

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.05.001

面向 6G 移动通信的可重构智能反射表面技术研究综述

虞湘宾, 于凯, 钱盼盼

(南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 210016)

摘要: 伴随移动通信技术的迅猛发展, 复杂多变环境和高能耗将是当前以及未来移动通信面临的主要问题, 低能耗、高效通信环境自适应调整将是移动通信技术发展的必经之路。可重构智能反射表面 (Reconfigurable intelligent surface, RIS) 技术的发展, 为移动通信提供了低能耗、通信环境自适应可重构服务, 满足了复杂通信场景下多样化设备服务需求。本文首先对 RIS 技术从原理、特点、优势等方面进行了概述; 然后针对 RIS 具体的应用场景, 对 RIS 技术优势进行总结; 最后在现有工作基础上, 总结了 RIS 技术可能面临的技术挑战, 并进一步论述与展望 RIS 技术的发展方向。RIS 技术将会进一步推动移动通信技术的变革, 助力移动通信技术面向未来复杂、智能化场景应用需求。

关键词: 移动通信; 可重构智能反射面; 自适应可重构环境; 智能化场景

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)05-0745-12

Overview of Reconfigurable Intelligent Surface for 6G Mobile Communication

YU Xiangbin, YU Kai, QIAN Panpan

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With the rapid development of mobile communication technologies, complex and changeable environment as well as high-energy consumption will become major problem for the current and future mobile communication. Low-energy consumption, efficient communication environment adaptation will be one of the most important ways to develop mobile communication technologies. The development of reconfigurable intelligent surface (RIS) technology provides configurable services for mobile communication with low energy consumption and adaptive communication environment, and thus it can meet the service requirement for diversified devices in complex communication scenarios. Firstly, we summarize the RIS technique in terms of principles, features, advantages, etc. Then, the technical advantages of RIS are summarized according to the specific application scenarios. Finally, the potential technical challenges of RIS techniques are provided based on the existing work, and the research direction of RIS techniques is further discussed and explored. RIS technology will further facilitate the transformation of mobile communications technology and help mobile communication technology face future application requirements in complex and intelligent scenarios.

Key words: mobile communication systems; reconfigurable intelligent surface; adaptive reconfigurable environment; intelligent scenarios

收稿日期: 2023-09-10; **修订日期:** 2023-09-30

作者简介: 虞湘宾, 男, 教授, 博士生导师, 中国电子学会通信分会委员, 中国电子学会信息论分会委员, IEEE 高级会员, 中国电子学会和通信学会高级会员。主要从事未来宽带移动通信关键技术研究。以第一作者身份在国内外学术期刊发表学术论文 120 余篇, 其中 SCI 检索 70 余篇。授权国家发明专利 30 余项。

通信作者: 虞湘宾, E-mail: yxbxwy@nuaa.edu.cn.

引用格式: 虞湘宾, 于凯, 钱盼盼. 面向 6G 移动通信的可重构智能反射表面技术研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 745-756. YU Xiangbin, YU Kai, QIAN Panpan. Overview of reconfigurable intelligent surface for 6G mobile communication[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 745-756.

大规模接入设备成为当前以及未来移动通信、物联网(Internet of things, IoT)系统发展的主要趋势之一,复杂多样化的服务需求、实时变化的通信场景导致了复杂多变的通信环境,面对如此大规模复杂多样化接入设备,超可靠、低时延及超高密度连接的服务需求成为未来移动通信发展亟需解决的重要难题^[1],也是推动第六代(The sixth generation, 6G)移动通信技术发展的重要研究方向。伴随移动通信技术的快速发展,超密集网络部署、大规模复杂多样化设备接入成为未来移动通信发展的必然趋势^[2]。然而,大规模复杂多样化设备的接入亟需超密集网络部署大量基站(Base station, BS)或接入点(Access point, AP),带来较大的系统硬件开销和能耗。同时,为满足大规模设备多样化服务需求,毫米波(Millimeter wave, mmWave)、太赫兹(Tera hertz, THz)等新型频谱资源将会被进一步开发,导致了未来通信环境的复杂多变特性。未来6G发展对移动通信技术提出了更高服务需求,《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》表明,泛在连接与沉浸通信作为未来6G移动通信发展的重要研究方向与发展趋势之一,面临着超高可靠、多媒体场景深入互动体验以及全域设备广连接等服务需求。泛在连接旨在加强全域无死角信息传输,最大程度上降低数字鸿沟,保障全用户的高效数字服务需求。特别是偏远地区、农村和灾区等特殊场景下的通信、物联网等信息服务需求,对未来6G移动通信发展的高效、广连接信息服务提出较高要求。沉浸式通信作为增强型移动宽带(Enhanced mobile broadband, eMBB)扩展,需要移动通信技术为其提供沉浸式、远程、多感官、多媒体以及全息服务,满足用户多方位的感官服务需求,实现远距离场景的深入互动体验,对多媒体信息传输的超低时延、超稳定可靠等提出较高要求。因此,未来6G移动通信将会面临着复杂多变、远距离视频场景融合、全域设备无差别信息服务以及高能耗的无线环境。当前技术发

展以高能耗为代价前提下,将无法较好地满足复杂多变无线环境下多样化设备系统服务需求。如何在移动通信技术研究中实现无线环境自适应可控,高效、经济的满足大规模无线设备服务需求,将是未来移动通信技术发展亟需解决的问题之一。

针对上述未来6G移动通信技术发展面临的问题,可重构智能反射表面(Reconfigurable intelligent surface, RIS)技术^[3],也叫做智能反射面(Intelligent reflecting surface, IRS)技术应运而生。传统移动通信系统优化设计主要考虑从发射端和接收端入手,进行系统性能提升,无线通信环境却受限于信息传输不确定性等因素,无法进行调整,使得传统收发端系统优化设计能力受限,无法较好地实现系统性能提升。RIS技术的出现,为进一步实现通信系统传输环境优化设计提供了可能。RIS技术凭借其可编程能力,根据系统服务需求自适应控制通信链路环境,从信息传输环境这一新的维度进行系统优化设计。类似地,传统移动通信技术也出现过中继通信、反向散射通信等相近技术。然而,与RIS技术相比,传统中继通信和反向散射通信存在成本高、功耗大及部署困难等问题。表1给出了传统中继通信与RIS辅助通信技术相关特征比较^[4]。RIS技术用于未来6G移动通信系统中,可以实现动态复杂通信环境下自适应信息传输,有效提升通信系统性能的同时,利用自身优势,保证系统能量消耗最低,较好地实现未来6G移动通信的绿色可持续发展,对于6G移动通信以及未来更高层次的移动通信技术发展有着较为深远的实际应用价值^[5]。“空天地一体化”通信技术作为未来通信发展的关键研究方向面临复杂多变通信输出环境,RIS技术自适应通信链路调整优势可进一步应对“空天地一体化”复杂多变通信网络环境,实现复杂动态多变传输环境下系统性能稳健提升。此外,作为未来通信技术发展的主流方向之一,新型短距离无线通信技术可利用RIS技术降低复杂电磁散射环境造成的

