



专题：6G 无线传输技术

面向新一代移动通信的智能超表面技术综述

高子路¹, 孙韶辉^{2,3}, 李丽⁴

(1. 北京航空航天大学, 北京 100083; 2. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083;
3. 无线移动通信国家重点实验室(电信科学技术研究院有限公司), 北京 100191;
4. 电信科学技术研究院, 北京 100191)

摘要: 智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)技术是6G的潜在关键技术之一, 具有低成本、低功耗和易部署等特点。通过智能地调控空间中的电磁波, RIS可以辅助构建智能可控的无线电磁环境, 从而为移动通信的发展提供一种新范式。首先, 对RIS的基础原理、主要技术优势和应用场景进行了分析。其次, 对RIS应用于通信传输中的信道估计、波束成形等关键技术进行了探讨, 并给出了相关研究建议。最后, 从硬件实现、算法设计和网络部署3个方面分析了目前RIS技术在实际应用中面临的主要挑战。

关键词: 智能超表面; 6G; 信道估计; 波束成形; 网络部署

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022278

Overview of reconfigurable intelligent surface for new-generation mobile communication

GAO Zilu¹, SUN Shaohui^{2,3}, LI Li⁴

1. Beihang University, Beijing 100083, China

2. CICT Mobile Communications Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Academy of Telecommunications Technology (CATT), Beijing 100191, China

4. China Academy of Telecommunications Technology (CATT), Beijing 100191, China

Abstract: Reconfigurable intelligent surface technology, which features low cost, low energy consumption and easy deployment, is the potential key technology of 6G. By intelligently regulating electromagnetic waves in space, RIS can assist in building an intelligent and controllable wireless electromagnetic environment, thus providing a new paradigm for the development of mobile communications. Firstly, the basic principle, main technology advantages and application scenarios were analyzed. Then, the key technologies such as channel estimation and beamforming in RIS aided communication transmission were discussed, and relevant research suggestions were given. Finally, the main challenges of RIS technology in practical application were analyzed from the aspects of hardware implementation, algorithm design and network deployment.

Key words: reconfigurable intelligent surface, 6G, channel estimation, beamforming, network deployment

专题策划人: 宋令阳, 孙韶辉, 赵军辉, 王东明, 戴凌龙

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-10-10

通信作者: 高子路, gaozilu0421@163.com

0 引言

随着 5G 的大规模商用, 全球已开启对下一代移动通信技术的研究探索。2020 年 2 月, 在瑞士日内瓦召开的第 34 次国际电信联盟工作会议上, 面向 2030 及未来 (6G) 的研究工作正式启动^[1]。相较于 5G, 6G 技术对数据传输速率、连接设备密度、时延等指标有着更高的要求, 而且会将现有的通信场景进行更广泛的扩展, 以实现空地海全覆盖的网络系统, 并实现任意设备之间的信息传输, 即真正进入万物互联时代^[2]。

2021 年 6 月 6 日, IMT-2030 (6G) 推进组正式发布《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书^[3]。其中在支持 6G 通信发展的潜在技术中, 智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 由于其易部署、硬件成本低、功耗低等特点逐渐成为未来通信发展的关键技术之一。

RIS 是一种具有可编程电磁特性的人工电磁表面结构, 由超材料技术发展而来^[4]。其表面上规则地排列了大量的电磁单元, 通过对每个电磁单元施加控制信号, 可以动态地调整电磁单元的电磁性质 (如容抗、阻抗和感抗等), 以完成对空间电磁波的动态调控, 进而智能地调整无线传输信道并重构无线传播环境^[5]。

目前, 学术界和产业界成立了相应的组织和论坛并开展系列的活动, 以加快 RIS 技术朝着商业化和产业化的方向发展。2020 年 6 月, IMT-2030 (6G) 推进组无线技术组成立了“RIS 任务组”^[6]。2021 年 9 月 24 日, 第一届 RIS 技术论坛在北京召开^[7]。2022 年 4 月 7 日, RIS 技术联盟在北京成立。RIS 技术联盟的成立能够有效促进相关技术的研究, 并且推进 RIS 技术在标准化以及产业化等方面工作的开展, 共同打造 RIS 生态^[8]。

