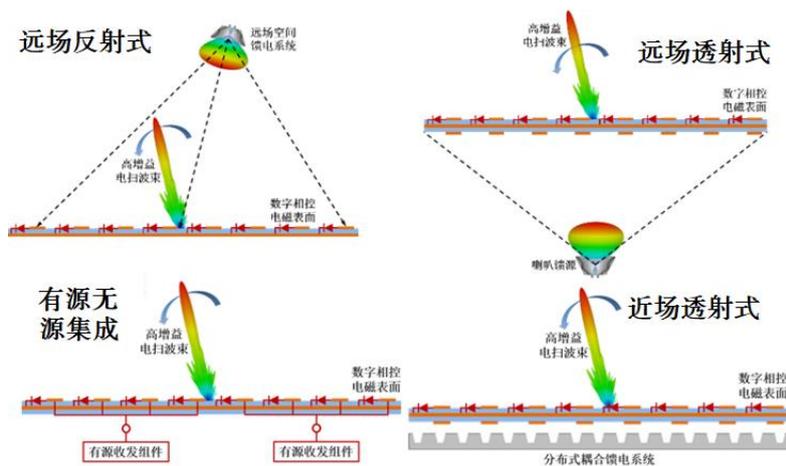


图 26 馈电模块 4 种模式

控制模块的主要功能是对可重构电磁表面进行控制，通常基于可编程逻辑门（Field Programmable Gate Array, FPGA）或类似的可编程平台上实现。控制模块根据上层系统给出的控制决策，产生低频控制信号和驱动电压并加载到电磁表面上的非线性器件上，从而实现了对电磁表面功能的实时控制。

4.2. 智能超表面类型

随着 RIS 产业化应用研究的演进，目前，产业界已经出现了多种不同类型的智能超表面硬件，表 2 归纳总结了部分公开文献中 RIS 类型及其技术特征。

表 2 智能超表面分类

技术特征	类型
透射或反射	反射式、透射式、反射透射一体式 ⁴
调控功能	信息调制（如发射机 ⁴ 或背向散射）、信道调控（如波束赋形）、基于 RIS 的新型相控阵天线、信息与能量同时传输（如数能同传）、基于 RIS 的空中计算 ⁴
调控方式(器件/材料)	PIN 管、变容二极管、MEMS、液晶、石墨烯等
频段	低频（Sub-6GHz）、毫米波、太赫兹及光学频段
是否可以功率放大	无源 RIS、有源 RIS ⁴
调控动态性	无源静态调控 RIS、半静态调控 RIS、动态调控 RIS
测量/感知能力	仅有无源单元构成、有部分有源单元可以执行测量/感知
部署模式	网络控制、独立部署

不同类型的智能超表面依据实际需求不同，可用于不同场景。以智能超表面调控动态性为例，无源静态调控 RIS，波束固定不变。用于快速部署，弱覆盖场景扩展，网络覆盖和补盲。半静态调控 RIS，波束半静态变化，间隔较长一段时间进行相位调节。用于扩展波束覆盖范围、提升小区容量和速率。无源静态调控 RIS 和半静态调控 RIS 具有控制简单、部署迅速等优势。但是，由于覆盖方向在一定时间内是固定不变的，无法针对用户进行波束赋形，不能针对信道的实时变化做出最优的波束响应。因此更进一步的智能 RIS 应能进行动态调整。动态调控 RIS，波束实时动态变化。用于动态跟踪用户、匹配信道环境，电磁波智能调控。动态调控 RIS 又分为基于波束扫描的动态调控 RIS 与基于信道状态信息（Channel State Information, CSI）的动态调控 RIS。基于波束扫描的动态调控 RIS，相位调节过程无需小尺度信道信息，RIS 通过扫描多个波束方向，并基于终端反馈的信道测量信息，选择最佳的波束方向。虽然基于波束扫描的动态调控 RIS 具有无需小尺度信道信息，控制指示开销较小等优点，但是多次调整波束也会带来较大的系统开销。基于 CSI 的动态调控 RIS 通过参考信号进行信道估计，并根据信道估计结果配置码本。虽然基于 CSI 的动态调控 RIS 可以获得较优的性能，但是目前级联信道估计算法和过程的复杂度较高，系统开销较大。

4.3. 智能超表面阵面设计

在设计智能超表面之前，须根据实际的应用场景确定合适的系统架构。首先，考虑系统的馈电方式，需要根据工作模式、性能指标、空间尺寸等要求，选择合适的馈电方式。对于波束增益要求较高的场景，通常采用损耗较低的反射式智能超表面；对于空间尺寸较小的场景，可以采用近场耦合式智能超表面。其次，选择适当的控制方式，包括机械控制、模拟信号控制和数字信号控制三类。机械控制由于其响应速度较慢，目前已较少采用。模拟信号控

⁴ 相关内容详见本白皮书第六章

制一般由控制模块产生连续分布的电平,控制变容二极管等具有连续变化参数的器件产生不同的响应。数字信号控制则由控制模块产生不同的电平,控制 PIN 二极管等开关器件产生不同的响应,根据可控状态数目,通常可分为 1-bit 或多 bit 控制。数字信号控制位数增多会导致表面结构复杂度增加且性能提升的边际增益下降,因此,现阶段的 RIS 原型系统大多采用 1-bit、2-bit 控制,少数原型系统采用 3-bit 甚至更多控制位数。

4.3.1. 电磁单元设计与优化

电磁单元设计与优化是智能超表面阵面设计的核心,需要先根据实际的应用需求确定单元设计目标,然后对电磁单元主体、偏置线路等进行优化设计。

首先,利用电磁仿真软件,如 HFSS 和 CST,建立单元主体及非线性元件的等效模型,配置周期边界条件和 Floquet 端口激励。随后选择进行合适的单元几何结构进行设计优化,使其在工作频段内满足预先设定的设计要求,如 1-bit 反射单元要求反射幅度接近 0dB,反射相位差为 180° 等。最后,还需要考虑用于连接控制系统的偏置线等结构,验证其对单元性能的影响。

以 1-bit 数字相控单元为例^[81],其设计目标为实现 14.5GHz 附近的 1-bit 数字调相。具体实现时,选择了经典的矩形谐振单元,通过 PIN 二极管的导通和断开改变单元的谐振长度,从而产生相频响应不同的两种状态,使得中心频点处两种状态的相位差为 180° 。通过添加用于控制 PIN 二极管的偏置线和用于交直隔离的扇形枝节,可以验证其对单元工作频段内的电特性影响较小。

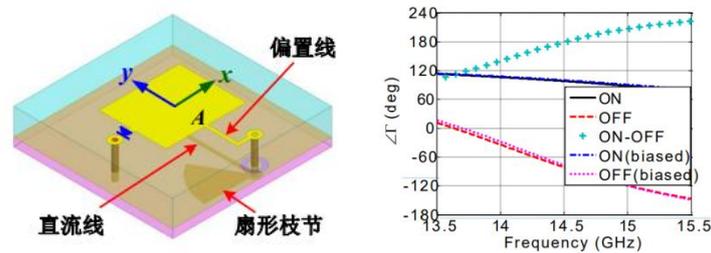


图 27 1-bit 数字相控单元及其相位响应

4.3.2. 阵列全波仿真与加工测试

完成单元设计后,理论上已经可以将单元结构周期拓展获得最终的智能超表面模型,但一般由于高次模、互耦等原因,实际智能超表面电磁性能与周期边界下的单元设计结果会有一些差距,需要针对整个智能超表面阵面进行全波仿真,以指导智能超表面的实际加工、测试和验证。

阵列全波仿真是在仿真软件中对整个阵面和馈源进行建模仿真,对算力资源有较高要求,仿真时间通常需要几小时甚至几天。通常,阵列全波仿真结果比单元结果更加可信,但仍然不能代替实测结果。



图 28 波导测试、RCS 测试与远场测试

实测通常包括波导测试、雷达截面积（Radar Cross Section, RCS）测试、远场测试等。波导测试一般需要设计合适的波导，将两个单元横置于波导中，以测量实际的单元特性。RCS 测试包括单站或双站 RCS 测试方法，通过将表面上所有单元调控为相同状态，进行“全开全关”测试，对比确定表面单元不同工作时状态间的相位差。远场测试则是基于实际应用场景，在大型远场暗室或外场进行测试。

4.4. 控制模块设计

控制模块的主要功能是根据 RIS 波束的入射方向、出射方向为 RIS 单元提供不同的相位分布，各个单元的量化相位分布也被称为码表，使用 α 入射 β 出射波束码表对与法向夹角为 α° 的入射波束赋相后朝与法向夹角 β° 的方向出射。控制模块主要由上位机、控制芯片与驱动电路组成，如图 29 所示。其中，上位机可连接通信系统从而实时向控制芯片提供出射方向；控制芯片，以 FPGA 芯片实现为例，根据出射方向将码表赋值到输出管脚，管脚通过驱动电路与线缆连接到 RIS；由于 RIS 的单元通常靠 PIN、高电子迁移率晶体管（High Electron Mobility Transistor, HEMT）或变容二极管等元件实现相位可重构功能，因此控制板的驱动电路只需要根据管脚的数字逻辑，输出相对应的电压或电流即可完成 RIS 的布相，从而完成对 RIS 的控制。

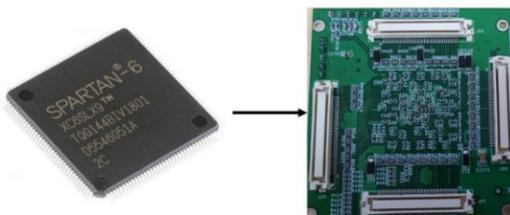


图 29 RIS 的控制模块示意图

4.4.1. 控制模块的码表提取

以基于 FPGA 实现的控制模块为例，RIS 的控制码表可以根据入射方向进行计算，目前有两种提取码表的思路：一种是提前计算出各个方向的码表并存入 FPGA 内存或集成存储，工作时根据上位机的指令按地址提取对应的码表并完成管脚赋值；另一种则是将码表计算程序植入 FPGA 芯片，在 FPGA 端完成码表的计算。前者对控制板的内存空间有较大要求，尤其是和 RIS 的规模呈正相关，但相应的 FPGA 端 Verilog 程序则相对简单；而后者要求 FPGA 端能够支持码表计算程序，最好还能执行各种码表优化算法，但这样能够降低存储需求，而且如果进行针对性的 FPGA 设计，能够提高 FPGA 性能利用率。

4.4.2. 控制模块的响应速度

在 RIS 辅助通信系统中，RIS 出射波束的切换速度由上位机到控制模块的响应速度与 RIS 波束生成速度决定。后者依赖于 RIS 的设计与集成的开关器件特性，而前者则取决于上位机和通信芯片的通信码率与控制芯片内部的程序架构及系统时钟。在 RIS 的实际应用中，需要制定一个 RIS 波束切换时间的标准。波束切换速度的瓶颈在于上位机到控制模块的响应速度，因此，需要在控制模块的设计中，尽可能提高响应速度，即从上位机发出指令到驱动电路完成电压或电流偏置所用的时间要尽可能短。

4.4.3. 控制模块潜在功能需求

除了上位机直接控制出射波束外，在未来潜在应用场景中，控制模块可能还需要自适应波束切换功能与网络配置功能。如果上位机并不知道接收端的具体方位，可以让 RIS 进行波束扫描来寻找接收端用户，在与接收端完成握手后结束波束切换并且保持波束稳定出射或跟踪。相应的控制模块就需要设置波束的自动切换，以及与上位机实时通信保证稳定跟踪接收端。另一方面，网络配置功能则应用于某些超大规模的 RIS 场景，由于控制芯片的资源有限，会出现输出管脚少于单元总数的情况，此时需要多块控制芯片分区控制同一个 RIS，那么控制模块就需要配置网络，每块芯片就是一个网络节点，从而实现对芯片的同步操作或分块操作。

5. 智能超表面系统建模与关键技术

5.1. RIS 辅助传输信号模型

与传统的信号传输模型不同，除了发射端与接收端之间的直连链路，RIS 辅助信号传输模型增加了一条由 RIS 引入的辅助传输链路，接收端的接收信号 \mathbf{y} 可以建模为：

$$\mathbf{y} = \sqrt{P_t}(\mathbf{H}_{RU}^T \Phi \mathbf{H}_{TR} + \mathbf{H}_{TU})\mathbf{s} + \boldsymbol{\omega}, \quad (4)$$

其中， P_t 为发射端功率， \mathbf{H}_{TR} 为发射端与 RIS 之间的信道响应矩阵， \mathbf{H}_{RU} 表示 RIS 与接收端之间的信道响应矩阵， \mathbf{H}_{TU} 表示收发端之间直连信道响应矩阵， \mathbf{s} 为来自发射端的发射信号向量， $\boldsymbol{\omega}$ 是加性高斯白噪声， Φ 为 RIS 引入的相控对角阵。

5.2. RIS 信道建模方法

主流的信道建模方法包括基于几何的统计性建模方法和基于射线追踪的确定性建模方法以及基于数字地图的混合信道建模方法。基于几何的统计性建模方法可以很好的还原某一类场景下信道的统计特性，同时其复杂度低、方便实现等优点使得该建模方法广泛应用于 5G 标准化研究中^[82]。基于射线追踪的确定性信道建模方法和基于数字地图的混合信道建模方法基于几何光学和一致性绕射理论计算从发射端到接收端的所有多径，极大地提高了建模的准确度，随着计算机计算能力的提升，该模型逐渐获得了业界的认可，成为标准化信道模型的可选模型^[83]。

5.2.1. 基于几何的统计性信道建模方法

基于几何的统计性建模（Geometry Based Stochastic Model, GBSM）方法的基本原理是通过对信道进行大量测量，得到相应场景的信道特性统计分布。在进行信道仿真时通过对这些统计分布进行随机采样生成信道特征，还原完整的信道信息。考虑到无线通信系统在时域、频域和空间域的分辨率不断提高，多径的聚簇效应愈加明显，GBSM 以簇结构为基础进行建模，其具体的模型结构如图 30 所示。

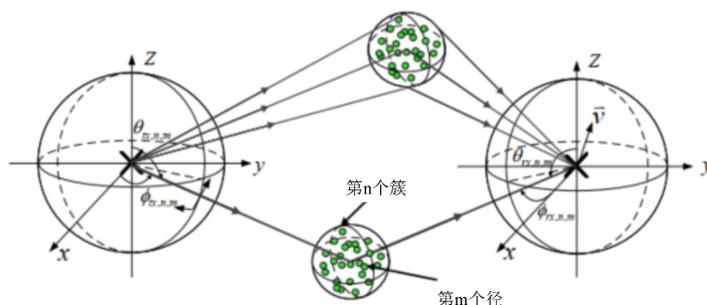


图 30 基于几何随机的统计性信道模型结构^[83]

考虑收发端为多天线的情况，若发射端有 S 个发射天线，接收端有 U 个接收天线，信道可以用 $U \times S$ 维的复矩阵表示，矩阵中每个元素表示对应子信道的信道冲激响应，具体可以

表示为^[83]:

$$h_{u,s}^{3D}(t, \tau) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sqrt{P_{n,m}} \begin{bmatrix} \gamma_{rx,u,p_1}^{3D}(\phi_{rx,n,m}, \theta_{rx,n,m}) \\ \gamma_{rx,u,p_2}^{3D}(\phi_{rx,n,m}, \theta_{rx,n,m}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e^{j\Phi_{n,m}^{p_1,p_1}} & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} e^{j\Phi_{n,m}^{p_1,p_2}} \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} e^{j\Phi_{n,m}^{p_2,p_1}} & e^{j\Phi_{n,m}^{p_2,p_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_{tx,u,p_1}^{3D}(\phi_{tx,n,m}, \theta_{tx,n,m}) \\ \gamma_{tx,u,p_2}^{3D}(\phi_{tx,n,m}, \theta_{tx,n,m}) \end{bmatrix} \cdot e^{j2\pi\lambda^{-1}\mathbf{r}_{rx}^T \mathbf{d}_{rx,u}} \cdot e^{j2\pi\lambda^{-1}\mathbf{r}_{tx}^T \mathbf{d}_{tx,s}} \cdot e^{j2\pi f_{n,m} t} \cdot \delta(\tau - \tau_{n,m}) \# \quad (5)$$

其中, N 、 M 表示簇和对应径的个数, $P_{n,m}$ 表示 n 簇中第 m 个径的功率, 矩阵部分引入极化, 其中有 p_1 和 p_2 两个正交的极化方向, 相应的 γ^{3D} 表示极化方向上的天线方向图, $\phi_{rx,n,m}$ 、 $\theta_{rx,n,m}$ 、 $\phi_{tx,n,m}$ 、 $\theta_{tx,n,m}$ 表示第 n 个簇中第 m 条多径的水平到达角, 垂直到达角, 水平离开角和垂直离开角, $\Phi_{n,m}$ 表示多径的初始相位, $\kappa_{n,m}$ 表示相应子径的交叉极化功率比, λ 表示中心载波波长, \mathbf{r}_{tx} 、 \mathbf{r}_{rx} 为到达角和离开角的球坐标单位向量, $\mathbf{d}_{rx,u}$ 、 $\mathbf{d}_{tx,s}$ 表示收发端对应天线的位置向量, $f_{n,m}$ 表示多普勒频移, $\tau_{n,m}$ 表示对应子径的时延。

将 RIS 引入传统通信系统传输信号模型框架中, 其信道模型如图 31 所示:

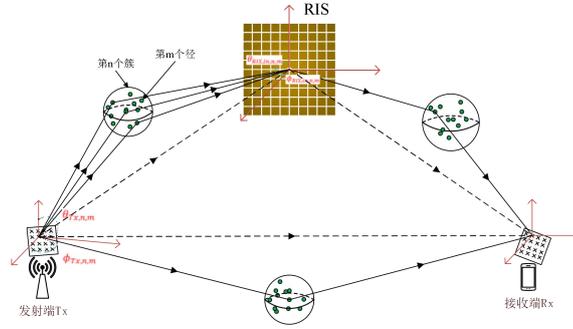


图 31 RIS 辅助通信信道模型

该模型的基本思路是将原本发射端 (Tx) 和接收端 (Rx) 之间的信道分为 Tx-RIS-Rx 的 RIS 辅助信道和 Tx-Rx 的直连信道两部分, 如公式 (5) 所示:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\sqrt{PL_{RU}}} \mathbf{H}_{RU}^T \mathbf{\Phi} \frac{1}{\sqrt{PL_{TR}}} \mathbf{H}_{TR} + \frac{1}{\sqrt{PL_{TU}}} \mathbf{H}_{TU} \# \quad (6)$$

公式中第一部分为 RIS 辅助通信信道, 其中 \mathbf{H}_{TR} 、 \mathbf{H}_{RU} 分别为发射端到 RIS、RIS 到接收端的信道响应矩阵, PL_{TR} 、 PL_{RU} 为对应通道的路径损耗。第二部分为发射端到接收端的直接链路信道, \mathbf{H}_{TU} 为该信道响应矩阵, PL_{TU} 为其对应的路径损耗。RIS 本身的电磁特性可以用数字方式表征^[84], 模型中使用相控 (幅控) 对角阵 $\mathbf{\Phi} = \text{diag}(\alpha_1 e^{j\theta_1}, \dots, \alpha_k e^{j\theta_k}, \dots, \alpha_{(n \times n)} e^{j\theta_{(n \times n)}})$ 来表示, 其中 α_k 、 θ_k 表示第 k 个 RIS 电磁单元的幅控系数和相控系数。

RIS 辅助信道模型将 RIS 本身独立于两端信道, 模型的输出为信道响应矩阵 \mathbf{H}_{TR} 、 \mathbf{H}_{RU} 以 RIS 到接收端信道响应 \mathbf{H}_{RU} 为例, 信道矩阵为:

$$\mathbf{H}_{RU} = (h_{u,1}^{3D}(t, \tau), \dots, h_{u,k}^{3D}(t, \tau), \dots, h_{u,n \times n}^{3D}(t, \tau)), \# \quad (7)$$

其中, RIS 单元个数为 $n \times n$, 将 RIS 的每一个电磁单元当作一个发射单元, $h_{u,k}^{3D}$ 为 RIS 上第 k 个电磁单元到接收端第 u 个天线的信道响应, 表示方法与上述公式(4)类似, 需要注意的是将发送天线的辐射方向图 $\gamma_{tx}^{3D}(\phi_{tx,n,m}, \theta_{tx,n,m})$ 修改为对应位置 RIS 单元的辐射方向图。同理可以写出Tx端到 RIS 的信道响应矩阵 \mathbf{H}_{TR} , 这里就不再赘述。

基于上述描述, RIS 辅助通信信道建模流程如图 32 所示:

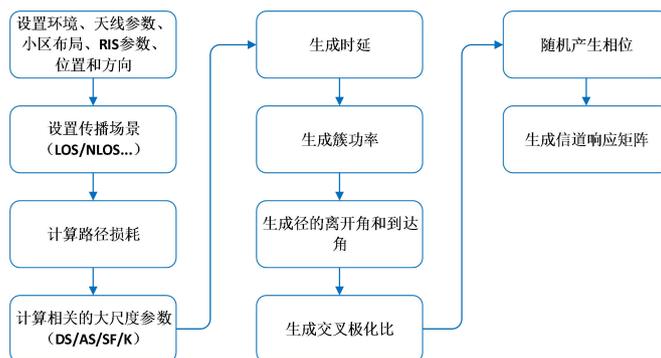


图 32 RIS 辅助通信信道建模流程图

建模流程主体部分与标准信道建模流程类似，引入 RIS 之后，新增 RIS 参数包括 RIS 单元数量、工作频段和最小电磁单元间隔。RIS 位置以及角度信息表示为 RIS 中心的三维坐标 (x, y, z) 以及法向量 $\mathbf{n}(\theta, \varphi)$ 。对于不同的 RIS 部署场景，路径损耗的生成公式有所不同，具体可以参考 3GPP TR 38.900 或 38.901 中的路径损耗公式。需要注意的是该模型将信道分为两部分，路径损耗的生成也分为 PL_{RU} 、 PL_{TR} 两部分，目的是为了将 RIS 本身的影响从信道中解耦。信道大尺度参数包括阴影衰落 (Shadow Fading, SF)，莱斯 K 因子，时延扩展和角度扩展——水平到达角角度扩展 (Azimuth Spread of Arrival Angle, ASA)、水平离开角角度扩展 (Azimuth Spread of Departure Angle, ASD)、垂直到达角角度扩展 (Zenith Spread of Arrival Angle, ZSA) 和垂直离开角角度扩展 (Zenith Spread of Departure Angle, ZSD)。由于 RIS 部署场景与位置的不同，大尺度参数的互相关矩阵会发生变化，需要充分的测量数据来支撑。得到大尺度参数后，可以生成相关的小尺度参数，包括簇的功率、时延以及角度信息——水平到达角 (Azimuth of Arrival, AOA)、水平离开角 (Azimuth of Departure, AOD)、垂直到达角 (Zenith of Arrival, ZOA) 和垂直离开角 (Zenith of Departure, ZOD)，生成方法可以参考文献[85]中 7.5 节的步骤 5。由于模型中 RIS 的引入，部分参数的生成过程有所改变，如 RIS 的水平角范围、不同场景时延的均值和方差等等。总的来说，RIS 对于信道的影响主要体现于 RIS 部署场景以及位置中，而由于目前 RIS 相关的测量工作不够充分，像是经验路径损耗公式、大尺度参数相关矩阵、小尺度参数生成等工作仍有待研究。