表1 中继与RIS对比

Table 1 Comparison of relay and RIS

特征	中继	RIS
硬件结构特性	有源射频器件构成	几乎无源
噪声	放大转发中继会同时放大噪声	简单的信号反射,几乎不会有噪声引入
时延	较高时延,解码转发中继额外的信号处理会增加功耗与时延	低时延
频谱效率	半双工中继会降低频谱利用率,从而导致频谱效率降低;全双工中继受到自干扰影响,造成一定的性能损失	不存在传统中继面临的问题(如全双工工作模式不存在自干扰),对频谱效率的提升程度取决于RIS的设计及控制方案
通信链路调整	无法自适应调整通信链路	可实现通信链路传输环境自适应调整
功率损耗	功耗较高	较低的硬件功耗

干扰,进一步提升系统性能。因此,RIS技术作为6G移动通信的关键技术之一,可与多种6G移动通信应用场景有机结合,利用其自身技术优势为6G移动通信技术发展提供动力,可推动6G移动通信技术的快速发展与应用。

1 RIS 基本原理

相比于传统通信网络架构,通信系统信息传输受限于复杂多变信道环境。RIS技术通过部署大量无源反射元件在通信环境中,根据信息传输需求动态自适应地调整通信信道环境,具有低成本和易部署的特性,较好地实现了通信系统性能的提升,保障了动态复杂多变通信场景下高质量信息传输。

1.1 系统模型

RIS技术是在当前以及未来通信环境复杂多变的应用背景下提出的,RIS部署在通信传输环境中,旨在突破传统通信系统设计思路,从信息传输环境入手,利用RIS技术根据通信系统性能需求,自适应调整、改变传输环境,实现系统性能提升。同时,RIS技术区别于传统中继传输方案,利用低成本、无源反射特性实现高效、节能的信息传输环境改造方案^[6],有助于未来复杂多变通信传输环境的管理与自适应调整。

RIS结构如图1所示^[7-8]。RIS是由3层介质板以及1个控制器组成的无源可重构反射超表面^[7-8]。RIS第1层介质基板上印刷有多个反射单元,在通信传输过程中,信号到达第1层反射单元后,系统根据通信需求调整反射单元相位将信号进行反射,实现系统性能提升;第2层介质板是铜板或其他金属板构成的信号衰减架构,其作用是利用金属板/铜板阻止信号穿透反射面,降低信号衰减;第3层介质板是由控制电路板组成的控制电路系统,控制电路板的主要作用是独立调整RIS所有反射单元中的电容、电感和电阻,实现RIS调整信号幅度和相位的功能;而RIS控制器通常是由现可编程门阵列(Field-programmable gate array, FPGA)组成,FPGA可以实现独立控制每个反射单元反射系

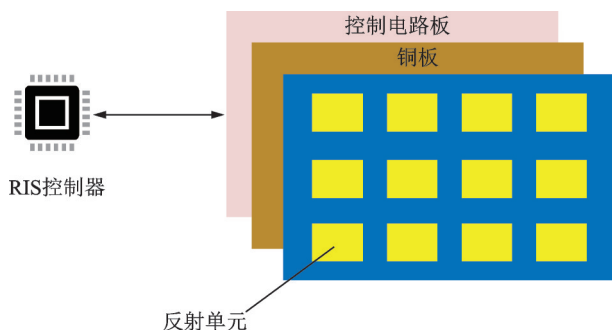


图1 RIS结构^[7-8]

Fig.1 Structure of RIS^[7-8]

数,实现信号幅度和相位的调整。目前RIS结构中,每个反射单元均与1个PIN二极管相连,通过直流馈电线路控制PIN二极管的偏置电压,实现PIN二极管在等效电路中“开”和“关”两种状态的切换,从而产生相移差,实现RIS反射单元的相位控制。因此,通过在RIS中使用FPGA设置相应的偏置电压,能够实现RIS每一个反射单元的相移,在此基础上,可以通过控制器实现对多个(甚至整个RIS)反射单元进行联合调节,从而实现对反射波束成形的控制,使之满足不同通信场景的需求。

RIS辅助移动通信系统是在通信环境中部署RIS,利用RIS的通信链路自适应调整能力,实现信号反射与增强,提升系统性能。RIS辅助通信系统旨在通过RIS反射波束与基站发射波束、功率等变量的联合优化设计,实现系统优化设计。其系统模型基本结构包含基站与用户间的直达传输路径,基站、RIS与用户构成的反射传输路径^[9-11]。系统模型如图2所示。一个基站服务K个终端设备,基站与终端设备之间的直达通信链路被障碍物阻断,系统通过RIS的反射相位优化设计实现信号由基站到RIS再到终端设备的传输。

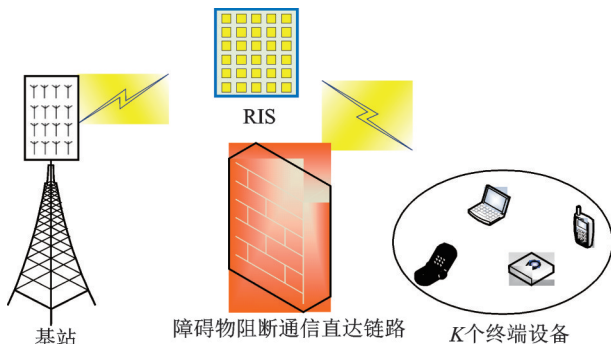


图2 RIS系统模型

Fig.2 System model of RIS

考虑到莱斯衰落,基站到RIS的信道 $H_{B,R}$ 可建模为

$$H_{B,R} = \sqrt{\rho_0 d_{B,R}^{-\alpha_{B,R}}} \left(\sqrt{\frac{\kappa_{B,R}}{\kappa_{B,R} + 1}} \bar{H}_{B,R} + \sqrt{\frac{1}{\kappa_{B,R} + 1}} \tilde{H}_{B,R} \right) \quad (1)$$

相应地,RIS到用户 k 之间的信道 $g_{R,k}$ 可建模为

$$g_{R,k} = \sqrt{\rho_0 d_{R,k}^{-\alpha_{R,k}}} \left(\sqrt{\frac{\kappa_{R,k}}{\kappa_{R,k} + 1}} \bar{g}_{R,k} + \sqrt{\frac{1}{\kappa_{R,k} + 1}} \tilde{g}_{R,k} \right) \quad (2)$$

式中: ρ_0 表示参考距离 $d_0 = 1$ m处的信道功率增益系数; $d_{B,R}$ 和 $d_{R,k}$ 分别表示基站到RIS和RIS到用户 k 的距离; $\alpha_{B,R}$ 和 $\alpha_{R,k}$ 分别表示基站到RIS和RIS到用户 k 相应的路径损耗指数; $\kappa_{B,R}$ 和 $\kappa_{R,k}$ 分别

