

智能超表面技术 白皮书



中国联合网络通信集团有限公司 | 中国移动通信集团有限公司 | 中国电信集团有限公司 中兴通讯股份有限公司 | 中信科移动通信技术股份有限公司 | 中国铁塔股份有限公司 中国兵器工业集团有限公司 | 东南大学 | 上海交通大学

前 言

本白皮书旨在识别智能超表面典型应用场景并分析对应场景中 面临的工程化问题和挑战,探讨实际限制和约束对理想情况下设计方 案的性能影响,并结合实际场景分析对应的解决方案,探索智能超表 面在工程化应用落地方面的演进路线,为未来智能超表面商用奠定基 础。 目 录

1 RIS 典型应用场景及工程化挑战	.2
1.1 KIS 典型应用切京	. Z
1.1.1 地面覆盖的辅助增强与基础使能	.2
1.1.2 使能低空覆盖	.4
1.1.3 初理层女全進信	. 5
1.2 丄 住 化 问 题 分 切	. 6
2 RIS 工程化硬件挑战	.7
2.1 RIS 硬件类型、架构分析	.7
2.2 RIS 硬件挑战	.8
2.2.1 量化误差	. 8
2.2.2 信道互易性	. 9
2.2.3 双极化	11
2.2.4 互耦	13
2.2.5 时延	14
2.2.6 局部单元失效	15
2.3 中局频 RIS 特性	16
2.3.1 高频频谱特性分析	16
2.3.2 高频色散效应	16
2.3.3 新中频与高频近场效应	17
3 RIS 部署与组网上程化设计	20
3.1 邰者频段研允	20
3.2 部署模式选择	20
3.3 RIS 类型与部署位置设计	21
3.4 网络拓扑规划与优化	23
3.4.1 双 RIS 单元分配优化	23
3.4.2 双 RIS 距离优化	23
3.5 组网策略	24
3.5.1 RIS 辅助的高低频协同组网架构	24
3.5.2 基站与 RIS 协同组网	25
4 RIS 与 NCR 对比分析	27
缩略语列表	30
参考文献	31

1 RIS 典型应用场景及工程化挑战

1.1 RIS 典型应用场景

RIS 以其独特的低成本、低功耗和低复杂度特性,有机会作为"辅助网元"增强 sub-6G 频段的网络覆盖,更是有机会作为潜在关键技术使能新中频及毫米波网络的连续覆盖及 6G 网络,成为未来无线网络中的"基础网元"。

1.1.1 地面覆盖的辅助增强与基础使能

(1) 地面覆盖辅助增强

借助 RIS 的波束转发功能,可动态按需调整从基站到 RIS 以及从 RIS 到用户端的反射 或透射"视距"信道,从而有效解决建筑、植被遮挡造成覆盖盲区的问题,显著提升无线网络 的覆盖性能^[1]。

在典型的覆盖补盲场景中,可在基站附近或盲区附近部署 RIS,并根据相应场景设计和 选择合适的赋形波束,以实现有效的覆盖补盲,如图 1 所示,基于 RIS 辅助的覆盖增强不 仅可用于室外宏覆盖场景,还可用于室内场景^[2]。通过将 RIS 部署于室内天花板、楼道拐角 等潜在的通信盲区内,可提升室内基站的覆盖性能,确保室内的连续、无缝覆盖。在室内和 室外联合补盲的场景下,可在建筑玻璃幕墙或墙壁隔断部署透射式 RIS,以增强室外站信号 的透射能力,从而提升室外信号对室内区域的覆盖效果。



覆盖增强与传输速率有较强的相关性,因此,通过 RIS 进行的覆盖增强也会相应提高 传输速率,如图 2所示。对于单用户多输入多输出(Single User Multiple Input Multiple Output, SU-MIMO)系统,可以通过 RIS 构建附加的无线链路,扩展信道子空间,从而增加传输流 数并提升用户速率。对于基站与 RIS 协同覆盖的多用户场景,部分用户在基站覆盖范围内, 另部分用户位于 RIS 覆盖范围内,由于基站与 RIS 部署位置及不同波束信号无线传输信道存在差异,分别在基站和 RIS 覆盖范围内的用户更容易实现多用户多输入多输出(Multi User Multiple Input Multiple Output, MU-MIMO) 配对与调度,实现系统整体速率的提升。



(2) 使能新中频与高频毫米波连续覆盖^{[3][4]}

当前 6GHz 以下的频段已经或即将被现有的 4G/5G 商业网络完全占用。未来 6G 网络的 部署将与现有的 4G/5G 网络长期共存,在短期内很难为 6G 网络释放出已占用的 6GHz 以下 的频段。ITU 已经将 6 GHz 频段中的高 500 MHz 带宽划归 IMT 使用^[5],且中国也已正式将 该频段确定用于 5G 和 6G 网络(《中华人民共和国无线电频率划分规定》自 2023 年 7 月 1 日起施行)。2023 年 12 月,国际标准化组织 3GPP 在英国爱丁堡召开会议,确定立项了 5G-Advanced 第二个标准版本 Rel-19 的首批 8 个项目,其中包括 7-24 GHz 新中频的信道模 型研究^[6]。此外,毫米波频段也是支持高精度感知定位业务连续覆盖的优质频段。可以预见,中频段及毫米波频段,尤其是新中频及低频毫米波频段(6.5-30 GHz),将有机会作为实现 6G 网络连续覆盖的主力频段。

毫米波频段的电磁特性决定了毫米波通信的高定向性,传统的毫米波通信受到高路径损 耗和高阻塞概率的限制,使得基于传统集中式部署基站(扇区化蜂窝网络)的方式难以实现 连续覆盖。站址选择、成本、复杂度、功耗、部署难度等因素都会限制传统基站部署密度的 进一步增加。美国 5G 毫米波网络部署的失败案例便是一个很好的佐证。RIS 具有低成本、 低功耗和简单易部署的独特技术优势,是实现毫米波连续覆盖的潜在解决方案。例如,基本 复用现有 5G 基站站址(即毫米波基站与现有 6 GHz 以下频段的基站密度相当,或适当增加 基站密度),同时在基站之间密集部署 RIS,可以低成本实现毫米波的连续覆盖。

为了更好地构建毫米波网络近场覆盖的连续性, RIS 部署优化时一方面需要考虑传统信 号强度角度的覆盖连续性, 另一方面还需要兼顾所覆盖区域的近场传播条件。因此, RIS 网 络需要在尺寸、朝向角度、部署密度、部署位置等方面进行综合优化。也就是说, RIS 网络 部署需要在原有优化目标信号覆盖强度的基础上,进一步增加近场传播信道的空间自由度作

为优化目标[7]。



图 3 RIS 使能中高频连续覆盖

1.1.2 使能低空覆盖

目前现网部署的基站设备的设计目标是保障地面业务覆盖质量,基站天线下倾角设计范 围通常为 6°-12°,而 AAU 垂直波束宽度通常为 15°。因此,现有的 4G 和 5G 网络无法为无 人机、电动垂直起降飞行器(electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)等低空飞行设 备提供无线网络覆盖。另外,相对于地面覆盖,低空覆盖还面临两个非常关键的挑战: (1) 主要为 LoS 信道,体现为自由空间衰落为主,随距离增加衰落较慢,小区覆盖区域很难控 制,可能导致更多相邻小区之间的同频干扰; (2)上倾角配置将可能带来更为显著的大气 波导现象,对于 TDD 系统,超远端的基站信号会带来上下行链路交叉链路干扰。

