

可重构智能表面技术及应用探讨

Exploration of Reconfigurable Intelligent Surface Technology and Its Application

刘显荻¹,张 鹏²,张莉萍³,陈任翔¹,马广辉¹,王 萌¹(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司,河南 郑州 450007;
2. 中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033;3. 中国铁塔浙江分公司,浙江 杭州 310000)

Liu Xiandi¹,Zhang Peng²,Zhang Liping³,Chen Renxiang¹,Ma Guanghui¹,Wang Meng¹(1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China; 2. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China; 3. China Tower Co., Ltd. Zhejiang Branch, Hangzhou 310000, China)

摘 要:

可重构智能表面(RIS)通过智能调控电磁波,解决了传统无线信道的传输局限,为构建智能可编程的无线环境提供了可能。详细阐述了RIS在高精度定位、车联网通信、安全通信等多个新型应用领域的潜力。RIS以其低成本、低能耗、可编程和易部署的特性,为无线通信领域的未来发展提供了广阔的应用前景。

关键词:

RIS;高精度定位;车联网;无人机通信

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.06.009

文章编号:1007-3043(2025)06-0045-07

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) overcome the transmission limitations of traditional wireless channels through intelligent modulation of electromagnetic waves, providing the possibility for the construction of an intelligent and programmable wireless environment. It elaborates on the potential of RIS in various novel application areas such as high-precision positioning, vehicle-to-vehicle communication, secure communication, and so on. With its characteristics of low cost, low energy consumption, programmability, and easy deployment, RIS offers a broad application prospect for the future development of wireless communication, driving the continuous advancement of communication technology.

Keywords:

RIS; Wireless communication; High-precision positioning; Internet of vehicles; Drone communication

引用格式:刘显荻,张鹏,张莉萍,等. 可重构智能表面技术及应用探讨[J]. 邮电设计技术,2025(6):45-51.

0 RIS背景

在近年来新兴的技术革新中,可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)凭借其显著的优势崭露头角,这些优势包括成本低、能耗低、可编程和支持快速部署^[1-3]。RIS能够动态调整其电磁属性,进而开启了一系列超越传统超材料极限的功能。RIS通常由大量精细设计的电磁单元矩阵构成,它通过精细控制这些单元上的可调节组件,智能化地调控电磁

波,实现对电磁场强度、相位、极化方向乃至频率的精确控制。

RIS的引入为无线传输环境带来了革新的可能,它旨在构建一个智能且可编程的新型无线通信环境^[4]。RIS具有如下2个独特优势:首先,它能有策略地优化信道的随机散射,从而提升无线系统的复用效率^[5];其次,通过精确控制信号的三维路径和相位聚合,RIS强化了信号强度,提升了整体的通信传输性能^[6]。因此,RIS的应用对于扩展无线网络覆盖、缓解频率重叠问题、减少局部盲区,并促进无线通信环境的自适应重构至关重要^[7]。随着RIS技术的发展,未来的网络平台正朝着以软件驱动的可重构智能体系演进,这种灵活性使其能够适应通信环境变化并提供

基金项目:6G业务需求分析及重点候选关键技术评估(2023-HXGG-AA2-001)

收稿日期:2025-04-30

定制化服务^[8]。RIS具备多方面的潜力,包括电磁能量管理、安全防护、减小电磁干扰、支持无源物联网发展、支持无线能量传输以及增强定位感知等^[9-11]。RIS甚至能将基带信息直接映射到射频载波,促进新型阵列发射器架构的设计,大大简化硬件系统的设计^[12]。

1 RIS的理论基础

在宏观层面,RIS作为超材料的分支独具特色。从空间维度来看,超材料主要分为立体三维和平面二维2种形式,后者进一步细分为固定参数结构和动态可控设计。RIS是动态可控类型的代表。1967年,V. Veselago教授在一项开创性的俄语文献中阐述了该新颖的理念,该成果在次年以英文版面世^[13],其首次引入了“左旋介质”的概念,其中电介常数 ϵ 和磁导率 μ 呈现负值,文中深入探讨了双负介质中电磁波传输行为的特性,并预言了一系列异乎寻常的调控效应。直到1996年,J.B. Pendry实现了负电介常数的实验验证^[14],随后提出了利用周期性布局验证负磁导率的可行性^[15]。至于人工电磁表面(超表面)的早期研究,D.F. Sievenpiper在1999年提出了基于蘑菇状结构的高阻抗表面(HIS),这一贡献具有里程碑意义^[16]。

