

智能超表面技术展望与思考



Reflections on Reconfigurable Intelligent Surface Technology

马红兵/MA Hongbing¹, 张平/ZHANG Ping²,
杨帆/YANG Fan³, 王欣晖/WANG Xinhui⁴,
张建华/ZHANG Jianhua², 刘秋妍/LIU Qiuyan¹

(1. 中国联合网络通信集团有限公司, 中国 北京 100032;
2. 北京邮电大学, 中国 北京 100876;
3. 清华大学, 中国 北京 100084;
4. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(1. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100032, China;
2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
3. Tsinghua University, Beijing 100084, China;
4. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202203012

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220511.1119.002.html>

网络出版日期: 2022-05-11

收稿日期: 2022-05-06

摘要: 智能超表面 (RIS) 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, RIS 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, 因此具有广阔的技术与产业前景。认为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面临的诸多问题与挑战。

关键词: 5G-Advanced; 6G; RIS

Abstract: Reconfigurable intelligent surface (RIS) is a technology with low cost, low energy consumption, programmable, and easy deployment characteristics, which can reconstruct wireless environment dynamically. Hence, RIS is viewed as a potential key technology to break through the restriction of traditional wireless communication and bring a brand-new paradigm to the wireless network in the future. Now, it is necessary to clarify the problems and challenges in the theoretical model, application technology, engineering research, and standardization of RIS implementation in the current and future.

Keywords: 5G-Advanced; 6G; RIS

1 研究背景

随着无线网络容量需求的持续快速增长, 未来十多年, 无处不在的无线连接将会成为现实, “通信-感知-计算”一体化的网络也将可能实现, 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无线网络面临的关键问题^[1]。

一直以来, 随心所欲地调控电磁波是人们不断追寻的梦想。麦克斯韦方程组的出现使得人们对电磁波的掌控能力有了飞速提升, 但受限于材料相对固定的电磁参数, 人们对电磁波的控制力仅局限于发射机和接收机。近年来, 智能超表面 (RIS) 能够灵活操控信道环境中的电磁特性, 一出现就吸引了业界的广泛关注。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, RIS 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, 形成相位、幅度、极化和频率可控制的电磁场。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, 可用于解决未来无线网络面临的问题。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 (SRE)^[2]。

从 2020 年开始, 中国学术界与产业界联合, 开展了一系列 RIS 产业推进活动, 极大地促进了 RIS 的技术研究与工程化进程。2020 年 6 月, 国际移动通信 (IMT)-2030 推进组无线技术组成立了 “RIS 任务组”。同年 9 月, 中国通信标准化协会 (CCSA) TC5-WG6 成立 “RIS 研究项目”。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》。2021 年 9 月 24 日, “第一届智能超表面技术论坛”¹ 大会召开, 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 (RISTA)² 暨第一届

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1806700)

1. 智能超表面技术论坛, <http://www.risforum.com>

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

会员大会在北京召开,这标志着智能超表面技术联盟正式成立^[4]。

目前,中国在RIS的材料工艺、理论研究、实现算法及工程试验等方面做出了重大贡献。作为未来通信关键技术领域中一个极具潜力的方向,RIS有机会在5G-Advanced网络中提前落地,并可能在未来6G网络中使能智能无线环境,进而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吞吐量和覆盖性能。

作为一种动态电磁参数调控技术,RIS在多个领域已经初步展示了其强大的性能。但是,在规模商用前,RIS仍在技术研究、工程应用、网络部署和标准化等方面面临诸多问题与挑战。本文中,我们将从背景、基础和关键技术、典型应用场景以及趋势与挑战等方面对RIS进行探讨。

2 RIS的理论和技術

RIS是一种多学科融合技术。在RIS概念诞生前,超材料相关基础理论已发展了半个多世纪,这为RIS理论体系的建立奠定了坚实基础。在关键技术方面,与RIS相关的相控阵、可编程逻辑门等技术均有了应用案例。RIS的概念在最近10年才被提出,并被视为一种潜在的6G关键技术,已有的理论与技术基础支撑了其研究的快速发展。