超大天线孔径的 RIS 以其无源调控的特性,可以很好解决传统基站面临的挑战,使能 低空覆盖。针对低空通信、低空导航和空域监管等低空范围智能网联的需求,可以在现有地 面移动通信网络的基础上,增加面向低空覆盖区域的 RIS 节点,如图 4 所示。通过 RIS 设 备部署位置、朝向与 RIS 阵面波束动态调控能力的结合,将朝向地面基站波束与朝向低空 终端的波束级联,在不改动基站硬件的基础上同时满足地面移动通信和低空智能网联的双重 需求。RIS 的波束上倾角需要尽可能垂直且采用窄波束,从而尽可能降低自由空间衰落导致 的相邻小区干扰,避免波导现象导致的远端基站交叉链路干扰。不过,这将导致每个 RIS 可以覆盖的区域较小,需要部署足够密度的 RIS,以实现 UAV 的连续覆盖。对于新中频及 毫米波频段,RIS 特有的低成本、低功耗、低复杂度,可以低成本实现无人机(Unmanned Aerial Vihicles, UAVs) 网络的连续覆盖需求。而对于 sub-6G 低频段而言,RIS 成本及复杂度的优 势不存,采用优化部署的基站支持低频段的低空覆盖是更合适的选择。



图 4 基于 RIS 辅助的低空覆盖增强(重庆现网实测场景)

1.1.3 物理层安全通信

物理层安全(Physical Layer Security, PLS)是一种利用无线信道的独特特性来实现基于 用户位置的安全无线通信的技术。它的核心优势在于通过充分利用无线信道的固有物理特征。 目前,基于物理层安全的通信策略主要包含两大类,一类是基于无线信道差异性设计的技术, 包括窃听编码、波束成形、人工噪声和中继协作干扰等,另一类是物理层密钥生成技术,主 要包括基于无线信道特征的密钥提取和物理层符号加密等方法,利用通信双方私有信道的特 性,提取无线信道的"指纹"特征,实现实时生成、无需分发的快速密钥更新方法,接近于一 次一密的完美加密效果。

由于无线物理层安全的本质是通过利用无线信道的物理特性,引入 RIS 技术后,借助 RIS 低成本、低功耗的方式动态的调控无线传播环境的优势,使得经过 RIS 反射的信号可以 在合法用户端得到增强,减少在其他用户方向上地泄露,从而大幅提升系统的无线传输性能, 如图 5 所示。因此,可在网络中部署 RIS 以进一步改进安全通信传输速率^[8]。



1.2 工程化问题分析

由于 RIS 的技术特点,如动态波束调整、反射和透射调控,对实际应用环境提出了具体要求。因此在部署 RIS 时,需要重点考虑以下几个问题,以确保其可以在不同环境下的高效部署和稳定运行:

(1) 供电

供电是 RIS 面向部署的核心痛点问题。RIS 作为网络节点的主要功能是数据转发,而当前许多类似技术(如中继、网络控制中继、小站和直放站)都依赖有线供电。如果 RIS 也 需通过有线方式供电,将难以在这些现有技术中脱颖而出。为此,一方面需要考虑进一步降 低 RIS 的能耗,另一方面需要探索无线的供电方式,包括能量收集、电池储能等。

(2) 选址与挂高

考虑到 RIS 的材料和形态特点,通常采用贴附式的部署方案,如在墙体表面、广告牌 或抱杆等结构上安装。由此可以看出, RIS 的部署往往依赖于环境中已有的建筑或物体,无 法自由布置于空旷空间。对于特定场景, RIS 的部署位置将受到一定的限制。因此,需要研 究和分析 RIS 在不同高度、距离基站的距离以及不同角度下的性能,并制定相应的部署指 南,以确定最佳的部署位置,从而优化 RIS 的覆盖效果和性能。

(3) 尺寸

由于 RIS 的性能与其面板大小(即 RIS 单元数)密切相关。因此,对于不同的应用场 景,需综合考虑 RIS 的成本与尺寸。从产品设计的角度来看,如果每个场景都需要定制化 的 RIS,将限制其产业规模。一种可行的解决方案是采用拼接式设计,即通过将少量 RIS 单 元组成一个 RIS 基板,根据具体场景需求选择不同数量和形态的基板进行拼接,以满足相 应场景需求,如图 6 所示。这种设计不仅可以降低生产成本,还能在不牺牲性能的情况下 提供灵活的配置选项,以满足多样化的应用需求。



6

2 RIS 工程化硬件挑战

2.1 RIS 硬件类型、架构分析

RIS 单元脱胎于最开始的左手材料超表面,特点是单元大小均小于半波长,工程上的实现目前均在十分之一波长到二分之一波长的区间内,在周期排布后呈现出自然界中不存在的复数介电常数或磁导率的性质。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。馈电系统主要是指通信信号的能量来源,一般不包含 RIS 的控制电路的供能系统。根据其架构设计的不同,RIS 可以分为反射式、透射式、有源无源集成式以及近场透射式等多种方式。其基本工作原理都是将待调控的电磁波照射到智能超表面上。其中,远场反射式和透射式两种馈电系统,可以由同一系统中的馈源天线主动发射,也可以被动地接收来自其他信号源的远程电磁波。RIS 当前主流的单元类型包括:

(1) 无源反射式 RIS 单元:对于常规调相的反射式 RIS 单元来说,一般设计为 U 方向 对称或者 V 方向对称或二者均对称的结构。RIS 单元至少分为三层:超结构层,介质层,以 及金属背板层或称为参考地层^{[9]-[10][9]}。通过二极管或者变容管等控制元器件将 RIS 单元的不 同结构进行连接,通过控制元件状态的改变,调控 RIS 单元上受激励而形成的电流分布, 进而控制电磁波出射的相位。

(2) 无源透射式 RIS 单元:麻省理工大学设计的无源透射式 RIS,其 RIS 单元不具备 调节相位的能力,而是通过 RF 开关,导通时该 RIS 面等效为一个完整的金属面,电磁波无 法通过;而断开时则等效为分立的一段段金属线,对电磁波起到透射的作用^[11]。实质上,将 一个个小的 RIS 当作单元在本设计中更容易理解,通过将小的 RIS 阵片组合为所示的阵面,将透射或反射设为"1"和"0"状态,通过同相叠加实现增益的提升。

(3)有源反射式 RIS 单元:有源反射式 RIS 的单元结构与无源反射式的完全一致或者 类似,其本质差别在于调控电路或放大电路的差异。

(4)同时反射和透射的 RIS 单元:目前对于该类型的硬件设计处于初级阶段,采用两块(层)独立的 RIS 对幅度和相位分别调控,难以自由调控。

调控电路即是调控 RIS 控制元器件状态的电路,通常为依靠高效快响应的现场可编程 逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)或其它方式调控直流偏置电压源的电 平值。从结构上分为通孔形式和共面形式。通孔形式设计 RIS 单元,控制元器件两端的引

线均是用通孔穿过介质层和金属背板层,在 RIS 面板的背后排布 FPGA 控制电路,利用金 属背板的屏蔽作用减小控制电路对 RIS 性能的影响。共面形式的设计是直接将控制电路与 超结构层排布打印在同一层上,目前出现在一些比较简易的 RIS 模型设计上,比如仅控制 U、 V中一个维度的相位偏移,即成行或成列地控制。共面设计由于与超结构层共面,对 RIS 的性能会有较大影响,且走线设计长度及位置需要进行规划,因此该方案可以预见地较难应 用到真实场景中。

此外,RIS业内也提出了利用光控二极管配合定制的集束光源进行 RIS 调控的方案,可以有效地将控制电路搬移到距离 RIS 面 0.5m 的距离,但是定制光源的控制依然需要 FPGA 调控。

RIS 控制电路在功能上分为两类,第一种是无源器件,仅进行相位控制,或仅进行反射 透射控制;第二种是有源器件,既进行相位控制也对信号进行放大^[12]。有源 RIS 在实际系 统中的表现实质上很接近于一个中继了。通过将原本的直流控制电路级联放大电路,对信号 和噪声进行了同步的放大。此外,有源 RIS 相较于无源信道侧 RIS 来说更容易实现全双工 模式。