尽管传统的等效介质参数方法可用于三维材料的电磁特性分析,但在二维超表面的研究中,这些参数已经失效^[17]。为了准确描绘二维超表面的特性,众多学者逐渐发展出各种理论框架。其中,最为显著的进展是由F. Capasso团队在2011年提出的广义斯涅尔准则^[18],它精准描述了电磁超表面的物理性质,具体如式(1)和式(2)所示:

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

$$\sin \theta_t - \sin \theta_i = \frac{\lambda_0 d_\varphi}{2\pi n_t d_x} \quad (2)$$

式(1)和式(2)分别是广义斯涅尔折射和反射定律,其中, n_i 是入射界面折射率, n_t 是出射界面折射率, θ_i 是入射角, θ_t 是出射角。

在2016年,杨帆及其研究团队首度提出了“界面电磁学”这一理论,着重剖析超表面的电磁特性原理^[19]。他们提出的概念侧重于通过解析二维界面的多元电磁现象,为各类电磁表面的构造及后续性能提升提供理论指导。

早期超表面设计主要依赖连续或近乎连续的物理特性,如表面极化率、表面电阻率、振幅与相位等,

来刻画其电磁特征^[14]。在2014年,东南大学崔铁军团队开创性地设计了“数字代码”和可编程超材料/超表面的概念,他们采用二进制编码的形式重塑了超表面的表征方式,实现了从模拟超表面到数字化的飞跃^[20]。通过将超表面的可调物理属性进行编码,借鉴计算机科学中的成熟编码理论和技术,从而更加智能化地操控超表面相关的参数^[21]。2017年,崔教授团队在他们的研究报告中系统地整理并构建了“信息超材料/超表面”这一全新的理论框架^[22],推动了超表面技术向更高层次的信息处理能力迈进。

1.1 固定参数超表面

1.1.1 频率选择表面

在电磁波调控技术中,固定参数超表面的一种重要子类为频率选择表面。频率选择表面的单元结构的核心组件包含金属贴片和介质板的协同作用,其中金属贴片的几何形态与尺寸,以及介质板的介电常数,共同决定了该表面的频率响应特性。当电磁波抵达时,金属贴片被设置成特定的形状和排布,通过接收、反射或被穿透,从而能够精准地调控不同频率的电磁波传输。

频率选择表面依据其构造特点分为2种主要类别:一是以金属贴片覆盖在介质表面形成的周期性结构,通常称为带阻型滤波器,它展现的频率特性是低频允许通过而高频被反射;另一种则是金属板上周期性开设槽道的开槽类型,这类表面的频率特性表现为低频反射而高频传输,形成带通型频率选择效果。

1.1.2 电磁带隙

电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构是一种人造的周期性结构,它能够在一定频带内影响、改变电磁波传播,其中一种经典结构为蘑菇形结构(见图1),它具有如下2个重要特性。

a) 频率带隙特性。EBG结构能够阻止一定频带内的电磁波在其中传播,而对频带外的电磁波传播几乎没有影响。一般定义这个频带为频率带隙或者禁带、表面波带隙。

b) 相位带隙特性。当平面电磁波垂直照射EBG结构表面时,如果以EBG结构表面为相位参考面,那么反射电磁波相位会随着频率从 -180° 到 $+180^\circ$ 连续变化。一般定义反射波相位在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 的频带为同相反射相位带隙或相位带隙。