2.1 基础理论

从广义上来说,RIS是超材料(也称为电磁超材料)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动态可调超表面。RIS一般被认为属于动态可调超表面。当然,业界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”的名称为人所知的。1967年,V. VESELAGO教授发表了一篇俄语论文。1968年,这篇文章被翻译成英文后发表^[11]。该文首次提出了“左手材料”的概念,即介电常数 ϵ 和磁导率 μ 均为负的材料,并系统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,J. B. PENDRY爵士实现并验证了负介电常数^[12],并于1999年提出了用周期排布来验证负磁导率^[13]。而最早的人工电磁表面(即超表面)的研究为1999年D. F. SIEVENPIPER教授提出的蘑菇型结构高阻抗表面(HIS)^[14]。

传统等效媒质参数(介电常数和磁导率)可用来描述三维超材料的电磁特性,但不再适用于分析二维超表面^[15]。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年由F. CAPASSO教授团队提出的广义斯涅耳定律^[16]。广义斯涅耳定律可以很好地刻画电磁超表面物理特性,如公式(1)和(2)所示:

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

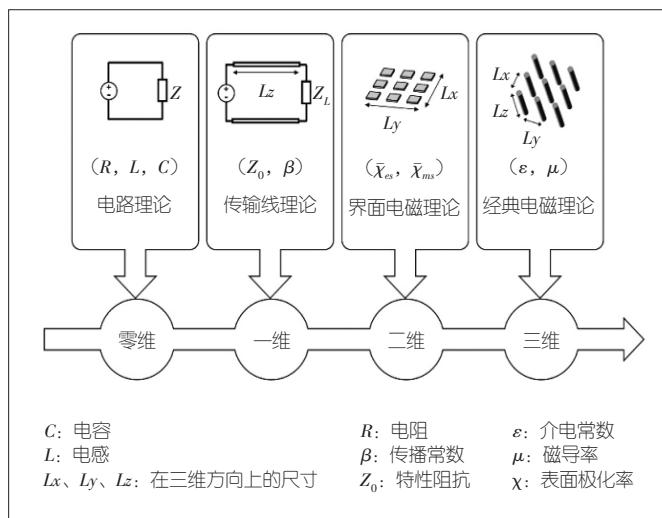
$$\sin \theta_i - \sin \theta_t = \frac{\lambda_0 d \varphi}{2 \pi n_i dx}, \quad (2)$$

其中,公式(1)是广义斯涅耳折射定律,公式(2)是广义斯涅耳反射定律, 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。

也有学者提出,采用建立在著名的麦克斯韦方程组上的现代电磁学对超表面的二维结构特性进行分析,如图1所示。2016年,杨帆教授及其课题组首次提出了“界面电磁学”的概念,以分析超表面电磁特性^[17]。界面电磁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,指导各种电磁表面的设计与优化。

早期的超表面在其物理结构固定后,功能和性能也随之确定。因其不支持按需动态调节,使用的灵活性受限。之后出现的可调超表面成为了研究的主流。在超表面上集成有源元件(如开关二极管、变容二极管等)或可调节材料(如液晶、石墨烯等),通过改变外部激励,固定物理结构的超表面可以呈现动态可调或可重构的电磁特性。

初期的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出发的,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



▲图1 电磁学问题在空间域上的分类方法^[18]

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^[19]，这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。这样可以更好地利用人工智能（AI）算法进行智能调控^[20]。2017年，崔铁军教授团队发表论文归纳、总结了已有研究，提出了“信息超材料/超表面”的概念体系^[21]。

除了上述对 RIS 自身物理特性分析的理论外，在 RIS 用于信息通信领域时，我们需要从信息科学的角度进行分析。2020年，崔铁军院士团队从信息论角度，建立码本几何信息熵 I_1 与远场散射方向图的物理信息熵 I_2 之间的关系^[22]：

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

2008年，F. K. GRUBER 教授首先提出了电磁信息论（EIT）概念，用于分析大规模多输入多输出（MIMO）系统的性能^[23]。2021年，清华大学戴凌龙教授团队提出采用 EIT 理论来揭示基于 RIS 的无线通信系统容量的基本物理极限。文中指出，EIT 可以建立一个新的分析框架，用于推导通信系统的自由度（DoF）、信道容量和其他重要性能要求^[24]。