2.2 RIS 硬件挑战

2.2.1 量化误差

采用高分辨率元件虽然能提高性能,但同时也会导致硬件成本、设计复杂性以及控制开销的显著增加。为了维持较低的硬件成本和功耗,RIS通常采用有限数量的量化相移。然而,有限相位量化可能导致较严重的相位噪声,对远场波束的指向性和近场波束的聚焦性能产生负面影响。量化噪声可以导致波束形成不够精确,从而影响波束的定向性和聚焦能力。这在高精度要求的应用中尤为关键,如精密定位和高分辨率成像。在图 7 中给出了 BS-RIS 和 RIS-UE 均为远场时不同量化比特数下的接收信号。可以发现,远场下1 比特量化存在明显 栅瓣,能量出现分散。增加比特数可以抑制栅瓣强度。



图 8 近场下不同量化比特数对应接收信号

在图 8 中给出了 BS-UE 信道为远场、RIS-UE 信道为近场下不同量化比特数下的聚焦信号。可以发现,在 RIS 低精度量化下,近场聚焦波束的实际接收图样仍能够呈现聚焦性质,但焦点位置的光斑形状相对理想情况存在发散,强度有所降低。在设计 RIS 系统时,需要在性能和成本之间找到合适的平衡点。这可能涉及对量化级别的优化,以最大程度减少量化噪声的影响,同时保持系统的经济性和低复杂度。这种权衡是 RIS 技术发展中的一个关键考虑因素,对于其在实际应用中的可行性和效能至关重要。

2.2.2 信道互易性

信道的上下行互易性是保证时分双工(Time Division Duplex, TDD)MIMO系统实现 下行链路高效预编码的必要条件。由于 RIS 的人工电磁特性并不严格遵循常见的自然规律, 由此带来了 RIS 是否会影响无线信道互易性的疑问。无线信道互易性的基础是电磁互易性, 电磁互易性是指当源点和观测点交换位置时,源点在观测点产生的电磁场保持不变的现象, 这一现象源于麦克斯韦方程组对于时间反演的对称性。电磁波传输经过的材料和传输介质是 具有互易性的,即可以保证无线信道的互易性。通常来说,当作用于 RIS 单元的控制信号 保持不变,常规设计和制造的 RIS 是具有互易性的,这是因为构成 RIS 的材料(如金属贴 片、介质层和可调元件)往往是遵循互易性定理的。因此,在正常条件下, RIS 辅助的无线 信道依然具有互易性。该结论可以通过对常见的变容二极管 RIS 和 PIN 管 RIS 两种原型样 机,在如图 9 所示的测试环境下的测量结果得以证明^[13],测量结果如表格 1 所示。

RIS 类型	入射角(°)	反射角(°)	下行接收功率(dBm)	上行接收功率(dBm)	
变容管	30	0	-42.6	-42.7	
变容管	50	30	-53.6	-53.7	
PIN 管	35	0	-49.4	-49.2	
PIN 管	5	0	-58.2	-58.2	

表格 1 两种常见类型 RIS 的信道互易性的测量结果



图 9 RIS 辅助无线通信系统上下行信道互易性的测试环境

虽然常见的 RIS 依然保持信道互易性,但是仍然存在打破信道互易性的可能性。如图 10 所示,在单元设计中使用有源非互易性电路、进行时变的单元控制、采用非线性和结构不对称,可以实现具有非互易特性的 RIS。虽然信道互易性经常被用来设计高效的无线通信协议, 但在一些潜在的应用场景中,信道互易性并不是必需的,例如无线电力传输和安全无线通信 等潜在场景。值得注意的是,RIS 的反射系数/透射系数往往对大入射角/反射角敏感。因此, 如图 11 所示,±60°入射角范围内入射/反射波束主瓣角度互易性成立,当入射角/反射角大 于±60°时,会导致上下行中 RIS 的反射波束方向呈现偏差,造成波束非互易的现象,但这并 不影响 RIS 信道的互易性^[14]。



(a)有源非互易性电路; (b)时变控制; (c)非线性和结构不对称 图 10 破坏互易性的方式



图 11 信道互易性测试结果

应对 RIS 可能引入的非互易性有两种思路:避免和利用。对于避免非互易性,在设计流程和制备工艺中避免引入非互易因素;针对角度敏感特性对上下行 RIS 波束赋形的影响,可以研究上下行校准方法来弥补。对于利用非互易性,可以利用非互易性 RIS 控制传输状态(包括双向传输、正向传输、反向传输和无传输),从空口层面解决数据流拥塞和电磁污染等问题^[14]。此外,上下行非互易性对于无线能量传输和安全无线通信等场景也具有前景。

2.2.3 双极化

通过电磁仿真发现,单极化 RIS 面板在垂直极化方向上,存在显著的水平镜面反射问题,影响信号传输效率与质量,如图 12 所示。为解决此问题,需探索新设计或技术,优化面板布局与结构,以减少反射,提升信号处理能力。



图 12 单极化 RIS 面板的水平镜面反射

由于基站广泛部署了交叉极化天线,所以对 RIS 双极化响应的研究是十分必要的。但 到目前为止,大多数 RIS 设备只对一种极化做出响应,即根据 RIS 元件内电流流动的方向, 做出垂直或水平极化响应。表格 2 给出了对目前高校和设备商的 RIS 样机基本情况。与振 幅调节的情况类似,垂直和水平极化的独立调节也会使相位调节的比特分辨率预算更加紧张。

编号	样机示例	极化方式	调控比特数(bit)	中心频点(GHz)	调控方式
1		单极化	1	2.6	点控
2		单极化	1	27	列控
3		单极化	2	2.6	点控
4		双极化 (棋盘分布)	1	26	点控

表格 2 RIS 样机基本情况调研

5		单极化	1	26	点控
6	- Har	双极化(两块单 极化拼接)	1	26	点控

实现双极化样机的主要方法包括: 棋盘拼凑(如表格 2 中的样机 4),双板拼接(如表格 2 中的样机 6),以及单元双极化(主要在静态 RIS 上实现)。大多数样机采用拼接或棋盘分布的方式来实现双极化功能,虽然能够满足一定的双流性需求,但依然存在面板利用率低和反射产生镜像极化分量干扰的问题。这些问题为未来的研究指明了方向,也预示着双极化 RIS 技术仍有巨大的发展潜力。

2.2.4 互耦

当 RIS 天线元件密布时,耦合效应对于单个天线元件以及阵列的辐射方向图是有影响 的^[16],如图 13 所示,利用耦合通过调整天线的模拟激励电流可实现方向性更高的空间波束, 并且可实现空间波束增益在水平方向不同角度上近似相等,如图 14 所示。其中,对于 RIS 耦合效应的建模是通过计算基于球面波展开的耦合矩阵实现的,具体而言,球面波展开法通 过在天线阵列的近场区域对辐射电场分量进行测量,可以较为全面的评估天线阵列的辐射方 向图和耦合关系,且结果同时适用于远近场,在实际上具有较高的可操作性。同时,天线阵 列的耦合效应与其物理结构强相关,当天线结构固定时,通过波束赋形对于不同方向发射波 束并不会引起阵列天线元件之间的耦合关系的明显变化,故可以通过预先仿真分析,在耦合 效应和辐射效率之间进行权衡折衷,并依据波束赋形性能进行包含耦合效应的最佳天线阵列 结构设计。



(a)单独 dipole 天线; (b)密布天线阵列中单个 dipole 天线,间距为 0.2λ; (c)基于耦合效应的空间 波束; (d)不考虑耦合效应的空间波束
 图 13 天线辐射方向图