1.2 动态可调超表面

在实际应用场景中,通常需要超表面能够实时切

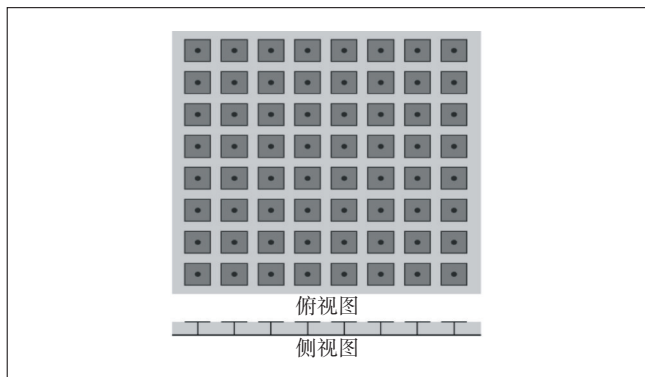


图1 蘑菇形电磁带隙示意

换不同的状态和功能。RIS利用超表面单元的可重构特性,以实时可编程的方式实现电磁波信号的调控功能。与传统天线和相控阵天线不同,它们一般将亚波长的超表面单元按照一定准则排布在二维表面上,每一个RIS单元通过加载一些射频开关来实现可调谐特性,常见的可调谐器件有变容二极管、PIN二极管和射频微机电系统等。通过采用可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)来控制这些射频开关。

在实际的应用中,常常追求超表面能够具备动态变换其状态与功能的能力。超表面技术凭借其组成单元的可重构特性,成功地实现了对电磁波信号操控的实时编程。与传统的天线和相控阵天线设计不同,这些装置往往将亚波长规模的超表面模块按照特定的策略排列于二维平面上。每个RIS单元借助射频开关的动态调整,如变容二极管、PIN二极管以及射频微电子机械系统,来实现其可调谐性能。为了精确控制这些开关,业界常采用功能强大的可编程逻辑门阵列(Programmable Logic Device, PLD),如FPGA,来执行智能化的信号管理。

1.2.1 PIN二极管

在RIS技术应用中,PIN二极管扮演着核心角色,作为可编程反射器,其具备可调电阻特性,这一特性源于对二极管偏置电压的微调。通过该方法,PIN二极管能够动态地调控电磁波的反射方向和能量分布。

在RIS设计中,这些二极管被整合进阵列元件中,构建出一个高度灵活的二维平台。每一个阵列单元的电阻值可根据需要调整,进而影响电磁波的相位响应和幅度调控,这使得RIS能够在波束调节、干扰抑制以及信号增强等多方面展现出卓越效能,也展现了其在无线通信系统中的潜在优势。

1.2.2 变容二极管

RIS整合了变容二极管作为动态元素,其核心功能是作为可调谐反射器使用。这种二极管的独特之处在于其电容值能通过调整偏置电压进行微调,从而实现对电磁波路径和频率的精确操控。如图2所示,在RIS的元件阵列设计中,每个变容二极管都被独立配置,允许通过调整各自的偏置电压来调整其对应的电容值,进而影响电磁波的反射特性及其频率响应的动态范围。

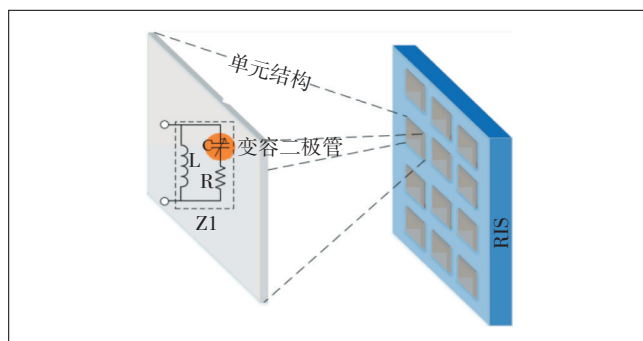


图2 RIS硬件结构

利用变容二极管的这一灵活性,RIS能够以程序化方式对电磁波的频率进行选择性的反射。通过精密地管理每个二极管的电容状态,可以精准地控制不同频率的电磁波的传输或反射,实现了对电磁波传输路径和选择性过滤的高度定制。