表示基站到RIS和RIS到用户 k 的莱斯因子; $\bar{H}_{B,R}$ 和 $\bar{g}_{R,k}$ 分别表示基站到RIS和RIS到用户 k 信道的直视路径(Line of sight, LoS)分量; $\tilde{H}_{B,R}$ 和 $\tilde{g}_{R,k}$ 分别表示基站到RIS和RIS到用户 k 信道的非直视路径(Non line of sight, NLoS)分量。

基于以上信道表示,基站经过RIS到达用户 k 的级联信道表示为

$$G_{B,R,k} = g_{R,k} \Theta H_{B,R} \quad (3)$$

式中: $\Theta = \text{diag}\{\beta_1 e^{j\theta_1}, \beta_2 e^{j\theta_2}, \dots, \beta_M e^{j\theta_M}\}$ 为RIS反射矩阵; M 为RIS中反射元素数量; $\beta_m \in [0, 1]$ 和 $\theta_m \in [0, 2\pi]$ 分别表示RIS第 m 个反射单元的幅度与相位。因此,基于上述分析,用户 k 的接收信号表示为

$$y_k = g_{R,k} \Theta H_{B,R} w_k x_k + \sum_{k' \neq k}^K g_{R,k'} \Theta H_{B,R} w_{k'} x_{k'} + n_k \quad (4)$$

式中: w_k 表示基站到第 k 个用户发射波束形成; x_k 表示基站发送给用户 k 的符号; n_k 为噪声。

RIS辅助通信系统的优化设计过程中,主、被动波束联合优化设计成为当前以及未来研究的主流方向,主动波束形成是基站端的发射波束形成,而被动波束形成则是RIS反射相位、幅度的优化设计。被动波束形成是RIS自适应调控传输链路环境的根本原理所在,其结合主动波束形成有利于基站与RIS实现较好的合作,更好地发挥两者优势,提升系统性能。同时,由于RIS技术主要通过对信息传输链路环境进行自适应调整来提升通信系统性能,根据其信道特性进行相应的系统优化设计将会进一步提升RIS优势。式(1~3)所给出的RIS辅助通信信道模型将呈现出其信道双衰落特性,也就是基站到RIS、RIS到用户的两阶乘性衰落导致的双衰落,这个双衰落问题将是RIS技术开放的研究难题。因此研究合理的RIS位置部署设计将会降低RIS技术的双衰落难题,将有着较大的应用前景。

由于频谱资源短缺难题,频谱资源丰富的mmWave、THz等高频将会成为未来6G移动通信发展的重要方向,然而高频通信面临着波长短、通信直达链路受阻和信号传输衰落严重等难题,严重影响高频频谱资源的利用与发展。由于RIS技术的发展可以自适应调整链路传输环境,降低高频信号传输衰减,RIS的上述优势为高频频谱资源应用提供了可能,因此RIS辅助通信系统在未来6G移动通信高频传输环境下有着更大的优势发挥空间,存在巨大技术潜力。

此外,RIS辅助通信系统的实际应用离不开信

道状态信息(Channel state information, CSI)的获取,然而由于RIS的无源特性,无法在RIS端实现CSI的获取,只有深入研究发展RIS的CSI获取,才能进一步充分挖掘RIS技术潜能,实现其真正的实际应用价值。

1.2 RIS的发展

RIS的起源与发展最早可追溯到反射阵列天线和“超材料”技术,具备数字编码技术的“超材料”可实现内部单元状态的动态调控,实现对信息传输环境中电磁波的自适应实时控制,从而进一步提出了“信息超材料”概念。RIS技术发展到现在,已经逐步应用于各类通信系统的研究,RIS技术也趋于成熟。自2018年起,RIS技术在通信系统传输领域得到了广泛发展,同时引起了学术界和工业界广泛关注。

国内外研究机构对RIS展开了广泛的研究试验,评估测试RIS的可行性以及其实际应用性能。2019年,日本DoCoMo公司首次展开了RIS辅助28 GHz毫米波通信外场测试,验证了其通信速率为560 Mb/s^[12]。室内应用场景方面,美国麻省理工学院于2020年搭建了2.4 GHz非授权工作频段的RFocus测试平台^[13],实验结果表明,RIS部署之后信号强度提升2倍,证明了RIS在室内应用场景的有效性。而RIS技术的起源性研究得益于中国东南大学崔铁军院士2014年首次提出的编码超材料^[14],并在此基础上进行了大量实验验证。文献[3]概述了RIS的硬件构成、原理等基础理论,总结了RIS在移动通信系统未来的潜在应用场景。文献[15]从RIS辅助移动通信系统优化设计出发,对系统基站端发射波束形成和RIS端被动反射波束形成进行联合优化,实现了系统性能提升,为RIS辅助通信系统优化设计奠定了基础。文献[16]进一步概述了RIS在未来移动通信发展进程中的潜在应用,并总结提出了RIS技术发展面临的挑战和机遇。

随着研究的深入发展,RIS技术开始向多元化发展。文献[17]以能效为优化目标,联合设计发射端波束形成和RIS反射波束形成,利用RIS技术优势提升系统能效,为绿色通信技术发展开拓新的研究方向。文献[18]将传统单一RIS的研究扩展到多个分布式RIS,通过分布式RIS的合理部署,充分挖掘RIS技术潜能,实现通信系统性能的进一步提升。然而,RIS作为低成本、无源且简易的通信辅助设备,单一的RIS技术在推动移动通信快速发展过程中能力有限,因此将RIS技术与移动通信其他关键技术有机结合可有效推动移动通信技术快速发展。文献[19-20]将RIS与无线携能技术结合,实现通信与能量同时增强传输,加强RIS在

IoT 系统中的应用能力。文献[21-22]考虑利用 RIS 增强移动通信物理层安全,是未来移动通信发展的关键研究方向。文献[23]将 RIS 技术与无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)通信结合,同时发挥 RIS 的通信链路可重构优势以及 UAV 灵活位置部署能力,不仅增强了 UAV 通信的稳定可靠性,而且利用 UAV 增强了 RIS 辅助通信系统设计

自由度。

移动通信技术的快速发展,将推动 6G 移动通信走向标准化,学术界和工业界对 6G 关键技术 RIS 的研究已经进行到深层次阶段,从 RIS 基础理论、RIS 应用、RIS 与其他 6G 关键技术融合等多方面进行研究,具体研究内容进展如表 2 所示。