2.2.5 时延

目前, RIS 单元的实现方式主要集中在 PIN 二极管、变容二极管、液晶。在实际测试中, 基于 PIN 二极管单元的状态切换时延在 800ns 左右,基于变容管单元的状态切换时延在 15us 左右, 而基于液晶单元的状态切换时延在 ms 级别。因此, 在 RIS 工程应用中, 为了实现对 移动用户的实时波束跟踪, 基于 PIN 二极管、变容二极管的单元性能会优于基于液晶的单 元。

2.2.6 局部单元失效

为了在 RIS 相关应用中克服自由空间乘性衰落, RIS 表面一般包含上千个反射/透射单 元。然而,在工程应用中保证巨大阵面 100%单元有效工作,显然会增加后期维护成本。局 部单元失效会在对应区域引入相位误差,从而影响波束的定向性和聚焦能力。不同单元失效 率对 RIS 表面反射/透射波束的影响如图 15 所示。当入射角为 50°时,RIS 表面反射角度为 -10°时,不同单元失效率所对应的反射波束方向图,其中失效单元在 RIS 阵面中随机分布。 随着单元失效率增加,RIS 反射波束的目标角度增益下降,干扰旁瓣的能量增加。另外,从 图 16 的多次平均结果中可以看出,当单元失效率大于 30%时,目标角度增益下降 3dB,旁 瓣抑制比大于-10dB:当单元失效率大于 50%,会影响 RIS 反射波束指向。因此,未来在工 程应用中,RIS 系统可以允许局部单元失效。但是,不同的应用场景对单元失效率的容忍程 度不同。



 (a) 失效率 10%
 (b) 失效率 30%
 (c) 失效率 60%

 图 15 不同单元失效率的 RIS 反射波束方向图



2.3 中高频 RIS 特性

2.3.1 高频频谱特性分析

自由空间传播损耗模型,路径损耗随着信号频率的增高而增大。因此,毫米波的传输损 耗明显大于 6GHz 以下频段。此外,毫米波在空气中传播时容易被各种气体吸收,从而产生 较大的衰减,且不同频率的毫米波在空气中的衰减也不同,比如毫米波在 30GHz、90GHz、 140GHz、210GHz 等频段损耗相对较小,而在 61GHz、118GHz 和 185GHz 等频段毫米波 的衰减相对较大。除了由于气体吸收带来的损耗外,相较低频段,降水、降雪、冰雹极端天 气也会给毫米波信号带来更大损耗。另一方面,毫米波由于波长短,几乎不能反射和绕射, 遇到物体会被遮挡,基本不能穿透大多固体材料,必须基于视距传输。此外,当天线数一定 时,波束宽度与波长成正比,随着工作频段的升高,相同条件下的波束也更窄。因此,毫米 波不仅可用频谱资源相较 Sub 6GHz 频段更丰富,能够实现更高通信速率和更大系统容量, 而且天线阵元的大小也可以做到毫米量级。在用户终端上使用毫米波通信,能够将 16 根甚 至更多数量的天线放置于狭小用户终端内,加以波束成形技术,可以有效克服毫米波覆盖范 围小的缺点,显著增大毫米波用户通信距离。

相比于毫米波,太赫兹能够提供更宽的带宽,理论上能够实现远超过 100Gbits/s 的无线 传输数据率。同时,太赫兹信号有更强链路方向性。相较无线光通信而言,太赫兹频段不会 因环境光源产生的环境噪声而影响传输可靠性,没有健康限制或安全限制,并且允许非视距 传输,能在雾、灰尘和湍流等不利气候条件下,表现出更好的性能。但是由于许多生物大分 子相互作用的能级恰好位于太赫兹频段,大气对太赫兹频段的电磁波有明显的连续吸收和线 吸收作用,这种吸收作用在共振频率处表现得尤为明显,使得太赫兹波的路径损耗比较严重。 太赫兹系统通过使用高增益天线对抗衰减,但同时增大了未对准衰落。此外,太赫兹频段的 多径衰落不同于无线电、毫米波波段的多径衰落。综上,分子吸收衰减、传播损耗、多径衰 落以及未对准衰落使太赫兹信道建模面临巨大的挑战。

2.3.2 高频色散效应

色散是指不同频率的电磁波在介质中传播时,由于介质的折射率随频率的变化而引起的 相位速度不同的现象。简单来说,色散是指不同波长的电磁波在传播过程中的相位差别,这 可能会对电磁波的传输和调制产生负面影响,导致传输信息的失效,影响传输可靠性。色散

受材料和结构的影响可分为材料色散和波导色散,材料色散由材料的物理特性决定,而波导 色散主要由结构参数决定。

在毫米波甚至更高频段,尤其是在 6G 超大带宽和大阵列的系统中,随着阵列尺寸的增加,色散现象尤为明显。这一现象由于不同频率的信号在阵列天线中不同的指向偏差而产生,导致高频子带和低频子带的波束指向存在差异,即波束偏移。在远场通信中,波束偏移主要表现为波束方向随子载波频率的变化而发生偏移。而在近场通信中,波束偏移不仅表现在波束聚焦位置随子载波频率的变化,还可能导致聚焦能量分散,不再集中于特定点。在的通信系统中,波束偏移成为一个显著的问题。在 RIS 辅助通信中技术中,需要在波束形成策略设计中考虑消除色散负面影响或是利用色散提升体统性能^[17]。

消除色散需要从 RIS 硬件设计和算法设计两个方面优化 RIS 阵面和相关硬件组件的设计,通过复杂的信号处理技术和自适应控制策略以及精细的波束成形和校准算法,动态调整 波束的指向和聚焦特性,实时补偿波束偏移。

除了消除色散,还可以通过 RIS 利用色散现象使得不同频率的波束指向不同位置,有 效控制近场波束分裂的程度,不仅可以按需动态实现覆盖增强,而且可以通过色散效应使不 同频率上聚焦于多个位置,通过操纵时间延迟参数,可以同时在多个位置生成多个波束。尽 管 RIS 对不同频带波束的调控角度是统一的,但是通过精确编程,RIS 能够调控不同频带电 磁波生成多个波束,服务多用户传输。

2.3.3 新中频与高频近场效应

传统的无线通信网络主要采用 6GHz 以下频谱,甚至是 3GHz 以下频谱。受限于波长, 这类网络一般采用较少天线阵子数量的天线。由于低维天线阵列和较低的频率,无线近场范 围通常被限制在几米甚至几厘米。因此,可以基于远场假设近似有效地设计传统无线通信系 统。然而,考虑到超大孔径阵列(Extremely Large Aperture Array, ELAA)以及高频 RIS 的 大孔径设计,6G 网络呈现出百米量级的超大近场区域,传统的远场平面波假设也已不再适 用。在 6G 网络中,近场区域是不可忽略的,这激发了对新的近场通信(Near Field Communications, NFC)范式的研究。

从空间维度的资源利用角度,传统蜂窝网络的典型部署是以小区为中心的标准网络架构。 在该网络架构下,尤其是在其主流的 Sub 6GHz 频段,远场近似作为表征手段已经足够。传 统无线通信系统已经充分挖掘和利用了远场空间资源,进一步探索和利用近场空间资源,则

有望为无线通信系统提供新的物理空间维度。未来 6G 网络中将会配置更大的天线孔径,并 将使用新中频、毫米波、太赫兹等更高频段,这将使得近场特性更加显著。同时,RIS、超 大规模 MIMO、无蜂窝等新技术的引入,则使得未来无线网络中近场场景广泛存在。近场 通信技术也是实现未来 6G 网络更高的数据速率要求、高精度的感知需求及物联网无线传能 需求等的使能技术之一,有机会成为未来 6G 潜在无线空口关键技术之一。其中,RIS 所具 备的超大尺寸、无源异常调控、低成本、低功耗和简单易部署等诸多特性,有机会在未来 6G 网络中构建泛在的近场无线传播环境,并带来全新的网络范式。