为了验证 RIS 技术的可行性, 国内外的研究

机构对基于 RIS 的通信系统开展了一系列的测试验证工作。

国内方面, 中国移动联合东南大学在室外环境下开展了 RIS 测试验证, 测试结果表明, RIS 可使得小区边缘覆盖平均提升 3~4 dB, 边缘用户设备 (user equipment, UE) 的吞吐量提升约 10 倍以上^[9]。中兴通讯联合中国电信完成了业界首个 5G 高频外场的 RIS 测试验证工作, 在距离 5G 高频 (26 GHz 频段) 基站 (base station, BS) 150 m 以上的非视距覆盖盲区或弱区, 利用 RIS 可使得 UE 的接收信号强度提升 12.5 dB^[10]。清华大学制作了包含 256 个 2 bit 离散相位控制单元的 RIS 设备, 该设备在 2.3 GHz 频段可以实现 21.7 dBi 的天线增益, 而在 28.5 GHz 频段的天线增益为 19.1 dBi^[11]。

国外方面, 日本 DoCoMo 公司在 2018 年针对 RIS 开展了世界上首个外场测试工作, 测试结果表明, 在 28 GHz 频段使用 RIS 可以提升 500 Mbit/s 的通信速率^[12]。美国麻省理工学院搭建了工作于 2.4 GHz 非授权频段的测试平台 RFocus, 测试结果表明, 在室内场景中可利用 RIS 提升 2 倍的信道容量^[13]。美国加利福尼亚大学圣地亚哥分校在商用多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO) 无线保真 (wireless fidelity, Wi-Fi) 网络中开展了关于 RIS 的测试工作, 最终测得 RIS 可将 Wi-Fi 范围从 30 m 扩展到 45 m, 并使得接收信号区域的数据速率增加了 1 倍^[14]。

虽然 RIS 在移动通信领域对于性能的提升有显著的效果, 但是在实际的工程应用中仍存在着诸多问题与挑战。本文将从基础原理、主要技术优势、应用场景、关键技术和主要挑战等方面对 RIS 技术进行较全面的总结与探讨。

1 概述

1.1 基础原理

电磁超材料是通过人工合成的方式, 制作成



的具有一定电磁性质并且以周期性结构进行排列的复合材料。其主要有两个基本特征：以人工方式进行合成，并且其电磁性质不取决于材料本身而由其中的人工结构决定^[15]。

RIS 正是基于电磁超材料的技术发展而来，它是一种以人工方式加工或合成的具有特殊电磁性质的二维表面。RIS 硬件架构如图 1 所示，其展示了一种典型的 RIS 硬件架构，包含 3 层底板和一个智能控制器^[16]。最外层底板是介电基板，其上规则地排列了大量的电磁单元，这些电磁单元通常由金属、介质和可调元件构成，其中可调元件可以是变容二极管、正一本征一负（positive-intrinsic-negative, PIN）二极管^[5]等（图 1 展示的电磁单元的可调元件是 PIN 二极管）。通过控制其中可调元件的偏置电压，可以调整电磁单元的电磁性质，进而以可编程的方式更改入射电磁波的电磁参数（如相位、幅度等）^[17]，从而达到对电磁波的智能调控。中间层底板是铜底板，其主要作用是避免信号能量的泄露。最内层底板是一个控制电路板，其主要作用是对每个电磁单元施加控制信号，进而调整每个电磁单元的电磁性质。控制电路板的控制信号由与其相连的智能控制器来触发。在实际应用中，现场可编程门阵列（field programmable gate array, FPGA）可以作为 RIS 的智能控制器^[16]。