5.2.2. 基于确定性的建模方法

不同于统计性信道建模方法，确定性信道建模方法是一种对真实通信场景高精度还原建模的建模方法，它通过对真实的无线传播环境进行重构，提取环境中物体的几何描述和电磁参数等信息，根据电磁波传播理论对无线信道进行精准的描述。在确定性信道建模体系中，主要有基于麦克斯韦方程组的全波分析法和基于几何近似进行数值计算的射线跟踪法两大类方法，其中射线跟踪法应用较为广泛。

依据几何光学理论与一致性绕射理论，射线跟踪建模方法可以实现对发送端和接收端之间的所有射线 (路径) 传播过程的预测，精准模拟传播路径之后，就可以确定射线的离开角、到达角、光程等参数。之后，将电磁波的能量传播看作射线 (光) 的传播，根据电磁学理论

和相应的反射系数、绕射系数和穿透系数进行电磁计算，预测所有路径的电磁参数，进而可以得到每条射线的功率等信道参数，最终计算出信道的传播特性，包括路径损耗、角度扩展、时延扩展等，建立对应于具体环境的信道模型。

射线跟踪法预测射线传播路径的过程称为几何计算，根据几何计算结果计算每条射线功率的过程称为电磁计算，其中几何计算是射线跟踪较为核心的部分。几何计算包括反射射线的几何计算和绕射射线的几何计算。

对于反射射线的几何计算，常用的一种方法为镜像法。 T_x 表示发射点， R_x 代表接收点， O 为平面 P_1 上的反射点。由镜像法可知，通过对 T_x 做关于 P_1 的镜像对称点 T_x' ，连接 T_x' 与 R_x ，连线与平面 P_1 的交点即为反射点 O 。从 T_x 开始，经过反射点 O ，最终到达 R_x 的路径就是所求的一次反射射线。对于高阶反射射线，可以通过递归使用镜像法求得。值得注意的是，计算高阶反射射线的计算开销很大，而高阶反射射线又因其功率较低而对信道的影响比较微小，因此有理由忽略反射次数过高的反射射线。文献[86]中指出，在室内场景中，当射线反射次数高于二时，对信道的影响几乎可忽略。

在引入单 RIS 辅助通信后，抵达接收端的射线由两部分组成，第一部分为从发送端出发，经 RIS 反射，而后抵达接收端的射线，第二部分为未经 RIS 反射，从发送端直接抵达接收端的射线，可对这两部分射线分别进行几何计算和电磁计算，而后合成整体的信道响应。

第一部分射线的几何计算比较特殊，因为射线抵达 RIS 后并非简单地发生镜面反射，而是按照特定的方向增益向各方向辐射。方向增益的具体形式与 RIS 的相位调控码本相关。因此，不能对这部分射线直接进行几何计算，而应将射线拆分为发送端到 RIS 和 RIS 到接收端两段，对这两段射线分别进行几何计算，得到两个射线集合，即发送端到 RIS 的射线集和 RIS 到接收端的射线集。然后，将分属两个集合的射线遍历组合拼接，即可得到从发送端出发经 RIS 反射抵达接收端的射线集合。

得到射线集合之后，需要对每条射线进行电磁计算，以得到其功率。在电磁计算时，仍需将射线从 RIS 处分为两段。对于第一段射线，其功率可根据几何光学法和一致性绕射理论得到^[87]。然后，对 RIS 的接收和反射方向增益建模，将接收方向增益与第一段射线耦合，求得 RIS 捕获的射线功率。此时，RIS 可以等效为以其捕获的功率按照其反射方向增益向外辐射信号的天线。最后，耦合等效天线，对第二段射线进行电磁计算，得到射线的最终功率。值得注意的是，对经 RIS 反射抵达接收端的射线进行电磁计算，重点工作为对 RIS 的接收和反射方向增益建模。对于 RIS 的接收方向增益，文献[88]中给出了一种建模方式，可以表示为：

$$F(\theta_{zOA}) = \begin{cases} \sqrt{\cos(\theta_{zOA})}, & \theta_{zOA} < \frac{\pi}{2} \\ 0, & \theta_{zOA} \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (8)$$

其中， F 表示接收方向增益， θ_{zOA} 表示射线抵达 RIS 的垂直角，此处的局部坐标系以 RIS 法向量方向为 z 轴正方向。在得到每个 RIS 单元的反射方向增益之后，结合 RIS 的相位调控码本和 RIS 单元的位置矢量，按照累加的方式合成得到 RIS 整体的反射方向增益。文献[88]中给出了由 RIS 单元的反射方向增益合成 RIS 整体的反射方向增益的具体方法。而 RIS 单

元的反射方向增益可以根据其电磁特性,用物理光学法或全波方法等较高精度的电磁传播理论得到。文献[89]中用 \cos^q 模式拟合 RIS 单元的接收和反射方向增益,不失为一种简化近似方法。对于第二部分射线,即未经 RIS 反射,由发送端直接抵达接收端的射线,其几何计算和电磁计算符合射线跟踪标准流程,与无 RIS 辅助通信系统并无差异。

最后,将上述两部分射线合并,提取每条射线的功率、时延、离开角、到达角等信息,即可得到一个单 RIS 辅助传输系统的确定性信道模型。

5.2.3. 混合信道的建模方法及 RIS 物理模型抽象

基于地图的混合信道模型 (Map-based Hybrid Channel Model, MHCM) 被国际标准化组织第三代合作伙伴计划 (The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 和国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 采纳,用于移动通信系统的方案选择和性能评估,相关模型给出了基站 (Base Station, BS) 与终端 (User Equipment, UE) 之间的大尺度及小尺度三维 (Three-Dimension, 3D) 信道特性,支持 0.5GHz~100GHz 频段、大带宽、大规模多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 及空间一致性、阻挡、氧衰、时变、多普勒、绝对时延、双移动、确定性地面反射等特性的建模。其中, MHCM 在信道模型准确性与计算量之间进行了平衡,分为确定性部分和统计部分:通过射线追踪技术进行确定性计算,反映信道的确定性分量;通过统计部分补充因为地图误差、配置简化和粗糙表面散射带来的影响,反映信道的统计分量。

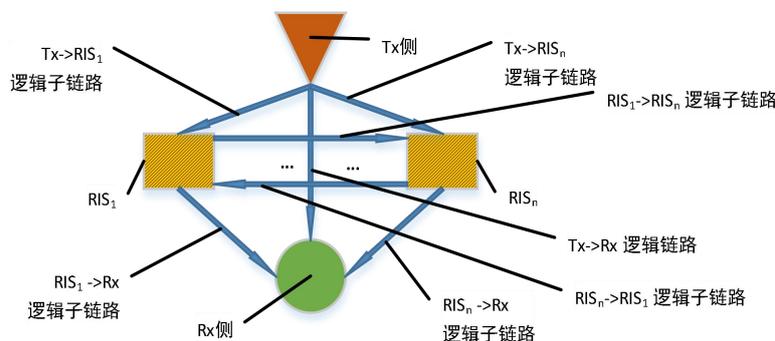


图 33 收发信道逻辑链路有向图

在 MHCM 基础上^[89],当基站作为发射信号源 Tx,终端作为接收设备 Rx,多个 RIS 作为无源可控反射节点时,发射侧 (Tx) 与接收侧 (Rx) 之间的信道模型,除了考虑现有模型 Tx 与 Rx 之间的无线信道链路,还应考虑 Tx-RIS-Rx 之间的链路,其关键在于 1) Tx-RIS 信道模型; 2) RIS 在码本控制策略基础上对不同来波方向的极化入射信号激励的响应模型; 3) RIS-RIS 信道模型; 4) RIS-Rx 信道模型。

为了平衡复杂精确与可用简化,可基于 RIS 部署的原则、调控目标来具体确定可能的逻辑链路组合,因为只有 RIS 接收到的信号有足够强度时,RIS 对最终信道才有显著影响,这也是基于模型效率和模型精度均衡的一个考虑,图 34 给出了基于 MHCM 模型的智能可控电磁表面的建模流程^[89]。

物理 RIS 面板可建模为由多个入射极化电磁波所激励的多个虚拟逻辑基站,每个逻辑

基站的发射功率，基于能量守恒原理，由馈入电波的功率密度、波矢方向、RIS 面板面积和插损共同确定，每个逻辑基站的极化辐射方向图由 RIS 面板各单元的码本所确定的阵因子方向图和 RIS 单元的极化辐射方向图共同确定。基于电磁散射理论和 Stratton-chu 方程，在假设 RIS 单元为理想导体的情况下，给出了一种 RIS 单元极化辐射方向图的确定方法，基于实测和仿真模型的对比，验证了该方法的有效性。

对于理想导体（Perfect Electric Conductor, PEC）而言，单元表面电流由磁场激励，需要结合 RIS 单元的极化配置分解到 RIS 单元的两个极化方向上，而后再基于 RIS 单元在不同极化方向的控制码本计算 RIS 单元的合成辐射方向图或场点场强，不同馈入极化电磁波所激励的散射电场和散射磁场可以进一步简化和分解为：

$$\begin{aligned}
 \vec{E}_{pol_x}^s(\vec{r}) &= \frac{-jkZ_0}{4\pi} \iint_S \hat{r} \times \left[\hat{r} \times \left[(\hat{n} \times \vec{H}^t)^T \cdot \vec{V}_{pol_x} \right] \vec{V}_{pol_x} \right] \cdot \frac{e^{-jk|\vec{r}|}}{|\hat{r}|} ds' \\
 \vec{H}_{pol_x}^s(\vec{r}) &= \frac{jk}{4\pi} \iint_S \hat{r} \times \left[\left[(\hat{n} \times \vec{H}^t)^T \cdot \vec{V}_{pol_x} \right] \vec{V}_{pol_x} \right] \cdot \frac{e^{-jk|\vec{r}|}}{|\hat{r}|} ds' \\
 \vec{E}_{pol_y}^s(\vec{r}) &= \frac{-jkZ_0}{4\pi} \iint_S \hat{r} \times \left[\hat{r} \times \left[(\hat{n} \times \vec{H}^t)^T \cdot \vec{V}_{pol_y} \right] \vec{V}_{pol_y} \right] \cdot \frac{e^{-jk|\vec{r}|}}{|\hat{r}|} ds' \\
 \vec{H}_{pol_y}^s(\vec{r}) &= \frac{jk}{4\pi} \iint_S \hat{r} \times \left[\left[(\hat{n} \times \vec{H}^t)^T \cdot \vec{V}_{pol_y} \right] \vec{V}_{pol_y} \right] \cdot \frac{e^{-jk|\vec{r}|}}{|\hat{r}|} ds'
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中， \vec{v}_{p1} 和 \vec{v}_{p2} 分别是 RIS 两个正交的极化方向单位矢量， Z_0 是自由空间波阻抗， \vec{E}^s 和 \vec{H}^s 分别是场点的电场强度和磁场强度， \vec{H}^t 是 RIS 单元源点位置表面磁场总场强度， \hat{n} 是 RIS 单元源点位置的单位法向量， $\hat{r} = \vec{r} - \vec{r}'$ ， \vec{r}' 是源点位置矢量， \vec{r} 是场点位置矢量， S 是 RIS 单元区域， \vec{k} 对应频点的波矢。

当给定馈入电磁波矢的极化方向及入射角时，在远场情况下，RIS 单元的辐射方向图可在公式（8）基础上，考虑能量守恒及 RIS 单元远场条件，通过综合归一化得到 RIS 单元两个正交极化分量对应的极化辐射方向图。

RIS 面板每个单元的相位调制可以基于两个极化方向进行独立调控或同调或仅调整一个极化方向的相位，这与具体的 RIS 面板配置或实现相关。对于单极化 RIS 面板，非可控方向的码本可以配置为一固定值 π ；对于双极化码本同调面板，可以给各 RIS 单元配置相同的码本或有固定相位偏差的码本。

对于入射角给定的线极化馈入电磁波可以基于 RIS 面板极化配置和码本配置激励出两个独立的极化辐射方向图，这是通过 RIS 虚拟基站进行 RIS 面板等效的基础。

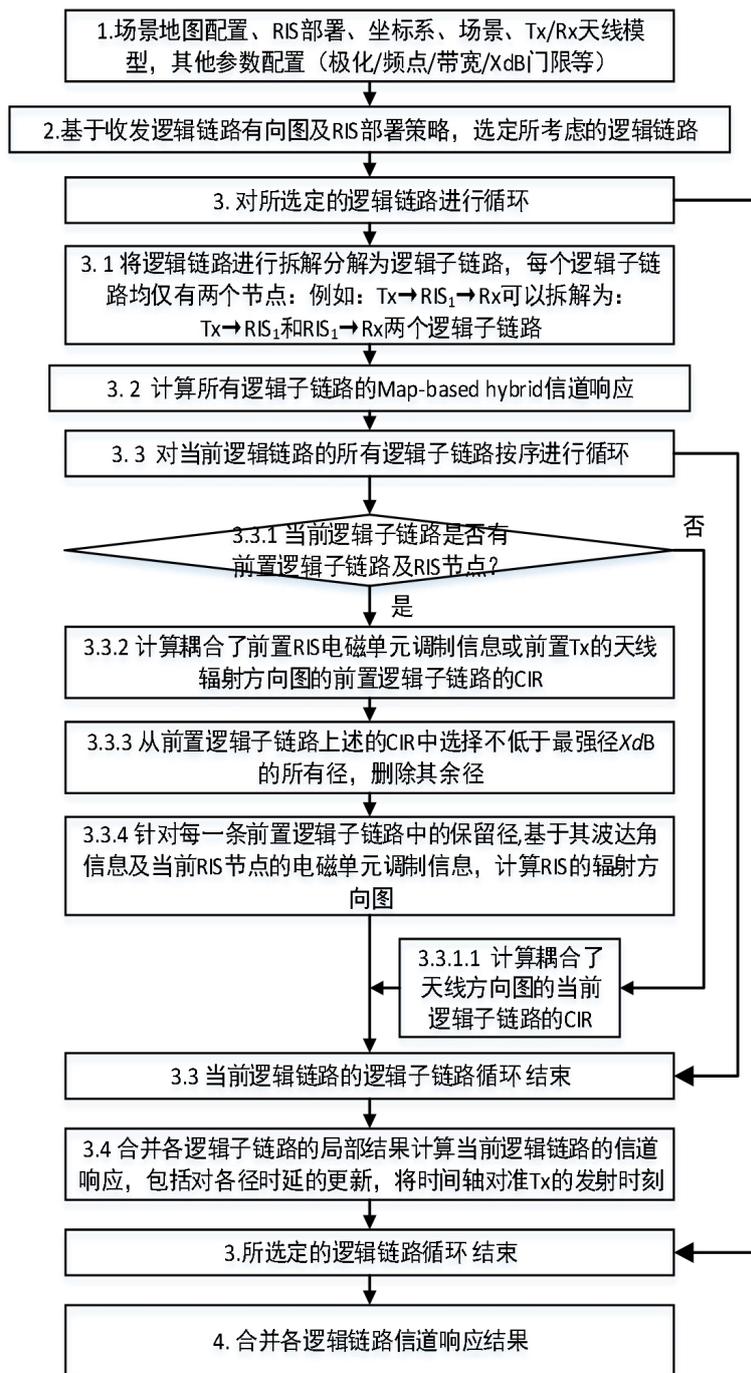


图 34 RIS 无线信道建模流程

5.3. 智能超表面辅助传输关键技术

5.3.1. 信道估计与反馈

RIS 辅助的无线通信系统中，除了基站与终端之间的视距信道外，还包括“基站-RIS”及“RIS-终端”的级联信道。级联信道状态信息（Channel State Information, CSI）获取是采用准无源 RIS 系统中需要解决的基本问题之一，要实现 RIS 的性能增强并实现对电磁环境的智能控制，获取精准的 CSI 不可或缺。信道信息获取包括了信道估计、波束训练、码本

反馈等多种方式。RIS 信道信息获取面临多方面的挑战：RIS 单元数增加带来的信道估计维度极大提升；被动信道估计使得分段信道的获取存在困难；RIS 表面面积增大带来的近场信道估计问题；硬件误差对信道估计精度造成影响以及宽带信道下出现波束偏移现象等。在现有的文献中，基于 RIS 的网络大多数采用基于导频的信道估计方式^{[89]-[96]}。在该方案中，发射机将已知的导频信号发送给接收机，接收机根据接收到的导频信号来估计信道。导频信号的发送可以是在上行链路中也可以是在下行链路中。在基于 RIS 的无线通信系统中，潜在的信道估计方法包括如下几种。

基于二态反射的设计^[97]：整个信道估计时间分成多个子阶段。在第一个子阶段中，RIS 中全部的反射单元都处于闭合的状态，基站只需估计基站到用户的直连信道。因此，基于 RIS 协同的无线通信系统可被简化为传统的不含 RIS 的无线通信系统，进而通过经典的解决方案，如最小二乘法或最小均方误差等算法可以实现对直连信道的估计。在接下来的每一个子阶段，RIS 的单个反射单元被依次打开，并保持其余反射单元是闭合的状态。基站依次估计由基站到反射单元以及反射单元到用户的级联信道。最后，通过最小二乘法或最小均方误差等算法对所有子阶段的估计结果来完成对整个系统的信道估计。

基于最小方差无偏的设计^[98]：在整个训练阶段，将 RIS 所有的反射单元处于开启的状态。首先，仍将整个级联信道估计时间分成多个子阶段。在每个子阶段，RIS 的最佳相移矩阵为离散傅立叶变换矩阵。因此，基于全部子阶段所有接收的导频信号来实现对级联信道的估计。

基于二时序的设计^[99]：考虑两种不同的时序。基站到 RIS 的位置通常都是固定不变的，因此，其信道状态在较长时间内保持不变，表现为大尺度的时序属性。而由于用户的移动性，导致其与基站和 RIS 间的信道状态将频繁的改变，因此，表现为小尺度的时序属性。在大尺度时序下的高维度的信道矩阵可以通过双链路导频传输策略进行估计。从长期的角度，由高维度引起的导频开销可以忽略。在小尺度时序下，尽管需要频繁的估计信道信息，但是由于其低维度的特性，导致其导频开销很低。因此，平均的导频开销将会降低。对基于长期 CSI 的传输设计，在传输开始时，BS 估计或测量长期 CSI，这种长期 CSI 多体现为信道的统计特征。基于此长时间的统计 CSI 计算出随后所有相干块中使用的波束形成矢量和相移，直至统计 CSI 发生变化。

基于多用户相关性的设计^{[100]-[101]}：首先，通过基于最小方差无偏的信道估计方法对第一个用户的级联信道进行估计。然后，基于多用户间的相关性对其他用户的级联信道进行估计，从而降低导频开销。

基于压缩感知的设计^[102]：压缩感知可以将稀疏的级联信道进行压缩，达到减少导频开销的目的。但传统的压缩感知算法，如正交匹配追踪，不能保证对信道估计的准确度，特别是在低信噪比的情况下。因此，基于信道估计的联合稀疏矩阵恢复方法被提出来解决准确度的问题，但其导频开销仍然很高。因此，将整个 RIS 分为多个子面，其中子面里的所有 RIS 反射单元具有相同的信道系数，估计的信道系数将被大大的降低。如果联合这两个技术，将极大降低导频的开销。例如，原子范数最小化(Atomic Norm Minimization, ANM)属于 off-grid 压缩感知技术，可用于 RIS 辅助的无线通信系统的信道估计。在这种方法中，根据信道结构创建无限个“原子”，信道是这些“原子”的线性组合。基于 ANM 的 RIS 信道估计目标是找到使信道矩阵/向量的原子范数最小的线性组合的系数及对应的原子。与其他压缩感知技术相同，信道矩阵/向量需要有一个稀疏表征。与传统的压缩感知方法相比，如 on-grid 压缩感知，ANM 可以提供更准确更高效的估计信道，实现高分辨率信道恢复。

低开销码本反馈设计^[103]：对于 RIS 辅助的 MIMO 系统，频分双工的下行信道反馈由于

级联信道维度的扩大而成为一个巨大的挑战。为解决该问题，部分研究设计基于有限参数反馈的传输方案设计。一个方向是采用基于分层模拟码本，利用有限反馈消息在 RIS 处设计模拟移相器以指示最佳波束指数。此外还可以进一步分析 RIS 信道的特性对级联信道反馈进行更高效的降维压缩并采用低维码本进行反馈。

自适应级联反馈码本设计^[104]：对 RIS 所级联的基站-RIS-用户信道而言，由于基站、RIS 和用户三者的移动状态不同，基站-RIS 子信道和 RIS-用户子信道存在不同的信道分布特性。为更好地量化分段子信道，提高信道反馈精度，可以根据子信道的分布特性设计自适应级联反馈码本。在有限反馈开销下，通过反馈比特数的合理分配动态生成符合信道特性的量化码字，能够降低因有限反馈带来的性能损失。

部分主动辅助信道估计^{[105]-[106]}：RIS 具有被动反射特性，不需要配置大量射频链路，阵子数目多，这使得其 CSI 的获取存在困难。为解决该问题，部分研究采用具备少量感知和信号处理功能的主动单元的 RIS 硬件结构设计。在无源 RIS 表面部署少量连接到基带的有源元件，通过压缩感知工具进行导频数明显降低的 RIS 信道估计和重建，并利用深度学习研究反射矩阵设计，实现接近速率上限的性能。对纯被动 RIS，在第一阶段先进行 BS 的 AOD 和 UE 的 AOA 估计，然后估计其他信道组成；对混合主动传感器 RIS，假设交替上行链路和下行链路训练以估计分段信道，可以以更低的信道路径损耗实现信道估计。