近场传播特性为未来 6G 网络带来更多可能性,但基于传统有源相控阵天线构建近场传播环境也面临着诸多挑战:

(1)超大尺寸有源相控阵天线(Active Phased Array Antenna, APAA)在硬件成本、复杂度、功耗、重量与体积等方面均有较大提升,很难实现密集部署,可提供的近场覆盖区域受限;

(2)近场距离在 APAA 阵面的近轴附近达到最大,会随着离轴角度的增大而逐渐减小, 该现象进一步限制了近场的覆盖范围;

(3)不同于通信业务受益于非视距(Non Light of Sight, NLoS)多径环境,感知定位 和无线传能业务理想的传播环境为近场 LoS 信道。仅采用集中部署的传统 APAA,与目标之 间很大概率为 NLoS 多径信道。虽然有很多文献研究基于传统有源相控阵天线的无蜂窝或多 点协作(Coordinated Multi-Point, CoMP)技术,这类分布式天线技术虽然可以一定程度缓 解上述集中部署的 APAA 问题,但依然受限于有源相控阵天线的固有技术特点的约束,很 难实现密集泛在部署。

RIS 独有的技术特征可以作为解决传统 APAA 挑战的有效手段。首先, RIS 作为一种可 编程二维电磁超表面,以无源方式对电磁波进行异常调控,具有低成本、低功耗的特点,并 且可以很容易制作成较大尺寸的天线孔径,从而可以以较低的成本实现密集部署。其次, RIS 类型多样,可以灵活地适应复杂多样的部署环境。从功能角度,RIS 类型可以包括信道 调控型(如反射型 RIS、透射型 RIS 和半透半反 RIS)、信息调制型 RIS (如基于 RIS 新型 基站、基于 RIS 的背向散射发射机、基于 RIS 的伴生通信等)和基于 RIS 的新型相控阵天 线等。RIS 可以很容易制作为不同的尺寸大小、不同的形状及不同的曲面形态等,从而适配 不同的部署需求。最后,RIS 简单易部署的特点也很容易构建近场视距(Light of Sight, LoS) 环境,从而更好地支持感知定位与无线传能业务的需求。另外,由于 RIS 为无源调控,天 然具有较低的电磁辐射水平,在泛在近场环境中依然可以满足人体电磁辐射安全指标比吸收

率。

相对传统有源相控阵天线, RIS 具备无源调控、低成本、简单易部署的特点,可以被泛 在密集部署,从而有机会为未来 6G 网络构建泛在近场信道环境。

RIS 的引入构建了级联信道,相对于传统网络,未来 6G 网络的无线传播环境将会更加 复杂多样。从近场传播环境角度, RIS 构建的典型近场模式如表格 3 所示。

类型	近场特性
信道侧RIS	扩展近场覆盖区域、克服近场覆盖空洞、构建新的LoS近场
基于RIS新型天线	低成本、低复杂度实现超大孔径相控阵天线,提升近场覆盖距离
信息调制类RIS	为低速率IoT设备通信构建发射机近场环境
反射式RIS	在信号电磁波入射的RIS正面(0,π)角度范围内构建近场传播环境
透射式RIS	在信号电磁波入射的RIS反面 (π,2π)角度范围内构建近场传播环境
半透半反式RIS	[0,2π)角度范围内构建近场传播环境
无源RIS	对入射电磁波信号执行近场波束聚焦,信号强度受限
右酒DIC	对入射电磁波信号执行近场波束聚焦,并进行信号放大。可以克服
	无源RIS信号强度受限问题,但复杂度稍高
单 RIS 级联信道	NB-RIS 之间的信道:近场/远场
(NB-RIS-UE)	RIS-UE 之间的信道:近场/远场
多 RIS 级联信道	RIS-RIS 之间的信道:近场/远场
(NB-RIS-RIS-UE)	NB-RIS 之间的信道:近场/远场
	RIS-UE 之间的信道:近场/远场
(RIS 级联信道)+	NB-UE 直达信道:近场/远场
(NB与UE直达信道)	RIS-RIS 之间的信道:近场/远场
	NB-RIS 之间的信道:近场/远场
	RIS-UE 之间的信道:近场/远场

表格 3 近场 RIS 类型



图 17 RIS 网络中的近/远场组合关系

3 RIS 部署与组网工程化设计

RIS 的引入将为未来无线网络带来一种前所未有的网络范式,然而,它同时也增加了无 线网络的复杂性,给网络部署带来了众多挑战。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,此两类场景 对 RIS 网络部署原则和需求有较大差异。

- 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。

可以预期,中高频段(7GHz-30GHz)将会是未来6G网络的核心频段。在中高频段, 密集部署的RIS可以构建泛在的近场传播环境,给未来6G网络带来全新的网络范式,不过 这一全新范式也会给6G网络部署带来诸多挑战。为克服这些挑战,一方面需要深入分析问 题机理,基于传统通信处理机制寻求解决手段;另外,这类庞大复杂的RIS近场网络,涉 及极为复杂的资源管理和调度,有必要探索采用人工智能大模型工具解决的可能性。

3.1 部署频段研究

中高频段可以提供足够宽的频谱资源,配合 ELAA 与密集 RIS,将可以极大提升网络性能,但中高频段部署的挑战也不容易忽视。由于电磁波传播特性导致的易被阻挡的现象,虽然利用 RIS 是一种关键的解决手段,但对于如何简单低成本的部署依然有很多问题需要深入分析研究。相对于传统有源相控阵天线,RIS 关键的竞争优势之一在于低成本。不过,目前主流的基于 PIN 管的调控机制,而毫米波 PIN 管的高成本成为一个重要约束。设计出低成本、低复杂度的毫米波频段 RIS 是其可以规模商用的关键因素之一。

3.2 部署模式选择

从是否受控于网络的角度, RIS 部署模式可以分为网络控制模式和独立控制模式。表格 4 分析了独立控制模式和网络控制模式性能对比。

类型		优势		挑战
	(1)	支持多网络协同	(1)	网络部署相对复杂
网络控制模式	(2)	支持多用户接入	(2)	需要部署网络控制链路
	(3)	更好满足授权频谱无线网络共存需求	(3)	需要设计测量和控制信令迭代流
			程	
	(1)	无需网络控制链路	(1)	存在多网络干扰协同问题
独立模式	(2)	网络易部署	(2)	可能造成严重干扰
	(3)	适用于非授权频谱低共存需求场景	(3)	无法很好地支持多用户接入

表格 4 独立控制模式和网络控制模性能对比

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 发现: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)。

3.3 RIS 类型与部署位置设计

RIS 泛在部署于复杂多样的实际环境中,且需要较大的尺寸,以构建泛在的近场传播环 境。RIS 形态需要灵活多样以适应复杂多样的部署条件,则多样性部署环境需求与统一标准 的工程化需求产生矛盾。入射角差异、等效天线口径变化等都会导致近场覆盖区域的变化, 这些将会对 RIS 部署位置/角度、RIS 最佳形状、部署密度等带来影响。另外, RIS 泛在部署 也将会给供电、同步和网络控制等带来诸多挑战。多样的 RIS 类型提供了解决泛在部署的 可能。信道调控类包括反射式 RIS、透射式 RIS 和半透半反 RIS,可以灵活增加 LoS 信道, 并扩展近场覆盖区域;基于 RIS 的增强相控阵天线,可以低成本、低复杂度地扩展天线孔 径,更好满足收发端的近场传播条件;基于 RIS 的信息调控,更方便地实现 RIS 与万物互 联(Internet of Everything, IoE)终端之间的近场多址接入。