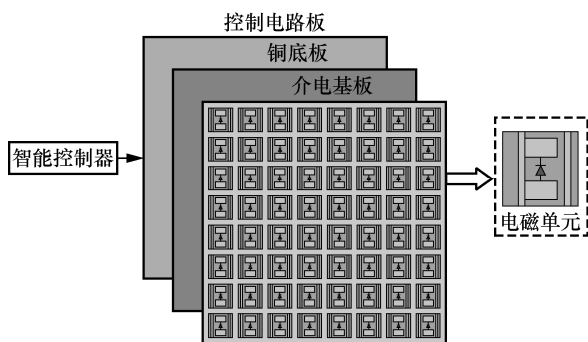


图 1 RIS 硬件架构

目前研究的 RIS 主要通过数字指示信息的方式，完成对入射电磁波的相位调控。利用不

同的数字指示信息对 RIS 的电磁单元进行编码，其中不同的编码状态表示电磁单元的不同相位响应^[18]，从而可以对入射电磁波的相位产生相应的相位偏转。以 1 bit 信息调控为例，此时每个 RIS 的电磁单元可产生 0 和 π 的相位响应，进而对入射电磁波的相位产生 0 或 π 的相位偏转。而在 2 bit 的信息调控中，每个 RIS 的电磁单元可产生 0、 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$ 的相位响应，进而可以对入射电磁波的相位产生 0、 $\pi/2$ 、 π 或 $3\pi/2$ 的相位偏转^[4]。

数字指示信息的编码位数增加，可以使得 RIS 的电磁单元产生更多的相位响应，进而对电磁波的调控也就更加灵活，但是对电磁单元的设计要求也会更高。

1.2 主要技术优势

相较于传统的通信设备，RIS 在硬件成本、功耗等方面均有明显的优势。

（1）硬件成本低

对于传统的相控阵，移相器、功率放大器等器件需要连接到每个天线单元^[19]，以实现模拟域的波束成形。相比之下，RIS 不需要配置大量的移相器、功率放大器等器件，而只是在每个电磁单元中集成了 PIN 二极管或变容二极管等硬件成本较低的器件，通过控制这些器件的偏置电压即可改变每个电磁单元的相位响应，进而实现模拟域的波束成形。因此，相较于传统的相控阵，RIS 的硬件成本相对较低。

（2）功耗低

RIS 上的电磁单元以无源的单元为主，并且其作用主要是对入射信号的相位进行智能调控，而没有对信号进行功率放大的能力。除此之外，相较于传统的通信设备，RIS 没有功耗较大的器件，因此 RIS 在功耗方面有很大的优势。

文献[20]介绍了一种工作频率为 5.8 GHz 且包含 1 100 个电磁单元的 RIS 原型设计，并实际测得该 RIS 的总功耗为 0.934 W。RIS 功耗

细目见表 1，其给出了该 RIS 上每个器件单元的功耗测试结果，可以看出，RIS 上所有器件单元的功耗整体偏低，从而保证了 RIS 有着较低的功耗。

表 1 RIS 功耗细目

器件名称	功耗/W
双向电压转换器	0.013 8
电平调节器	0.918
变容二极管	0.001 76

(3) 易部署

RIS 是一种二维结构的电磁超表面，其面板的厚度比无线电磁波的波长要小很多^[5]，整体较为轻薄，且没有集成大量复杂的硬件设备。因此，其部署的方式相较于传统的通信设备也就更为灵活，可以部署在车辆、建筑物的表面、室内墙壁等。另外，RIS 包含的电磁单元数量可根据实际通信需求进行调整，这就使得其部署的灵活性大大增加。

(4) 不会引入额外时延和热噪声

传统的通信设备在对信号进行接收、处理和发送时，会引入额外的处理时延和热噪声。而 RIS 仅依靠无源电磁单元的物理特性完成对于入射信号的相位调控，而没有信号处理的过程，因此不会引入额外的信号处理时延，也不会引入热噪声。

1.3 应用场景

(1) 空间补盲

在通信场景中，BS 与 UE 之间的直视链路有可能被障碍物阻挡，导致 BS 与 UE 之间无法正常通信，空间补盲示意图如图 2 所示。通过在通信场景中部署 RIS，可以在 BS 和 UE 之间建立新的通信链路，使得 BS 发射的信号通过 RIS 进行中转，从而绕过障碍物到达 UE^[16]。