表 2 RIS 的研究进展

Table 2 Research progress of RIS

年份	作者	研究内容
2023	Aboagye 等 ^[24]	讨论了基于 RIS 技术的室内可见光通信(Visible light communication, VLC)系统,特别是 RIS 如何克服 LoS 阻塞以及 VLC 系统中的设备定向问题
	Das 等 ^[25]	介绍基于机器学习的 RIS 算法,并概述 IoT 系统中智能频谱分配
2022	Björnson 等 ^[26]	介绍 RIS 辅助通信系统的信道建模,并从信号处理的角度概述 RIS 基本原理,包括通信、定位和传感
	You 等 ^[27]	概述 RIS 辅助通信的典型部署策略,并比较它们的性能
2021	Zheng 等 ^[28]	对 RIS 辅助无线通信进行全面综述,重点介绍了 RIS 信道估计和波束形成设计等实际问题的有效解决方案
	Wu 等 ^[5]	对 RIS 辅助的无线通信进行全方位的概述,并从通信理论角度给出 RIS 应用的 3 个主要技术挑战
	Yuan 等 ^[29]	简要总结了 RIS 的 3 个设计挑战,包括 CSI 获取、被动信息传递和反射优化
	Liu 等 ^[30]	对 RIS 辅助无线通信下的性能分析、波束形成和资源分配以及机器学习进行了综述,并且讨论 RIS 相关应用
2020	Long 等 ^[31]	提供了 RIS 辅助无线通信的概述,包括愿景、有效的应用场景和重要的性能度量标准。然后介绍了新的信号模型、硬件结构和竞争优势,并且对 RIS 技术可能的应用场景、RIS 未来的挑战和部署进行了研究
	Björnson 等 ^[32]	概述 RIS 的主要特性,并提出关于功能、性能增益和路径损失的 3 个误解
	Renzo 等 ^[7]	从通信理论的角度对 RIS 技术进行全面概述,并讨论其最新的应用场景
	Wu 等 ^[3]	介绍了 IRS 在无线通信中的潜力,并讨论了其基本概念、主要应用以及关键的技术挑战
	Gong 等 ^[33]	对 IRS 辅助通信的性能分析进行概述,并根据系统优化目标和优化变量对 IRS 应用的最新研究进行分类概述
	Sena 等 ^[34]	从信道增益、功率分配公平、覆盖范围和能量效率等方面讨论 IRS 在非正交多址(Non-orthogonal multiple access, NOMA)中的应用潜能
	Kisseleff 等 ^[35]	通过调查新的应用场景和用例,提出未来通信网络的智慧城市理念,同时强调 RIS 实际应用的潜在优势以及其广阔的研究前景
2019	ElMossallamy 等 ^[36]	介绍了基于超表面 RIS 和基于反射阵列 RIS 的不同硬件实现,并讨论了信道建模以及 RIS 辅助无线通信的挑战和机遇
	Huang 等 ^[37]	介绍了全息多输入多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)表面,并总结了其硬件架构、功能/特性和通信应用
	Wymeersch 等 ^[38]	介绍了 RIS 相关的信道模型,并讨论了 RIS 在提高定位精度和扩大制图范围方面的优势
2018	Renzo 等 ^[39]	引入可重构超表面赋能的智能无线电环境,并讨论将其应用于通信、传感和计算的各种功能性能提升
	Liang 等 ^[40]	讨论大型智能表面的硬件实现、性能提升和应用,重点讨论与反向散射通信和反射中继的相似与不同之处
2018	Liaskos 等 ^[41]	推出软件定义的超表面概念和架构,并探讨其未来研究挑战

RIS 技术打破传统通信系统设计方案,从复杂多变链路传输环境着手,通过相位控制自适应调控传输链路环境,以低成本、低功耗工作方式提升系统性能。其自身结构优势以及在通信系统中的应用优势表现为以下几方面。

(1)低成本的硬件组成。传统有源天线阵列通常是由移相器、功率放大器等有源器件与天线单元相连接构成,具有较大的硬件成本。RIS 技术则是

侧重于无源架构的设计,以最低成本实现高效通信系统辅助设备^[42],RIS 架构中每一个反射单元都是由 PIN 二极管、变容二极管、电容和电阻等无源器件构成,通过对无源器件进行偏置电压控制实现反射单元电磁相位调整,最终完成信号传输链路环境自适应调整。因此,RIS 利用较低硬件成本完成高效通信系统性能提升。

(2)低功耗助力绿色可持续通信。未来 6G 移

移动通信技术的快速发展,不仅是在通信系统性能、用户服务需求等方面进行完善与提升,而且绿色可持续发展的移动通信技术也必不可少。飞速发展的移动通信技术带来了大量能源消耗,未来6G技术发展对于能源将会有更大的需求,一味地高速发展通信技术而忽略能量消耗问题不可取,同时也是不可持续的。因此,如何降低能源消耗的同时保证移动通信技术高效发展成为6G关键技术难点。RIS技术设计初衷便是以无源反射特性为主,除简单的信号控制指令消耗有限能量以外几乎没有其他能量消耗。因此,RIS技术助力6G通信绿色可持续发展^[43-44],可较大程度降低系统能量消耗,以最低的能量消耗获取最大的系统性能提升。

(3)没有额外噪声。传统通信收发、转发设备(如:发射机、接收机以及中继转发器等)在信号发射、接收和转发过程中通常会引入额外的信号处理时延和热噪声,造成不可避免的系统性能损失。RIS工作过程是利用无源器件对传输信号进行快速转发,没有进行任何信号处理,有效避免了热噪声的引入和信号处理时延,同时RIS技术在全双工通信能力^[45],相对于传统中继转发技术拥有较大的系统优势。

(4)简洁方便的易部署特性。未来6G通信环境错综复杂,通信设备的部署需要考虑位置、尺寸和供电等复杂问题。RIS具有高自由度的尺寸设计优势,可根据部署位置特点进行RIS尺寸合理设计,且RIS供电简单,不需要额外的空间进行单独部署,可直接部署在建筑表面、天花板、窗口玻璃以及各类移动平台等任何方便部署的位置,这对于通信环境错综复杂、大规模设备接入的IoT应用场景有着较大的应用优势。对于完整的通信系统而言,RIS的部署不需要对其进行较大的改变,可直接根据系统优化设计需求进行大规模、多样化的RIS部署,具有较大的部署灵活性。

RIS技术利用其自身低成本、低功耗、易部署等优势吸引了学术界和工业界广泛关注,并得到了较好发展;同时,利用系统优化设计方法对RIS反射相位进行合理优化设计,可显著提升通信系统性能,对于未来6G动态复杂多变通信环境有着较大的实际应用价值。可以说,RIS技术的快速发展与应用离不开系统优化设计方法的支持,有效的系统优化设计方法可以充分挖掘RIS技术优势并将其发挥到极致。其中,RIS辅助通信系统的主被动波束形成联合优化设计方法^[46]作为支撑RIS技术应用的关键技术被广泛应用,其作用是在通信系统中,根据系统实时服务需求,对基站主动波束形成和RIS被动反射波束形成进行联合优化设计,实现