2 RIS的新型应用场景

RIS技术的兴起带来了“智能无线环境”的新兴概念。传统无线网络中,电磁环境不受网络控制,而在智能无线环境中,RIS将环境转变为一个智能可重构电磁空间,为信息传输和处理带来范式的转变。RIS能增强通信覆盖减少盲区,可以协助基站增强定位感知能力,无源RIS用作中继可以实现能量和信号的整合传输,而有源RIS可以通过配置在算力服务器周围来低成本实现动态的高性能通信服务,最后RIS能重构电磁场,进而实现对无线信道的精细化感知和个性定制,依据上述特性,未来RIS的新型应用场景可以有以下几个方面。

2.1 基于覆盖增强方向的应用

传统的通信覆盖受到基站功率的限制,覆盖范围有限,同时频率日益变高的通信信号越来越容易遭受传输路径上物体的阻塞,往往会产生很多弱覆盖区域乃至覆盖盲区,RIS部署在基站和用户之间,可以显著增强基站的覆盖,有效减少通信盲区,助力未来车联

网和无人机通信的大发展。

车联网作为驱动产业革新的关键引擎,其影响力日益凸显,它深刻重塑了汽车行业的架构、出行范式、能源消耗模式以及社会运作方式。智能交通和自动驾驶技术的飞速发展,对车联网的通信效率、响应速度及稳定性提出了更为严格的要求。由于车辆在行驶中的动态特性及有限的通信范围,确保车辆间的实时通信成为一项挑战。RIS的引入为车联网解决方案打开了新格局,如图3所示,RIS通过类似中继的方式扩展了车辆通信的有效半径,并有效填补了传统车联网的信号覆盖盲点,为车联网的持续进步提供了前瞻性的突破策略。

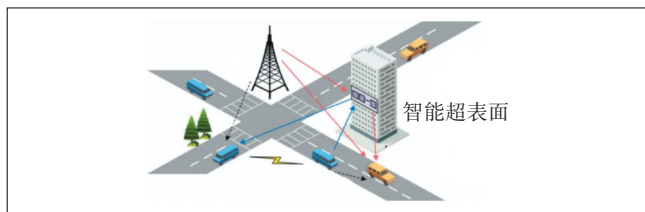


图3 基于RIS的车联网系统

随着人们对无线通信服务质量与速度的需求日益增长,无人飞行器(Unmanned Aerial Vehicles, UAVs)通信正崭露头角。UAV的卓越机动性使它们能迅速在目标区域部署通信网络,这显著提升了构建稳定连接的可能性。作为一种独特的低空通信平台,通过集成RIS于UAV,可以在热点区域及传统信号盲点创造出高效的连通网络(见图4)。RIS与UAV的融合能够在短时间内提供广泛且可靠的通信服务,从而增强灾难区域的应急通信能力。此外,RIS在航路覆盖方面也展现出潜力,通过精确地安置于地面、建筑物边缘或顶部,RIS能有效地反射地面基站信号,实现对UAV航线的无缝补充。RIS的经济性和便捷部署特性使其成为实现大面积航路信号增强的理想选择,具有广阔的应用前景。

2.2 基于辅助定位方向的应用

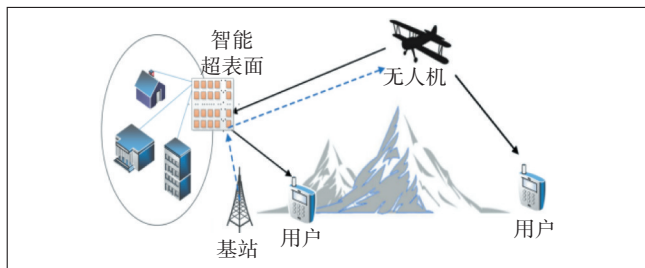


图4 RIS辅助的无人机网络应用场景

传统的无线网络依赖于基站设施实现定位,然而其定位能力受限于基站的物理布局 and 数量。为了突破这些局限,研究者们开始探索利用RIS来增强定位性能。RIS作为一种新兴技术,能够在无线网络的覆盖范围内灵活安装,它能够辅助基站进行精确的空间定位,尤其是提升了高密度环境(如建筑物内部)中的定位精度(见图5)。