假设基站处可以得到当前通信系统的完整 CSI。现有的传输设计工作可分为完美 CSI 和非完美 CSI。完美 CSI 基于瞬时 CSI 完全可用的假设来考虑传输设计。前述对智能超表面信道估计与反馈的分析主要集中在理想 RIS 假设方案设计，但考虑到信道估计误差是不可避免的，如果在传输设计中认为估计的 CSI 是完美的，那么得到的解决方案很可能无法满足 QoS 要求。在 RIS 辅助通信系统中，由于需要估计与 RIS 相关的额外信道，这个问题进一步恶化。理想 RIS 假设即每个反射元件具有恒定的幅度、可变的相移，以及对不同频率的 RIS 单元具有相同的响应。不同的误差类型和量级可能对信道估计方案应用于工程产生不同的影响，需要在设计中充分考虑。现有研究提出了一种基于级联信道不完美 CSI 的 RIS 辅助多用户系统的鲁棒传输设计框架，采用有界 CSI 误差模型和统计 CSI 误差模型来表征级联信道估计误差。

5.3.2. 波束赋形

RIS 波束赋形原理是通过改变反射单元对入射电磁波的相位响应，使面板上所有的反射单元在特定方向上的反射波同相叠加，从而让反射能量集中在一个较小的立体角内。波束赋形不仅可以获得更高的方向性增益，还可以降低反射信号对邻区的干扰。通过基站侧与 RIS 侧的预编码波束赋形联合优化，还可以实现更安全的无线通信。

5.3.2.1. 波束赋形算法

对于 RIS 用于提升覆盖的场景，通常基站和终端之间因存在阻挡而无直连链路，需要依靠 RIS 产生人工反射径形成虚拟直射链路。如果基站与 RIS 之间、RIS 与终端之间均只有视距（Light of Sight, LoS）路径，或者除视距路径之外的非视距多径可以忽略，则波束赋形设计相对简单。但实际应用场景一般会更复杂，这增加了基站侧与 RIS 侧的预编码波束赋形联合优化的复杂性。例如基站与 RIS 之间、RIS 与终端之间可能只有非视距（Non Light of Sight, NLoS）路径或同时存在 LoS 和 NLoS 路径，会使得信道变得复杂。又例如单个 RIS 服务多个用户、多个 RIS 服务单个用户，多个 RIS 服务多个用户，甚至同时存在多个基

站多个 RIS 协同服务多个用户，以及多个 RIS 协作实现多跳传输的情况。对于这些复杂场景，从干扰抑制、信道容量、能效、谱效等角度考虑，都需要对基站和 RIS 进行联合的波束赋形设计。此时所要解决的问题已不再是单纯的 RIS 反射波束调控问题，而是在一定的约束条件下实现 RIS 辅助的通信系统的性能最优化问题。

基于交替优化算法 (Alternating Optimization, AO)：联合波束赋形设计通常会因为多约束条件而难以得到闭式解，只能通过数值方法求解，而其优化模型的非凸特性又导致常规方法求解困难，通常需要采用交替优化的方式迭代求解。但是其使用的约束、优化目标或者研究场景存在差异。优化目标包括：谱效和能效最大化、多用户的最小信噪比最大化、符号错误概率最小化、多用户的和速率最大化等。约束包括基站最大功率约束、最小的信噪比约束和中断概率约束等。交替优化算法存在的主要问题是需要处理时延，且复杂度比较高，迭代求解的收敛效率和避免陷入局部最优是实际应用中需要特别关注的问题，尤其是超低时延传输或者超高速移动场景。另外，准确的高维度级联信道信息是非常难获取的，而算法性能对此又非常的依赖。

基于半正定松弛优化算法：对非凸的单元模量的约束条件的一种常规的处理方法是将 RIS 被动波束赋形矢量转化成秩为 1 的半正定矩阵。通过应用半正定松弛法 (Semidefinite Relaxation, SDR) 并忽略非凸秩为 1 的约束条件，原始的非凸问题转化成凸的半正定规划 (Semi-Definite Programming, SDP) 问题。此问题可以由许多有效的凸优化工具进行求解。但如果所获得的矩阵的秩不为 1，则通常使用高斯随机方法来解决此问题。然而，通常情况，所构建的秩为 1 的解决方案所获得的解是次优解。此解可能对于原始的 RIS 被动波束辅助的设计并不用。它不仅会导致整体性能的降低，而且也无法保证基于 AO 迭代算法的收敛性。因此，两种其他有效的算法包括定点迭代法和流形优化法 (Manifold Optimization, MO) 用来设计 RIS 被动波束赋形。相对于 SDR，这两种算法可以达到相对较高的系统性能和较低的计算复杂度。

基于分支定界优化算法：由于 RIS 被动波束赋形的非凸特性，通过标准的凸优化很难获得最优解。而分支定界法可以解决 NP-hard 离散和组合优化的问题，以及一些特定的连续性函数的优化问题。因此，对于 RIS 被动波束赋形的问题，分支定界法可以获得全局最优解，尽管此方法需要更高的计算复杂度。但是，此方法可以作为性能基准之一，来验证次优解的相关算法的有效性。

基于迭代的优化算法：其主要思想在于获得本地最优解或者是获得在可接受的计算复杂度的前提下的次优解。这些算法包括不限制于连续细化算法，共轭梯度算法，定点迭代法和流形优化法 (MO) 等。这些算法可以更好地寻求性能和计算复杂度的平衡。

基于量化的优化算法：在有限的相移的假设下，量化方法可以将每一个离散的相移变量松弛成连续的变量。通过松弛化，所获得的连续变量被量化到离他最近的离散值。但是，量化方法可能导致系统性能的降低。此外，通过连续松弛化后，非凸的单元模量的约束条件仍然存在。

5.3.2.2. 波束训练

基于码本的设计可以有效降低反馈开销，对降低系统成本、提升通信效率具有重要作用。由于 RIS 带来的级联信道特性，其对应的训练码本通常为分级码本，这使得其码本训练与传统 MIMO 具有不同的性质，需要合理设计 RIS 码本及波束训练方案。

基于码本 RIS 的快速波束训练方案^[103]：为减少 RIS 辅助上行链路通信的导频开销，该文献所提出的快速波束训练方案将波束训练被分为两个阶段，在第一阶段中，用户端采用

全向传输，RIS 进行波束训练以获得最优无源波束；在第二阶段中，RIS 采用最优无源波束并且固定不变，用户端进行波束训练以获得最优的有源波束。此外，在 RIS 端的波束训练中，多波束扫描方案被提出进一步降低波束训练所需的导频开销。

基于分层码本的 RIS 相移优化^[104]：首先，基于最小二乘法的分别适用于 RIS 的分层模拟预编码码本以及移动端的分层混合预编码码本被提出，其中码本设计需要满足功率约束和硬件限制。基于所提出的分层码本，波束训练被分为多个阶段，每个阶段测试不同层码本的待测码字，其中每一层的待测码字由其上一层的最优码字决定。随着波束训练的进行，最优码字的范围被不断缩小，直至找到 RIS 和移动端的最优码字。此外，作者还基于波束训练得到的最优码字，对移动端进行定位以获得更高的传输速率。

基于级联码本的 RIS 波束训练：级联码本由两个子码本组成，两个子码本中的码字分别适用于视距路径和非视距路径。因此该码本可以根据不同的场景来改变其结构，并捕捉到路径增益的不同分布特征。在所提出的级联码本的基础上，推导得出有限反馈比特有限情况下的误码率的理论上界，并且将反馈比特分成四部分生成子码本的有限信道反馈方案被提出，使得误码率的上界最小化。

5.3.2.3. 联合波束赋形和信息传输

联合波束赋形和信息传输旨在进一步提高 RIS 辅助系统的信息传输速度。在此方案中，RIS 一方面通过波束赋形定向反射电磁波，以增强收发机之间的通信。同时，通过调整反射单元的电磁波响应，RIS 将额外的信息调制在反射信号上，以被动地上传其信息^[36]。

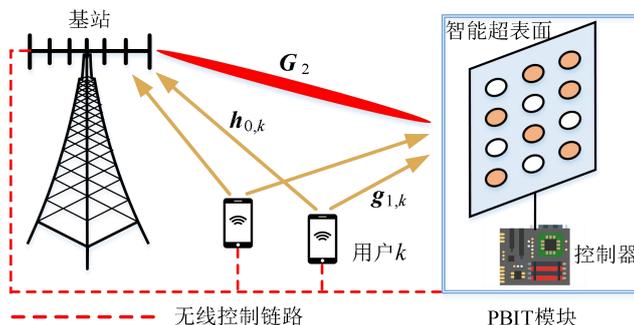


图 35 基于 RIS 的联合波束赋形和信息传输系统

RIS 的信息传输能力一方面可以满足其自身的通信需求。首先，在一个通信系统中，RIS 需要在链路建立过程中上传握手信息，并在与进行收发器进行同步过程中报告确认信息。其次，RIS 辅助通信系统的配置和维护过程中也产生了一定量的信息需要被上传。例如，需要对 RIS 工作环境（如温度、湿度、压力等）进行实时监测，以避免 RIS 元件损坏，并在发生损坏时报告故障信息。另一方面，RIS 的被动信息传输能力可以辅助其周边的其他小型设备，比如传感器，进行信息传输，从而协助构建一套绿色物联网系统。相比于通过专门的射频链路上传信息，基于 RIS 的联合波束赋型和信息传输机制具有以下三个主要优点：1) 无需额外的硬件成本和能量消耗来生成或重传射频信号；2) 不消耗额外时间/频率资源，因为 RIS 的信息被调制在来自射频发射机的反射信号上；3) RIS 的联合波束赋型和信息传输具有提高 RIS 辅助系统的复用增益的潜力。

基于 RIS 的联合波束赋型和信息传输在系统设计上还存在诸多开放性问题的。一是 RIS 反射模式的设计。即如何设计 RIS 的信息调制方式（比如开关调制，幅度调制，相位调制，

频率调制)以简化 RIS 赋值通信系统的设计,使得该系统具有更大的容量,更高的自由度等。二是波束赋型的设计。由于 RIS 单元的电磁波响应承载了额外的信息,其反射单元的状态具有一定的随机性。这使得 RIS 的波束赋型的设计成为一个随机优化问题。解决随机优化问题通常要比解决传统波束成形设计中涉及的确定性优化问题更加困难。三,由于来自 RIS 信息调制在来自射频发射机的信号上,使得这两路信息乘性地耦合在一起。接收端基于观测信号同时恢复这两路信息是一个双线性信号恢复问题。这比传统的通信系统中的单线性信号恢复更复杂。此外,基于 RIS 的联合波束赋型和信息传输系统的信道容量刻画,发射机和 RIS 端的联合波束赋形,以及收发机和 RIS 的一体化设计也值得进一步研究。

针对 RIS 波束赋形求解复杂度高这一问题,文献[107]提出了一种基于 RIS 分区的低复杂度设计方案。该设计将 RIS 分为多个区块,每个区块包含多个反射单元。RIS 分区设计不再对反射单元进行逐单元优化,而是将各个区块看作设计实体,从而减小 RIS 波束赋型问题规模。具体来说,RIS 分区设计发掘每个区块对入射电磁波的反射特性,仅优化每个区块对入射电磁波的反射方向与波前相位,在区块层级实现对智能超表面的宏观调控,以大幅降低系统优化开销。

5.3.3. AI 使能通信

人工智能(Artificial Intelligent, AI)使能 RIS 通信的关键思想是用基于 AI 技术解决 RIS 通信中的关键信号处理问题,如信道获取、波束赋形设计和资源调度等,从而获得比传统技术更高的系统效率。通过对海量数据集的训练,信道获取可以更加准确。此外,AI 还可以帮助克服由硬件损伤和导频污染引起的非线性问题。另外,通过制定不同的 AI 学习策略,可以针对不同的目的配置波束赋形设计,还可以实现资源调度以构建更好的网络拓扑。因此,对于波束赋形设计和资源调度,人工智能将有助于增强总体设计的鲁棒性。

5.3.3.1. AI 使能 RIS 信道获取

为充分利用采集数据的信息或解决信道模型未知情况下的信道估计问题,可以将人工智能新方法用于信道估计。近年来发展迅速的人工智能为传统无线通信提供新的处理范式,为智能超表面无线通信信道估计带来了新的解决方案^[108]。人工智能真实数据的内在特征,以数据驱动的方式处理信号,适用于模型不匹配、资源不足、硬件损坏以及动态传输等非理想 RIS 场景。

对于直接信道获取,文献[109]提出直接估计 RIS 通信的级联信道,并将信道估计问题表述为去噪过程。然后采用深度残差学习(Deep Residual Learning, DReL)方法隐式学习残差噪声,以从基于噪声导频的观测中恢复信道系数。接下来,借助贝叶斯原理推导了基于深度残差网络的最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE)估计器。然而,在多用户情况下,由于所有用户的信道训练总是在基站集中实现,所以所有训练数据集都应该传输到 BS。因此,其传输开销将非常高。文献[110]采用了联邦学习(Federated Learning, FL)框架,其中神经网络将在用户而不是 BS 处进行训练。在这种情况下,基站和用户之间只需要相互传输更新的参数。

由于 BS 天线阵列和 RIS 单元的规模都很大,直接估计 RIS 信道将导致巨大的训练开销。

一种解决方案是通过压缩感知技术从有限的测量中重构信道矩阵。然而，压缩感知的方法需要复杂的数学运算，并且对噪声测量不鲁棒。最近的研究表明，通过人工智能辅助方法，可以从部分信道推断出整个信道。对于全无源 RIS，可以在终端（即 BS 或用户）处实现全级联信道的外推。文献[111]采用了常微分方程（Ordinary Differential Equation, ODE），并在卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）中建立了不同数据层之间的连接，这可以比普通的 CNN 更好地拟合采样子信道和全信道之间的映射。同时，在最近设计的混合有源/无源 RIS 架构中，一些 RIS 单元具有信号处理能力^[112]。因此，可以在 RIS 处直接实现单边信道的估计^[113]。文献[114]激活了一部分 RIS 单元，恢复了激活单元处的单个信道，然后从部分信道中推断出完整的单边信道信息，其中采用了 CNN。此外，作者还提出了一种基于概率抽样理论的天线选择网络，以选择这些有源 RIS 单元的最佳图案。另外，文献[115]提出了元素分组策略以减少级联信道估计开销。在该方案中，每组中的每个 RIS 单元都保持打开状态，共享相同的反射系数，并假设具有相同的 CSI。实际上，一个组中的信道不相同。在 RIS 分组方案中只能观测到部分而不是全部信道信息。此外，与每个组内不同 RIS 单元相关的已实现信道将相互干扰。受天线外推思想的启发，可以设计一个神经网络来消除每个组内的干扰，并获得精确的部分级联信道。利用这些部分信道，可以进一步利用其他深度学习（Deep Learning, DL）方案来外推全级联信道。

RIS 信道估计还应包含高移动性场景，而天线域信道外推思想可以移植到时域。时域上的信道外推本质上是时间序列重建和预测问题，可以应用递归神经网络（Recurrent Neural Network, RNN）。然而，当时变 RIS 信道具有长期依赖性时，RNN 模型将面临梯度消失或爆炸的问题。另一种解决方案是设计基于长短期存储器（Long-Short-Term Memory, LSTM）的方案，将其存储器与时间连续状态分离。然而，由于硬件损坏和环境干扰，部分规则采样点可能会失效，只能获得非规则采样的信道。受 ODE 结构的启发，可以通过在具有系数的非规则采样点之间添加连接和线性计算来构建连续时变信道模型。在这种情况下，可以使用最近提出的潜在 ODE，以在时域上获得最高的信道外推性能。与传统的 ODE 模型不同，在潜在 ODE 中，潜在变量框架可以显式地解耦系统的变化、观察的可能性和识别模型^[116]。因此，基于随机子采样测量的时域预测问题将变得更容易处理。与 RNN 和常规 ODE 相比，基于潜在 ODE 的信道预测在其预测 MSE 方面有显著改进。

5.3.3.2. AI 使能 RIS 波束赋形

现有关于 RIS 的研究大多是遵循传统的模型驱动的波束赋形设计方案，高度依赖信道信息的准确性和实时性。但是在实际工程部署中，无论从复杂度、开销和对协议的兼容性的角度看，对 RIS 辅助通信系统进行信道获取是相当困难的。已有研究从规避信道估计带来的实现困难出发，提出了不依赖信道信息的盲波束赋形方案。基于一些将神经网络应用于 RIS 的信道估计或波束赋形的研究，已有研究提出将二者合并直接学习如何基于接收信号进行波束赋形，这种结合的深度学习方法能够从原始数据中提取更多的相关信息。还有研究利用接收信号的统计特性设计波束赋形算法，其基本思想是通过给出足够多的反射相位的随机样本，利用接收信号功率的条件样本平均值设计波束赋形算法，该方法已被证明能适用于多块 RIS 的协同部署以及长期大尺度衰落信道。这类方案适用于信道估计困难且 RIS 只进行

简单的离线操作的补盲场景。

RIS 通信最重要的增益来自波束赋形，波束赋形可以控制信号向期望方向的反射并提高传输质量。这可以通过连续调谐 RIS 单元的相移和反射幅度来实现。然而，高精度调整将导致巨大的硬件成本和控制电路实现的巨大挑战。这里，我们将介绍三种场景下典型的基于 AI 的波束形成设计策略，即全无源 RIS、混合无源/有源 RIS 和高移动性情况，如图 36 所示。

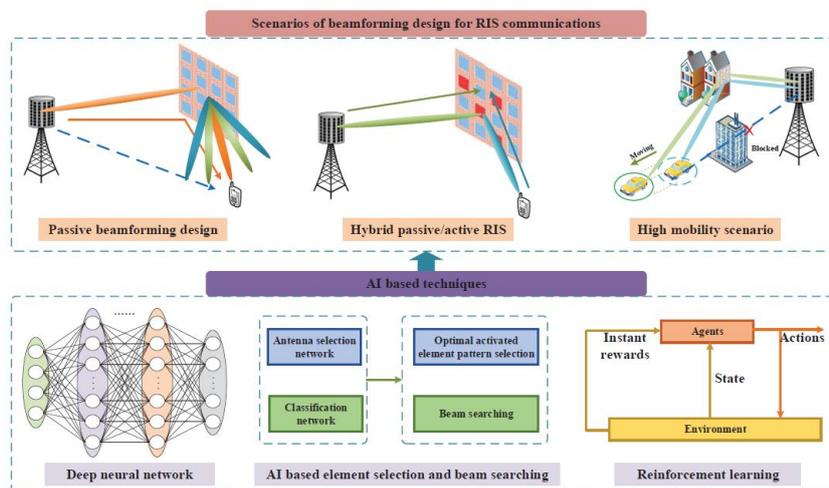


图 36 基于 AI 的 RIS 通信波束赋形设计

对于无源 RIS 的波束赋形设计，文献[117]针对室内通信场景提出了一种基于 DL 的方法来实现 RIS 配置，其中深度神经网络 (Deep Neural Network, DNN) 被训练以精确地映射用户的位置和 RIS 单元的配置。然后，可以通过最大化用户侧的接收信号强度来获得最优 RIS 波束赋形矩阵。然而，这种基于监督学习的方法需要大量数据集，并且需要很长的训练时间。文献[118]开发了一种基于深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 的算法，其中一个代理将随着时间的推移通过与环境的试错交互逐渐得出其最佳行为，然后生成最佳波束赋形矩阵。该算法不仅可以从环境中学习并逐渐调整其行为，而且可以获得与加权 MMSE 和基于迫零波束赋形的分数规划相媲美的性能。还有一些关于基于 RIS 的混合预编码架构的工作，其中 BS 处基于相控阵的模拟预编码被 RIS 波束赋形所取代。由于离散相移的非凸约束，系统和速率的最大化问题很难解决。文献[119]提出了一个基于并行 DNN 的分类问题，并提出了一种基于 DL 的多离散分类 (DL based Multiple Discrete Classification, DL-MDC) 混合预编码方案。在该结构中，使用多个 DNN，并且每个 DNN 的输出对应于基于 RIS 的模拟波束赋形矩阵的对角元素。与交叉熵优化^[120]相比，基于 DL-MDC 的方案可以显著减少运行时间，性能损失可以忽略不计，并且在 Saleh Valenzuela 信道模型和实际的 3GPP 信道模型中都能很好地工作。

对于混合无源/有源 RIS 情况，RIS 只能从激活单元获得和处理采样子信道信息。与被动波束赋形设计相比，由于 RIS 只能从有限的激活反射单元获取有效信号，用于波束赋形设计的 NN 的输入数据将受到限制，这将损害^[118]中基于连续优化的方案的性能。文献[121]借助 DFT 矩阵构造了有限波束赋形码本，从码本中选择最佳波束赋形可以看作是一个分类问题。然后，作者设计了基于全连接神经网络 (Fully-connected Neural Network, FNN) 的分类网络，以联合获得混合无源/有源 RIS 的最优激活反射单元模式和搜索的波束赋形矩阵。

对于高移动性场景，RIS 波束赋形设计的主要挑战是精确匹配时变特性。文献[122]考虑了 THz 无人机网络，其中移动用户由 BS 和飞行 RIS 服务。基于波束轨迹的先验观测，提

出了一种 DL 算法来主动预测最优 RIS 波束赋形。由于无人机的移动性，基于门控递归单元（Gated Recurrent Unit, GRU）的网络结构用于捕获频谱数据内的时间相关性并学习序列相关性。此外，受文献[111]中的 ODE 结构和 LSTM 框架的启发，可引入另一种结合信道和波束跟踪的可行方案。首先，可以通过关闭/激活部分 RIS 单元对 RIS 辅助信道进行采样。类似于基于 LSTM 的时域信道外推，可以构建基于 ODE 的时变信道模型，获取时域采样子信道，然后通过 LSTM 实现信道跟踪。利用在任何预期时间获取的天线域采样子信道，可以通过分类网络选择相应时间的最佳波束赋形矩阵。

要想实现新一代电磁无线通信中接近 Shannon 香农定理给定的通信速率上限，首先需要通信大数据的信息熵进行基带数字编码；然后需要对根据实际电磁环境对电磁信道的自由度进行智能调控，以实现动态的最优 MIMO/RIS 波束赋形。为了对通信大数据进行最优的压缩编码，需要对其进行数据特征挖掘、特征提取和去相关。自 2020 年始，中山大学与美国伊州理工大学的廖少林团队研发了高效的字典学习压缩感知神经网络（Dictionary Learning based Compressed Sensing Neural Network, DL-CSNet），把大数据的字典学习和压缩感知技术有机地结合起来，使得图像复原的信噪比提升了 3 个数量级以上。

文献[123]对近场下 RIS 的码本训练所需的导频开销量剧增的问题，提出了一种基于深度学习的近场 RIS 波束训练方案。首先，适用于近场信道的 RIS 码本被设计出来，其中每个码字由用户相对 RIS 的角度和距离共同决定。在波束训练期间，仅部分近场码字被测试，测试所得的接收信号被作为神经网络的输入。训练好的神经网络根据接收信号输出近场 RIS 码本中的最优码字的索引，从而有效地减少了导频开销。