主被动波束完美配合,以达到RIS优势充分发挥、系统性能最大程度提升的目的。RIS辅助通信系统主被动波束联合优化设计方法分为传统方法、智能优化方法和人工智能(Artificial intelligence, AI)方法^[47]等,随着此类方法的不断创新发展,RIS技术优势将得以进一步发挥,RIS技术与其优化设计方法的完美结合将进一步推动未来6G移动通信技术的创新与发展。

2 RIS应用场景

RIS技术的提出与应用,其目的是从通信传输环境角度出发进行系统优化设计,根据系统实时服务需求,动态自适应调整控制传输环境,实现系统性能提升。作为移动通信系统必不可少的关键要素,传输环境对于系统性能有着决定性作用。因此,RIS技术在通信环境中有着广泛的应用场景,图3展示了RIS的丰富应用场景^[48-56]。

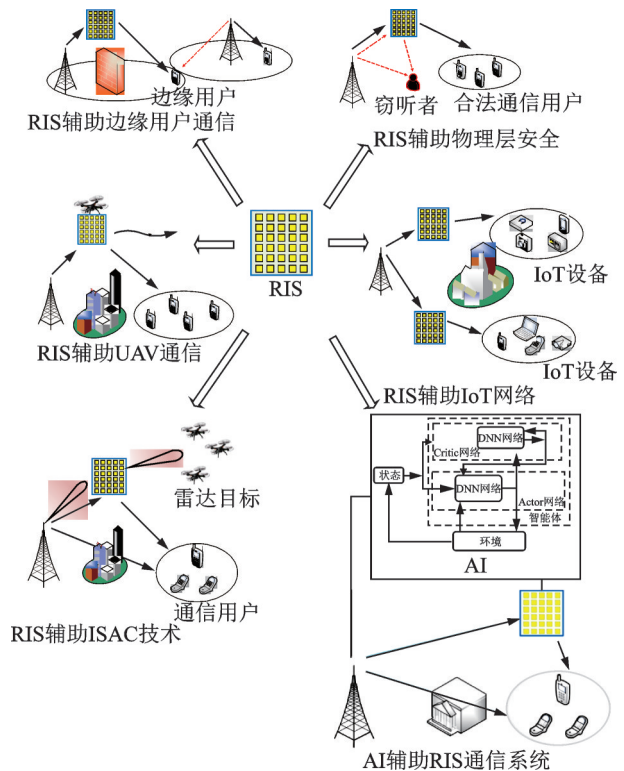


图3 RIS应用场景

Fig.3 Application scenario for RIS

2.1 RIS辅助边缘用户通信

RIS技术的提出,首要解决的通信问题便是远距离通信或弱信号通信的信号增强,因此边缘用户通信场景的应用是RIS技术最基本的应用场景。边缘用户面临着信号传播盲区、信号衰减严重和相邻小区干扰等问题,严重影响通信质量。通过合理部署RIS,不仅可以降低边缘用户信号衰减,同时

RIS构建新的传输路径可以实现基站信号盲区的覆盖,大大减少小区信号盲区。相邻小区对于边缘用户的信号干扰问题,也可以通过自适应调整RIS反射相位进行边缘用户信号增强与干扰对抗,有效提升边缘用户信号质量。

2.2 RIS辅助物理层安全

随着移动通信技术的快速发展,物理层安全问题已成为移动通信未来发展需要面临的重大问题之一。当前以及未来通信场景中,大规模设备接入的同时,也存在着大规模窃听设备,严重影响信息传输安全,前期研究中少量窃听设备或窃听设备距离用户存在一定距离时,可以通过传统的系统优化设计进行应对。然而,大量窃听设备的接入不仅提升了信息泄露的概率,且当窃听设备距离用户设备距离较近时,无法通过传统方法较好地实现信息安全保护,成为未来移动通信发展的关键难题之一^[57]。RIS技术的应用,不仅可以为海量用户设备提供可靠有效的信息传输服务,凭借其高效的反射相位调整自由度可以在信号增强的同时有效对抗信息窃听,也可以根据通信环境窃听设备的实时变化自适应调整信号增强和防窃听方案,有效应对复杂环境下物理层安全问题。

2.3 RIS辅助IoT网络

IoT已是未来移动通信发展的必然趋势,传统意义上的移动通信技术必然走向万物互联的IoT时代。IoT具有大规模设备接入、信息传输环境复杂多变等特性^[58],RIS技术的发展也是为复杂多变环境下的信息传输进行服务。因此,将RIS技术应用用于IoT环境,有助于推动IoT进一步发展,进而开启万物互联新时代。IoT环境中存在大规模异构设备^[59],其服务需求、通信链路环境等均是动态复杂多变的。因此,需要在IoT环境中部署大量分布式RIS,根据设备实时服务需求、通信链路环境实时变化,自适应调整信息传输环境,实现多样化服务需求的有效保障。

2.4 RIS辅助UAV通信

UAV通信作为新时代移动通信发展的主流发展方向之一,将移动通信技术提升到空间域,为移动通信技术插上了“飞行的翅膀”,获取更高的系统设计自由度。UAV通信包括UAV基站、UAV用户和UAV中继等较多服务场景^[60]。然而,不管是哪种应用场景,其面临着与传统地面移动通信不同的通信链路环境,空中信息传输面临着复杂多变、远距离传输和UAV能量供给有限等特性,为UAV通信的发展带来挑战。将RIS技术与UAV通信相结合,可以通过RIS相位调整有效增强传输链路环境的可靠性。同时,RIS技术可以建立有

效、稳定的地空能量传输链路,为UAV空中飞行提供持续可靠的能量补给。因此,RIS技术与UAV通信的结合研究,有效保障了UAV通信技术的优势发展,为UAV通信提供更广大发展空间。

2.5 AI辅助RIS通信系统

伴随着AI技术的快速崛起,RIS技术与AI结合将是未来发展的重要趋势。RIS技术辅助移动通信的发展,是对其进行合理的系统优化设计,充分利用与挖掘RIS技术优势,实现系统性能稳健提升。然而,随着移动通信技术复杂多样化的场景变革,系统优化设计趋向于多目标优化、难以建模目标函数以及动态多变的环境约束等,传统基于模型的优化设计方法不能很好地满足场景应用需求,而AI技术可以通过与移动通信环境交互学习,实时动态反馈环境需求与优化目标变化,符合未来移动通信场景需求。AI技术与RIS的结合,利用了AI优势,动态自适应地学习复杂通信场景需求,很好地发挥了RIS技术潜能。二者结合充分发挥了优势互补,推动移动通信技术快速变革与发展。