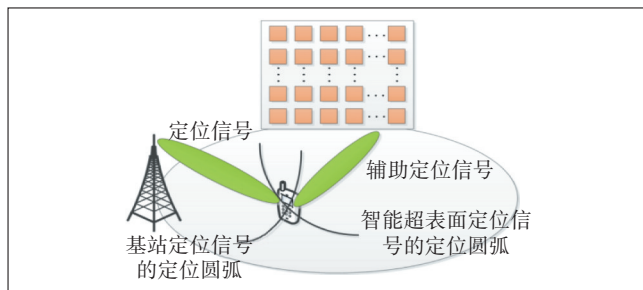


图5 RIS用于定位

通过精确测量基站与RIS之间参考信号的时间差,利用基础的基站位置信息,同时结合RIS的协助,可以有效地解算出移动设备的确切位置。相较于传统的多基站定位方法,RIS具备显著的优势。首先,其集成的大面积天线阵列提升了空间分辨率,这意味着能实现更细粒度的位置识别。其次,RIS的广泛部署灵活性解决了传统网络中难以触及的定位难题,比如在室内环境中的高精度定位,有效填补了定位盲区。

2.3 基于能量采集传输方向的应用

无线通信领域的一种新型通信方式是无线携能通信(Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT),它突破了传统无线系统的信息传输局限,实现了能量与数据的同时传输(见图6)。RIS凭借其无源的优势,作为动态中继,能够巧妙地整合信息信号和能量信号的混合波束,从而增强被服务用户的信号强度,尤其对那些信号较弱的终端设备,通过能量收集技术,能显著延长设备的使用寿命,提升了整体能源利用效率。

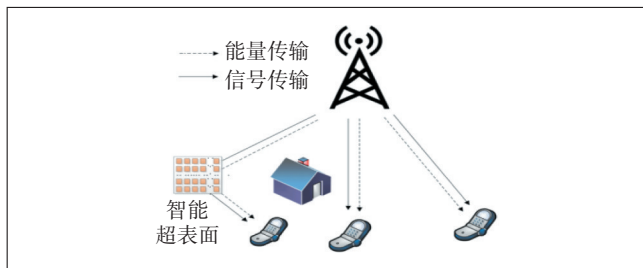


图6 RIS应用于SWIPT系统

在无线功率传输(Wireless Power Transfer, WPT)应用中,传统的焦点在于利用发射器向接收者单向传输电力,例如在智能家居设备充电、电动车充电及医疗植入设备供能中发挥关键作用。而RIS被纳入WPT网络架构不仅解决了无源反射表面的能源供给难题,确保了其持续稳定的运行,还通过反射射频能量实现了多功能服务,促进了绿色通信的发展。

在无线供电通信网络环境中,用户不再受限于传统的被动接收,而是能够积极地利用设备自身的能量进行双向通信。特别在基于RIS的无线供电通信场景中,无论是直射还是反射路径,用户设备利用捕获的射频能量来进行通信已成为可能。一旦能量收集完毕,用户就能利用能量,扩大通信范围,减少通信盲区,RIS的应用极大地优化了通信性能。

2.4 基于动态调整通信质量的应用

移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)在无线接入网络的边界区域、移动用户周边及网络边缘处构建了一个集成IT服务与云计算功能的动态环境。RIS可以凭借调控电磁单元的反射参数来精准控制空间信号传播路径,显著提升了网络性能,当在边缘网络的场景时,RIS能够优化边缘设备的任务卸载过程,显著增强数据交换的成功率,从而减少从端到终端的信号传输延迟。尤其是,若将RIS部署在边缘服务器的周边,其能够有效利用边缘计算的强大计算能力,提升对电磁单元反射系数的实时调控精度(见图7)。这种策略不仅提高了系统的覆盖范围,还增强了数据传输容量,最终使边缘网络整体时延显著降低。通过这种策略的整合,边缘网络在提供高效服务的同时,不断刷新了无线通信的效能界限。