对于传统远场假设的蜂窝网络部署,主要的优化目标为网络覆盖的信号强度分布,或称链路预算。近场通信的出现增加了 RIS 部署和网络设计的复杂度。RIS 的部署策略在很大程度上影响着信道系数,进而对整个通信系统的性能产生显著的影响。在实施 RIS 部署时,必须考虑到多个因素,包括硬件成本、部署地点的可用性、用户分布以及服务需求等。根据不同的应用场景,需要选择合适形态的 RIS,并进一步优化其部署位置,以实现系统性能的最大化。在近场通信的应用中,部署策略的选择尤为关键,因为需要构建一个既智能又可控的无线传播环境,以满足对高空间分辨率和高精度感知的需求。

伴随天线和材料领域相关技术的进步,诸如有源 RIS,透射反射一体 RIS 等新型 RIS 不

断涌现。这些新型 RIS 扩展 RIS 技术的应用场景,并提升特定应用场景下的通信性能。

现阶段 RIS 技术研究主要基于无源反射的无源 RIS,该类 RIS 所利用的无源反射单元仅 能调整入射信号相位,难以有效解决"发送端-RIS-接收端"双重路径衰落问题,导致反射链 路信号强度弱。在用户间直接链路未被阻挡时,直接链路信号强度是反射链路信号强度的数 千倍,无源 RIS 需要大量反射单元以完全消除同频用户间的干扰和获得较强的性能增益。 尽管无源 RIS 可以增加反射单元数目以增强反射链路,但是这将导致电路、空间以及功耗 成本的大幅提升。同时,随着无源 RIS 尺寸增加,RIS 反射信号将变为近场传播,增加反射 单元数目带来的干扰抑制能力与性能增益将大幅下降。因此,解决 RIS 反射链路双重路径 衰落问题,是大幅提升基于 RIS 的无线通信性能的关键。



(a) 无源 RIS 反射单元
 (b)有源 RIS 反射单元
 图 18 RIS 反射单元电路设计

有源可重构智能表面是通过在传统无源 RIS 设计基础上添加如图 7-1 所示的有源放大电路,以实现电磁信号幅度增强的新一代 RIS。上述有源放大电路可通过隧道二级管或互补金属氧化物半导体等有源器件等器件实现。通过在隧道二极管上添加直流偏置源可使得反射单元的负载阻抗值为负,其反射系数的幅值可大于 1,因此有源 RIS 单元具备反射放大的能力。不同于传统的中继方案需要"接收-放大-转发"的方式进行信号放大转发,有源 RIS 通过反射的方式来对入射射频信号直接进行相位调节与幅度放大,其仍具备 RIS 的部分优势,如实现简便,成本较低。

有源 RIS 可在原有相控为主的无源 RIS 基础上增强 RIS 幅控能力,能有效解决反射链路信号弱问题,有望实现更加灵活强大的信道调整功能,从而显著增强无线通信性能。同时,有源 RIS 因其电磁反射单元具备反射放大的能力,可借助较少的反射单元实现与无源 RIS 相当的无线通信传输增益,使得有源 RIS 在面积与部署成本上具有一定的优势。有源 RIS 减少部署占用面积,使之可应用于物理空间受限的场景。同时,有源 RIS 也为管理与抑制

空间中的强信号干扰提供一种有效手段。

然而,有源器件的存在也使得主动式 RIS 在放大入射信号的同时引入了额外的热噪声, 因此在有源 RIS 辅助的通信系统里还需要考虑放大噪声造成的性能损失以及对其他用户的 干扰问题。同时,有源 RIS 除了传统 RIS 的电路功率消耗外,还需要额外的功率消耗以支 撑每个反射天线单元的反射放大能力。每个反射天线单元此时充当反射放大器,需要添加直 流偏置源使得隧道二极管等具有负阻抗特性的器件工作在负阻抗区域。在实际工程实现中, 这一类反射放大器的功率与其采用的有源器件,阻抗特性,直流功率以及反射输出功率等因 素相关。当入射信号位于线性工作区间时,基于隧道二极管的反射放大器能够实现功率的线 性放大。在上述反射放大器的设计中,由于入射信号在经历从发送机到反射天线单元的信道 衰落后其信号功率并不会很强,因此反射放大器可仅消耗较低的功耗实现高增益的反射放大。 反射信号放大所消耗的能量往往只占反射天线单元整体功率消耗的小部分,因此可用直流偏 置源功耗表示反射放大器整体功率。有源 RIS 虽然需要额外的功率开销,但是其使得每个 反射天线单元都可以在射频层面放大入射信号。相较于以往由复杂并且高功耗的射频链路器 件构成的信号放大设备,有源 RIS 能够在功率开销较小的情况下,实现轻量级的信号放大。

3.4 网络拓扑规划与优化

3.4.1 双 RIS 单元分配优化

在给定固定单元预算的情况下,如何确定每个 RIS 的大小(即单元数),以便在无源 RIS 的平方阶波束形成增益和有源 RIS 的唯一功率放大增益之间进行权衡,仍然是一个令人困 惑的问题。具体来说,当有源 RIS 的尺寸增大而无源 RIS 的尺寸减小时,无源波束形成增 益随之减小,反射型放大器产生的放大噪声得到不可忽略的增加。相反,如果有源 RIS 的 尺寸太小,则放大增益不足。因此,单元分配的研究对于提高联合有源 RIS 和无源 RIS 辅 助物联网的通信速率具有现实意义^[19]。有源 RIS 和无源 RIS 联合辅助无线通信系统的接收 信噪比随反射单元数的立方渐近增加,且无源 RIS 应该比有源 RIS 分配更多的资源。

3.4.2 双 RIS 距离优化

在有源和无源 RIS 联合辅助通信系统,发送端经过三个视距通道上的两个 RIS 与接收 端进行通信。关于该系统的 RIS 部署优化,二维搜索法可以被用于找到最佳的 RIS 的部署

位置使得系统性能最好,然而复杂度比较高。为了得到低复杂度的部署方案,我们假设无源 RIS 固定在发送端或接收端的正上方以最小化路径损耗,并且有源 RIS 可以灵活地放置在发 送端和接收端之间以最大化信道增益。已知无源 RIS 部署在发送端或接收端有利于得到更 好的信噪比,所以我们的假设是合理的。

假设无源 RIS 部署在接收端的正上方,发送端到有源 RIS 的水平距离x_B可以表示为

$$x_{\rm B} = \frac{L\sigma_0^2 P_{\rm B} h_d^2}{\beta \sigma_{\rm r}^2 P_{\rm I} N_{\rm p}^2 + \sigma_0^2 P_{\rm B} h_d^2}$$

其中,L为发送端和接收端之间的水平距离,σ₀²和σ_r²分别为接收端和有源元件引入的放大噪 声,h_d为 RIS 的高度,β为参考路损,P₁为有源 RIS 放大功率预算,N_p为无源元件的个数。 可以见到,发送端到有源 RIS 的水平距离随着发送功率的增加而增大,但是随着放大功率 预算或者放大噪声的增加而减小。当发送功率较大时,有源 RIS 应该部署在靠近接收端的 位置,增强接收端接收到的信号功率。当放大功率预算或者放大噪声较大时,有源 RIS 应 该靠近发送端以抑制噪声。而且,RIS 的部署策略与无源元件个数有关。对于更多的无源元 件,有源 RIS 应该更靠近发送端,使其获得更强的信号,同时使得级联信道的增益减小, 以抑制引用的放大噪声。

假设无源 RIS 部署在发送端的正上方,有源 RIS 到接收端的水平距离xu可以表示为

$$x_{\rm U} = \frac{L\sigma_{\rm r}^2 P_{\rm I} h_d^2}{\beta \sigma_0^2 P_{\rm B} N_{\rm p}^2 + \sigma_{\rm r}^2 P_{\rm I} h_d^2}$$