2.6 RIS辅助通感一体化技术

辅助通感一体化(Integrated sensing and communication, ISAC)技术作为6G通信关键研究方向之一,已经得到了学术界和工业界广泛关注,其将通信和雷达感知相结合,有利于促进两者之间优势互补,使得通信、雷达感知相互促进发展。但是,ISAC技术面临着雷达目标和通信用户相互干扰、通信传输环境与雷达回波复杂交互等难题。为解决上述难题,进一步提升系统整体性能,在收发机端进行系统优化设计必然伴随严重功耗等问题,以较大功耗等代价克服ISAC技术面临的复杂问题显然不可取。而RIS技术在通信链路环境自适应调整方面有着其特有的优势,将RIS与ISAC结合,可以针对通信链路传输环境和雷达回波的复杂交互、实时多变进行自适应管理与调整,且RIS的应用有助于降低通信用户和雷达用户之间的相互干扰,以最低的硬件成本实现复杂环境下ISAC系统性能提升,在未来6G移动通信应用场景下,RIS辅助ISAC技术拥有较大的发展潜力。

3 挑战与展望

RIS技术的提出,对学术界和工业界产生了较大的影响,RIS的应用将会直接推动移动通信技术向6G时代的过渡,现有的理论研究与实际场景实验充分彰显RIS技术的发展潜力,而且未来复杂多

变、大规模接入设备的移动通信场景将为 RIS 技术应用提供更大的优势发挥空间。当前移动通信技术正面临新的突破,新时代的技术变革将会带来更大的技术挑战与需求,RIS 技术与未来移动通信发展的碰撞,将会带来更大的挑战与机遇。

3.1 面临的挑战

目前 RIS 技术的发展主要集中在性能分析与测试以及固定场景下系统资源优化与分配方面,RIS 技术的优势得到了一定的验证。然而随着移动通信技术的快速发展与 6G 移动通信场景提出的需求,RIS 技术将面临着更大的技术挑战,未来复杂、动态、多变、大规模设备接入场景才是 RIS 技术真正的应用环境,RIS 技术若想得到更大的发展与技术升华,必须实际面对未来通信场景需求,真正解决实际应用环境中的难题。因此,RIS 技术还面临如下自身技术以及实际应用难题。

(1)信道估计问题。RIS 技术提出的初衷便是以无源、低成本且低功耗特性为出发点,以上特性为 RIS 提供了前所未有的技术优势,同时也面临着无法避免的 CSI 获取难题。移动通信系统的优化设计离不开通信环境的 CSI 获取。然而,RIS 技术却由于其无源特性而无法实现 CSI 的获取,当前研究考虑从基站侧获取级联 CSI,RIS 部署有源模块实现 CSI 获取等克服这一难点,但没有形成一个统一标准,也没有得到一种最有效的 RIS 辅助通信系统 CSI 获取方案。RIS 的 CSI 获取是其未来研究与应用无法避免的难题,只有突破 RIS 的 CSI 获取这一基本问题,才能进一步推动 RIS 技术的发展,从而推动移动通信技术的快速发展。

(2)RIS 部署与双衰落问题。当前 RIS 辅助移动通信技术的研究对于 RIS 部署问题研究有限,传统单一简单环境下,RIS 部署可以通过前期研究结论进行部署,获取较好的系统性能。然而,固定通信环境下 RIS 的部署并不能满足多样化、动态和复杂场景的需求,且 RIS 技术的应用面临双衰落问题。因此,如何在未来复杂多变移动通信场景下,对多个 RIS、多种类型 RIS 进行合理的位置及高度部署,满足复杂场景下、多样化设备的服务需求,实现复杂多变移动通信场景下,系统性能总是能利用 RIS 技术获取较好的性能提升,将是未来 RIS 技术发展面临的重大问题之一。

(3)动态环境管理。所谓动态移动通信及环境,是当前以及未来高速发展的移动通信技术带来的通信链路环境复杂多变、大规模接入设备复杂多样化、服务需求多样化以及用户设备的动态可变特性形成的。RIS 技术的主要优势便是可以以通信单元控制动态调整通信链路环境。然而,前期研究

主要集中在固定环境下 RIS 性能测试,未来动态复杂通信环境才是 RIS 技术的主要应用场景。动态复杂多变环境下,利用 RIS 技术优势,自适应调整链路环境,对通信传输链路环境进行自适应优势设计,提升系统性能,将是 RIS 技术发展的必经之路。移动通信发展到 6G 甚至更高层次的技术变革,也会带来更为复杂的动态多变环境,也会为 RIS 技术带来持续不断的发展需求与技术挑战。

(4)低复杂度鲁棒系统设计。动态复杂场景下不可避免地面临 CSI 获取不完全、用户设备移动不确定性和通信链路环境面临的突发多变特性等问题,RIS 技术拥有动态自适应调整通信链路环境的技术优势。在此基础上,如何实现各类不完全、不确定性误差、硬件损伤以及错误等突变因素前提下系统性能的稳健提升也将是 RIS 技术面临的重大挑战之一。同时,低复杂度系统优化设计算法的研发也将会为 RIS 技术提供更为强大的发展动力,实现 RIS 技术更快更好的实际应用。低复杂度的系统优化设计算法结合 RIS 技术的鲁棒设计,可以更为稳健地将 RIS 技术应用到未来多变复杂的通信场景中。低复杂度鲁棒 RIS 辅助通信系统的优化设计将是推动 RIS 技术实际应用的主要难题之一,同时也是 RIS 技术在未来移动通信实际应用场景中最有价值的推动力之一。

(5)多 RIS 协作通信系统优化设计。传统单个 RIS 辅助通信系统性能测试与系统优化设计已经得到了较好的技术验证与发展。然而,未来 6G 通信面临着链路传输环境复杂多变、大规模接入设备爆炸式增长以及新型分布式通信网络架构兴起等实际应用问题,单个 RIS 无法满足上述实际应用场景服务需求,多个分布式 RIS 的部署将是未来 RIS 辅助通信系统发展趋势。现有理论研究虽已开展多个分布式 RIS 辅助通信系统的研究,然而此类研究却是基于多个 RIS 之间相互独立不存在干扰的理想假设前提下进行的,与实际应用环境不相符,未来分布式 RIS 辅助通信系统必然存在 RIS 之间信号转发、相互干扰等实际问题,如何对多个分布式 RIS 进行合理优化设计,实现多个分布式 RIS 之间的相互协作,最大程度提升系统性能将是未来研究难点。

3.2 未来研究方向

(1)RIS 辅助超可靠低时延通信。超可靠低时延一直是移动通信技术发展亘古不变的应用需求,只有实现该应用需求,移动通信技术才能稳健地应用到实际通信场景。RIS 技术一开始便是针对复杂多变动态移动通信场景提出的,旨在应对不确定多变场景下环境突发多变造成的系统性能损失,提

高移动通信环境信息传输的可靠性。同时,RIS的部署可以改善通信链路传输环境,有效避免信息传输过程中不必要的时间浪费,降低通信时延。因此,RIS技术在超可靠低时延通信需求下,有着更为广阔的发展潜能。