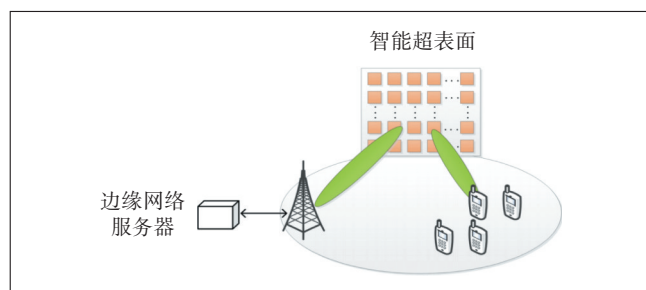


图7 RIS应用于移动边缘网络

2.5 基于信道精细化的安全通信应用

面对无线通信系统中日益突出的信息保障需求,电磁环境的固有复杂性与难以控制特性带来了安全挑战和干扰难题。未来要实现通信安全突破并提升

效能,关键在于探索利用电磁环境的内在特性,设计出能自我防护的内生安全机制。然而,依赖外部环境的无线内生安全策略在应对动态环境时性能会大打折扣。通过融合电磁理论与信息论,一种创新的无线内生安全构想——基于电磁信息论的新型RIS架构崭露头角。RIS的独特之处在于其能实时重构电磁场,对无线信道实施动态编程,从而实现对信道的精准感知和个性化设计。这样,它有能力最大限度地减少不确定性,削弱不可控因素,为无线通信的性能提升提供了强大的技术支撑。

展望6G时代的安全愿景,RIS的强大功能体现在它的信道精细化感知和自定义能力上。通过精确地调整RIS的配置,能够在保护通信的同时,挖掘通信与安全基础属性的潜在优势。如图8所示,通过将RIS巧妙地安置在窃听器周围,其反射信号能够与直通窃听器路径的信号产生干涉,有效地削弱潜在的信息泄露风险,展现了RIS在保障通信安全方面的巨大潜力。

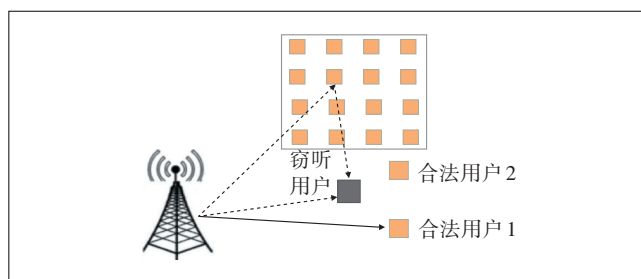


图8 RIS应用于安全通信

3 业界试验进展及攻关方向

3.1 内场测试

在2018—2023年,普林斯顿大学、麻省理工学院和加州大学圣地亚哥分校分别搭建了2.4 GHz频段LAIA、RFocus和ScatterMIMO RIS原型系统;欧洲研究机构也成立了RIS领域的VisorSurf和ARIADNE项目,通过撒点测试验证了RIS在室内的波束赋形、覆盖增强和多流增速性能。在国内,东南大学团队搭建了RIS单输入单输出二进制频移键控、正交相移键控、八进制相移键控、16QAM、64QAM和MIMO QAM等系列原型系统;清华大学团队研发了2.3 GHz、3.5 GHz、5.8 GHz、26 GHz等频段多阵元系列原型系统;华中科技大学、香港中文大学(深圳)、西安电子科技大学等团队纷纷开展RIS原型系统研发,并与各大设备商开展系统联调和室内外典型场景下的测试,持续验证RIS在

多流增速和覆盖补盲等方面的性能提升。

3.2 外场测试

在2018年, NTT DoCoMo与Metawave合作在日本东京开展了28 GHz RIS外场测试, 验证RIS毫米波的覆盖补盲能力; 在2020年, NTT DoCoMo与玻璃制造商AGC合作, 开展了毫米波频段动态透明RIS验证测试, 并在2021年进一步使用RIS透镜验证室外到室内的覆盖增强能力。在2022年, 韩国LG公司针对3.5 GHz和28 GHz频段开展RIS外场测试验证。