5.3.3.3. AI 使能的资源调度

AI 辅助资源调度的优化目标包括以下方面：频谱和能源效率、环境感知范围、系统部署成本和网络拓扑等，多个 BS 和 RIS 的联合波束赋形设计以及联合功率分配。此外，在高移动性场景中，由于信道链路与 RIS 和 BS 上的调度密切相关，用户移动性将进一步影响 RIS 通信的最佳网络拓扑。因此，还应讨论移动性场景中的网络拓扑优化。

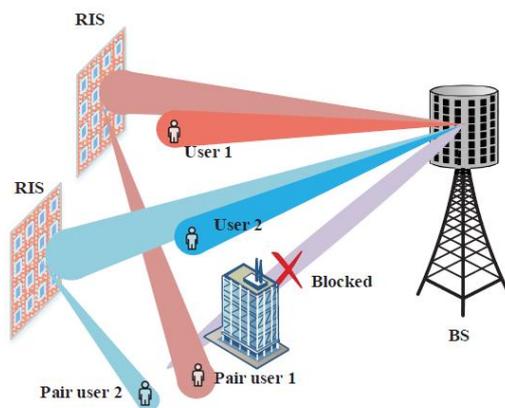


图 37 基于 RIS 的 NOMA 场景中的用户分组和波束赋形示意图

为了最大化下行链路非正交多址接入（Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA）网络的和速率，文献[124]调用了一种修改的对象迁移自动化算法，将用户划分为几个相同大小的簇，通过深度确定性策略梯度（Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG）算法，以协同控制 RIS 处的多个反射元素。与先训练后测试的过程不同，文献[124]采用了一种长期的自调整学习方案，通过迭代探索和开发，在每个给定环境中搜索最佳动作，即用户分区和 RIS

波束赋形。这种 RIS 辅助的 NOMA 下行链路网络实现了比传统正交多址 (Orthogonal Multiple Access, OMA) 网络更高的和数据速率。此外, DDPG 算法可以长期有效地学习资源分配策略的动态特性。

为了提高 RIS 辅助毫米波通信的性能, 文献[125]提出了一种机器学习授权的波束管理框架, 以精确对齐 BS 和用户终端之间的波束。在此框架内, 利用 DNN 来识别复杂的网络环境, 这可以帮助每个 BS 选择其最佳 RIS。此外, 采用在线学习方法来预测终端的移动性。通过集成环境和移动性感知, 可以通过将用户的位置映射到其最佳 RIS 来实现主动波束切换方案。除了许多具有单个 RIS 的工作外, 还有许多工作讨论了多个 RIS 的协作。例如, RIS 通信中的信道链路也可以以多跳方式进行调度, 这可以有效地对抗严重的传播衰减并提高环境传感的覆盖范围。然而, 由于多用户干扰、数学上难以处理的多跳信号和非线性约束, 关于最大化多 RIS 系统的和速率的优化问题的公式是非凸的。文献[121]提出了一种基于 DRL 的算法, 用 DDPG 算法扩大 RIS 通信的感知范围。为了克服 DRL 框架中超大 Q 表的不切实际的搜索复杂性, 使用了基于 DNN 的 Q 学习方法。此外, DDPG 结构的核心是由完全连接的 DNN 组成的评论家和演员网络。输入波束赋形矩阵和信道信息后, DDPG 算法将输出当前迭代的波束赋形设计。

文献[126]采用 DRL 方法, 通过联合优化发射功率分配、RIS 波束赋形矩阵和 RIS 单元的开/关状态, 最大化了平均能量效率。尽管预定义的奖励可能受到各种未知方面的影响, 例如用户信道上的不确定性, 但预期奖励和实际奖励之间的差异可以由 DNN 在 DRL 框架中使用, 其中反馈来自不确定环境。虽然 RIS 通信中的资源调度涉及对多个用户的 NN 进行训练, 但 FL 框架也是处理资源调度问题的可行方法。文献[127]将 FL 应用于 RIS 辅助的毫米波系统, 并实现了隐私保护设计。FL 被应用于训练 DNN 模型, 用于用户信道与其最优 RIS 波束赋形之间的映射。此外, FL 可以帮助并行优化多个 RIS, 同时保护私有 CSI。然而, 由于所有本地参数都是在共享无线信道上传输的, 因此不期望的传播误差将不可避免地恶化全局聚合的性能。文献[128]提出了一种交替优化算法, 以最小化聚合误差并加快 FL 的收敛速度。通过调用半定松弛方法, 解决了联合优化发射功率、接收标量和相移的非线性和非凸问题。此外, 基站、RIS 和用户的位置信息也可以辅助资源调度。利用位置信息的知识, 可以通过几何方法容易地获得不同对象之间的位置关系, 即基站-RIS 或 RIS-用户。利用用于波束赋形选择的预定义集合, 可以利用适当设计的 NN 来搜索位置信息和最佳波束赋形索引之间的映射。

在移动场景中, 由于用户的位置在变化, 因此对变化环境的适应对于资源调度是必要的。为了在移动性场景中最大化多 RIS 辅助的多小区网络的上行链路和速率, 文献[129]提出了一种基于多代理 DRL 的动态控制方案, 其中 BS 被视为独立的代理。特别地, 每个 BS 自适应地配置其本地 UE 功率、本地 RIS 波束赋形及其组合器。针对多个基站动作耦合导致的非平稳性, 提出了一种有效的消息传递方案, 该方案要求相邻基站之间仅有有限的信息交换。对于车辆通信, 路侧单元 (RoadSide Unit, RSU) 可以利用 RIS 在未覆盖区域内提供间接无线传输。由于车辆以不同的方向和移动速度移动, 并且在盲区有不同的停留时间。如果向盲区内的所有车辆提供相同的业务量, 低机动性车辆将比高机动性车辆获得较差的服务质量。因此, 文献[130]研究了 RIS 赋能车辆通信中的联合车辆调度和无源波束赋形, 以最大化盲区中车辆的最小可达速率。这个问题被分解为两个子问题: 无线调度和 RIS 相移优化。前者通过 DRL 解决, 以获得各种道路条件和 RIS 选择情况下的最优 RSU 调度方案, 而后者通过块坐标下降 (Block Coordinate Descent, BCD) 算法解决, 以最大化当前服务车辆的瞬时和速率。

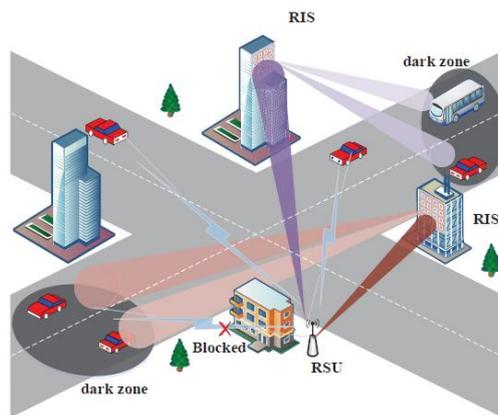


图 38 车辆通信场景中的 RIS 调度

5.4. 智能超表面增强多址技术

多址技术是实现多用户通信的关键使能技术，一般地，多址技术可简单划分为正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)和非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)两大类。

5.4.1. RIS 辅助 TDMA 系统

时分多址接入(Time division multiple access, TDMA)作为正交多址接入典型代表，其主要实现方式是为用户分配正交的时间资源，以避免用户间干扰。对于传统的通信系统，在信道的相干时间内，每个用户的信道条件保持不变，TDMA 的频谱效率通常低于 NOMA。

而对于 RIS 辅助的通信系统，在相干时间内，可通过动态调控 RIS 的相位，为多用户通信创造有利的时变信道，以获得时间分集。在 RIS 辅助的 TDMA 系统中，每个用户在时间尺度上依次被调度，因此可在各个用户的调度时隙内为该用户设计特定的 RIS 相位，即通过动态调控 RIS 相位，提升 TDMA 系统性能。而在 NOMA 系统，由于所有用户同时被调度，通过动态调控 RIS 相位对于提升系统性能并不显著。已有研究针对两用户下行通信系统，发现在特定的用户位置分布条件下，TDMA 相比于 NOMA 在保证用户服务质量下需要的基站功率更小^[131]。此外，针对能量受限的上行传输系统或者无线供能的场景，早期研究^[132]论证了动态调控 RIS 相位可以使得 TDMA 获得比 NOMA 更大的吞吐量性能。而考虑端到端传输时延、用户公平性等其他性能指标或因素，NOMA 相比于 TDMA 具有固有的优势，而对于 RIS 辅助的 TDMA 和 NOMA 性能比较可能会有不同的结果。

5.4.2. RIS 辅助 NOMA 系统

未来无线通信业务量以及无线设备接入量将呈爆炸式增长，目前移动通信系统中采用的正交多址接入技术受限于无线资源在时域、频域、码域、空域等方向的自由度，不仅使得原本有限的无线资源难以充分利用，而且也极大地限制了网络中用户的接入数量。为了提升 RIS 辅助通信系统的频谱效率和用户连接数，与非正交多址接入技术结合，构建 RIS 辅助 NOMA 系统，是一个极具潜力的解决方案^{[133]-[134]}。NOMA 技术的核心思想是允许多个用户复用相同的无线资源块(如时隙、子载波、空间波束等)，并在功率域或码字域上区分各个用户，以提升频谱效率和用户接入能力。值得一提的是，传统 NOMA 通信中可实现的通信

性能增益很大程度上取决于用户之间信道条件的差异性。通过利用 RIS 对用户信道进行重构,可以实现更加灵活的 NOMA 通信,进一步激发 NOMA 相较于 OMA 可实现的性能增益^[135]。因此, RIS 辅助 NOMA 系统可视为一种“双赢”的集成。

为了充分实现 RIS 辅助 NOMA 系统的增益,还需要克服诸多挑战。例如,对于多天线 NOMA 通信,用户执行串行干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC) 解码顺序不再仅由用户信道增益顺序决定,还需要满足额外的解码速率条件。已有研究^[136]初步提出了一种 RIS 增强的多天线 NOMA 传输框架,针对不同的 RIS 反射单元类型并且考虑多天线 NOMA 用户 SIC 解码顺序条件,通过应用凸优化方法提出了可获得局部最优解的算法,使系统吞吐量最大化。在该情况下,基站端的有源波束赋形和 RIS 端的被动波束赋形将与 NOMA 用户 SIC 解码顺序、用户分簇等设计高度耦合,当用户数量众多时,相关低复杂且高效的优化设计算法有待进一步研究。

功率域 NOMA 另一个典型的特征在于可以和传统的正交多址接入方案结合,从而折中系统的性能和 SIC 实现的复杂度。值得注意的是,受益于 RIS 动态波束调控, RIS 辅助的 TDMA 通信系统可以获得有利于各用户通信的时变信道,从而带来系统吞吐量的显著提升。在考虑 RIS 的影响下,结合 TDMA 和 NOMA 的优势,以平衡系统的性能与实现复杂度,是一个值得考虑的问题。通过将 TDMA 与 NOMA 结合,对用户进行分组,其中,组内的用户以功率域 NOMA 的方式传输,共享相同的 RIS 波束赋形矢量;组间用户占用正交的时间资源并为每个用户组设计各自的 RIS 波束赋形矢量,可形成一种 NOMA-TDMA 混合多址技术。通过合理的设置用户组数目, RIS 辅助的 NOMA-TDMA 系统可以灵活高效地平衡系统复杂度与吞吐量性能^{[137]-[138]}。然而, RIS 辅助的 NOMA-TDMA 系统也为性能优化带来了新的挑战,用户分组准则不再由用户的信道直接决定,需要考虑结合 RIS 相位带来的等效信道的影响,这使得 RIS 相位设计与用户分组设计高度耦合。对于上行通信场景,早期的研究分别在被动式与主动式 RIS 辅助的 TDMA-NOMA 场景下,开展了吞吐量最大化的研究^{[139]-[141]}。

5.4.3. RIS 辅助 OTFS 系统

未来无线通信中高移动性通信环境众多,包括自组织车联网、无人机网络等。在这些通信场景内将存在大尺度多普勒频移,且极大压缩信道相关时间,致使 OFDM 遭受严重的子载波间干扰,给大规模 RIS 信道参数获取带来严重挑战。近年来,正交时频空调制 (Orthogonal Time Frequency Space Modulation, OTFS) 作为一种新型的二维调制方式 (时延域和多普勒域),为 6G 提供了新的选择,通过简单在 OFDM 系统的收发端分别加上逆辛傅里叶变换和辛傅里叶变换,就可以有效抵抗 OFDM 系统中多普勒频移带来的码间干扰,开拓了新的信号表征域量化辨识通信资源,在高速运动的场景中具有更高的稳定性和可靠性,为高移动通信研究提供了新的视角。

OTFS 给出了新的二维信号空间,即延迟-多普勒域信号空间,可以有效地将高动态时变信道转换为延迟-多普勒域中近乎静态的稀疏二维信道。OTFS 系统主要存在的问题是收发端的信号处理,包括信道估计尤其是信道均衡的复杂度过高,而 RIS 收发机可以在实现大规模阵列的同时,降低其在接收端信道均衡的复杂度,因此 RIS 实现的大规模阵列硬件能够非常好的适配 OTFS 系统。探索 RIS 辅助通信同 OTFS 波形的融合机制,深挖 OTFS 在延迟-多普勒域强信道表征能力,将有助于进一步扩展 RIS 的应用范围。

然而,对于移动环境下的 RIS 辅助 OTFS 通信,还存在一定挑战。首先,OTFS 本身较为复杂的信道估计和均衡过程使得其很难应用于经典的多天线系统中,再加上 RIS 本身作

为无源器件且存在级联的至少两段信道，导致其在信道估计上具有较高的难度。其次，RIS存在的频率选择性相移等性质会导致调制的较宽带信号产生不需要的畸变，引入RIS的额外干扰，因此宽带性能稳定的RIS硬件，不仅仅对OFDM系统，对OTFS系统也是一个迫切的需求。另外，不同于OFDM符号，OTFS符号持续时间较长，如采用若干OTFS符号专用于部分虚拟信道估计，将严重制约系统频谱效率。此外，因OTFS调制在延迟-多普勒域中的双循环移位接收模型结构，终端在延迟-多普勒域发送的导频和数据经过高动态级联信道将产生混叠。理论上，可在延迟-多普勒域放置保护带，规避导频和数据间潜在干扰。由于保护带尺寸同RIS级联信道的最大多普勒频移和最大延迟成正比，在高移动场景下，也将大大降低系统频谱效率。因此，RIS支持的OTFS系统的导频设计和保护间隔的选取也是需要解决的问题。最后，需针对OTFS下的新收发信号模型对RIS相移矩阵进行设计，在RIS系统中设计高效的基于OTFS的传输体制以及对应的延迟多普勒域信号处理算法，提升高移动环境中RIS辅助通信的性能。

5.4.4. RIS 辅助分块多址接入系统

利用RIS服务多用户时，不同用户的波束可能同时入射在一个RIS面板上。由于RIS同时只有一种调控状态，这将导致RIS的波束赋形调控很难同时优化适配多个用户的信道。为了使用RIS同时服务多个用户，除了采用NOMA方案外，另一种有前景的方案是将一块RIS分为多个子块，基站将给不同用户的波束打到不同的子块上，通过合理设置不同子块的调控相位，可以实现同时优化匹配不同用户的信道，从而很好地实现多用户接入^[142]。与NOMA技术相比，分块多址接入可以很好地消除多用户间地干扰，从而可以达到很好地性能。与TDMA相比，分块多址接入可以实现同时传输，具有更高地频谱效率。基于RIS的分块多址接入机制，可以用于单小区多用户接入场景，也可以用于多小区多用户接入场景^[143]。

5.5. 智能超表面网络部署

从通信环境复杂度和RIS部署及调控复杂度角度，可以把部署场景分为小范围可控的受限区域和大范围复杂环境两大类，这两类场景对RIS网络部署原则和需求有较大差异^[144]。小范围可控的受限区域，有机会部署足够密度的RIS并实现精确电磁环境智能调控，例如典型的室内热点覆盖区域。大范围复杂环境，业务分布相对稀疏，不方便也不必要实现无线传播环境的精确控制。对于此类环境，可以重点对无线传播信道的大尺度特性进行调控，包括阴影衰落、自由空间传播路损等大尺度特性。

基于上述两种情况，可以进一步从四个方面考虑RIS的部署，即部署模式、共存和共享、增秩和覆盖增强以及覆盖区域^[145]。（1）从网络部署模式来看，RIS部署场景可以包括独立模式和网络控制模式。这两种模式在控制链路要求、测量/控制信令交互和网络部署复杂性方面有所不同，并有各自的优缺点。（2）从共存和共享的角度来看，RIS部署场景可以包括多运营商网络共存、单用户接入和多用户接入、多RIS部署以及频谱属性（例如，授权频谱和非授权频谱）。（3）从增秩和覆盖增强的角度来看，RIS部署场景可以包括部署在基站附近、部署在小区边缘、部署在单元中部、或无处不在的泛在部署。其中，泛在部署将可能真正带来无线网络架构的变革。（4）从覆盖区域的角度来看，RIS部署场景可以包括偏远地区、城市室内/室外、NTN等。

5.5.1. RIS 网络部署模式对比

(1) 网络控制模式与独立模式

从是否受控于网络的角度，RIS 部署模式可以分为两类。其中，RIS 由网络控制的部署模式称为“网络控制模式”，RIS 自我控制的部署模式称为“独立模式”^[145]。表 3 比较了独立模式和网络控制模式的优势和挑战。

表 3 网络控制模式与独立模式的对比

类型	优势	挑战
网络控制模式	<ul style="list-style-type: none"> 支持多网络协同 支持多用户接入 更好满足授权频谱无线网络共存需求 	<ul style="list-style-type: none"> 网络部署相对复杂 需要部署网络控制链路 需要设计测量和控制信令迭代流程
独立模式	<ul style="list-style-type: none"> 无需网络控制链路 网络易部署 适用于非授权频谱低共存需求场景 	<ul style="list-style-type: none"> 存在多网络干扰协同问题 可能造成严重干扰 无法很好地支持多用户接入

通过对上述两个种模式优劣势的比较分析，并结合授权频谱和非授权频谱的特点，可以得到观察：1) 网络控制模式：适用于复杂网络和具有高网络共存要求的授权频谱场景（即蜂窝网络）；2) 独立模式：适用于简单网络、局域覆盖的非授权频谱技术场景（例如，Wi-Fi）。

(2) 集中式与分布式

考虑多用户网络的 RIS 部署，网络中一个基站与 $K > 1$ 个用户（或 K 组相邻用户）通信，用户彼此之间距离足够远。在这种情况下，有两种不同的策略来部署网络中的 N 个 RIS 反射元件：1) 分布式部署，其中反射元件形成多个分布式 RIS，每个 RIS 位于一个用户附近；2) 集中式部署，所有的反射元件形成一个位于基站附近的大型 RIS。注意，对于 $K = 1$ 的单一用户情况，上述两种部署策略是等效的，因为都在基站处实现最大接收信号功率。然而，对于 $K > 1$ 的情况，这两种部署策略通常会导致用户和基站之间的信道不同。在集中式部署下，所有用户都可以通过 N 个反射元件来服务；而在分布式部署下，每个用户只使用 N 个反射元件的小部分来获得最近的 RIS 的服务，因为较远的 RIS 反射的信号由于路径损失很大而太弱。

就系统容量而言，集中式 RIS 部署通常比分布式 RIS 部署更有利，但值得注意的是，在部署 RIS 时，可能还需要考虑其他实际因素。首先，分布式部署需要更多的 RIS，因此基站和 RIS 控制器之间需要更多的回程链路来交换信息，从而导致网络开销增加。其次，由于站点/空间限制，在基站附近部署大型集中式 RIS 并不总是可行的，而在用户端部署多个分布式 RIS 通常更灵活。第三，集中对抗分布式 RIS 部署的性能增益是在双信道条件的假设下，而在实践中，两种部署策略下的信道统计数据可能会在 LoS 概率，NLoS 衰落分布、信道相关性等方面有很大差异，这可能导致不同场景下的不同比较结果。

5.5.2. RIS 网络部署面临的挑战

现有的 RIS 研究主要关注自引入 RIS 以来经典通信问题所面临的新挑战，如信道估计

和波束形成，这些研究主要关注单网络系统模型假设下的问题研究。在实际的无线移动通信网络中，多个网络的共存是一个传统的问题，RIS 的引入可能会带来全新的网络共存挑战。实际网络中，入射在 RIS 面板上的无线信号既包括 RIS 优化调控的“目标信号”，也包括其他“非目标信号”，RIS 将会对这两类信号同时调控。在非受控情况下，RIS 对来自其他网络的“非目标信号”进行非预期的异常调控，将导致网络共存问题。文献[144]初步分析了 RIS 网络的共存问题，并提出了可能的解决思路。基于文献[144]，文献[146]进一步对 RIS 网络共存进行了深入分析和建模，并对具备带外滤波器的新型多层 RIS 结构和 RIS 分块机制两种新型 RIS 结构进行了深入分析和评估。文献[147]提供了高铁通信场景下的 RIS 网络部署挑战分析与方案。

RIS 技术可以部署于以用户为中心的 Cell-free 网络，组成 TRP 节点和无源 RIS 节点混合的异构网络。在 Cell-free 网络中 RIS 可以与网络中的多个 TRP 站点协同传输，进一步无线网络的覆盖质量。同时，Cell-free 网络中 RIS 与 TRP 站点的“多对多”的协作模式对信道测量、波束赋形和资源调度提出新的挑战。例如，Cell-free 网络不仅要测量各个 TRP 站点与终端之间的信道状态，还要测量各个 TRP 站点经过 RIS 到达终端的级联信道的信道状态，导致 RIS 级联信道估计的导频开销和计算复杂度增加。文献[148]提供了一种双时间尺度的信道信息获取和预编码方案，通过终端用户与 RIS 单元的局部匹配，降低信道信息获取开销和预编码优化复杂度。

6. 新型智能超表面

智能超表面以其对电磁波独特的智能调控方式,为新型无线信号调制硬件范式与智能无线环境提供无限可能,各种新型智能超表面设计不断涌现。

6.1. 反射和透射一体的智能超表面

目前大部分的 RIS 的工作模式仅支持仅反射或仅透射模式中的一种,本节将介绍一种新型的融合反射和透射功能于一体的 STARS (Simultaneously Transmitting and Reflecting Surface, STARS)。相比单一功能的 RIS, STARS 可以实现 360° 的覆盖和具有更多的调节自由度等优点^{[149][151]}。与此同时,其硬件实现和物理原理也更加复杂。