(2) 边缘覆盖增强与干扰抑制

BS 的发射功率有限，使得处在小区边缘 UE 的接收信号质量较差。尤其在高频段，信号的衰落会更大，就会导致信号传输的距离有限，从而

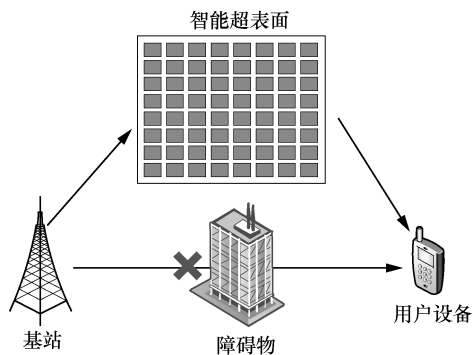


图 2 空间补盲示意图

影响小区边缘 UE 的通信质量。通过在 BS 和 UE 之间部署 RIS，可以对 BS 的发射信号进行接力，除此之外，通过调整 RIS 电磁单元的相位实现波束成形，也有利于信号的增强，从而提升边缘小区 UE 的接收信号质量。边缘覆盖增强示意图如图 3 所示。

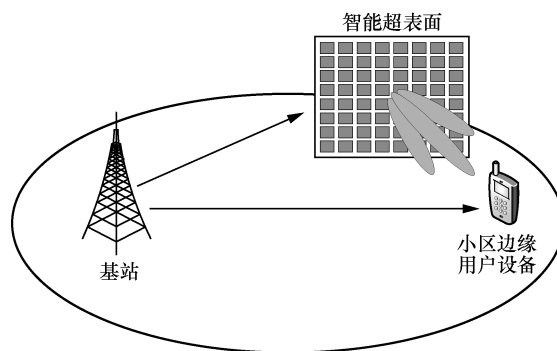


图 3 边缘覆盖增强示意图

另外，当 UE 处于小区边缘时，会受到相邻小区 BS 的干扰^[16]。通过在 UE 和服务该 UE 的 BS 之间部署 RIS，并合理地设计 RIS 的电磁单元的相位，可以实现有用信号的增强和干扰信号的抑制。干扰抑制示意图如图 4 所示。

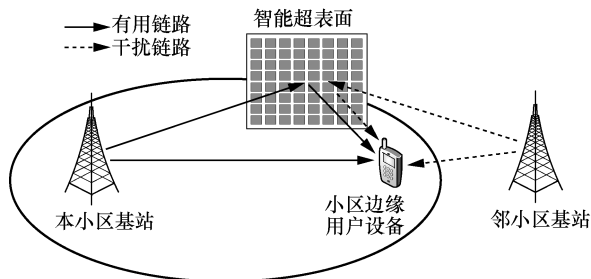


图 4 干扰抑制示意图



(3) 提升系统吞吐量

利用 RIS 低成本、低功耗、易部署的特点，可以实现 RIS 在移动通信网络中的大规模部署，为通信网络增加额外有效的信息传输路径，以提高信号传输的复用增益和接收信号的稳定性，并极大地提升系统的吞吐量。提升系统吞吐量示意图如图 5 所示。

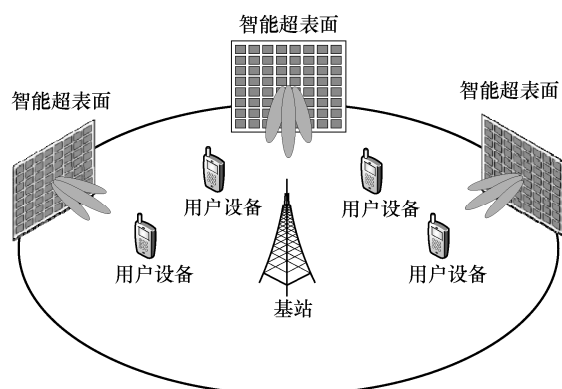


图 5 提升系统吞吐量示意图

(4) 发射机设计

传统的无线发射机包含了大量的功率放大器、混频器和滤波器等硬件设备，会导致很高的功耗和硬件成本^[21]。而 RIS 的硬件成本和功耗都相对较低，并且其阵列相对较大可以带来较高的阵列增益。另外，仅通过改变 RIS 上每个电磁单元的相移即可实现对波束的灵活控制。因此，可以将 RIS 代替传统的相控阵来进行发射机的设计。基于 RIS 的发射机设计示意图如图 6 所示。