在2021年, 中国联通和中兴通讯携手完成业界首个5G网络外场的第1代静态RIS技术验证, 初步完成定点接收信号强度和边缘用户性能2个方面的技术探索。在2022年, 中国联通联合清华大学、行晟科技、罗德与施瓦茨等多家单位通过罗德与施瓦茨Qualipoc软件和路测终端、矢量网络分析仪与施瓦茨TSME6扫频仪等仪器开展RIS技术试验, 通过暗室测试、室内测试和室外测试几个场景测试了RIS邻道抑制比(ACLR)、阵面方向图、RSRP以及吞吐量等指标, 对RIS性能进行了多维测试。在2023年, 东南大学联合杭州钱塘信息高等研究院、中国移动通信有限公司研究院在亚运会多个场馆内部署RIS, 在部分弱覆盖区域实现10倍的信号强度增幅, 同时动态RIS可以调控波束, 及时准确跟随用户, 保证了信号强度和速率的稳定。2024年2月, 中国联通携手中兴通讯在辽宁大连完成业界首个动态RIS 2.0外场验证, 采用集成化程度更高的RIS 2.0产品, 通过5G-A基站和RIS波束协同部署, 显著改善了近1 000 m²的信号质量, 平均RSRP提升超过15 dB, 平均用户速率提升300%以上, 有效解决了网络覆盖空洞的问题, 开创5G-A组网新模式。

3.3 当前重点攻关方向

RIS正在经历快速的迭代与发展, 未来的重点攻关方向包括RIS硬件结构及调控算法、基带新算法和无线网络新架构等。

a) RIS硬件架构与控制算法研究。开发能够独立调节电磁信号特性的单元器件, 如快速调整电磁波的幅度、相位或极化等参数。同时开发设计多功能的RIS阵列, 包括优化单元空间布局, 集成不同类型的原子阵列以及开发多层、多功能的RIS模组, 以增强RIS阵列的工作带宽和能量转换效率。同时开发和完善RIS的控制算法, 以增强RIS阵列的功能多样性, 同时探索其新的应用领域。

b) RIS基带新算法研究。研究与开发高效基带算法以促进RIS的广泛应用已成为目前的研究热点, 其主要包括如下内容。

(a) 研究支持RIS通信的空口设计及算法, 如研究分布式RIS的协同传输策略, 包括利用人工智能技术优化信道信息的获取及波束设计。

(b) 针对多样化的传输环境, 设计灵活的信道测量与建模方法, 如将实测数据与统计模型相结合进行信道建模, 或是采用电磁计算的确定性建模方案。

(c) 推动融合RIS的新空口方案的标准化和RIS的产业化进程, 同时建设系统级仿真平台和系统验证平台, 对RIS新方案进行全面评估。

c) 基于RIS的无线网络新架构研究。明确在不同传输环境下RIS的网元功能, 并探讨RIS与无线网络之间的控制机制及其相关的接口协议。同时研究在同构或异构无线网络中RIS的网络拓扑设计与部署策略, 探究融合RIS的无线网络架构的移动性、鲁棒性、可扩展性、安全性以及时延特性, 并推动融合了RIS的新型无线接入网络架构的标准化工作。

3.4 应用中的工程问题

现有的RIS研究主要关注经典通信问题, 侧重于单网络系统模型假设下的问题研究。而在实际的无线通信环境中, 多个网络共存是一个不可绕过的问题, RIS的引入可能会带来全新的网络共存挑战。

RIS标准化设计与多变的部署环境的挑战: RIS大规模部署于复杂多样的实际通信环境中, 其形态需适应复杂多样的部署条件, 此时多样化的部署需求与标准统一的工程化设计形成矛盾。等效天线口径的变化、天线入射角的差异等因素都会造成覆盖区域的变化, 进而对RIS部署的角度、位置、部署密度以及RIS的最佳形状造成影响。同时, RIS工业化部署也会给供电和网络控制等带来挑战。