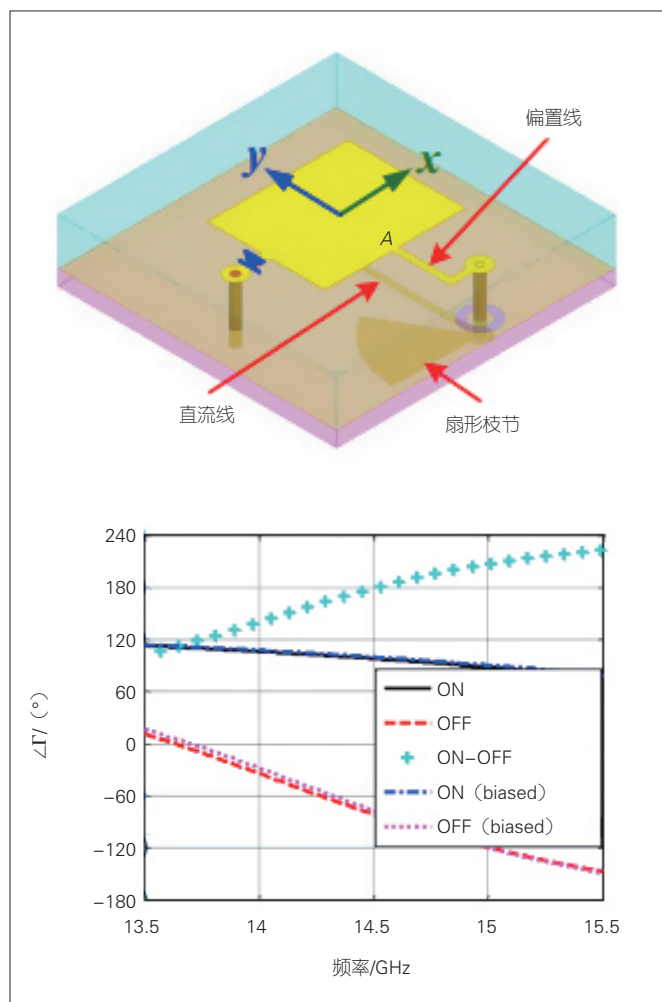
2.2 关键技术

2.2.1 硬件结构与调控

无论是用于新型的无线收发机，还是用于无线传输的中继节点，RIS 硬件架构都包含三大部分：可重构电磁表面、馈电系统和控制系统。可重构电磁表面是系统中对空间波进行调控的主体，其结构为周期或准周期排布的表面单元组成的阵列。控制系统通过对可重构电磁表面非线性器件配置低频控制信号，可改变局部单元的电磁特性，以实现来自馈电系统的高频信号进行动态调控。

（1）可重构电磁表面结构设计

可重构电磁表面设计是 RIS 技术的初衷和核心，需要根据实际的应用需求来确定单元设计目标，然后对单元主体、偏置线路等进行优化设计。首先，需要在电磁仿真软件中建立合适的主体模型，设置周期边界条件、Floquet 端口激励、非线性元件的等效 RLC 模型等；随后，选择合适的单元几何结构进行设计优化，使得在所需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 0 dB，反射相位差为 180°等^[25]；最后，还需要考虑用于连接控制系统的偏置线等结构，并验证其对单元性能的影响。1-bit 数字相控单元及其反射相位示意如图 2 所示。



▲图 2 1 bit 数字相控单元及其反射相位^[25]

（2）控制系统设计

控制系统的控制方式主要包括机械控制、模拟信号控制、数字信号控制 3 类。机械控制由于其响应速度较慢，目前已较少采用；在模拟信号控制中，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；在数字信号控制中，控制模块产生不同的电平，控制 PIN 二极管（P-I-N 结构的二极管）等开关器件产生不同的响应。其中，数字信号控制根据可控状态数目，可分为 1 bit、2 bit 或更多 bit 状态的控制，不过更多控制位数会导致表面结构复杂度急剧增加，设计和实现更为困难。

控制系统软件设计的核心是控制码表设计，即根据电磁波束方向设计可重构电磁表面单元相位分布。目前控制码表的提取有两种方式：一种是离线查表模式，预先计算出各个方向码表并存储，使用时根据上位机的指令按地址提取对应的码表并完成赋值；另一种则是在线计算模式，将码表计算程序植入处理单元，由处理单元完成码表的计算。