可以见到,有源 RIS 到接收端的水平距离x_U随着发送功率的增加而减小,但是随着放 大功率预算或者放大噪声的增加而增大。与前一节类似,当发送功率较大时,有源 RIS 应 该部署在靠近接收端的位置。当放大功率预算或者放大噪声较大时,有源 RIS 应该靠近发 送端。与前一节不同的是,对于更多的无源元件,有源 RIS 应该更靠近接收端。这是因为 更多的无源元件可以提供更高的无源波束增益,到达有源 RIS 的信号比较强。有源 RIS 通 过增加放大系数可以减少级联信道的路径损耗,从而进一步增加接收端的信号功率。

3.5 组网策略

3.5.1 RIS 辅助的高低频协同组网架构

为了充分利用频率资源,为用户提供连续稳定的高质量网络服务,未来 6G 网络将有可能与 5G 网络长期共存,并延续 5G 网络架构设计思路,采用高中低频协同组网实现全连接 覆盖。基于 RIS 辅助的高中低频协同组网架构如图 19 所示,优先中频资源,实现 6G 的重 点区域连续覆盖,重耕已有低频资源实现全域连接,利用毫米波、太赫兹等高频资源实现热 点补充,满足高速率、大带宽、低时延等极致连接场景的应用需求,并针对网络中出现的盲 区,采用 RIS 实现低成本覆盖补盲。密集城区中楼宇林立,需要考虑建筑物墙体穿透损耗 的 O2I 覆盖场景较多,导致中频段网络小区半径大多只有 300~400 m,与毫米波视距径拉 远测试距离基本相当,因此,未来密集城区毫米波基站部署具有与中频段基站 1:1 部署的 条件。但是,与中频段电磁波相比,毫米波频段的电磁波具有易受障碍物遮挡、穿透损耗大、 绕射能力差等特性,因此,在高低频协同组网架构中,在毫米波不满足 LoS 传输条件时, 如 O2I 覆盖或非视距传输时,透射式或反射式 RIS 节点的协同部署,可以辅助毫米波网络 实现深度覆盖增强,以低成本、低功耗方式为用户提供连续稳定的高质量网络服务。



图 19 基于 RIS 辅助的高中低频协同组网架构

3.5.2 基站与 RIS 协同组网

RIS 典型应用场景主要是面向毫米波网络和少量中频段网络深度覆盖需求,未来密集城 区毫米波基站如果与中频段基站采用三扇区共址部署,基站与 RIS 协同组网如图 2 所示, 透射式 RIS 主要用于 O2I 覆盖增强场景,基站与反射式 RIS 覆盖参数见表 1,参考辽宁联通 和联通研究院携手中兴通讯完成业界首个动态智能超表面 RIS 2.0 外场验证数据。一个尺寸 为 0.5 m*0.5 m 的中型 RIS,其覆盖面积约占毫米波基站一个扇区的 1/10,一个 A3 大小的 小型 RIS,其覆盖面积大约是毫米波基站一个扇区的 1/100。中型 RIS 覆盖面积相对较大, 适用于室外连片盲区覆盖增强场景,一个扇区内部署的中型 RIS 合理数量范围是 1~2 个。 如果扇区内超过 20%的连片区域存在覆盖盲区,需要联合基站配置和 RIS 部署实现无线网 络优化。目前 RIS 阵面的水平波束角度通常为±60°,与中型 RIS 相比,小型 RIS 的覆盖能 力差异主要体现在径向拉远距离较短,适用于分散的小面积盲区或室内覆盖增强场景。由于 一个扇区与中型 RIS 和小型 RIS 的覆盖面积比例约为 100:10:1,当一个扇区内存在大量 覆盖盲区,部署小型 RIS 超过 10 个时,将有至少 2 个小型 RIS 覆盖区域处于相同的中型 RIS 覆盖区域内,可以认为局部区域存在连片盲区。因此,一个存在覆盖盲区的密集城区,在由 中型 RIS 或小型 RIS 辅助基站协同组网的典型室外场景下, RIS 部署规模不会超过基站规模 一个数量级。依据基站与 RIS 配比分析,未来商用阶段 RIS 设备的期望成本应比基站成本 至少低一个数量级。



图 20 基站与 RIS 协同组网

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

表格 5 基站与反射式 RIS 覆盖参数

4 RIS 与 NCR 对比分析

与 RIS 具有近似功能的网络控制中继器(Network Controller Repeater, NCR) 已于 2023 年在 3GPP R18 范畴内基本完成了核心的标准化工作。NCR 的基本架构如图 21 所示,包括 NCR 终端(Network Controller Repeater Mobile Terminal, NCR-MT)和 NCR 转发(Network Controller Repeater Forwarding, NCR-Fwd)两个功能实体,其中 NCR-MT 用于 NCR 和基站 的信息交互,NCR-Fwd 用于信息转发。整个系统包括三条链路,接入链路(Access-link), 回程链路(Backhaul Link)以及控制链路(C-link)。



图 21 NCR 示意图

与传统直放站相比,NCR 引入了网络侧的控制功能,以实现波束转发,且 NCR 重点关 注高频段的覆盖增强的应用场景,兼顾中低频。NCR 与基于波束赋形的 RIS 在系统参数、 工作模式、控制信令等细节方面存在一定的差异,具体如表格 6 所示。

特征	NCR	RIS
系统架构	两个功能实体,三条链路; 控制链路和回传链路是带内的,共享公共 射频模块	需要通信与控制模块,两条链路; RIS 控制和转发可以分开
硬件器件	天线、射频及数字基带处理器件;收发天 线独立,可实现收发波束灵活独立调整, 实现全双工需要隔离	通信部分:天线、射频及数字基带处理器件; 转发部分:近无源电磁单元、控制器件;自 然具备全双工特性,成本较低
数据处理	仅处理控制链路的数据,不处理转发链路的	り数据
单元数	天线单元较少,不超过基站侧天线单元	单元数更多,波束指向性更高
协议影响	网络侧	网络侧,可能会引入终端侧影响
噪声及干扰	引入额外的热噪声,可能会放大干扰	不引入额外的噪声,可能会放大干扰
信号自激	有	无

表格 6 NCR 与 RIS 对比

在系统架构方面, RIS 与 NCR 类似,也需要具备与网络侧通信的能力,以便接入当前 网络,接收网络侧的控制信息。此外, RIS 需要单独的控制模块以对表面电磁单元的调控, 而这部分不涉及数字基带处理器件,也无需射频链路,可采用低复杂度、低功耗的实现方案。 从通信链路上来看, RIS 仅有两条链路,如图 22 所示,其中 C-link 与 NCR 类似,而转发链 路只有一条,记为 F-link。其主要原因在于 RIS 采用的是反射或透射式转发,因此无法以波 束赋形的方式接收入射电磁波,仅具备出射电磁波的波束调控能力。因此,不同于 NCR 的 B-link 和 A-link 设计, RIS 在转发链路上仅需考虑出射方向的波束赋形。



图 22 RIS 功能架构示意图

在硬件器件方面,NCR 主要由天线、射频及数字基带处理器件构成,其主要功耗产生 在射频和基带。RIS 的通信模块硬件构成与 NCR 相似,但是转发部分与 NCR 不同,主要由 电磁单元和控制器件构成。在功耗方面,通常每个电磁单元的功耗是很低的,以最常用的 PIN 二极管为例,单个功耗在 mW 级别,而如果采用变容二极管,则功耗更低,在μW 级别。 因此 RIS 电磁表面的功耗不高,主要功耗集中在控制器件上,可达十数瓦[15],这是由于目 前通常采用基于 FPGA 的控制方式,随着产业化发展,后续如采用专用芯片实现电磁单元 状态的控制,其功耗将大幅降低。