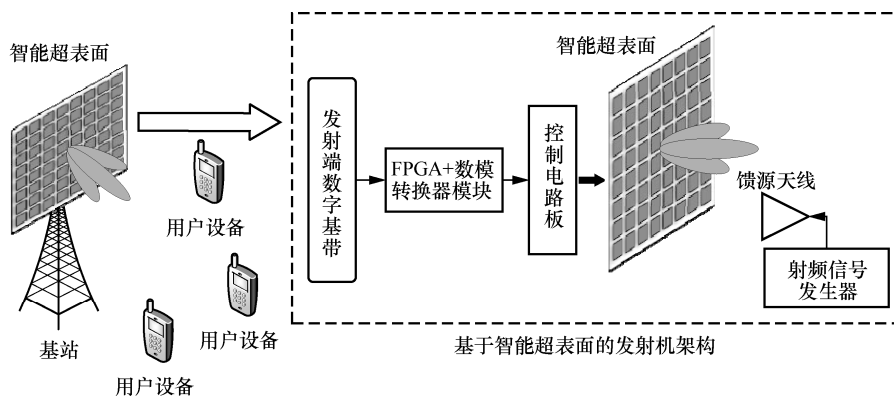


图 6 基于 RIS 的发射机设计示意图

(5) 其他新型应用

在通信场景中，RIS 的引入还会激发一些新的应用，如利用 RIS 辅助定位、无人机通信、车联网通信、无线能量与信息传输等。

- RIS 辅助定位：在传统的通信中，定位的精度往往受 BS 部署的位置、BS 的数量等因素的影响。由于 RIS 部署灵活且功耗相对较低，因此可以在通信场景中的合适位置进行 RIS 的部署，以辅助 BS 进行定位，提高定位的精度^[22]。
- 车联网通信：在车联网通信中，车辆的移动较快，使得车辆之间很难保证有效的通信，通过将 RIS 部署在车辆或建筑物上可以有效提高通信的质量^[23-25]。
- 无人机通信：无人机具有机动性强的特点，往往被用于在目标区域内建立快速而有效的通信链路。为了有效提高通信的质量，可以将 RIS 装载在无人机上以作为低空飞行的中继站，也可以将 RIS 部署在合适的地面或建筑物上，以将发射端的信号反射到无人机上^[26-27]。
- 无线能量与信息传输：电磁波既可以传输信息也可以传输能量，而 RIS 可以实现对电磁波的智能调控，因此可以利用 RIS 进行能量的传输或信息与能量的同时传输，以提高通信的质量^[28]。

在通信场景中, RIS 的引入使得智能调控电磁波成为可能, 这就为信息的传输和处理带来了新的转变, 使得在未来的通信系统中利用 RIS 产生更多新型的应用。

2 关键技术

RIS 的关键技术包括信道建模、信道估计和波束成形等, 这些关键技术的研究决定了 RIS 在通信系统中的应用场景和实现方式等。

2.1 信道建模

过于简单的信道模型, 可能会误导信道估计、波束成形等关键技术的算法设计, 进而影响性能的评估。因此, 在基于 RIS 的通信场景中, 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^[6]。

目前, 基于 RIS 的信道测量与建模考虑了大尺度衰落特性(路径损耗、阴影衰落等)、小尺度衰落特性(多径效应、信道相关性等)、近场与远场的部署差异和 RIS 单元的电磁特性等方面。

文献[29]通过对 RIS 的物理和电磁特性进行研究, 针对远场波束成形场景、近场波束成形场景和近场广播场景建立了 RIS 辅助无线通信系统的自由空间路径损耗模型, 揭示了基于 RIS 的路径损耗模型与发射机/接收机到 RIS 的距离、RIS 单元尺寸、近/远场效应和 RIS 单元辐射模式之间的关系。最后通过实验测量, 验证了该路径损耗模型的有效性。

文献[30]考虑了由 RIS 单元的硬件特性(如插入损耗)而引起的单元反射效率的不同对于路径损耗模型的影响。而且根据 RIS 单元低功耗、低增益的特点, 给出了适合于 RIS 单元的模型。另外考虑到当 RIS 距离发射机和接收机均较远时, 信号在 RIS 上的传播并非绝对的镜面反射, 并通过分析给出了不同频率、不同单元反射效率等情况下入射信号在 RIS 上达到镜面反射所需的 RIS 大小。最后通过仿真, 对所提出的路径损耗模型进行了测试与验证。