在未来的无线网络中, STARS 在室内、外均拥有许多的应用场景。其中最有潜力的应用之一即是提升无线网络的覆盖面积和信号质量,这是因为 STARS 对于提升室内、外的信号连接性有着革命性的作用。尤其是对于毫米波等高频段的电磁信号,其穿透、绕过墙壁等障碍的能力很弱,将 STARS 部署在墙体或窗户上,并对透射信号进行波束赋形,可以大大提高室内外信号的连通性。同时,对于室内或室外的通信场景, STARS 也可以被部署到汽车、飞机或室内墙体中,其全方位的信号覆盖能力是仅反射/透射式 RIS 所无法实现的。在具体的通信应用方面,首先,基于 STARS 支持 NOMA 是一个具有潜力应用方向。考虑到传统 NOMA 通信中可实现的通信性能增益很大程度上取决于用户之间信道条件的差异性。因此可以利用 STARS 对反射和透射信号进行能量分割,增加反射用户和透射用户的信道条件差异,由此构建 STARS 增强的“反射-透射”NOMA 通信系统。其次, STARS 增强的全空间物理层安全通信是另一个应用方向。利用 STARS 提供的 360° 重构传输信道,无论窃听者处于空间任何位置, STARS 都可可在一个或多个窃听方向上的有用信号强度进行削弱,实现保密传输。未来, STARS 还有更多的应用场景,如 STARS 增强的无线能量传输、可见光通信和通信感知一体化技术等等。

6.1.1. STAR 硬件设计与调控

与传统 RIS 类似,调控 STARS 主要靠控制其电磁单元的表面阻抗来实现,进而控制入射信号在其表面激发的表面电流的分布、强度与相位。而对于 STARS,调控反射和透射系数的关键在于其电磁单元不仅需要支持电流,还需要支持磁流(即涡旋电流)。对于 STARS 的硬件实现,主要可以分为阵列式和超材料式两种^[152]。阵列式的结构类似于传统的反射式天线阵列,主要由多个电磁单元周期性排列而成。其电磁单元大小往往在厘米量级,因此,其每个电磁单元内可以容纳二极管、电容、电感等调节器件。对于基于超材料电磁单元的调节往往需要直接控制对应材料的电磁特性。例如对于单层或多层石墨烯,可以通过调节其电导率来控制各层的反射、透射系数。

任意一个 STARS 单元可以处于纯反射状态 (R mode)、纯透射状态 (T mode) 或叠加态 (T&R mode)。与纯反射式 RIS 相比, STARS 的每个单元都有着更多的可调节自由度,

这也极大的增加了其调相的复杂度。为了便于整体优化，这里给出三种基本的调控机制：能量分割、模式切换和分时切换^[153]。

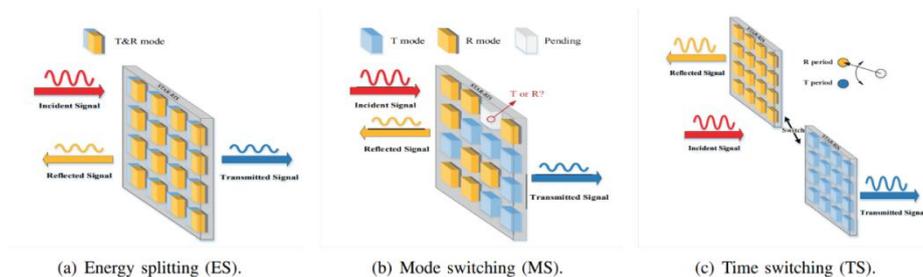


图 39 STARS 基本调控协议

能量分割（Energy splitting）：如图 39（a）所示，此模式下所有 STARS 电磁单元处于反射和透射叠加态，每个电磁单元具有独立可调的信号幅度和相位控制。此模式虽然具有较高的调节复杂度，但是可以获得最佳的 STARS 波束赋形增益。

模式切换（Mode switching）：如图 39（b）所示，此模式下 STARS 的单电磁元分为两组，各组的电磁单元只工作在纯反射状态或纯透射状态下。与能量分割模式相比，此模式的优点是更加便于实际实施。当所有电磁单元完成分组后，模式切换 STARS 可以看作由反射式 RIS 和透射式 RIS 组合而成。然而由于并不是所有电磁单元都参与了反射和透射，此模式的缺点是无法获得最大的波束赋形增益。

分时切换（Time switching）：如图 39（c）所示，此模式下整个 STARS 周期性的交替于纯反射状态和纯透射状态之间。这样的设计使得反射信号过程与透射信号过程的通信设计优化相互独立，然而，该模式需要频繁地切换电磁单元的工作模式，因此对于时钟同步的要求较高。

6.1.2. 基于 STARS 的三维定位

反射式 RIS，只能为其正前方的用户提供通信和定位服务，位于其背面的用户无法得到支持和帮助。随着 STARS 的引入，服务背面用户将成为现实。STARS 可以支持 360 度的覆盖，支持反射和折射双模式工作。STARS 非常适合用于室内和室外的定位，它可以同时使用反射和折射来提高定位系统的准确度。如图 40 所示，在 STARS 的辅助下，室外基站可以同时为室外用户和室内用户进行定位。在这个系统中，室外用户和 BS 之间存在两条路径，即一条直射 LoS 路径和一条通过 STARS 的反射路径。对于室内用户来说，只存在一条通过 STARS 的折射路径。通过控制 STARS 反射和折射控制矩阵以及两种模式的功率分配，可以同时满足室内和室外用户的 QoS 要求。对于高导频开销情形，文献^[154]优化了两个控制矩阵。表 4 简要总结了不同类型 RIS 的 3D 定位能力。

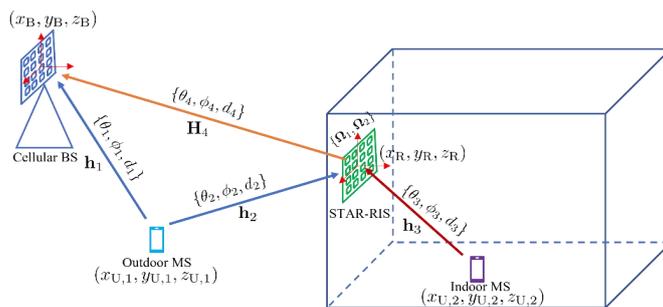


图 40 STAR-RIS 使能的室内和室外同时定位^[154]

表 4 基于不同类型 RIS 三维定位的总结

RIS 类型	RIS 数量	定位方法	覆盖范围	准确度
分布式接收 RIS ^[155]	≥ 3	基于角度	180 度	高
集中式接收 RIS ^[156]	≥ 1	基于角度	180 度	高
被动式 RIS ^[157]	≥ 2	基于角度	180 度	中等
STARS ^{[158]-[159]}	≥ 1	混合	360 度	中等

6.2. 有源智能超表面

通过将有源功率放大器集成在智能超表面单元中，使得 RIS 具有对空间电磁波进行二次场增强调控的能力，并利用数字编码技术对功率放大器的状态进行数字离散化调控，从而实现动态调控超表面的辐射远场波束可重构，单元结构如图 41 所示^[160]。该增强式调控功能将为 RIS 在链路信道增强、覆盖半径的提升、小型化及提高系统转换效率方面提供必要的基础支撑。

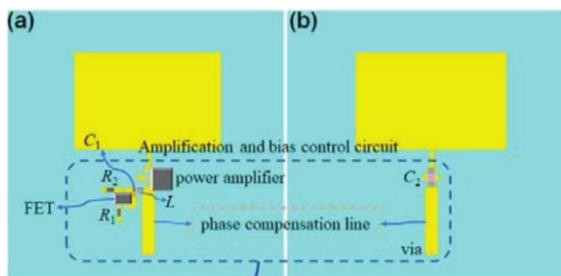


图 41 加载功率放大器的 RIS 单元结构(a)顶层和(b)底层

结合功率放大器的高功率耐受特点，集成有源功率放大器的智能超表面具备空间功率传输的功能，当采用时空编码量化矩阵的数字调制方式对功率放大器进行周期性的开关切换时，超表面具有增强模式的非线性谐波波束调控特性，并将能量及信息赋予不同谐波波束，可以实现能量与信息的同时传输，为 RIS 在智能携能通信系统中进一步应用奠定了坚实的基础，如图 42 所示。

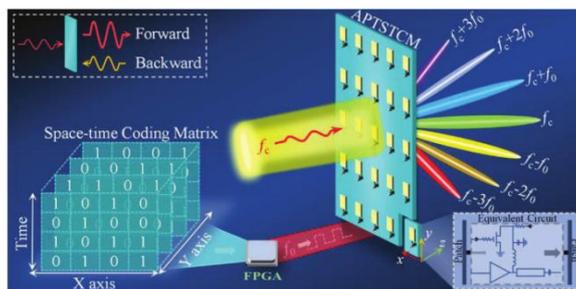


图 42 RIS 电磁能量放大、谐波调控与非互易传输

为克服 RIS “乘性衰落”效应这一难题，即 RIS 反射链路的路径损耗为发射机到 RIS 和 RIS 到用户这两段子链路路径损耗的乘积，清华大学团队提出了有源 RIS 及其对应的信号模型和系统设计方法^[161]。有源 RIS 通过在每个（或部分）RIS 单元中集成反射式有源功率放大器，如图 43 所示，对反射信号同时进行相位调控和高增益放大，从而补偿乘性衰落带来的路损。3.5GHz 频段 64 单元有源 RIS 辅助的无线通信原型验证平台实测结果表明，有源 RIS 可产生高增益的反射波束，相比于金属板，可提高接收信号功率约 10dB 以上，实现了显著的接收功率提升。不同于无源 RIS 被动反射时可忽略热噪声，有源 RIS 在放大被反射信号的同时，也将额外引入并放大不可忽略的热噪声。

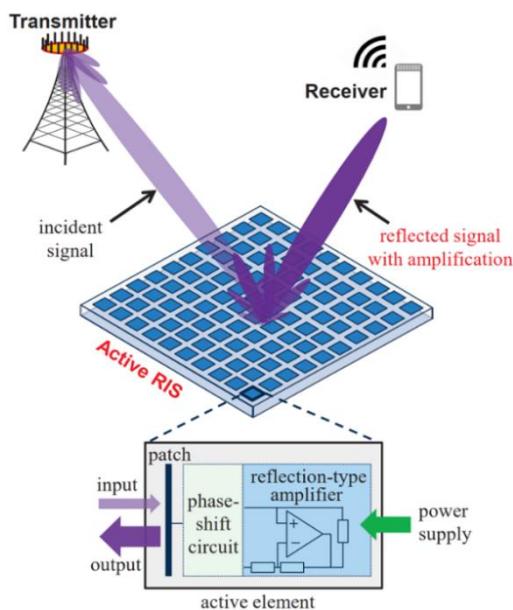


图 43 有源 RIS 对反射信号同时进行调控和放大

6.3. 基于 RIS 的新型大规模天线

由于毫米波路损较大，一般需要通过更大规模的天线阵列，以获得更高的阵列赋形增益来弥补路径损耗。受限于成本、功耗、散热等原因，大规模的天线阵列通常采用数模混合波束赋形架构。而 RIS 可以以更低的成本、功耗实现更小体积、质量的大规模天线阵列。

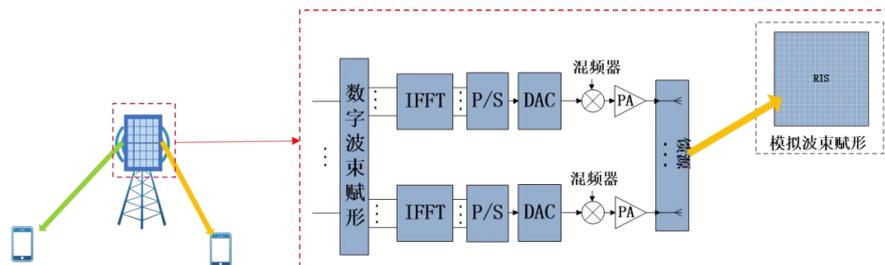


图 44 基于 RIS 的发射机架构

使用 RIS 替代基站的传统相控阵天线，可以显著降低基站的成本和功耗。此外，通过数字编码对 RIS 进行智能调控，可以实现更为灵活的波束赋形效果，获得更大的波束扫描角度。大量的 RIS 单元还可以进一步提升 RIS 的波束赋形精度。将 RIS 用作发射机的模拟天线阵列，替代数模混合波束赋形架构中的（全部或部分）模拟阵列部分，信号处理基带部分仍然在 RIS 之外进行。通信时，基站使用数字天线阵列将信号发射到基站配备的 RIS 阵面上，信号经由 RIS 阵面反射/透射后达到目标用户。与传统的天线阵列相比，使用现有的反射/透射型 RIS 作为模拟天线阵列，可能无法直接通过线路与基站的射频电路相连，而是通过空口进行连接。值得注意的是，RIS 作为发射机的模拟天线阵列，一般距离基站较近，因此，可以不考虑定义新的空中接口。由于 RIS 是基站的一部分，也不会改变系统的网络架构。

6.4. 基于 RIS 的收发机

RIS 可以实现无线通信复用技术，构建多模式复用的发射机。加载特定时空编码的 RIS 可用于精准地调控电磁波传播方向和谐波能量分布，集能量辐射和信息调制功能于一体，同时在时间域和空间域编码并处理数字信息。通过优化时空编码矩阵，可以将信息直接加载到电磁波的空间谱和频率谱特征上，来实现空分和频分复用的多通道无线通信技术^[162]。基于时空编码 RIS 实现的新体制复用无线通信发射机，具有低成本和简单架构的优势，省去了传统空分和频分复用技术中所需的天线阵列、混频器、滤波器等射频部件。根据目标用户数量和空间位置，采用直接信息编码方案的 RIS 可以同时、独立地向多用户进行实时信息传输，无需数模转换和混频过程；并且具备方向调制和安全通信的特性，在非目标位置的用户无法正确解调信息。这种时空编码 RIS 提供了一种低成本和低复杂度的方案来实施空分和频分复用技术，可以实现 RIS 收发机使能的上下行多用户通信设计以及 RIS 收发机赋能的计算和通信网络设计等^{[163]-[165]}，为新体制无线通信发射机设计提供了思路。

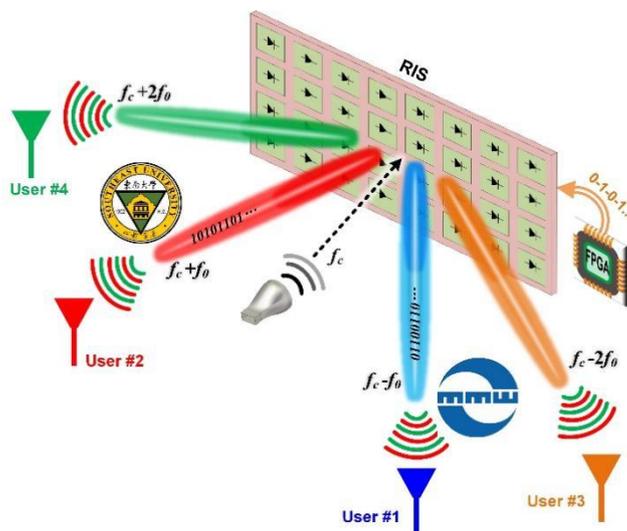


图 49 基于 RIS 的空分和频分复用发射机设计

此外，通过将不同斜率的线性时变控制信号序列应用于各向异性时空编码 RIS 的不同极化通道，可以将信息调制到不同的极化信道和频率信道上，从而实现频率-极化分集复用信号调制^[166]。利用各向异性时空编码 RIS 可以搭建的空间-频率-极化分集复用无线通信发射机，大大地简化无线通信系统的架构。相较于早期的 RIS 发射机，这种发射机所构建的系统可在更高的维度上提高信道容量和空间利用率，为其在多用户协同无线通信中的应用提供了新思路 and 新的解决方案。

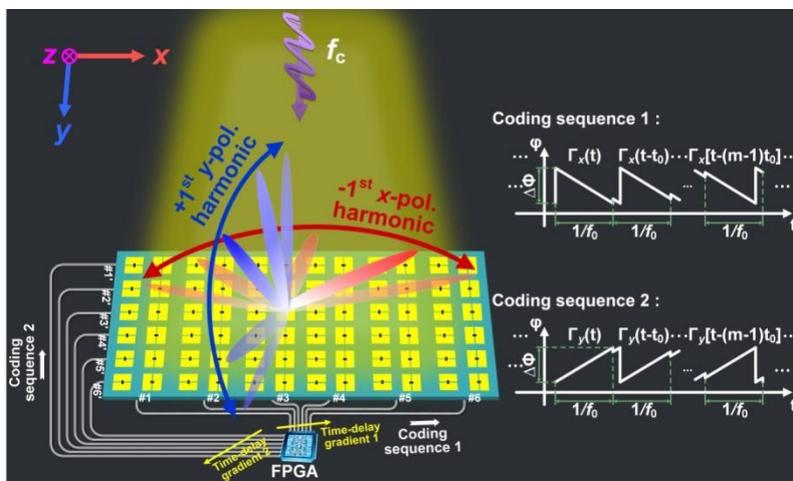


图 50 基于各向异性 RIS 的空间-频率-极化分集复用发射机设计

6.5. RIS 使能空中计算

无线模拟计算通过精细构建的传输信号将计算卸载到无线环境中。通过 RIS 设计周围的无线传播环境来实现这样的架构，被称为基于 RIS 的空中卷积神经网络架构（Air Neural Network, AirNN）。AirNN 利用波的反射物理特性来表示模拟域中的数字卷积，这是 CNN 架构的重要组成部分。与传统通信相比，接收端需要对信道的变化做出相应的响应，通常这种响应可以表示为有限脉冲响应(Finite Impulse Response, FIR) 滤波器，AirNN 主动创建信

号反射以通过 RIS 来模拟特定的 FIR 滤波器。AirNN 涉及两个步骤：首先，CNN 中神经元的权重是从一组有限的信道脉冲响应(Channel Impulse Response, CIR)中提取的，这些信道脉冲响应对应到可实现的 FIR 滤波器。其次，每个 CIR 都是通过 RIS 设计的，反射信号在接收器处组合信号可以确定卷积的输出^[167]。传统的空中计算与基于 RIS 的新型 AirNN 对比，如图 45 所示，传统的 CNN 架构，重点强调了卷积的计算步骤，输入数据形式是原始的 IQ 样本，软件中的数字卷积运算被表示为一组 FIR 滤波器（以红色框显示），不同的 RIS 配置导致了特定的通道转换等同于(a)中所示的卷积运算，(b) AirNN 架构展示了相同的卷积使用 RIS 网络进行无线环境的调节与操控。

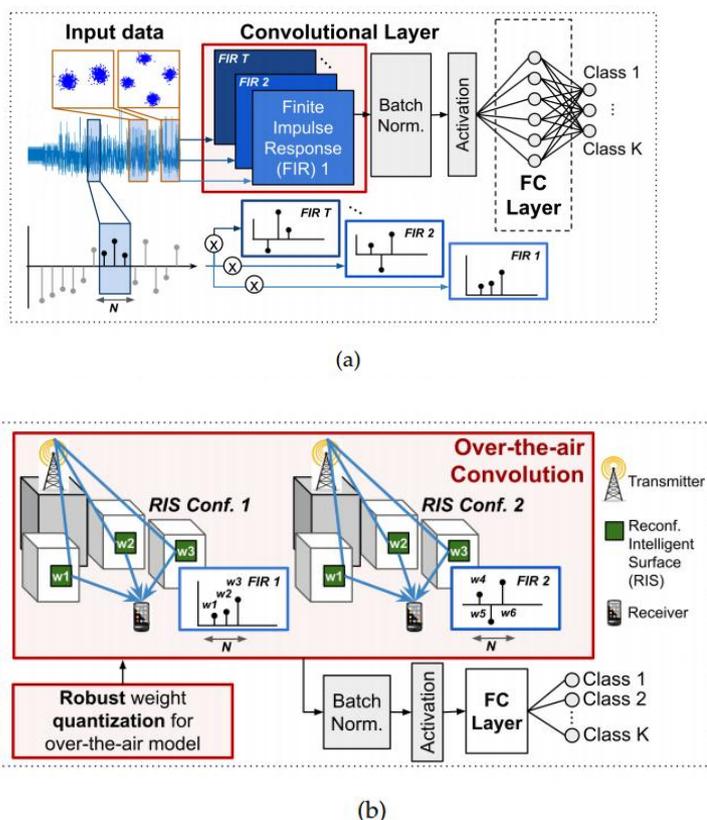


图 45 传统的空中计算与基于 RIS 新型 AirNN 的对比

为了满足未来的通信和计算需求，需要新材料技术来补充现有的通信和计算技术，从而使电子产品及其应用进一步多样化。这里将介绍基于 RIS 的智能计算超表面^[168]，如下图 46 所示，智能计算超表面由智能控制器和三层组成：负责可调信号反射、吸收和折射的可重构波束形成层、负责基于超材料的计算的智能计算层和负责系统调控的控制层。前两个多功能层相互影响，应共同配置。内部控制层是由智能控制器触发的控制电路板，重点调整波束形成层的可调参数，可由现场可编程门阵列实现。为了满足计算任务的多样化，智能计算层可以配置不同种类的超材料，例如用于无线频谱学习的神经形态计算超材料（或用于保密信号的模拟计算超材料处理等。探索计算超材料的最新趋势发现，智能计算超表面有可能使联合通信和计算成为现实。

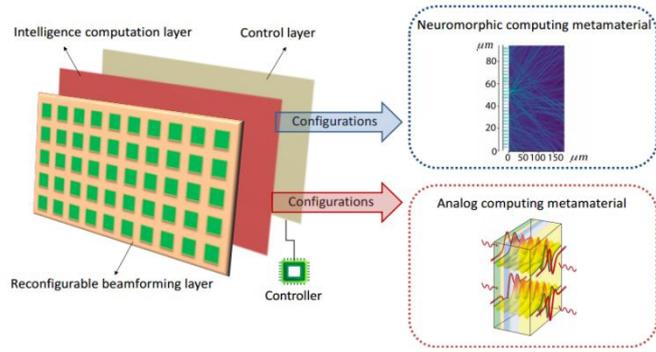


图 46 智能计算超表面的结构图

7. 智能超表面技术现状

7.1. 项目与研究

(1) 北美

2018年，美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）开展了评估无线环境编程重构可行性的研究项目。该项目侧重于研究无线环境优化是否可行，探索改变无线信道的方法，为无线通信创造更有利的环境条件。项目团队探索了使用小尺寸无线电磁单元来改变无线环境，进而影响端到端的无线信道状态；进一步的，基于控制设备的动态控制信息调整这些无线电磁单元，实时测量端到端的无线信道的变化。

2019年，NSF开展了液态金属调谐的柔性超表面的研究项目，其主要目标是通过理论基础研究，分析液态金属机械柔性（可弯曲/可折叠）超表面的潜力和局限性，设计可部署、可移动、适配地形的超表面，可按需实时调整无线电信号。