2.2.2 基带算法

(1) 信道建模

在传输信号模型中,信道响应矩阵是极为重要的部分。作为一种将环境转变为智能可重构电磁空间的潜在技术,RIS为其辅助传输的系统建立准确而高效的无线信道模型是保证无线通信系统及相关技术评估合理性的基础。当前主流的信道建模方法包括基于几何的统计性建模和基于射线追踪的确定性建模方法两类。统计性建模方法通过专用测量设备采集某一真实场景下的信道数据,并通过大、小尺度参数对信道数据中隐藏的特性进行统计描述。2021年,崔铁军院士团队对RIS辅助无线通信的自由空间路径损耗进行建模^[26]。

$$P_r = P_t G_t G_r G_d d_s \lambda^2 / (64\pi^3) *$$

$$\left| \sum_{m=1}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} \frac{\sqrt{F_{n,m}^{\text{combine}} \Gamma_{n,m}}}{r_{n,m}^t r_{n,m}^r} e^{-j2\pi(r_{n,m}^t + r_{n,m}^r)} \right|^2 \quad (4)$$

基于几何光学与一致性绕射理论,射线追踪方法对发射机-接收机、发射机-RIS、RIS-接收机链路之间的多径射线(传播路径)进行精确计算,从而确定多径射线的离开角、到达角、时延、功率等信道参数。

(2) 信道估计

相对于传统MIMO系统,RIS使能的无线系统特性给信道估计带来新的挑战。首先,典型RIS一般采用全被动元素,并不具备复杂的信号处理能力,这使得信道状态信息(CSI)的估计存在困难。设计具有部分主动元素的RIS可以自主估计CSI,但需要权衡信道估计与复杂度及成本的需求^[27]。其次,RIS超大规模天线阵子带来了高维信道估计的复杂度问题。此外,引入RIS后带来的分段信道特性,也给RIS的信道估计带来新的问题。

一方面,可以利用信道的双时间尺度特性进行分段信道估计,即用户设备(UE)的低维移动信道估计频繁,而高维准静态的基站(BS)-RIS信道仅需要信道统计信息,不需要频繁的信道估计,从而降低了总体导频开销^[28]。另一方面,可以通过RIS电磁单元优化分组来降低估计高维RIS信道^[29]和多用户信道的复杂度^[30]。高频段场景可以利用RIS信道矩阵低秩特性,构造联合稀疏矩阵并设计矩阵填充问题来实现级联信道估计^[31],还可以利用多用户信道在角度域的稀疏性来降低导频开销^[32]。可将RIS面板划分为不同的子块,每个子块在不同的时隙采用不同调控系数矩阵,依次估计出待估计信道^[33]。通感一体化技术的发展使利用感知信息辅助

RIS信道估计成为可能^[34]。另外,考虑到工程化应用的复杂度,基于码本的信道估计是一种典型的低复杂度信道估计方法,但RIS信道分段特性和近场特性会给传统码本方案带来挑战^[35]。

(3) 波束赋形

RIS引入的级联信道和超大规模天线阵子的特点使得系统的波束赋形设计变得更加复杂。RIS借鉴Massive MIMO混合波束赋形的模型架构。从系统模型的角度看,RIS可以视为一个外部模拟波束预编码单元,对相应的相移矩阵进行设计。也就是说,RIS对来自发射机的信号采用模拟波束赋形进行电磁波反射调控。

相对于传统波束赋, RIS的波束赋形有一些新的特征:

- 超大规模RIS电磁单元个数,使得设计波束赋形的电磁调控参数有较高的复杂度。信道降维与电磁单元分组是平衡波束赋形性能和复杂度的有效方法。
- RIS传播信道具有分段特性,需要联合优化设计基站的有源波束和RIS的无源波束。

- 超大天线孔径带来传播信道的近场特性。

现有的波束训练设计依赖于基于远场信道模型设计的远场码本。然而,由于RIS超大天线孔径特点,用户更可能处于RIS的近场区域。文献[35]设计与近场信道模型相匹配的近场码本,并提出了有效的近场波束训练方案。

2.2.3 组网设计

从通信环境复杂度和RIS部署及调控复杂度的角度考虑,我们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着较大差异。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。对于大范围复杂环境,RIS主要对已有或新引入的主要传播路径/主散射体进行调控,半动态或静态地调控无线信道的大尺度特性,所需的RIS形态简单易部署,且成本较低。

无线网络引入RIS也会带来新的网络共存方面的挑战。文献[36]分析了RIS网络的共存问题,并提出了可能的解决思路。在实际网络中,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。通过调控电磁波的幅度、相位、极化方式等,RIS可以增强“目标信号”,同时也对“非目标信号”进行非预期的异常调控。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,这将导致严重的网络共存问题。文献提出了带有带通滤波层的多层RIS结构和RIS分块机制两种解决方案。另外,