(2)RIS辅助高频段通信。伴随着移动通信技术的快速发展与多样化用户设备的爆炸式增长,通信频谱资源面临着较为严重的短缺危机。mmWave、THz等高频段拥有着丰富的频谱资源,能有效应对移动通信发展频谱资源短缺问题,高频通信已成为未来6G通信关键发展趋势之一。然而高频段通信也面临着传输衰减严重、传输距离短等致命缺陷。RIS技术的提出,为高频段通信提供了发展契机。RIS技术与高频段通信结合可以利用其通信链路自适应调整能力,有效降低高频段信息传输衰减、延长高频段通信传输距离以及提升高频段信息传输质量。因此RIS技术可以有效避免高频段传输面临的困境,大大增强其实际应用能力,二者结合将是未来移动通信技术发展的重要研究方向。

(3)RIS辅助“空天地一体化”通信。“空天地一体化”通信技术作为6G移动通信的愿景之一,将是未来移动通信发展的主流。空天地结合有效地利用了空天技术平台,将传统陆地移动通信技术拉升了两个维度,提升了移动通信技术发展空间。然而,空天技术平台的接入带来发展机遇的同时,也带来了空天平台环境复杂多变、信息传输距离较远等不可避免的难题。RIS技术的加入,将会有效地改变空天地一体化通信传输环境、克服远距离信息传输带来的系统性能降低等问题。RIS技术自身具备的通信链路环境自适应可控能力与空天地一体化通信发展需求完美契合,有着较为宽广的技术发展空间,是未来移动通信发展主要推动力之一。

(4)基于RIS技术的近场通信。6G移动通信场景下,大规模接入设备、复杂动态多变链路传输环境以及新型高频频谱资源的应用对RIS技术提出了更高服务需求,RIS需要部署超大规模的反射单元以进一步实现复杂通信环境的动态调控。因此,RIS中超大规模反射单元部署不可避免地形成近场通信效应,也是未来6G研究的关键技术之一。在近场通信环境下,电磁结构发生根本性变化,传统平面波信道模型将不再适用,进而转向球面波信道建模。如何在RIS辅助未来6G近场通信中较好地建立球面波信道模型,进一步利用球面波特性和RIS技术优势发挥到极致,实现RIS技术近场通信的完美结合,最大程度提升系统性能,将是推动未来6G移动通信发展的关键驱动力之一。

4 结 论

移动通信技术的高速发展,必然面临着大规模异构设备接入、动态服务需求以及复杂多变链路传输环境等问题。RIS技术的提出,在应对上述移动通信技术快速发展面临的难题方面有着较好的潜在发展优势。本文主要论述了RIS技术及其在未来移动通信系统中的应用。通过引入RIS的基本原理及系统模型,阐述了RIS显著优势及其典型应用场景。在此基础上,结合现有RIS技术应用场景,总结了RIS技术发展潜在的问题,并对未来的发展方向进行了论述和展望。RIS的研究和进步将会进一步推动通信技术革新,助力6G进入新场景多需求下的多技术融合新阶段。

参考文献:

- [1] WANG Chengxiang, YOU Xiaohu, GAO Xiqi, et al. On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies, and testbeds[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(2): 905-974.
- [2] QIAO Li, ZHANG Jun, GAO Zhen, et al. Massive access in media modulation based massive machine-type communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(1): 339-356.
- [3] WU Qingqing, ZHANG Rui. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.
- [4] YE Jia, KAMMOUN A M, ALOUINI M S. Spatially-distributed RISs vs relay-assisted systems: A fair comparison[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2021, 2: 799-817.
- [5] WU Qingqing, ZHANG Shuowen, ZHENG Beixiong, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [6] 高子路, 孙韶辉, 李丽. 面向新一代移动通信的智能超表面技术综述[J]. 电信科学, 2022, 38(10): 20-35.
GAO Zilu, SUN Shaohui, LI Li. Overview of reconfigurable intelligent surface for new-generation mobile communication[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(10): 20-35.
- [7] RENZO M D, 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.
- [8] 李南希, 朱剑驰, 郭婧, 等. 可重构智能表面技术: 研

- 究进展、原型机及挑战[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(2): 305-310.
- LI Nanxi, ZHU Jianchi, GUO Jing, et al. Reconfigurable intelligent surface: Research progress, prototypes and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(2): 305-310.
- [9] GAO Yulan, YONG Chao, XIONG Zehui, et al. Reflection resource management for intelligent reflecting surface aided wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(10): 6971-6986.
- [10] 姚嘉铖, 许威, 黄永明, 等. 基于可重构智能表面的6G通信技术[J]. 信号处理, 2022, 38(8): 1555-1567.
- YAO Jiacheng, XU Wei, HUANG Yongming, et al. Techniques for reconfigurable intelligent surface-aided 6G communication network: An overview[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(8): 1555-1567.
- [11] 齐峰, 岳殿武, 孙玉. 面向6G的智能反射面无线通信综述[J]. 移动通信, 2022, 46(4): 65-73.
- QI Feng, YUE Dianwu, SUN Yu. A survey of intelligent reflecting surface wireless communications toward 6G[J]. Mobile Communications, 2022, 46(4): 65-73.
- [12] NTT DOCOMO. Metawave test 5G mobile system in Tokyo [EB/OL]. (2018-12-06) [2023-09-01]. <http://www.srrc.org.cn/en/news4504.aspx>.
- [13] ARUN V, BALAKRISHNAN H. RFocus: Practical beamforming for small devices[EB/OL]. (2019-02-18) [2023-09-01]. <http://arXiv preprint arXiv.1905.05130>.
- [14] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light Science & Applications, 2014(3): e218.
- [15] WU Qingqing, ZHANG Rui. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(3): 1838-1851.
- [16] BASHARAT S, HASSAN S A, PERVAIZ H, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: Potentials, applications, and challenges for 6G wireless networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 184-191.
- [17] WU Jiao, KIM S, SHIM B. Energy-efficient power control and beamforming for reconfigurable intelligent surface-aided uplink IoT networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(12): 10162-10176.
- [18] YANG Zhaohui, CHEN Mingzhe, SAAD W, et al. Energy-efficient wireless communications with distributed reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(1): 665-679.
- [19] PAN Cunhua, REN Hong, WANG Kezhi, et al. Intelligent reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1719-1734.
- [20] 庞海舰, 陈健锋, 张广驰, 等. 智能反射面辅助的无线信息与能量传输研究综述[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 27-35.
- PANG Haijian, CHEN Jianfeng, ZHANG Guangchi, et al. Survey on intelligent reflecting surface-assisted wireless information transmission and power transfer[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(3): 27-35.
- [21] ALMOHAMAD A, TAHIR A M, AL-KABABJI A, et al. Smart and secure wireless communications via reflecting intelligent surfaces: A short survey[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 1442-1456.
- [22] 王荣, 贾少波, 张迪, 等. 智能反射面辅助的物理层安全技术综述[J]. 移动通信, 2022, 46(6): 52-59.
- WANG Rong, JIA Shaobo, ZHANG Di, et al. A review on intelligent reflecting surface-assisted physical layer security technology[J]. Mobile Communications, 2022, 46(6): 52-59.
- [23] MEI Haibo, YANG Kun, LIU Qiang, et al. 3D-trajectory and phase-shift design for RIS-assisted UAV systems using deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(3): 3020-3029.
- [24] ABOAGYE S, NDJONGUE A R, NGATCHED T M N, et al. RIS-assisted visible light communication systems: A tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 251-288.
- [25] DAS S K, BENKHELIFA F, SUN Yao, et al. Comprehensive review on ML-based RIS-enhanced IoT systems: Basics, research progress and future challenges[J]. Computer Networks, 2023, 224: 109581.
- [26] BJÖRNSEN E, WYMEERSCH H, MATTHIENSEN B, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: A signal processing perspective with wireless applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2022, 39(2): 135-158.
- [27] YOU Changsheng, ZHENG Beixiong, MEI Weidong, et al. How to deploy intelligent reflecting surfaces in wireless network: BS-side, user-side, or both sides?[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2022, 7(1): 1-10.
- [28] ZHENG Beixiong, YOU Changsheng, MEI Weidong, et al. A survey on channel estimation and practical passive beamforming design for intelligent reflecting surface aided wireless communications[J]. IEEE Com-