2020年，NSF开展可重构反射面实现无源和有源网络之间共存的研究项目，该项目希望通过利用RIS概念抑制接收端的信号干扰，保证多个无源和有源无线系统之间无缝共存。该项目研究了RIS增强型频谱共存网络的整体和跨层设计、性能分析、部署和优化方法。该项目提出了一个整体模型用以评估RIS部署对频谱共享场景中无线传播环境的影响，并给出了频谱共存场景下的RIS性能指标；针对无源和有源设备共存的无缝通信网络提出一种系统化的网络规划方法，用于确定RIS的部署数量和布局方式；提出一种分布式频谱共享的在线优化框架，动态优化RIS的配置；设计了具有近似连续的波束控制能力的RIS，并且在实际环境中验证了RIS增强的频谱共存的可行性。

(2) 欧洲

欧盟自2017年开始通过重大项目的方式持续资助有关智能超表面在未来移动通信网络中应用的研究。2017年，欧洲VISORSURF项目启动研发Hyper Surfaces，旨在开发一套具有可编程电磁行为的智能互联的完整硬件和软件组件。Hyper Surfaces在超表面中集成了嵌入式电子控制单元和预定义的软件编程接口；控制单元依据外部软件命令改变超表面结构，产生所需的电磁行为。

2021年1月1日，欧盟资助的RISE-6G项目开始研究基于无线电波传播控制的可重构智能表面技术，旨在实现智能、可持续和动态可编程的无线环境，进一步提升5G系统的通信能力。RISE-6G的研究计划包括：定义基于RIS的新型网络架构和运营策略；研究并验证RIS的电磁传播模型，定义RIS技术应用的基本原则；设计基于RIS的动态可编程无线传播环境的解决方案，为无线网络提供大容量连接、高能源效率、低电磁场污染和高定位精度的通信服务，同时保证频谱使用、数据保护和电磁信号发射符合法律法规要求；开发新的原型机在垂直领域进行测试验证。

2021年5月1日，欧盟资助的PathFinder项目提出无线2.0模式，希望无线信道适配于蜂窝网络的业务需求。该技术提出通过设计和部署RIS来优化无线信道。该项目旨在为RIS使能的无线2.0网络建立理论和算法基础，推动无线网络的进一步变革。PathFinder项目重点关注的研究问题包括：受物理环境启发的RIS/无线电波交互模型，用以建立RIS使无线2.0网络的理论和算法基础；RIS网络通信与信息理论模型；大规模部署的RIS网络的性能

分析模型；RIS 网络的运行方案和优化算法；RIS 原型机和关键算法的测量验证。

德国联邦教育和研究部资助的 6G-LICRIS 项目，旨在通过利用可重构智能表面（RIS）以最小的能量需求显著提高未来 6G 网络的容量和覆盖范围。该项目从 2022 年底开始，计划运行时间为 3 年。

（3）日韩

2018 年 11 月 29 日，NTT DOCOMO 与 Metawave 公司成功合作研制世界上第一个 28GHz 频段反射超表面。2020 年 1 月 17 日，NTT DOCOMO 与全球玻璃制造商 AGC 合作，成功研制世界上首个支持 28 GHz 频段 5G 网络的透明动态超表面原型系统。该透明动态超表面原型系统在一个高度透明的包装中实现了对无线电波反射和穿透的动态操控，适合在建筑物和车辆的窗户以及广告牌上不引人注目地使用。透明动态超表面原型系统可以支持完全穿透入射无线电波、部分反射入射无线电波和全部反射无线电波三种模式，通过轻微移动玻璃基板动态控制无线电波。与使用半导体的传统方法相比，该设计不仅允许动态控制波束方向，而且同时保持窗口的透明度，有利于大规模部署。2021 年 1 月 26 日，NTT DOCOMO 和 AGC 提出附着在窗户表面的薄膜状超表面透镜的超表面技术，该技术可将室外收到的 28 GHz 5G 无线电信号有效引导到室内的特定位置。新型超表面透镜由新型人工工程材料制成，在二维表面上集成大量周期性排列的亚波长器件单元。通过控制器件单元的排列形状，透明动态超表面将室外无线电信号定向到室内的特定焦点，有效的提升建筑物内特定区域的覆盖质量。这种超表面材料对 LTE 和 sub-6G 频段无线电波没有影响，不会影响传统无线频率的性能。

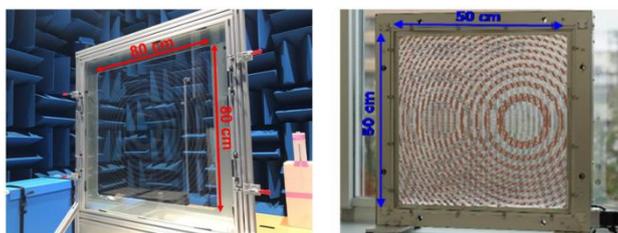


图 47 静态超表面透镜（左）和动态超表面透镜（右）

（4）中国

2014 年，东南大学崔铁军院士团队在国际上率先提出数字超材料的概念，并展示了第一块现场可编程超材料，借助 FPGA 输出序列调整超表面单元内部二极管开关的通断，在物理空间中实现了对电磁波的直接调控，开创了数字可编程超材料研究的先河，并在国际上引发大量关注。2020 年该团队设计并实现了一种基于人工表面等离激元超材料技术的亚波长间距双通道信号无线通信系统级解决方案。利用该人工表面等离激元系统，可以高质量地实现亚波长间距双通道信号的非视距无线通信，解决了传统技术中亚波长间距信号抗干扰能力弱的难题，为高度集成化的密集非视距无线通信技术发展提出了全新的解决思路。

2016 年，清华大学杨帆教授团队提出界面电磁学理论，研究物质（天然的或人造的）界面附近产生的独特而丰富的电磁现象，及其理论、方法、器件、系统和应用，已被视为现代电磁学研究中的一个重要分支领域。基于界面电磁理论的相控电磁表面技术已成为有效的 RIS 技术实现途径之一，可将相控和辐射功能集成一体化，实现无移相器的相控辐射体制，

具有成本低、功耗低、结构简单、平面轻薄等突出优势。

2021年南京大学电子科学与工程学院冯一军教授团队在智能表面关键技术上取得实质性突破，成功研制了低成本、大面积、可规模扩展的高效智能表面，具有多比特相位状态动态可调、单元独立控制等应用优势，可灵活实现动态、复杂波束及电磁波环境分布调控。

华中科技大学尹海帆教授研究团队自主研发的智能超表面无线通信原型系统成功打破业界性能记录，在不改变发射信号功率的前提下，实现了接收信号增强500倍的实测效果；完成了业界首个智能超表面的室外远距离信号传输实验，利用其信号增强作用克服电磁波远距离传播的损耗，实现了500米传输距离外高清视频流的实时播放。此外，在信号穿墙测试中，智能超表面也获得了400倍信号功率增益，极大弥补了信号穿墙损耗，保证了通信质量。

西安电子科技大学李龙教授团队和张顺教授团队自主研发毫米波无源微基站、2-bit智能超表面系统和集成有源功率放大器的透射型时空编码超表面。无线RIS原型系统采用数字编码超材料技术和智能化拼接方案，具有口径可重构和波束可重构的特定，可灵活应用于室内无线通信盲区覆盖和特定区域的信号增强；有源RIS原型系统具有对空间电磁波进行二次场增强调控的能力和非线性谐波波束调控特性，可以将能量及信息赋予不同谐波波束实现能量与信息的同时传输。通过对RIS系统的高效组网能力进行测试验证，验证了智能表面在各种复杂环境中应用的可行性，为RIS阵面系统的普适化以及商业化提供了高价值的参考数据。这些实地测试结果表明智能超表面将有望成为解决5G乃至未来移动通信网络覆盖痛点和高功耗痛点的一个关键技术。

2021年，中兴通讯完成了智能超表面第一阶段静态超表面技术原型验证，初步探索了智能超表面技术在5G盲区、弱区定点覆盖提升的可行性。2022年，中兴通讯创新性提出基于5G基站的智能超表面动态协同技术，该技术的核心是基站通过空口向智能超表面发送波束ID等信息，指导智能超表面动态选择和切换波束，实现动态波束扫描和用户跟踪，该方案将智能超表面6G关键技术进行了5G化应用。

7.2. 测试与验证

7.2.1. 方法与环境

7.2.1.1. RIS多角度射频测试

RIS的RF参数需要在OTA暗室中进行测试，以获得高精度的RF测试结果。考虑到RF参数会受到RIS入射/反射角度关系的影响，因此需要测试不同入射/反射角度组合下的RF参数，如图48所示。虽然在角度关系方面有许多入射/反射的组合，但是对于技术验证而言，通常只需要一些典型的入射/出射角度组合，例如入射/出射角度关系 30° ， 60° ， 90° 和 120° 。

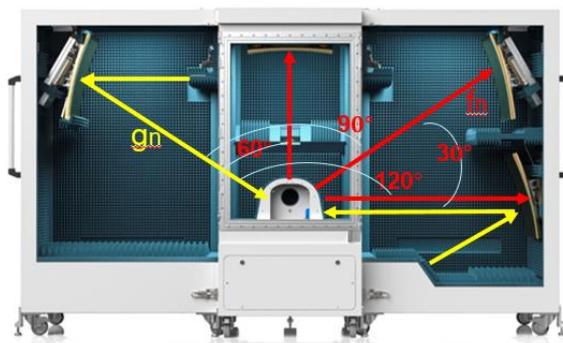


图 48 暗室测试配置

7.2.1.2. RIS 阵面 RCS 特性测量

为了更好地了解对包含 RIS 的场景进行信道建模和仿真，需要对 RIS 材料的 RCS(雷达散射截面，Radar Cross-Section)特性进行测量。双基 RCS 测量系统可以用来对 RIS 材料的 RCS 特效进行测量，如图 49 所示。双基 RCS 测量系统包括网络分析仪和双轴旋转平台，其中网络分析仪进行 S 参数测量，旋转平台有两个共轴的旋转摇臂，摇臂上分别放置发射和接收天线并且连接网络分析仪的两个端口，待测的 RIS 材料固定在转台中心。在 RIS 材料 RCS 测量中，固定发射天线的位置，然后旋转接收天线，对每个接收天线的位置测量 S21 参数，从而得到某一入射角度的 RIS 材料 RCS 特性。

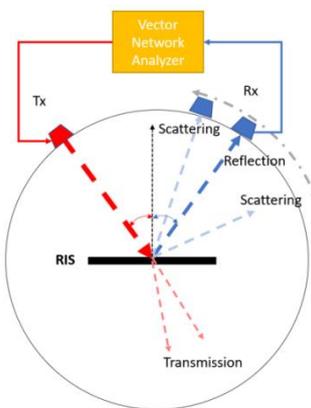


图 49 双基 RCS 测量系统原理图

7.2.1.3. RIS 场景无线信道测量

为了了解 RIS 的无线信道特性，需要相应的测量系统来进行信道测量。

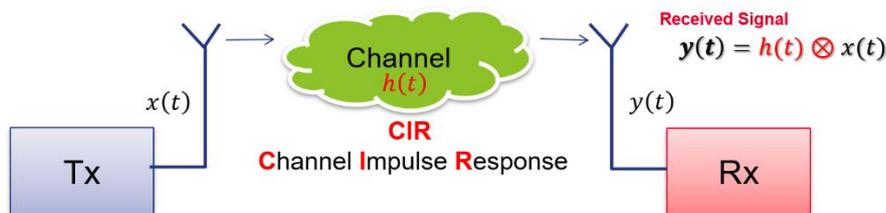


图 50 信道测量系统示意图

信道测量系统的简化示意图如图 50 所示。典型的信道测量系统由发射机与接收机构成,发射机发射预定义的测量波形作为输入信号激励无线通道,输入信号通过无线信道传播到达接收机,通过从接收信号中提取信道冲激响应来获得无线信道特性。在利用 RIS 辅助增强覆盖的典型场景中,RIS 作为无源反射设备部署在无线环境中,发射信号的传播将受到 RIS 反射的影响。一方面,我们可以将 RIS 场景的无线信道视为一个整体,对包含 RIS 的信道进行端到端信道测量;另一方面,RIS 场景的无线信道可分割为从基站到 RIS 的信道和 RIS 到终端的信道,从而分别测量。

在增强覆盖的场景中使用 RIS 作为无源反射器或透镜时,通常需要较大的 RIS 尺寸,例如几米。考虑到 RIS 与终端之间的距离不太远,其距离可能并不总是满足 RIS 阵列的远场距离条件。例如,一个 2 米乘 2 米大小的 RIS,工作频率为 3GHz,远场距离约为 160 米,在此距离内的终端处在 RIS 阵列的近场区域。因此,需要考虑近场信道的测量和建模的问题。RIS 阵列不同阵元的通道特性可能不一致(例如,各个 RIS 阵元的到达角/出射角和中心位置),应该对 RIS 阵列不同位置进行信道测量。

无线信道特性既可以在时域测量,也可以在频域测量,因此出现了时域探测技术和频域探测技术两种信道探测方法。表 5 列出了常用信道测量技术及其优缺点。频域和时域信道测量技术均能满足 RIS 场景信道测量的频率范围和带宽要求,同时测量的动态范围(与测量距离有关)也能够保证。

表 5 信道测量技术比较

	频域测量技术	时域测量技术	
	扫频法	滑动相关法	宽带相关法
优点	大测量带宽; 高接收灵敏度	可使用低速数字采集设备,成本低	测量速度快,支持高多普勒频率
优点	测量速度低; 测试距离受限	测量速度低	系统复杂成本高

RIS 场景信道测量的信道测量系统的主要考虑因素是多普勒频率的要求。无论是室外或室外到室内的高达 833Hz 多普勒频移的场景,还是室内场景(140Hz),只有宽带相关方法才能满足 CIR 捕获速度(大于最大多普勒频移的两倍,即室外和室外到室内约 1.7kHz,室内约 280Hz)。另一个需要考虑的因素是角度测量,即 RIS 场景信道的 AoA(到达角)和 AoD(离开角)。SISO 信道测量系统通常使用 RDA(旋转定向天线)方法或虚拟阵列方法进行角度测量,由于测试过程中的机械运动使得测量速度非常慢;MIMO 信道测深系统采用阵列天线,通过角度估计算法提取 AoA 和 AoD,可在高速测量前提下获得准确的 AoA/AoD。考虑到多普勒频率要求,应采用 MIMO 信道测量体系结构进行 RIS 场景的信道测量。RIS 场景信道测量的典型信道测量系统示意图如图 51 所示。

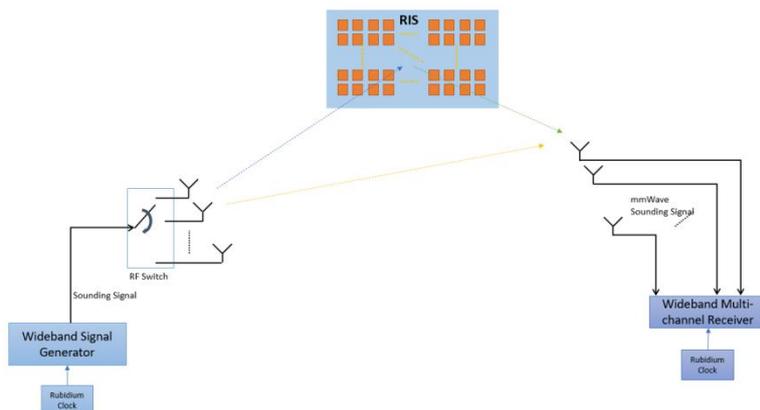


图 51 RIS 场景信道测量系统框图（端到端信道测量）

基站到 RIS 信道和 RIS 到终端信道的信道测量也可以使用上述信道测量系统进行测试。考虑到 RIS 到终端的近场信道测量需求，需要在 RIS 阵列不同位置放置测量天线阵列进行多次测量，从而捕获和提取不同 RIS 子阵列到终端的信道特性，然后结合子信道特性构建 RIS 到终端的近场信道模型。图 52 给出了使用 R&S@TS-5GCS 信道探测解决方案进行的信道测量结果。在 LoS 径旁边，我们可以清楚地看到 RIS 部署引入的第二个峰值。

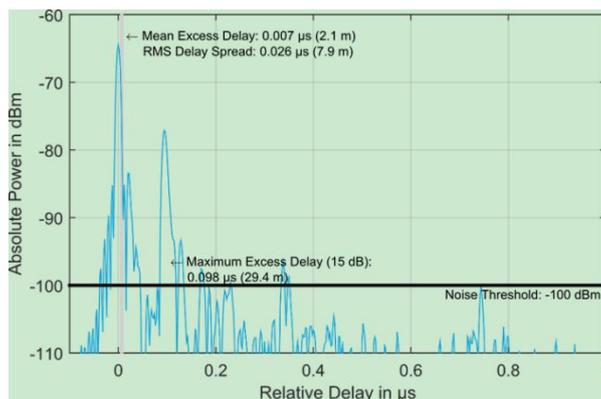


图 52 RIS 信道测量

7.2.2. 测试与验证

(1) 北美

2020 年 2 月，美国麻省理工学院发布了 RFocus 超表面原型设计。RFocus 原型由 3720 个廉价的天线组成，这些天线布置在 6 平方米的表面上。按比例计算，每个天线单元的成本预计只有几美分或更少。不同工作模式的 RFocus 可以作为反射镜将一侧的信号反射至指定位置，或者作为透镜将信号折射至指定的位置。通过合理的控制方式，RFocus 可以将原本散布在环境中的信号再次集中向目标位置，让收发器在无需增加天线或输出功率的情况下获得 9.5 倍的信号增益。RFocus 不仅可以增强 Wi-Fi 信号，还能放大 5G 基站信号及给物联网等小型设备提供数据连接等。虽然要专用的控制器来管理上面的微型天线阵列，但由于表面本身不发射新的无线电波，因此 RFocus 可以通过低功率电子电路自适应地配置天线单元的工作模式，实现低功耗的无源工作模式。

同年，美国加州大学圣地亚哥分校搭建了 ScatterMIMO 原型系统。该系统也是一种无

源的智能超表面系统，通过调节智能超表面的相移，为其建立一条虚拟视距链路，增强接收信号质量。通过典型室内办公场景下测试验证表明，在 ScatterMIMO 系统辅助下，在理想连续可调相控阵中，ScatterMIMO 系统波束控制精度可以在 0.5dB 以内，系统平均吞吐量可以提高 2 倍，覆盖半径从 30m 扩展到 45m，SISO 信噪比提高 2dB。

(2) 欧洲

2022 年 3 月 1 日，欧盟资助的 SURFER 项目将表面波通信(SWC)用于室内通信的理论基础和实验验证。SWC 可以在室内环境中实现可靠、节能和无干扰的通信。平面波在材料的界面处传播，并且局限于材料的表面。与基于 FSC 的 RIS 相比，SWC 中表面波在材料的界面上滑行，其传播本身就被限制在其表面上。与 FSC 相比，SWC 的独特优势是更小的路径损耗、更容易的干扰管理，以及更敏捷的反窃听方案。

(3) 日韩

2018 年 11 月 29 日，在 NTT DOCOMO 与 Metawave 公司合作，在日本东京都江东区开展 28GHz 频段智能超表面原型系统演示验证。该演示验证在东京国际交流中心屋顶的 5G 基站和运行实验车的 5G 终端之间进行测量。由于东京国际交流中心的遮挡，5G 基站和 5G 试验车之间没有直射路径。演示中超表面反射设备的位置，反射波的反射方向和波束形状是确定的，通过超表面的反射波束来扩大 5G 站点的覆盖范围。结果表明，在 Metawave 的超表面反射阵列的反射波束方向上，通信速度达到了 560 Mbps，而在没有反射阵列的情况下，通信速度为 60 Mbps，极大改善了缺乏 5G 覆盖区域的通信质量，通信范围扩展了约 35 米，配备 5G 移动站的车辆的通信速度提高了 500 Mbps。

2020 年 1 月 17 日，NTT DOCOMO 与全球玻璃制造商 AGC 合作，成功进行世界上首次使用 28 GHz 5G 网络的透明动态超表面原型试验。在试验中，无线电波以测量两种模式的穿透力：完全穿透，即超表面基底和可移动的透明基底相互连接，以及完全反射，即超表面基底和可移动的透明基底相隔 200 多微米。在 28 GHz 下对这两种模式的测试都取得了成功。无线电波在穿透模式下穿过基底，在反射模式下被阻挡，这两种情况下都没有衰减。在目前的测试中，两个基片之间的距离是手动控制的，但在未来的测试中，将使用压电致动器在穿透和反射模式之间高速切换。

2021 年 1 月 26 日，NTT DOCOMO 和 AGC 开展 28 GHz 5G 开发薄膜状超表面透镜试验验证。结果表明，超表面透镜提高了室内焦点接收的 28GHz 无线电信号的功率水平。试验还证实了控制焦点位置的能力，以及从单焦点切换到双焦点的能力。

2022 年 3 月，韩国 LG 公司针对 3.5GHz 和 28GHz 频段开展智能超表面外场测试验证。4 月，日本京瓷公司开展 28GHz 频段的 5G 智能超表面原型系统研发测试，验证了智能超表面系统可有效提升网络覆盖质量。

(4) 中国

2018 年至今，东南大学金石教授团队与崔铁军院士、程强教授团队合作，实现了基于智能超表面的 SISO、MIMO 实时无线传输，率先进行了智能超表面自由空间路径损耗测量建模、智能超表面实际环境信道测量建模、信道互易性测量验证以及智能超表面功耗测量建模等系列工作。2019 年，清华大学 RIS 团队完成了 5G Sub-6 GHz 和毫米波频段的系列 RIS 样机研发，并与多家主流运营商和设备商合作，采用自主研发的 2304 单元 RIS 模块，完成了 5G 毫米波 RIS 室内和外场测试。南京大学 RIS 团队与华为技术有限公司合作研制智能超

表面原型系统，并进行了对 5G 无线网络（2.6GHz 频段）覆盖补盲及优化提升的原型测试，验证了智能表面在真实网络环境中应用的可行性。

2021 年 6 月底，中兴通讯携手中国联通完成全球首个 5G 中频网络外场下的智能超表面技术验证。在 5G 中频基站非视距覆盖小区边缘，5G 终端参考信号接收强度提升可达 10dB，5G 小区边缘用户性能提升 40% 以上。中兴通讯与中国电信在上海完成业内首个智能超表面反射面板在 5G 高频网络外场的远距离技术验证测试。在距离 5G 高频（26GHz 频段）基站 150 米以上的非视距覆盖盲区或弱区，5G 终端参考信号接收强度提升可达 12.5dB，5G 高频弱区内用户性能改进可达 296%。智能超表面反射技术将为 5G 高频基站网络深度覆盖提供科学可行的创新技术途径。同年 7 月，中国移动携手东南大学电磁空间科学与技术研究院率先在 5G 现网完成智能超表面技术实验，结果表明智能超表面可根据用户分布灵活地调整无线环境中的信号波束，显著改善现网弱覆盖区域的信号强度、网络容量和用户速率，预示了信息超材料技术在未来移动通信网络中的广泛应用前景。