此网络共存问题也表明,规模部署的 RIS 需要受控于网络,以约束其对无线环境中“非目标信号”随意的非预期异常调控行为,避免导致的严重网络性能恶化。

2.3 原型验证

(1) 内场测试

2018—2021 年,美国普林斯顿大学、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^[37]和 ScatterMIMO^[38]智能超表面原型系统;欧洲研究机构也成立了智能超表面研发领域的 VisorSurf 和 ARIADNE 项目,通过上百次撒点测试,验证了智能超表面在室内场景中的波束赋形、覆盖增强和多流增速的能力。

中国智能超表面原型系统研发也与其他国家基本保持同步。东南大学团队搭建了智能超表面单输入单输出二进制频移键控(SISO BFSK)/正交相移键控(QPSK)/八进制相移键控(8PSK)/16QAM(包含了 16 种符号的正交振幅调制)/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/28 GHz 频段 64/100/256/1 024/2 304/4 096 阵元等系列原型系统^[39-40];香港中文大学(深圳)、华中科技大学、西安电子科技大学等诸多团队均开展了智能超表面原型系统研发创新,并与各大设备厂商开展系统联调和内场典型场景下的测试,持续验证智能超表面在覆盖补盲和多流增速等方面的性能增益。

(2) 外场测试

NTT DoCoMo 在 2018 年首次开展 28 GHz 智能超表面外场测试,验证智能超表面毫米波覆盖补盲能力;2020 年,首次开展了毫米波频段透明动态超表面验证测试;2021 年,进一步使用超表面透镜验证室外到室内的覆盖增强能力。2022 年,韩国 LG 公司针对 3.5 GHz 和 28 GHz 频段开展智能超表面外场测试验证。

中国三大运营商也都已开启智能超表面外场测试验证工作。2021 年下半年,中国联通^[8]、中国移动^[6]、中国电信^[7]分别针对 3.5 GHz、2.6 GHz 频段和毫米波频段开展智能超表面技术 5G 外场测试,验证了智能超表面系统可切实提升 5G 网络深度覆盖和扩容提速的能力。近期,北京邮电大学针对工业场景开展智能超表面环境适变理论和信道快速重构方法研究,以保障工厂在复杂电磁环境下的平稳高效运行。

3 RIS 技术典型场景

近年来,学术界和产业界依据 RIS 技术的特性,分析了其典型的应用场景。本文在前期研究的基础上,进一步根据 RIS 技术的发展阶段以及 5G-Advanced 和 6G 网络的趋势,分

析了 RIS 在 5G-Advanced 和 6G 网络中的典型场景。

3.1 5G-A 阶段典型场景

在 5G-Advanced 阶段,在移动通信网络的典型场景中,RIS 将侧重支持 Sub6GHz 和毫米波频段传统通信场景的覆盖或速率增强。

(1) 覆盖补盲

传统的蜂窝部署可能会覆盖空洞区域,而 RIS 可部署在基站与信号盲区之间,通过有效地反射/透射传输信号,以增强信号盲区用户的信号质量,保证空洞区域用户的覆盖。

(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,从而提高信号传输的复用增益。尤其在视距传输场景中,引入基于 RIS 的可控信道,收发天线阵列间信道的空间相关特性将会得到很大改善,可用于数据传输的子空间数目将会增加,这极大地提升了系统的传输性能。

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。在收发端之间增加 RIS 设备,使小区边缘用户按需利用终端多天线能力,极大提升传输性能。

3.2 6G 阶段典型场景

(1) RIS 支持高频通信

高频毫米波和太赫兹是 5G-Advanced 和 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,小区半径较小,受障碍物遮挡、雨雪天气、环境吸收等影响大。依据 3GPP 38.901(第 3 代合作伙伴计划中的协议),在同等条件下,28 GHz 毫米波信号的路径传输损耗比 3.5 GHz 信号的路径损耗增大约 18 dB;在穿透损耗方面,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,如表 1 所示,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 10 dB 以上,这导致覆盖范围内的大部分区域通信质量从良好变得非常差。因此,高频通信必将面临覆盖半径小、盲区多、部署运维成本高的严峻形势。

在基站和终端用户之间部署智能超表面设备,能够在视距通信不可达或信号质量较差的盲区或小区边缘,按需动态建立非视距链路,从而提升网络深度覆盖质量,减少覆盖盲区。未来,随着超材料天线的应用推广,智能超表面设备形态将更加丰富多样,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基站提供有效的补充和延伸。