在数据处理方面, RIS 和 NCR 均对转发链路的数据进行透传, 仅需处理 C-link 的控制 信息。而控制链路对可靠性的要求较高, 对数据速率一般没有很高的要求。对 RIS 而言, 这意味着其通信模块的功能不需要特别强大, 可能无需支持高阶调制阶数, 也无需支持大带 宽, 可以尽可能的降低硬件成本和复杂度。

在波束调控能力方面,目前协议规定 NCR 支持的最大波束数目为 64,但这并不意味着 NCR 最大只支持 64 个物理波束,只是在波束指示时最多采用 64 个波束索引。对于 RIS 来 说,其表面的电磁单元数量巨大,可达数百、甚至数千级别,而 NCR 采用的天线数量很难 达到这个量级。因此,RIS 的波束精度会更高,可以支持更多样的转发波束图样。但是考虑 到控制信令开销以及网络侧调度的复杂度,最终在进行波束指示时,很可能会像 NCR 一样 对最大波束索引数量进行限制,大概率也会限制到 64 个波束索引。

在标准化协议影响方面,NCR 的协议影响仅在网络侧,对于用户侧是透明的。也就意味着现网用户不需要设备升级便可以直接受益于 NCR 的部署,这对于市场规模化应用是有利的。从协议影响上,RIS 应与 NCR 一致,即仅存在网络侧影响,而对用户侧透明。当然,RIS 在后续演进中可能会引入用户侧的协议影响,但是在此之前需要对其性价比进行充分的论证^[20]。

在噪声及干扰方面,由于 NCR 本质上还是采用放大转发的方式,会引入额外的热噪声, 而 RIS 采用反射或透射的转发模式,不会引入额外噪声。但是他们都可能会带来一些额外 的干扰,这主要是由于其透传特性。NCR 和 RIS 都不需要知道转发数据的具体频域信息, 因此会对工作频段范围内的所有信号进行波束转发。为了抑制干扰,NCR 引入了开关控制

机制,仅在需要其转发信息的时间段内开启。借鉴 NCR 经验,RIS 也可以引入开关控制机制,在节能的同时实现一定程度的干扰抑制。

通过系统级仿真,评估 RIS 和 NCR 辅助通信系统在 FR1 和 FR2 频段的性能。对于 FR1 频段,考虑 2.6GHz 载频,仿真假设 NCR 只放大信号而不采用波束赋形,RIS 采用反射波束 赋形。从图 23 中可以看出,在某些配置下,NCR 的参考信号接收功率(Reference Signal Receiving Power, RSRP)性能会优于 RIS。但是,RIS 的信干噪比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)性能优于 NCR。这是因为 NCR 不仅放大了信号功率,还放大了噪声和 干扰。如果考虑 NCR 的自激问题,其性能会进一步恶化。



图 23 Sub 6GHz NCR 与 RIS 的 RSRP 和 SINR 累积分布曲线对比

对于 FR2 频段,考虑 26GHz 载频,仿真假设 NCR 采用波束扫描, RIS 考虑针对用户的 波束赋形方案。如图 24 所示,2500 个阵子的 RIS 的性能优于 30dB 增益的 NCR。



图 24 毫米波频段 RSRP 和 SINR 累积分布曲线

缩略语列表

缩略语	英文全名	中文
АР	Access Point	接入点
APAA	Active Phased Array Antenna	有源相控阵天线
CoMP	Coordinated Multiple Point	多点协作
ELAA	Extremely Large Aperture Array	超大孔径阵列
eVTOL	electric Vertical Take-off and Landing	电动垂直起降飞行器
FPGA	Field Programmable Gate Array	现场可编程门阵列
IoE	Internet of Everything	万物互联
LoS	Light of Sight	视距
MU-MIMO	Multi User Multiple Input Multiple Output	多用户多输入多输出
NCR	Network Controlled Repeater	网络控制直放站
NCR-Fwd	Network Controller Repeater Forwarding	NCR转发
NCR-MT	Network Controller Repeater Mobile Terminal	NCR终端
NFC	Near Field Communications	近场通信
NLoS	Non Light of Sight	非视距
PLS	Physical Layer Security	物理层安全
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface	智能超表面
RSRP	Reference Signal Receiving Power	参考信号接收功率
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio	信干噪比
SU-MIMO	Single User Multiple Input Multiple Output	单用户多输入多输出
TDD	Time Division Duplex	时分双工
UAVs	Unmanned Aerial Vihicles	无人机

参考文献

[1] LI. N, Zhu J, Guo J, et al. Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface-Aided Wireless Communication: Potential Schemes, Standard Impact and Practical Challenges[C]. 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops), Sanshui, Foshan, China, 2022, pp. 211-215.

[2] Mu X, Liu Y, Guo L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 21(5): 3083-3098.

[3] 赵亚军. 基于智能超表面的 6G 近场网络构建[J]. 移动通信, 2024, 48(4): 2-11.

[4] RIS 任务组,智能超表面典型应用、挑战与关键技术[R]. IMT2030, 2023.12.

[5] GSMA. The 6 GHz Ecosystem: Demand Drives Scale[R]. 2022.

[6] 3GPP. RP-234018, Channel Modelling Enhancements for 7-24 GHz[R]. 3GPP TSG RAN Meeting #102, Edinburgh, UK, 11th-15th December, 2023.

[7] Y. J. Zhao, L. L. Dai, J. H. Zhang, et al. "6G Near-field Technologies White Paper," FuTURE Forum, Nanjing, China, Apr 2024. doi: 10.12142/FuTURE.202404002.

[8] Cheng Z, Li N, Zhu J, et al. RIS-Assisted Secure Communications: Low-Complexity Beamforming Design[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2023.

[9] Cui, T., Qi, M., Wan, X. et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. Light Sci Appl 3, e218 (2014). https://doi.org/10.1038/lsa.2014.99

[10] L. Dai et al., "Reconfigurable Intelligent Surface-Based Wireless Communications: Antenna Design, Prototyping, and Experimental Results," in IEEE Access, vol. 8, pp. 45913-45923, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977772.

 [11] V. Arun and H. Balakrishnan, "RFocus: Beamforming using thousands of passive antennas," in Proc. 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'20), Feb. 2020, pp. 1047-1061.

[12] 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.

[13] TANG W, CHEN X, CHEN M Z, et al. On channel reciprocity in reconfigurable intelligent surface assisted wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 94–101. DOI:10.1109/MWC.001.2100136. [14] Yue S, Zeng S, Zhang H, et al. Intelligent omni-surfaces aided wireless communications:
Does the reciprocity hold? [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(6):
8181–8185. DOI: 10.1109/TVT.2023.3242283.

[15] MA Q, CHEN L, JING H B, et al. Controllable and programmable nonreciprocity based on detachable digital coding metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(24): 1901285. DOI:10.1002/adom.201901285.

[16] Ji R, Huang C, Chen X, et al. Electromagnetic Hybrid Beamforming for Holographic Communications[J]. arXiv preprint arXiv:2403.05970, 2024.

[17] M. Cui, L. Dai, Z. Wang, S. Zhou, and N. Ge, "Near-field rainbow: Wideband beam training for XL-MIMO," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 22, no. 6, pp. 3899-3912, Jun. 2023.

[18] Huang, C., Chen, W., & Wu, Q. (2024). Joint Active And Passive RIS Aided Wireless Communication: Elements Allocation and Achievable Rate. arXiv preprint arXiv:2404.06880.

[19] Chen G, Wu Q, Wu C, Jian M, Chen Y, Chen W. Static RIS meets distributed MIMO: A new architecture for dynamic beamforming. IEEE Wireless Communications Letters. 2023 Jul 19.

[20] 李南希,朱剑驰,程振桥. 可重构智能表面潜在标准化工作分析[J]. 移动通信, 2023,47(11): 2-7.



AND DECEMBER OF