RIS是否受控于上层通信网络的抉择: 在RIS实际部署时, 可以根据是否受控于上层通信网络, 分为受控部署和独立部署2种。对于受控部署模式, 它可以更好地满足多种无线网络共存的需求, 增强多网络协同, 支持多用户的接入, 但是会增加网络部署的难度, 因为需要部署专用的网络控制链路, 并设计相关的测量和控制信令流程; 而对于独立部署模式, 它不需要网络控制链路, 更加容易部署, 适用于无线网络共存度较低的环境, 如果网络环境较为复杂, 会出现多网络协同问题, 甚至对其他通信网络造成严重的干扰。

4 结束语

RIS 技术能够突破传统无线信道不可控特性, 主动地控制无线传播环境, 实现信号传播方向调控, 抑制干扰并增强信号, 构建智能可编程无线环境新范式。RIS 典型应用包括解决无线通信中的覆盖空洞问题, 扩展覆盖范围, 抑制电磁干扰, 支持大规模连接及实现高精度感知与定位等。其与多技术的融合具有极大的应用潜力, 可以降低环境干扰, 低成本实现高性能传输, 提高环境感知能力, 是实现 6G 通信的关键技术之一。作为一项前沿技术, RIS 仍然面临很多方面的应用挑战, 如 RIS 标准化架构设计, 面对特异通信环境的 RIS 大规模部署方案的研究以及更节能和更高效的 RIS 材料等。未来, 随着全球各个通信组织的协同配合和通信事业的发展, 这些问题也将被逐个解决, RIS 必将在 B5G/6G 中大放异彩。

参考文献:

- [1] TARIQ F, KHANDAKER M R A, WONG K K, et al. A speculative study on 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(4): 118–125.
- [2] 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.
- [3] ZHANG L, CHEN X Q, LIU S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 4334.
- [4] HUANG C W, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 4157–4170.
- [5] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2450–2525.
- [6] HAN Y, TANG W K, JIN S, et al. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8238–8242.
- [7] HUANG C W, YANG Z H, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Multi-hop RIS-empowered terahertz communications: a DRL-based hybrid beamforming design[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(6): 1663–1677.
- [8] LIASKOS C, NIE S, TSIOLARIDOU A, et al. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 162–169.
- [9] CHEN J, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Intelligent reflecting surface: a programmable wireless environment for physical layer security[J]. IEEE Access, 2019(7): 82599–82612.
- [10] YU S X, LIU H X, LI L. Design of near-field focused metasurface for high-efficient wireless power transfer with multifocus characteristics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3993–4002.
- [11] HU J Z, ZHANG H L, DI B Y, et al. Reconfigurable intelligent surface based RF sensing: design, optimization, and implementation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2700–2716.
- [12] TANG W K, CHEN M Z, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: new paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 180–187.
- [13] VESELAGO V G. The electrodynamics of substance with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509.
- [14] 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): 4773–4776.
- [15] 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.
- [16] SIEVENPIPER D F, ZHANG L X, BROAS R, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with forbidden bands at radio and microwave frequencies[C]//Proceedings of the SPIE. Bellingham: SPIE, 1999: 154–165.
- [17] 张磊, 陈晓晴, 郑熠宁, 等. 电磁超表面与信息超表面[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 817–828.
- [18] YU N F, GENEVE P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333–337.
- [19] 杨帆, 许慎恒, 刘骁, 等. 基于界面电磁学的新型相控阵天线[J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 256–265.
- [20] 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.
- [21] MA Q, BAI G D, JING H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions[J]. Light, Science & Applications, 2019, 8: 98.
- [22] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(15): 3644–3668.

作者简介:

刘显荻, 工程师, 硕士, 主要从事移动通信新技术研究以及专网研发工作; 张鹏, 高级工程师, 主要从事移动通信网络规划、移动通信新技术研究等工作; 张莉萍, 助理工程师, 学士, 主要研究方向为通信工程规划建设、项目管理、通信工程技术演进等; 陈任翔, 高级工程师, 主要从事无线通信网络规划、无线新技术研究等工作; 马广辉, 高级工程师, 学士, 主要从事移动通信工程规划、设计工作; 王萌, 工程师, 硕士, 主要从事移动通信专网研发、设计工作。