▼表1 高频信号穿透损耗 3GPP的理论值及实测值

材料	3GPP 高频信号穿透损耗模型	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	$L_{\text{混凝土}}=5+4f$	125~1 205	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

f:频率 L:路径损耗

(2) RIS使能轨道角动量 (OAM)

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,因此成为6G潜在的关键技术之一。OAM 涡旋电磁场的生成方式有很多种,其中一种典型的便是基于智能超表面的涡旋电磁场的生成方法。通过反射型和投射型智能超表面,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。

(3) RIS使能通信感知一体化

未来移动通信系统正朝着更加智能化和软件化的方向发展,有望通过融合环境感知技术、用户定位功能和智能无线环境新范式,进一步拓展其网络能力和应用场景。在智能超表面辅助的无线通信系统中,利用智能超表面的空时调制能力,不仅可以在非视距环境中建立虚拟视距链路,通过优化智能超表面的反射系数矩阵提高通信链路质量,按需动态提供波束赋形增益,而且可以在同等条件下使系统具备较大天线孔径的优势和较高的定位精度,实现高精度感知定位能力。

4 RIS 技术挑战与趋势

RIS 技术的挑战与趋势主要涉及理论模型、应用技术、工程化研究等方面。

对 RIS 理论模型的刻画,虽然已有一些积累(参见 2.1 节),但后续还需在电磁调控物理机理、电磁信息学、信道模型等方面进一步深入探索,以尽快构建完善的理论体系。另外,RIS 是材料科学(主要指超材料)、电磁学、信息与电子学、通信工程等多学科交叉融合的技术,需要多学科协同推进。

在应用技术研究方面,已有的研究主要为了解决传统无线通信中的经典问题,例如信道估计、波束赋形和信息调制等,而在基于 RIS 的通感一体化、AI 使能 RIS^[41]和基于 RIS 的安全通信等新颖的应用领域研究投入不足,相关的研究成

果较少。另外,已有的研究大多基于一些简单的系统模型,提供的机制一般仅适用于较为理想的场景。因此,后续研究需要关注 RIS 的全新应用领域,并考虑更为复杂的模型。

在工程化研究方面,虽然已有一些 RIS 样机的简单测试,且在特定场景中展示出了一些性能增益,但距离真正的工程化应用依然有很远的距离。

(1) RIS 标准化。3GPP 5G-A Rel-18 立项了 Smart-Repeater, 这为 RIS 在 Rel-19 中的标准化立项,以及其基于 5G 网路的标准化工作打下良好的基础。与 5G-A 的标准化不同,在 RIS 的 6G 标准化工作中,6G 标准预计将是全新的标准协议。因此,未来 RIS 标准化工作将不用考虑与传统系统兼容性,且届时 RIS 技术研究也更加成熟。

(2) RIS 网络部署。从 RIS 工程应用的落地角度来看,可以采用 3 阶段的网络部署方式:阶段 1,在 5G 现网中少量部署非标准化静态 RIS 面板,用于解决覆盖空洞问题,尤其是高频覆盖问题;阶段 2,基于 5G-A 标准化机制部署半动态可调的 RIS,用于优化网络的连续覆盖;阶段 3,未来无线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。

5 结束语

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。未来移动通信网络将面临频谱资源紧缺、芯片集成度要求较高、无线信道不可控、设备能耗较大等一系列挑战。智能超表面具有低成本、低能耗、可编程、易部署等特点,构建智能可控无线环境将会给未来无线网络带来一种全新的范式,并有机会成为基础原始创新取得突破的领域,同时引领全球产业链的成熟和发展。