- munications Surveys & Tutorials, 2022, 24 (2) : 1035-1071.
- [29] YUAN Xiaojun, ZHANG Ying jun, SHI Yuanming, et al. Reconfigurable intelligent-surface empowered wireless communications: Challenges and opportunities[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28 (2): 136-143.
- [30] LIU Yuanwei, LIU Xiao, MU Xidong, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(3): 1546-1577.
- [31] LONG Wenxuan, CHEN Rui, MARCO M, et al. A promising technology for 6G wireless networks: Intelligent reflecting surface[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2021, 6(1): 1-16.
- [32] BJÖRNSON E, ÖZDOĞAN Ö, LARSSON E G. Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 58(12): 90-96.
- [33] GONG Shimin, LU Xiao, HOANG D T, et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2283-2314.
- [34] SENA A S D, CARRILLO D, FANG Fang, et al. What role do intelligent reflecting surfaces play in multi-antenna non-orthogonal multiple access?[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(5): 24-31.
- [35] KISSELEFF S, MARTINS W A, AL-HRAISHAWI H. Reconfigurable intelligent surfaces for smart cities: Research challenges and opportunities[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2020, 1: 1781-1797.
- [36] ELMOSSALLAMY M A, ZHANG Hongliang, SONG Lingyang. Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(3): 990-1002.
- [37] HUANG Chongwen, HU Sha, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27 (5): 118-125.
- [38] WYMEERSCH H, HE Jiguang, DENIS B, et al. Radio localization and mapping with reconfigurable intelligent surfaces: Challenges, opportunities, and research directions[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 52-61.
- [39] DI R M, MEROUANE D, DINH-THUY P H, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable Ai meta-surfaces: An idea whose time has come [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019(1): 1-20.
- [40] LIANG Yingchang, LONG Ruizhe, ZHANG Qianqian, et al. Large intelligent surface/antennas (LISA): Making reflective radios smart[J]. Journal of Communications and Information Networks, 2019, 4 (2) : 40-50.
- [41] LIASKOS C, NIE Shuai, TSIOLIARIDOU A, et al. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 162-169.
- [42] CHENG Qiang, ZHANG Lei, DAI Junyan, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: Simplified-architecture transmitters—from theory to implementations [J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(9): 1266-1289.
- [43] YU Xianghao, XU Dongfang, NG D W K, et al. IRS-assisted green communication systems: Provable convergence and robust optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(9): 6313-6329.
- [44] HE Jinglian, MAO Yijie, ZHOU Yong, et al. Reconfigurable intelligent surfaces empowered green wireless networks with user admission control[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71 (7) : 4062-4078.
- [45] PAN Gaofeng, YE Jia, AN Jianping, et al. Full-duplex enabled intelligent reflecting surface systems: Opportunities and challenges[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(3): 122-129.
- [46] WANG Jinghe, WANG Hanqing, HAN Yu, et al. Joint transmit beamforming and phase shift design for reconfigurable intelligent surface assisted MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(2): 354-368.
- [47] WANG Jinghe, TANG Wankai, HAN Yu, et al. Interplay between RIS and AI in wireless communications: Fundamentals, architectures, applications, and open research problems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(8): 2271-2288.
- [48] NAEEM F, ALI M, KADDOUM G, et al. Security and privacy for reconfigurable intelligent surface in 6G: A review of prospective applications and challenges[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2023, 4: 1196-1217.
- [49] ALMEKHLAFI M, ARFAOUI M A, ASSI C, et al. Enabling URLLC applications through reconfigurable intelligent surfaces: Challenges and potential[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2022, 5 (1) : 130-135.
- [50] WANG Xinyi, FEI Zesong, ZHENG Zhong, et al.

- Joint waveform design and passive beamforming for RIS-assisted dual-functional radar-communication system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(5): 5131-5136.
- [51] YILDIRIM I, UYRUS A, BASAR E. Modeling and analysis of reconfigurable intelligent surfaces for indoor and outdoor applications in future wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(2): 1290-1301.
- [52] CHEN Yuanbin, WANG Ying, ZHANG Jiayi, et al. QoS-driven spectrum sharing for reconfigurable intelligent surfaces (RISs) aided vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(9): 5969-5985.
- [53] LI Jingyi, XU Sai, LIU Jiajia, et al. Reconfigurable intelligent surface enhanced secure aerial-ground communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(9): 6185-6197.
- [54] DAI Yueyue, GUAN Yongliang, LEUNG K K, et al. Reconfigurable intelligent surface for low-latency edge computing in 6G[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(6): 72-79.
- [55] NGUYEN K K, KHOSRAVIRAD S R, DA COSTA D B, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted multi-UAV networks: Efficient resource allocation with deep reinforcement learning[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2022, 16(3): 358-368.
- [56] ZHANG Hongliang, DI Boya, BIAN Kaigui, et al. Toward ubiquitous sensing and localization with reconfigurable intelligent surfaces[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(9): 1401-1422.
- [57] ZHANG Jiayi, DU Hongyang, SUN Qiang, et al. Physical layer security enhancement with reconfigurable intelligent surface-aided networks[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 3480-3495.
- [58] MURSIA P, SCIANCALEPORE V, GARCIA-SAAVEDRA A, et al. RISMA: Reconfigurable intelligent surfaces enabling beamforming for IoT massive access[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(4): 1072-1085.
- [59] HUANG Shanfeng, WANG Shuai, WANG Rui, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted mobile edge computing with heterogeneous learning tasks[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 369-382.
- [60] GERACI G, GARCIA-RODRIGUEZ A, AZARI M M, et al. What will the future of UAV cellular communications be? A flight from 5G to 6G[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(3): 1304-1335.

(编辑: 刘彦东)