2021 年 8 月，由深圳市大数据研究院、香港中文大学（深圳）、华为技术有限公司联合成立的未来网络系统优化创新实验室完成了无需信道状态信息的 RIS 技术的原型研发，在不需要改变现有移动网络结构和协议的前提下验证了 RIS 技术的可行性。实验室所研发的 RIS 技术适合在现有 5G 网络中低成本、大规模地推广部署。目前，罗智泉教授带领的联合研发团队已经完成了基于真实 5G 网络环境（现网 5G 2.6GHz 频段）的初步测试验证，证实了基于盲波束赋形的 RIS 技术能够为 5G 网络带来全方位的性能提升。从实际测试效果来看，在室内典型的弱覆盖场景下，能有效改善区域弱覆盖，覆盖增益 14dB，SINR 增益 12dB，速率提升 200%；在室外的空旷场景下，多径较少，RANK 较低。通过引入 RIS，RANK 提升一阶，速率增益为 50%。团队已初步完成原型机规模应用的前期准备工作，下一步计划在真实网络中更丰富的场景中进行验证与应用，支撑 5G 网络系统级优化。

2022 年，中国联通联合罗德与施瓦茨清华大学、行晟科技等多家单位开展 RIS 技术试验。RIS 验证环境分为暗室测试、室内测试和室外测试，室内测试主要包括 RIS 被测件以及测试仪表。通过 R&SQualipoc 软件和路测终端、R&STSME6 扫频仪测试、矢量网络分析仪以及 R&SFSW43 频谱仪测试 RIS 阵面方向图、邻道抑制比（ACLR）、RSRP 以及吞吐量等指标，对 RIS 能力进行多方面验证测试。同年，中兴通讯率先完成了具备协同波束赋形能力的智能超表面原型样机研发，分别在实验室和外场环境完成了业界首个技术验证。结果表明，相比静态超表面只能提升定点覆盖，基站和智能超表面协同波束赋形技术不仅可大幅提升基站覆盖范围，还可支持移动场景下的用户无缝连接⁵。

2022 年，IMT-2030（6G）推进组成立“试验任务组”，组织开展了包括智能超表面、通感一体化等在内的 5 项 6G 潜在关键技术试验，并于 2022 年 11 月 15-16 日在上海召开的“全球 6G 发展大会”上发布了测试情况。其中，智能超表面技术试验有中兴通讯、华为、中信科、中国联通、西安电子科技大学、华中科技大学、东南大学和清华大学等 8 家单位参加。考虑到技术成熟度，2022 年度重点针对 RIS 用于覆盖增强场景进行测试验证。测试内容包含室内覆盖增强、室外覆盖增强、多用户干扰测试，以及 RIS 的栅瓣功率的基本功能测试。测试结果表明，RIS 通过主动控制无线传播环境，可以灵活调控波束指向期望方向，

⁵业界首个 5G 基站和动态智能超表面协同波束赋形技术原型完成验证，
https://www.sohu.com/a/579113478_121124379

在增强覆盖增强方面具有较明显的性能优势，且低功耗、易部署，但目前面临器件、调控、算法等多方面的挑战。2023年2月，中兴通讯动态 RIS 入选巴塞罗那 2023 年全球移动大会最佳移动技术突破奖短名单。

7.3. 标准演进与生态构建

(1) IMT2030 (6G) 推进组

2020年6月，IMT-2030(6G)推进组成立无线技术组“RIS任务组”。RIS任务组成员由国内从智能超表面研究的主要单位构成，成立以来组织了一系列活动，推动了RIS技术的研究、标准及产业化进程。2021年9月17日和2022年11月16日，IMT-2030(6G)推进组在6G研讨会RIS分论坛上发布第一版和第二版《智能超表面技术研究报告》。

(2) 中国通信标准化协会 (CCSA)

中国通信标准化协会 (CCSA) 是国内通信标准化工作的主力军。2020年9月，CCSA TC5WG6#55会议立项《智能超表面无线技术研究》，研究内容包括：(1) 智能超表面的应用场景；(2) 材料进展；(3) 算法研究；(4) 系统架构和组网设计；(5) 智能超表面和其他技术融合；(6) 实验验证和测试。

(3) RISTA 智能超表面技术联盟

2022年4月7日，智能超表面技术联盟成立暨第一届会员大会在北京召开。来自国内外87家高校、企业、科研院所、政府智库以及行业组织的联盟成员代表采用线上、线下融合的方式参加大会。



图 53 智能超表面技术联盟成立仪式

智能超表面技术联盟是在自愿、平等、互利、合作的基础上，由智能超表面相关的企/事业单位、社团组织、高等院校、科研院所等自愿结成的跨行业、开放性、非营利性的社会组织，旨在汇聚产业界力量，推动智能超表面生态系统相关主体之间的交流和深度合作，有效促进智能超表面相关技术研究、标准化以及产业化等方面的工作开展，打造智能超表面生态。

本次联盟成立暨第一届会员大会上通过了联盟理事长、副理事长、理事长单位、特约顾问、专家委员会主任委员等重大任命决议：由崔铁军院士担任联盟理事长，北京邮电大学、东南大学、清华大学、中国电信、中国电子学会通信分会、中国联通、中国信通院、中国移

动和中兴通讯担任理事长单位（按单位拼音顺序），聘请杨泽民先生作为特约顾问，中国科学院崔铁军院士，中国工程院邬江兴院士、刘韵洁院士、张平院士，加拿大皇家科学院罗智泉院士，新加坡工程院张瑞院士作为联盟专家委员会主任委员。智能超表面技术联盟下设理事会、常务理事、专家委员会和秘书处以及 5 个工作组，并计划每年召开一次智能超表面技术论坛作为联盟年度品牌会议。同时，会上审议并通过了联盟章程、工作组设置、会员申请和联盟 2022 年工作计划。联盟理事长崔铁军院士就智能超表面技术做专题报告。

(4) ETSI

ETSI 的可重构智能表面行业规范小组（ISG RIS）于 2021 年 6 月获得批准，并于 9 月启动，ETSI 成员有机会协调其在各个欧盟合作项目中对 RIS 技术的标准化前研究工作，以及全球倡议，为该技术的未来标准化铺平道路。旨在审查并建立可重构智能表面技术的全球标准化。该 ISG 于 2021 推出了三个新的工作项目，分别研究 RIS 应用场景及部署方式、技术挑战及架构、通信模型及信道模型，计划输出包括技术报告，白皮书和概念验证。

8. 智能超表面趋势展望

8.1. 迭代演进，6G 技术 5G 化螺旋发展

在智能超表面技术被提出之前，超材料技术、界面电磁理论、广义斯涅尔定律等相关理论技术均已有完善的理论基础，基于移相器的相控阵系统设计和硬件设备也已在多种场景部署应用。此外，智能超表面阵元设计主要与信号波长等射频信号特征相关，基本不受信号波形、调制编码、帧结构等底层技术体制的影响，可较好的兼容其他物理层技术。智能超表面系统具备灵活部署的潜能，可灵活嵌入到无线网络。因此，智能超表面技术具有理论基础完善、可兼容底层技术、对网络影响具有本地化的特点，具备 6G 技术 5G 化演进的技术基础。通过从静态 RIS 到半静态/动态 RIS 的迭代演进，针对不同部署场景，可打造相适宜的部署及控制策略。

在 5G 阶段，通过设计 Sub-6G 频段亚波长的智能超表面系统，通过带内传输控制信息等模式可实现智能超表面系统与现有基站和终端的初步融合，进而探索智能超表面与基站间的潜在接口以及相应的协议影响，以期实现智能超表面按需动态调控无线环境的高阶能力。

8.2. 标准先行，分阶段推进产业落地

2021 年 12 月，3GPP Rel-18 通过网络控制中继器（Network-Controlled Repeater, NCR）研究立项^[169]；2022 年 6 月，NCR 标准化项目成功立项^[170]。从功能及特性上来看，NCR 与 RIS 有很多相似之处，因此，NCR 的标准研究工作可为后续 RIS 的标准化研究提供一定的参考与支撑。目前，RIS 作为一项新兴技术，相关技术研究处于膨胀期，技术手段百花齐放，硬件器件也尚未定型，因此较难以开展相关标准化工作。随着 RIS 技术、器件研究日益成熟，功能及特性逐步收敛、稳定，届时将会是 RIS 标准化的发力期。

基于以上分析，对 RIS 标准化演进的展望如下：根据实现复杂度和产业成熟度，在 Rel-18 网络控制中继器的基础上，推动 5G-A 阶段反射式 RIS 演进，同步研究 RIS 远场模型，推动基于 FPGA 中等尺寸 RIS 阵面的开发和应用，进一步推动 RIS 近场信道模型的研究，以及基于 ASIC 的超大 RIS 面板，最终实现 6G 阶段 RIS 标准化。



图 54 RIS 标准化展望

从 RIS 工程应用落地角度，可以考虑三阶段的网络部署及迭代演进：阶段一，在 5G 现

网少量部署非标准化静态 RIS 面板，用于解决覆盖空洞；阶段二，基于 5G-A 标准化机制部署半动态配置的 RIS，用于优化网络的连续覆盖；阶段三，未来移动通信网络中泛在部署智能灵活的 RIS，构建智能可控无线环境，给未来 6G 带来一种全新的通信网络范式。

8.3. 开放共赢，构建融合发展生态圈

RIS 作为一个极具潜力的方向，具备在当前无线网络中提前落地的可能，或为未来移动通信网络中使能智能无线环境提供技术支撑，带来全新的网络范式。目前，RIS 已在多个领域初步展示了其突出的功能与性能。但是，RIS 在规模商用前仍然在技术研究、工程应用、网络部署和标准化等方面的面临诸多问题与挑战。

目前，智能超表面产业上下游工作相对独立，亟需构建智能超表面产业融合发展生态圈，汇聚产、学、研、用全产业链多方共识与合力，以开放共赢的态度，引导和推进包括超材料、器件、信息与通信技术、垂直行业、解决方案提供商以及学术界等相关群体之间的交流和深度合作，有效促进智能超表面相关技术研究、标准化进程，共同推进智能超表面产业落地。

9. 结论

践行“双碳”战略和推进高质量发展是全面建设社会主义现代化国家的重要任务。打造低碳化、数字化、智能化的数字信息基础设施是通信运营企业的使命和内在要求，也是推动全社会实现“双碳”目标和高质量发展协同共赢的关键因素。智能超表面技术在低成本、低功耗和易部署等方面具有独特优势，在 5G 和未来 6G 网络中都具有很多潜在机遇和应用前景，并且具备 6G 技术 5G 化演进的技术基础。虽然，智能超表面在规模商用前仍然在技术研究、工程应用、网络部署和标准化等方面的面临诸多问题与挑战，但是，汇聚产、学、研、用全产业链多方共识与合力，引导和推进包括超材料、器件、信息与通信技术、垂直行业、解决方案提供商以及学术界等相关群体之间的交流和深度合作，推进智能超表面从理论技术向应用成果转变，可有效推动在商用网络中落实“双碳”战略和高质量发展目标。

参考文献

- [1] 高秋彬, 黄秋萍, 孟溪等, 超大规模天线技术研究报告[R], IMT-2030 (6G) 推进组, 2021.
- [2] M. Di Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M.-S. Alouini, C. Yuen, J. de Rosny, and S. Tretyakov, "Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, Nov. 2020.
- [3] 中兴通讯、东南大学、中国联通联合承办第一届 RIS 技术论坛 [E]. <https://www.msbcsc.com/info/Nw5111e>. 2021-09-26.
- [4] 智能超表面技术联盟在京成立 [E]. 科技日报, <http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/202204/78120a63e7e04bb4b6a0053367a83b1f.shtml>. 2022.
- [5] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 赵亚军, 袁弋非, 孙欢等, 智能超表面技术研究报告[R], IMT-2030 (6G) 推进组, 2021.
- [6] 跨学科创新, 中国移动联合崔铁军院士团队率先完成智能超表面技术试验 [E]. <https://www.c114.com.cn/news/118/a1168348.html>. 2021.
- [7] 中兴通讯联合中国电信完成业界首个 5G 高频外场智能超表面技术验证测试 [E]. <https://www.c114.com.cn/news/127/a1167281.html>. 2021.
- [8] 中兴通讯携手中国联通完成全球首个 5G 中频网络外场下的智能超表面技术验证 [E]. <https://www.c114.com.cn/news/127/a1167167.html>. 2021.
- [9] 数学与通信完美结合——罗智泉教授团队与华为合作取得 5G 网络中应用智能反射面技术的突破 [E]. <http://www.sribd.cn/article/361/>. 2021.
- [10] 5G Evolution and 6G: HAPS, metasurface lens and pinching antenna [E]. https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media_center/event/mwc21/contents/exhibits06/. 2021.
- [11] W. Chen, C.-K. Wen, X. Li, and S. Jin, "Channel customization for joint Tx-RISs-Rx design in hybrid mmWave systems," [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2109.13058v1>.
- [12] 黄腾, 面向太赫兹通信的超表面研究[D]. 北京邮电大学学位论文, 2021.
- [13] 余礼苏, 刘超良, 钱佳家, 王玉皞, 王正海. 面向 6G 基于 HDMA 的高速大容量可见光通信系统构建与优化[J]. 江西通信科技, 2022.
- [14] H. Abumarshoud, L. Mohjazi L, O. A. Dobre, et al. LiFi through reconfigurable intelligent surfaces: A new frontier for 6G? [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2021, 17(1): 37-46.
- [15] A.R. Ndjiongue, T. M. N. Ngatched, O. A. Dobre, et al. Design of a power amplifying-RIS for free-space optical communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(6): 152-159.
- [16] 冯骥, NTN 非地面网络技术及其产业分析[J], 卫星电视与宽带多媒体, vol. 11, pp. 31-32, 2021.
- [17] X. Bai, F. Zhang, L. Sun, et al., "Radiation-type programmable metasurface for direct manipulation of electromagnetic emission," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 16, p. 2200140, 2022.
- [18] S. Li, B. Duo, X. Yuan, Y.-C. Liang, and M. Di Renzo, "Reconfigurable intelligent surface

- assisted UAV communication: Joint trajectory design and passive beamforming,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 716–720, 2020.
- [19] J. Guo, L. Yu, Z. Chen, Y. Yao, Z. Wang, Zh. Wang, and Q. Zhao. RIS-assisted secure UAV communications with resource allocation and cooperative jamming[J]. *IET Communications*, Apr. 2022. DOI: 10.1049/cmu2.12416.
- [20] E. Björnson, H. Wymeersch, B. Matthiesen, P. Popovski, L. Sanguinetti and E. d. Carvalho, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 39, no. 2, pp. 135-158, March 2022.
- [21] H. Wymeersch, J. He, B. Denis, A. Clemente and M. Juntti, "Radio Localization and Mapping With Reconfigurable Intelligent Surfaces: Challenges, Opportunities, and Research Directions," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 52-61, Dec. 2020.
- [22] J. He, H. Wymeersch, L. Kong, O. Silvén and M. Juntti, "Large Intelligent Surface for Positioning in Millimeter Wave MIMO Systems," in *IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020.
- [23] J. He, H. Wymeersch, T. Sanguanpuak, O. Silven and M. Juntti, "Adaptive Beamforming Design for mmWave RIS-Aided Joint Localization and Communication," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2020.
- [24] E. C. Strinati and e. al, "Reconfigurable, intelligent, and sustainable wireless environments for 6G smart connectivity," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 10, pp. 99-105, October 2021.
- [25] G. C. Alexandropoulos, N. Shlezinger and P. d. Hougne, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Rich Scattering Wireless Communications: Recent Experiments, Challenges, and Opportunities," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 28-34, June 2021.
- [26] T. Bai, C. Pan, Y. Deng, M. ElKashlan, A. Nallanathan and L. Hanzo, "Latency Minimization for Intelligent Reflecting Surface Aided Mobile Edge Computing," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2666-2682, Nov. 2020.
- [27] M. Cui, G. Zhang, and R. Zhang, "Secure wireless communication via intelligent reflecting surface," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 1410–1414, 2019.
- [28] S. Hong, C. Pan, H. Ren, K. Wang and A. Nallanathan, "Artificial-Noise-Aided Secure MIMO Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surface," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 12, pp. 7851-7866, Dec. 2020.
- [29] S. Tian, X. Zhang, X. Wang, J. Han, and L. Li, "Recent advances in metamaterials for simultaneous wireless information and power transmission" *Nanophotonics*, vol. 11, no. 9, 2022, pp. 1697-1723.
- [30] C. Pan *et al.*, "Intelligent Reflecting Surface Aided MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 8, pp. 1719-1734, Aug. 2020
- [31] Q. Wu and R. Zhang, "Joint Active and Passive Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surface Assisted SWIPT Under QoS Constraints," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 8, pp. 1735-1748, Aug. 2020.
- [32] Q. Wu, X. Guan and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Energy and Information Transmission: An Overview," *Proceedings of the IEEE*, vol. 110, no. 1, pp. 150-170, Jan. 2022.
- [33] M. Chang, J. Han, X. Ma, H. Xue, X. Wu, L. Li, and T. J. Cui, "Programmable metasurface

- for simultaneously wireless information and power transfer system,” ZTE Communications, vol. 20, no. 2, pp. 48–62, Jun. 2022.
- [34] W. Wu, Zi Wang, Lu Yuan, Fuhui Zhou, Fei Lang, Baoyun Wang, and Qihui Wu, “IRS-Enhanced Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks,” IEEE Wirel. Commun. Lett., vol. 10, no. 10, pp. 2254–2258, Oct. 2021.
- [35] W. Wu, Zi Wang, Fuhui Zhou, Baoyun Wang, Qihui Wu and Naofal Al-Dhahir, “Joint Sensing and Transmission Optimization in IRS-Assisted CRNs: Throughput Maximization,” in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM) 2022, 2022, to be published.
- [36] W. Yan, X. Yuan, Z.-Q. He, and X. Kuai, “Passive Beamforming and Information Transfer Design for Reconfigurable Intelligent Surfaces Aided Multiuser MIMO Systems,” IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 38, no. 8, pp. 1793–1808, Aug. 2020, doi: 10.1109/JSAC.2020.3000811.
- [37] Z. Tian, Z. Chen, M. Wang, Y. Jia, L. Dai and S. Jin, "Reconfigurable Intelligent Surface Empowered Optimization for Spectrum Sharing: Scenarios and Methods," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 17, no. 2, pp. 74-82, Jun. 2022.
- [38] J. Yuan, Y. -C. Liang, J. Joung, G. Feng and E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surface-Assisted Cognitive Radio System," in IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 1, pp. 675-687, Jan. 2021
- [39] L. Zhang, Y. Wang, W. Tao, Z. Jia, T. Song and C. Pan, "Intelligent Reflecting Surface Aided MIMO Cognitive Radio Systems," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 10, pp. 11445-11457, Oct. 2020
- [40] X. Guan, Q. Wu and R. Zhang, "Joint Power Control and Passive Beamforming in IRS-Assisted Spectrum Sharing," in IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 7, pp. 1553-1557, July 2020.
- [41] Z. Peng, Z. Zhang, C. Pan, L. Li and A. L. Swindlehurst, "Multiuser Full-Duplex Two-Way Communications via Intelligent Reflecting Surface," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 69, pp. 837-851, 2021.
- [42] Y. Zhang, C. Zhong, Z. Zhang and W. Lu, "Sum Rate Optimization for Two Way Communications With Intelligent Reflecting Surface," in IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 5, pp. 1090-1094, May 2020.
- [43] C. Pan et al., "Multicell MIMO Communications Relying on Intelligent Reflecting Surfaces," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 8, pp. 5218-5233, Aug. 2020.
- [44] G. Zhou, C. Pan, H. Ren, K. Wang and A. Nallanathan, "Intelligent Reflecting Surface Aided Multigroup Multicast MISO Communication Systems," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 68, pp. 3236-3251, 2020.
- [45] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军等, 可重构电磁超表面及其应用研究进展[J]. 雷达学报, 10(2):206-219, 2021.
- [46] 孟祥帅, 基于人工电磁超表面涡旋电磁波产生及目标近场散射[D]. 西安电子科技大学学位论文, 2019.
- [47] S. Yu, L. Li, G. Shi, C. Zhu, X. Zhou, and Y. Shi, "Design, fabrication, and measurement of reflective metasurface for orbital angular momentum vortex wave in radio frequency domain," Applied Physics Letters, 108, 121903, 2016.
- [48] S. Yu, L. Li, G. Shi, C. Zhu, and Y. Shi, "Generating multiple orbital angular momentum vortex beams using a metasurface in radio frequency domain," Applied Physics Letters, 108,

- 241901, 2016.
- [49] 董晓航, 基于反射型超表面的涡旋电磁波产生研究[D]. 南京航空航天大学学位论文, 2019.
- [50] Z. Yang, M. Chen, Z. Zhang, C. Huang, "Energy Efficient Semantic Communication over Wireless Networks with Rate Splitting," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, to appear.
- [51] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet physics uspekhi*, 1968, 10 (4) : 509-514.
- [52] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. *Physical review letters*, 1996, 76 (25) : 4773.
- [53] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 1999, 47 (11) : 2075-2084.
- [54] SIEVENPIPER D, ZHANG L, BROAS R F J, et al. High impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 1999, 47 (11) : 2059-2074.
- [55] 张磊, 陈晓晴, 郑熠宁, 崔铁军. 电磁超表面与信息超表面[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(06):817-828.
- [56] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al.. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333–337. DOI: 10.1126/science.1210713.
- [57] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: science & applications*, 2014, 3 (10) : e218-e218.
- [58] MA Q, BAI G D, JING H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions[J]. *Light: science & applications*, 2019, 8 (1) : 98.
- [59] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces[J]. *Journal of materials chemistry C*, 2017, 5 (15) : 3644-3668.
- [60] F. K. Gruber and E. A. Marengo, "New aspects of electromagnetic information theory for wireless and antenna systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 11, pp. 3470-3484, Nov. 2008.
- [61] Wan, J. Zhu, Z. Zhang, and L. Dai, "Capacity for electromagnetic information theory," arXiv preprint arXiv:2111.00496, Nov. 2021.
- [62] Cui Tie-Jun, Wu Hao-Tian, Liu Shuo, Research progress of information metamaterials [J], *Acta Phys. Sin.*, 2020, 69(15): 158101. doi: 10.7498/aps.69.20200246.
- [63] L. N. Dworsky, *Modern Transmission Line Theory and Applications*, 1st Ed., Wiley, 1980.
- [64] K. Sarabandi and N. Behdad, "A Frequency Selective Surface With Miniaturized Elements," *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 55, pp. 1239-1245, 2007.
- [65] A. Fallahi and J. Perruisseau-Carrier, "Design of tunable biperiodic graphene metasurfaces," *Phys.rev.b*, vol. 86, pp. 4608-4619, 2012.
- [66] S. B. Glybovski, S. A. Tretyakov, P. A. Belov, Y. S. Kivshar, and C. R. Simovski, "Metasurfaces: From microwaves to visible," *Physics Reports*, vol. 634, pp. 1-72, 5/24/ 2016.
- [67] Y. Ra'Di, C. R. Simovski, and S. A. Tretyakov, "Thin Perfect Absorbers for Electromagnetic Waves: Theory, Design, and Realizations," *Physical Review Applied*, vol. 3, p. 037001, 2015.
- [68] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial

- absorber," *Physical Review Letters*, vol. 100, p. 207402, 2008.
- [69] N. Gagnon, A. Petosa, and D. A. McNamara, "Research and Development on Phase-Shifting Surfaces (PSSs)," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, pp. 29-48, 2013.
- [70] D. Sievenpiper, Z. Lijun, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, pp. 2059-2074, 1999.
- [71] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications," *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 51, pp. 2936-2946, 2003.
- [72] B. H. Fong, J. S. Colburn, J. J. Ottusch, J. L. Visher, and D. F. Sievenpiper, "Scalar and Tensor Holographic Artificial Impedance Surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, pp. 3212-3221, 2010.
- [73] D. R. Jackson, C. Caloz, and T. Itoh, "Leaky-Wave Antennas," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, pp. 2194-2206, 2012.
- [74] D. Rutledge, J. B. Hacker, M. Kim, R. M. Weikle, R. P. Smith, and E. Sovero, "Oscillator and amplifier grids," in *1992 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest*, 1992, pp. 815-818 vol.2.
- [75] J. W. Mink, "Quasi-Optical Power Combining of Solid-State Millimeter-Wave Sources," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 34, pp. 273-279, 1986.
- [76] K. Chang and C. Sun, "Millimeter-Wave Power-Combining Techniques," *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, vol. 31, pp. 91-107, 2003.
- [77] J. B. Hacker, R. M. Weikle, M. Kim, and P. De Lisis, "A 100-element planar Schottky diode grid mixer," *Microwave Theory & Techniques IEEE Transactions on*, vol. 40, pp. 557-562, 1992.
- [78] M. E. Bialkowski, A. W. Robinson, and H. J. Song, "Design, development, and testing of X-band amplifying reflectarrays," *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, vol. 50, pp. 1065-1076, 2002.
- [79] X. Yang, S. Xu, F. Yang, M. Li, H. Fang, and Y. Hou, "A Distributed Power-Amplifying Reflectarray Antenna for EIRP Boost Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2742-2745, 2017.
- [80] A. Krasnok, M. Tymchenko, and A. Alù, "Nonlinear metasurfaces: a paradigm shift in nonlinear optics," *Materials Today*, 2017.
- [81] H. Yang et al., "A 1-Bit 10×10 Reconfigurable Reflectarray Antenna: Design, Optimization, and Experiment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2246-2254, June 2016.
- [82] J. Zhang, Y. Zhang, Y. Yu, et al., "3-D MIMO: How much does it meet our expectations observed from channel measurements?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 8, pp. 1887-1903, Aug. 2017.
- [83] "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020," ITU-R M.2412, <https://www.itu.org>, Tech. Rep., 2017.
- [84] T. Cui, M. Qi, X. Wan, et al., "Coding Metamaterials, Digital Metamaterials and Programmable Metamaterials," *Light: Science & Applications*, vol. 3, e218, Oct. 2014.
- [85] "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, version 15.0.0," 3GPP TR 38.901, <https://portal.3gpp.org>, Tech. Rep., 2018.
- [86] J. Zhan, J. Zhang, L. Tian et al., "Comparative channel study of ray tracing and measurement for an indoor scenario at 28 GHz," in *12th European Conference on Antennas and*

- Propagation (EuCAP 2018), 2018, pp. 1-5
- [87] F. Wang, Y. Zhang, P. Tang et al., "Effects of Inaccuracies of Indoor Environment Databases on Ray Tracing Results," in 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), 2021, pp. 1-7.
- [88] 窦建武, 陈艺骥, 张楠, 等. 智能可控电磁表面信道建模[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 368-377.
- [89] E. Basar, I. Yildirim and F. Kilinc, "Indoor and Outdoor Physical Channel Modeling and Efficient Positioning for Reconfigurable Intelligent Surfaces in mmWave Bands," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 12, pp. 8600-8611, Dec. 2021
- [90] Singh C, Singh K, Liu K H. Fast Beam Training for RIS-Assisted Uplink Communication[J]. arXiv preprint arXiv:2107.14138, 2021.
- [91] J. He, H. Wymeersch, T. Sanguanpuak, O. Silven and M. Juntti, "Adaptive Beamforming Design for mmWave RIS-Aided Joint Localization and Communication," 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2020, pp. 1-6.
- [92] W. Chen, C. -K. Wen, X. Li and S. Jin, "Adaptive Bit Partitioning for Reconfigurable Intelligent Surface Assisted FDD Systems With Limited Feedback," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 21, no. 4, pp. 2488-2505, April 2022.
- [93] R. Schroeder, J. He, M. J. Juntti, Channel Estimation for RIS-Aided mmWave MIMO Systems via Atomic Norm Minimization, ICC Workshops 2022: 1219-1224, , Korea, May 16-20, 2022.
- [94] G. C. Alexandropoulos and E. Vlachos, "A Hardware Architecture For Reconfigurable Intelligent Surfaces with Minimal Active Elements for Explicit Channel Estimation," in IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2020.
- [95] G. C. Alexandropoulos, N. Shlezinger, I. Alamzadeh, M. F. Imani, H. Zhang and Y. C. Eldar, "Hybrid reconfigurable intelligent metasurfaces: Enabling simultaneous tunable reflections and sensing for 6G wireless communications," arxiv, 2021.
- [96] H. Zhang, N. Shlezinger, I. Alamzadeh, G. C. Alexandropoulos, M. F. Imani and Y. C. Eldar, "Channel Estimation with Simultaneous Reflecting and Sensing Reconfigurable Intelligent Metasurfaces," in IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2021.
- [97] D. Mishra and H. Johansson, "Channel estimation and low-complexity beamforming design for passive intelligent surface assisted MISO wireless energy transfer," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process., pp. 4659–4663, 2019.
- [98] T. L. Jensen and E. De Carvalho, "An optimal channel estimation scheme for intelligent reflecting surfaces based on a minimum variance unbiased estimator," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process., pp. 5000–5004, 2020.
- [99] C. Hu, L. Dai, S. Han, and X. Wang, "Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications," IEEE Trans. Commun., 69(11):7736–7747, 2021.
- [100] Z. Wang, L. Liu, and S. Cui, "Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted multiuser communications: Framework, algorithms, and analysis," IEEE Trans. Wireless Commun., 19(10):6607–6620, 2020.
- [101] G. Zhou, C. Pan, H. Ren, P. Popovski and A. L. Swindlehurst, "Channel Estimation for

- RIS-Aided Multiuser Millimeter-Wave Systems," in IEEE Transactions on Signal Processing, 70:1478-1492, 2022.
- [102] B. Zheng and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface-enhanced OFDM: Channel estimation and reflection optimization," IEEE Wireless Commun. Lett., 9(4):518–522, 2020.
- [103] D. Shen and L. Dai, "Dimension Reduced Channel Feedback for Reconfigurable Intelligent Surface Aided Wireless Communications," in IEEE Transactions on Communications, 69(11):7748-7760, Nov. 2021
- [104] W. Chen, C.-K. Wen, X. Li, and S. Jin, "Adaptive bit partitioning for reconfigurable intelligent surface assisted FDD systems with limited feedback," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 21, no. 4, pp. 2488-2505, Apr. 2022.
- [105] X. Hu, R. Zhang, and C. Zhong, "Semi-passive elements assisted channel estimation for intelligent reflecting surface-aided communications," IEEE Trans. Wireless Commun., 21(2):1132–1142, 2022.
- [106] Y. Jin, J. Zhang, X. Zhang, H. Xiao, B. Ai, and D. W. K. Ng, "Channel estimation for semi-passive reconfigurable intelligent surfaces with enhanced deep residual networks," IEEE Trans. Veh. Technol., 70(10):11083–11088, 2021.
- [107] C. Cai, X. Yuan, and Y.-J. A. Zhang, "RIS Partitioning Based Scalable Beamforming Design for Large-Scale MIMO: Asymptotic Analysis and Optimization", 2022. [Online], Available: <https://arxiv.org/abs/2203.08377>.
- [108] J. He, H. Wymeersch, M. D. Renzo, M. J. Juntti, Learning to Estimate RIS-Aided mmWave Channels. IEEE Wirel. Commun. Lett. 11(4): 841-845, 2022.
- [109] C. Liu, X. Liu, D. W. K. Ng, and J. Yuan, "Deep residual learning for channel estimation in intelligent reflecting surface-assisted multi-user communications," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 21, no. 2, pp. 898-912, Feb. 2022.
- [110] A. M. Elbir and S. Coleri, "Federated learning for channel estimation in conventional and IRS-assisted massive mimo," arXiv preprint arXiv:2008.10846, 2020.
- [111] M. Xu, S. Zhang, C. Zhong, J. Ma, and O. A. Dobre, "Ordinary differential equation-based CNN for channel extrapolation over RIS-assisted communication," IEEE Commun. Lett., vol. 25, no. 6, pp. 1921-1925, June 2021.
- [112] S. Liu, Z. Gao, J. Zhang, M. D. Renzo, and M. -S. Alouini, "Deep denoising neural network assisted compressive channel estimation for mmWave intelligent reflecting surfaces," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 69, no. 8, pp. 9223-9228, Aug. 2020.
- [113] A. Taha, M. Alrabeiah, and A. Alkhateeb, "Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning," IEEE Access, vol. 9, pp. 44304-44321, 2021.
- [114] S. Zhang, S. Zhang, F. Gao, J. Ma, and O. A. Dobre, "Deep learning optimized sparse antenna activation for reconfigurable intelligent surface assisted communication," IEEE Trans. Commun., vol. 69, no. 10, pp. 6691-6705, Oct. 2021.
- [115] Y. Yang, B. Zheng, S. Zhang, and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface meets OFDM: Protocol design and rate maximization," IEEE Trans. Commun., vol. 68, no. 7, pp. 4522-4535, July 2020,
- [116] Y. Rubanova et al., "Latent ODEs for irregularly-sampled time series," arXiv preprint arXiv:1907.03907, 2019.
- [117] C. Huang, G. C. Alexandropoulos, C. Yuen, and M. Debbah, "Indoor signal focusing with deep learning designed reconfigurable intelligent surfaces," 2019 IEEE 20th

- International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2019, pp. 1-5.
- [118] C. Huang, R. Mo, and C. Yuen, "Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 8, pp. 1839-1850, Aug. 2020.
- [119] Y. Lu, M. Hao, and R. Mackenzie, "Reconfigurable intelligent surface based hybrid precoding for THz communications," *Intelligent and Converged Netw.*, vol. 3, no. 1, pp. 103-118, March 2022.
- [120] X. Gao, L. Dai, Y. Sun, S. Han, and I. Chih-Lin, "Machine learning inspired energy-efficient hybrid precoding for mmWave massive MIMO systems," 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 2017, pp. 1-6.
- [121] C. Huang et al., "Multi-hop RIS-empowered Terahertz communications: A DRL-based hybrid beamforming design," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 6, pp. 1663-1677, June 2021.
- [122] N. Abuzainab, M. Alrabeiah, A. Alkhateeb, and Y. E. Sagduyu, "Deep learning for THz drones with flying intelligent surfaces: Beam and handoff prediction," 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 1-6.
- [123] W. Liu, H. Ren, C. Pan, F. Shu, S. Jin and J. Wang, "Low-overhead Beam Training Scheme for Extremely Large-Scale RIS in Near-field," arXiv:2211.15910, 2022.
- [124] Z. Yang, Y. Liu, Y. Chen, and N. Al-Dhahir, "Machine learning for user Partitioning and phase shifters design in RIS-aided NOMA networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 11, pp. 7414-7428, Nov. 2021.
- [125] C. Jia, H. Gao, N. Chen, and Y. He, "Machine learning empowered beam management for intelligent reflecting surface assisted MmWave networks," *China Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 100-114, Oct. 2020.
- [126] G. Lee, M. Jung, A. T. Z. Kasgari, W. Saad, and M. Bennis, "Deep reinforcement learning for energy-efficient networking with reconfigurable intelligent surfaces," ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland, 2020, pp. 1-6.
- [127] L. Li et al., "Enhanced reconfigurable intelligent surface assisted mmWave communication: A federated learning approach," *China Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 115-128, Oct. 2020.
- [128] W. Ni, Y. Liu, Z. Yang, H. Tian, and X. Shen, "Federated learning in multi-RIS-aided systems," *IEEE Int. Things Journal*, vol. 9, no. 12, pp. 9608-9624, 15 June 2022.
- [129] J. Kim et al., "Exploiting multiple intelligent reflecting surfaces in multi-cell uplink mimo communications," arXiv preprint arXiv:2011.01141, 2020.
- [130] A. Al-Hilo, M. Samir, M. Elhattab, C. Assi, and S. Sharafeddine, "Reconfigurable intelligent surface enabled vehicular communication: Joint user scheduling and passive beamforming," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 3, pp. 2333-2345, March 2022.
- [131] B. Zheng, Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface-Assisted Multiple Access With User Pairing: NOMA or OMA?," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 4, pp. 753-757, April 2020.
- [132] Q. Wu, X. Zhou, W. Chen, J. Li and X. Zhang, "IRS-Aided WPCNs: A New

- Optimization Framework for Dynamic IRS Beamforming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 7, pp. 4725-4739, July 2022.
- [133] C. Huang, R. Mo and C. Yuen, "Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser mimo systems exploiting deep reinforcement learning," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 8, pp. 1839-1850, Aug. 2020.
- [134] C. Huang, Z. Yang, G. C. Alexandropoulos, K. Xiong, L. Wei, C. Yuen, Z. Zhang and M. Debbah, "Multi-hop RIS-empowered terahertz communications: a DRL-based hybrid beamforming design", in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 6, pp. 1663-1677, June 2021
- [135] G. Chen, Q. Wu, W. Chen, D. W. K. Ng, , and L. Hanzo, "IRS-aided Wireless Powered MEC Systems: TDMA or NOMA for Computation Offloading," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, early access, doi: 10.1109/TWC.2022.3203158.
- [136] X. Mu, Y. Liu, L. Guo, J. Lin, and N. Al-Dhahir, "Exploiting Intelligent Reflecting Surfaces in NOMA Networks: Joint Beamforming Optimization", *IEEE Transactions on Wireless Communications*; vol. 19, no. 10, pp. 6884-6898, Oct. 2020.
- [137] M. Hua and Q. Wu, "Joint Dynamic Passive Beamforming and Resource Allocation for IRS-Aided Full-Duplex WPCN," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 7, pp. 4829-4843, July 2022.
- [138] Y. Liu, X. Mu, X. Liu, M. Di Renzo, Z. Ding, and R. Schober, "Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) Aided Multi-User Networks: Interplay Between NOMA and RIS", *IEEE Wireless Communications*; vol. 29, no. 2, pp. 169-176, April 2022.
- [139] G. Chen, Q. Wu, C. He, W. Chen, J. Tang, and S. Jin, "Active IRS Aided Multiple Access for Energy-Constrained IoT Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, early access, doi: 10.1109/TWC.2022.3206332
- [140] D. Zhang, Q. Wu, M. Cui, G. Zhang and D. Niyato, "Throughput Maximization for IRS-Assisted Wireless Powered Hybrid NOMA and TDMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 9, pp. 1944-1948, Sept. 2021.
- [141] X. Shao, L. Cheng, X. Chen, C. Huang and D. W. K. Ng, "Reconfigurable Intelligent Surface-Aided 6G Massive Access: Coupled Tensor Modeling and Sparse Bayesian Learning," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, doi: 10.1109/TWC.2022.3182653.
- [142] Y. Zhao and X. Lv, "Network Coexistence Analysis of RIS-Assisted Wireless Communications," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 63442-63454, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3183139.
- [143] M. Jian and Y. Zhao, "A Modified Off-grid SBL Channel Estimation and Transmission Strategy for RIS-Assisted Wireless Communication Systems," *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Limassol, Cyprus, 2020, pp. 1848-1853, doi: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148537.
- [144] 赵亚军, 菅梦楠. 6G 智能超表面技术应用与挑战 [J]. *无线电通信技术*, 2021, 47(06):679-691.
- [145] Zhao, Y.; Lv, X. Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G: Applications, Challenges and Solutions. *Preprints 2022*, 2022120006 (doi: 10.20944/preprints202212.0006.v2).
- [146] Y. Zhao and X. Lv, "Network Coexistence Analysis of RIS-Assisted Wireless Communications," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 63442-63454, 2022, doi:

- 10.1109/ACCESS.2022.3183139.
- [147] 赵亚军,章嘉懿,艾渤.智能超表面技术在智能高铁通信场景的应用探讨[J].中兴通讯技术,2021,27(04):36-43.
- [148] Z. Zhang and L. Dai, "A Joint Precoding Framework for Wideband Reconfigurable Intelligent Surface-Aided Cell-Free Network," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 4085-4101, June 2021.
- [149] Y. Liu, X. Mu, J. Xu, R. Schober, Y. Hao, H. V. Poor, and L. Hanzo, "STAR: Simultaneous Transmission And Reflection for 360 Coverage by Intelligent Surfaces", *IEEE Wireless Communications*; vol. 28, no. 6, pp. 102-109, December 2021.
- [150] J. Xu, Y. Liu, X. Mu and O. A. Dobre, "STARs: Simultaneous Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces," in *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 9, pp. 3134-3138, Sept. 2021.
- [151] J. Xu, Y. Liu, X. Mu, R. Schober and H. V. Poor, "STARs: A Correlated T&R Phase-Shift Model and Practical Phase-Shift Configuration Strategies," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, doi: 10.1109/JSTSP.2022.3175030.
- [152] J. Xu et al., "Simultaneously Transmitting and Reflecting Intelligent Omni-Surfaces: Modeling and Implementation," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 16, no. 5, pp. 1097-1111, Aug. 2022.
- [153] X. Mu, Y. Liu, L. Guo, J. Lin and R. Schober, "Simultaneously Transmitting and Reflecting (STAR) RIS Aided Wireless Communications," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 3083-3098, May 2022.
- [154] J. He, A. Fakhreddine and G. C. Alexandropoulos, "Simultaneous indoor and outdoor 3D localization with STAR-RIS-assisted millimeter wave systems," in *IEEE Vehicular Technology Conference, London/Beijing, UK/China, 26–29 September 2022*.
- [155] G. C. Alexandropoulos, I. Vinieratou and H. Wymeersch, "Localization via Multiple Reconfigurable Intelligent Surfaces Equipped With Single Receive RF Chains," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 1072-1076, May 2022.
- [156] J. He, A. Fakhreddine, C. Vanwynsberghe, H. Wymeersch and G. C. Alexandropoulos, "3D localization with a single partially-connected receiving RIS: Positioning error analysis and algorithmic design," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (under review), 2022.
- [157] J. He, A. Fakhreddine, H. Wymeersch and G. C. Alexandropoulos, "Compressed-sensing-based 3D localization with distributed passive reconfigurable intelligent surfaces," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, under review, Rhodes, Greece, 4–9 June 2023.
- [158] O. Daniel, H. Wymeersch and J. Nurmi, "Delay–Accuracy Tradeoff in Opportunistic Time-of-Arrival Localization," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 6, pp. 763-767, June 2018.
- [159] W. Tang et al., "MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: System design, analysis, and implementation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 11, pp. 2683–2699, Nov. 2020.
- [160] X. Wang, J. Han, S. Tian, D. Xia, L. Li, and T. J. Cui, "Amplification and Manipulation of Nonlinear Electromagnetic Waves and Enhanced Nonreciprocity using Transmissive Space-Time-Coding Metasurface," *Adv. Sci.*, vol. 9, no. 11, pp. 2105960, Apr. 2022.

- [161] Z. Zhang, L. Dai, X. Chen, C. Liu, F. Yang, R. Schober, and H. V. Poor, "Active RIS vs. passive RIS: Which will prevail in 6G?," arXiv Preprint, arXiv:2103.15154, Mar. 2021.
- [162] L. Zhang, M. Z. Chen, W. Tang, J. Y. Dai, L. Miao, X. Y. Zhou, S. Jin, Q. Cheng, T. J. Cui, A wireless communication scheme based on space- and frequency-division multiplexing using digital metasurfaces. *Nature Electronics*, 2021, 4 (3), 218-227.
- [163] X. Bai et al., "High-efficiency transmissive programmable metasurface for multimode OAM generation," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 8, no. 17, 2020, Art. no. 2000570.
- [164] Z. Li, W. Chen, and H. Cao, "Beamforming Design and Power Allocation for Transmissive RMS-based Transmitter Architectures," in *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 53-57, Jan. 2022.
- [165] Z. Li, W. Chen, Z. Liu, H. Tang, J. Lu, "Joint Communication and Computation Design in Transmissive RMS Transceiver Enabled Multi-Tier Computing Networks," in *J. Sel. Areas Commun.*, to appear, 2022.
- [166] J. C. Ke, X. Chen, W. Tang, M. Z. Chen, L. Zhang, L. Wang, J. Y. Dai, J. Yang, J. W. Zhang, L. Wu, Q. Cheng, S. Jin, T. J. Cui. Space-frequency-polarization-division multiplexed wireless communication system using anisotropic space-time-coding digital metasurface[J]. *National Science Review*, 2022, 9(11): nwac225.
- [167] S. G. Sanchez, *et al.*, "AirNN: Over-the-Air Computation for Neural Networks via Reconfigurable Intelligent Surfaces," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, doi: 10.1109/TNET.2022.3225883.
- [168] B. Yang, et al. "Reconfigurable Intelligent Computational Surfaces: When Wave Propagation Control Meets Computing." arXiv preprint arXiv:2208.04509 (2022).
- [169] "New SI: Study on NR Network-controlled Repeaters,"RP-213700, 3GPP TSG RAN Meeting #94e, 2021.
- [170] "New WID on NR network-controlled repeaters,"RP-222673, 3GPP TSG RAN Meeting #97-e, 2022.

版权所有 ©智能超表面技术联盟 RISTA 2023