致谢

感谢中国联合网络通信有限公司研究院无线技术研究中

心李福昌总监、张忠皓博士和中兴通讯股份有限公司无线研究院算法部赵亚军总工对本文的指导和支撑。感谢智能超表面技术联盟(RISTA)提供了良好的技术研究与合作平台。

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. DOI: 10.1109/mwc.001.1900488
- [2] RENZO D M, ZAPPONE A, DEBBIAH 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. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007211
- [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 [EB/OL]. (2021-09-26)[2022-04-20]. <https://www.mscbsc.com/info/Nw5111e>
- [4] 智能超表面技术联盟在京成立 [EB/OL]. (2022-04-08)[2022-04-20]. <http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/202204/78120a63e7e04bb4b6a0053367a83b1f.shtml>
- [5] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 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 [EB/OL]. (2021-07-09)[2022-04-22]. <https://www.c114.com.cn/news/118/a1168348.html>
- [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 [EB/OL]. (2021-07-08)[2022-04-22]. <https://www.c114.com.cn/news/127/a1167281.html>
- [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 [EB/OL]. (2021-07-07)[2022-04-20]. <https://www.c114.com.cn/news/127/a1167167.html>
- [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 [EB/OL]. (2021-08-12)[2022-04-20]. <http://www.sribd.cn/article/361/>
- [10] 5G evolution and 6G: HAPS, metasurface lens and pinching antenna [EB/OL]. [2022-04-20]. https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media_center/event/mwv21/contents/exhibits06/
- [11] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet physics uspekhi, 1968, 10(4): 509–514. DOI: 10.1070/pu1968v010n04abeh003699
- [12] 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. DOI: 10.1103/PhysRevLett.76.4773
- [13] 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. DOI: 10.1109/22.798002
- [14] SIEVENPIPER D F, ZHANG L X, BROAS R, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with forbidden bands at radio and microwave frequencies [C]//Proceedings Volume 3795, Terahertz and Gigahertz Photonics. 1999, 3795: 154–165. DOI: 10.1117/12.370159
- [15] 张磊, 陈晓晴, 郑耀宁, 等. 电磁超表面与信息超表面 [J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 817–828
- [16] 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. DOI: 10.1126/science.1210713
- [17] RAHMAT-SAMII Y, YANG F. Surface EM in antenna engineering: from EBG to meta-surface and beyond [C]//2016 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Fajardo, Puerto Rico, 2016
- [18] 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
- [19] 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. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
- [20] 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. DOI: 10.1038/s41377-019-0205-3
- [21] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces [J]. Journal of materials chemistry C, 2017, 5(15): 3644–3668
- [22] CUI T J, WU H T, LIU S, et al. Research progress of information metamaterials [J]. Acta physica sinica, 2020, 69(15): 158101. DOI: 10.7498/aps.69.20200246
- [23] GRUBER F K, MARENGO E A. New aspects of electromagnetic information theory for wireless and antenna systems [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2008, 56(11): 3470–3484. DOI: 10.1109/TAP.2008.2005468
- [24] WAN Z, ZHU J, ZHANG Z, et al. Capacity for electromagnetic information theory [EB/OL]. <https://arxiv.org/pdf/2111.00496.pdf>
- [25] YANG H H, YANG F, XU S H, et al. A 1-bit 10×10 reconfigurable reflectarray antenna: design, optimization, and experiment [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 64(6): 2246–2254. DOI: 10.1109/TAP.2016.2550178
- [26] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(1): 421–439. DOI: 10.1109/twc.2020.3024887
- [27] TAHA A, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning [J]. IEEE access, 2021, 9: 44304–44321. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064073
- [28] HU C, DAI L L, HAN S F, et al. Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(11): 7736–7747. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3072729
- [29] TAHA A, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning [J]. IEEE access, 2021, 9: 44304–44321. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064073
- [30] WEI X H, SHEN D C, DAI L L. Channel estimation for RIS assisted wireless communications—part II: an improved solution based on double-structured sparsity [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(5): 1403–1407. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3052787
- [31] HE Z Q, YUAN X J. Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(2): 210–214. DOI: 10.1109/LWLC.2019.2948632
- [32] WEI X H, SHEN D C, DAI L L. Channel estimation for RIS assisted wireless communications—part II: an improved solution based on double-structured sparsity [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(5): 1403–1407. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3052787
- [33] JIAN M N, ZHAO Y J. A modified off-grid SBL channel estimation and transmission strategy for RIS-assisted wireless communication systems [J]. 2020 international wireless communications and mobile computing (IWCMC), 2020: 1848–1853. DOI: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148537
- [34] XU W H, GAO F F, ZHANG J H, et al. Deep learning based channel covariance matrix estimation with user location and scene images [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(12): 8145–8158. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3107947
- [35] WEI X, DAI L, ZHAO Y, et al. Codebook design and beam training for extremely large-scale RIS: far-field or near-field? [EB/OL]. (2021-09-21)[2022-04-20]. <https://arxiv.org/abs/2109.10143>
- [36] 赵亚军, 营梦楠. 6G智能超表面技术应用与挑战 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 679–691. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2021.06.002
- [37] ARUM V, BALAKRISHNAN H. RFocus: beamforming using thousands of passive antennas [EB/OL]. [2022-04-20]. <https://www.usenix.org/conference/nsdi20/presentation/aron>
- [38] DUNNA M, ZHANG C, SIEVENPIPER D, et al. ScatterMIMO: enabling virtual MIMO with smart surfaces [C]//Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. USA: ACM, 2020: 1–14. DOI: 10.1145/3372224.3380887
- [39] DAI L L, WANG B C, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communication: antenna design, prototyping, and experimental results [J]. IEEE access, 2020, 8: 45913–45923. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977772
- [40] LI Y Z, REN Y L, YANG F, et al. A novel 28GHz phased array antenna for 5G wireless communications [J]. ZTE communications, 2020, 18(3): 20–25. DOI: 10.12142/ZTECOM.202003004
- [41] ZHANG S, LI M Y, JIAN M N, et al. AIRIS: Artificial intelligence enhanced signal processing in reconfigurable intelligent surface communications [J]. China communications, 2021, 18(7): 158–171. DOI: 10.23919/JCC.2021.07.013

作者简介



马红兵，中国联合网络通信有限公司科技创新部总经理、中国 IMT-2020/IMT-2030 推进组成员、GSMA TG 成员、工业与信息化部科技委移动与无线及卫星通信专家咨询组成员、中国无线电协会专家委员会副主任委员；长期从事移动通信技术研究与应用创新工作，研究方向包括 5G、6G 网络组网技术研究及毫米波、智能超表面等关键技术创新应用；曾获国务院特殊津贴，国家科技进步二等奖 1 项，省部级科学技术奖 5 项；已发表论文近百篇。



张平，中国工程院院士，现任北京邮电大学信息与通信工程学院教授、网络与交换技术国家重点实验室主任；先后担任国家自然科学基金委员会首届国际合作咨询委员，信息学部第三、五、六届咨询委员，“973”计划“认知无线网络基础研究”项目首席科学家，“863”计划“网络与通信”主题专家，国家科技重大专项“新一代宽带无线移动通信网”总体组专家，IMT-Advanced 2020 (5G) 专家组成员，国家第六代移动通信 (6G) 技术研发总体专家组专家；先后获国家科学技术进步奖特等奖 1 项、国家科学技术进步奖一等奖 1 项、国家技术发明奖二等奖 3 项、国家科学技术进步奖二等奖 2 项，2017 年获首届全国创新争先奖，2018 年获光华工程科技奖、何梁何利基金科学与技术进步等奖项。



杨帆，清华大学教授、智能超表面技术联盟 (RISTA) 副理事长；主要研究方向包括现代天线理论、设计与测量、新型电磁材料探索和应用、电磁场数值算法与优化，以及应用电磁系统研究与开发；已承担国家“863”“973”、自然科学基金、重点研发等多个重大国家科研项目，

主持建设清华大学电磁实验中心，多次在全球重要会议上做大会特邀报告，并组织专题论坛，在 IEEE 国际天线与传播年会等国际会议上开设专业课程 10 余次，2017 年被 IEEE 天线与传播学会遴选为杰出讲师，2018 年被选为 IEEE Fellow，被 ACES 遴选为 ACES Fellow；申请发明专利 20 余项，已授权 12 项，实现转让 2 项，已出版 6 本学术专著，发表论文 400 余篇。



王欣晖，中兴通讯股份有限公司副总裁、无线标准和产业关系总经理，IEEE PES 技术委员会（中国）委员，连续三届担任 3GPP GERAN 副主席，中国通信学会无线移动通信委员会委员，中国通信标准化协会理事，IMT-2020/IMT-2030 推进组专家组成员；长期从事先进无线技术与标准化推进工作。



张建华，现任北京邮电大学信息与通信学院教授、北京邮电大学-中国移动联合创新中心主任、中国 IMT-2030 (6G) 工作组频率子组副组长等；先后获国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金、教育部新世纪优秀人才等计划资助，曾获国家技术发明奖二等奖 2 项，以及中国通信学会科学技术奖一等奖、无线电管理科学技术一等奖、茅以升青年科技奖等奖项；发表论文 200 余篇，获国家授权发明专利 50 余项。



刘秋妍，中国联通网络通信有限公司研究院高级工程师；长期从事无线网络技术预研工作；主要研究方向包括智能超表面、区块链、边缘计算等移动通信技术创新预研与应用验证；曾主持省部级“十三五”“十四五”科技预研项目 2 项，多次参与国家级重大专项；发表论文 10 余篇。