文献[31]在基于 RIS 辅助无线通信系统的场

景下, 提出了端到端、电磁兼容、互耦感知和单元幅度与相位响应耦合的电磁通信模型。该模型与传统的通信理论框架具有内在的相容性, 可以用于物理兼容的建模、分析和 RIS 辅助通信的优化。

在文献[32]中, 作者认为在基于各向同性散射环境下的 RIS 辅助无线通信系统中不应该假设独立同分布的瑞利衰落, 并推导了一个与空间相关的瑞利衰落模型, 而且证明了该模型在各向同性散射环境下的有效性。

目前, 关于 RIS 的信道建模的研究大多建立在衍射模型的基础上, 未来可重点从电磁学的角度研究 RIS 单元的电磁特性对于信道建模的影响, 包括电磁单元的互耦特性、极化特性等。另外, 在目前的理论分析中往往将 RIS 单元建模为理想的反射单元, 而实际的单元响应可能受信号的入射角度与出射角度、入射信号的极化方向等因素的影响^[33]。因此, 未来可针对 RIS 单元的信号响应模型开展更多的仿真评估与实际测试。

除了考虑 RIS 单元自身特性对于信道建模的影响, 还可考虑不同频段、不同业务和不同部署场景下关于 RIS 的信道测量与建模, 这对于 RIS 的实际应用有着极大的意义。

2.2 信道估计

在传统的无线通信中, 只存在 BS 和 UE 之间的直视信道, 而 RIS 的引入会在通信场景中增加 BS 与 RIS 之间的信道和 RIS 与 UE 之间的信道, 导致在基于 RIS 的通信场景中, 需要完成上述 3 段信道的估计, 这就增加了信道估计的难度。而且 RIS 的阵列相对较大, 使得 BS-RIS-UE 的级联信道的维度相对较高, 相应地增加了算法设计的复杂度。除此之外, 目前研究的 RIS 大多配备的是无源电磁单元, 没有信号处理的能力, 这就使得信道信息的获取变得更加困难。

文献[34]认为 BS-RIS 信道对于所有 UE 的级联信道而言为公共信道, 因此所有 UE 的级联信道之间存在相关性, 并能够以相关系数进行相互



表示。因此在完成 BS 与某个 UE 的级联信道估计后,只需要估计其他 UE 的级联信道与该 UE 的级联信道之间的相关系数,即可完成剩余 UE 的级联信道的估计,从而减小了算法的复杂度。

文献[35]认为 BS-RIS 信道对于所有 UE 的级联信道而言为公共信道,而在 RIS 或者不同 UE 附近存在一定数量的公共散射体。这就导致在所有 UE 的角度域级联信道中存在公共非零行和一定数量的公共非零列,该性质被称为“双结构稀疏性”,通过利用该性质可以对正交匹配追踪(orthogonal matching pursuit, OMP)算法做进一步改进。最后结果表明,利用该算法可以在减少导频开销的情况下有效地进行信道估计。

文献[36]将信道估计分成初始信道估计和常规信道估计两种情况。在初始信道估计中,BS-RIS 的信道是未知的,首先通过对 RIS 断电的方式进行 BS-UE 信道的估计,然后通过迭代求解不动点方程的方式估计 BS-RIS 信道,最后利用最小二乘(least square, LS)法对 RIS-UE 信道进行估计。在常规信道估计中,由于 BS 和 RIS 的位置相对固定,因此不需要频繁地估计,并假设 BS-RIS 信道已知。可以通过多次改变 RIS 的相位阵来获得多个信道测量方程,从而完成 RIS-UE 信道和 BS-UE 信道的估计。

文献[37]通过矩阵分解和矩阵补全两个阶段来设计算法以完成级联信道的估计。在矩阵分解阶段,利用双线性广义近似消息传递算法来从接收信号中恢复得到 BS-RIS 信道和 RIS-UE 信道与导频信号的乘积矩阵。在矩阵补全阶段,利用黎曼流形梯度的算法从 RIS-UE 信道与导频信号的乘积矩阵中恢复出 RIS-UE 的信道。

文献[38]认为 BS 和 RIS 的位置相对固定,因此 BS-RIS 信道变化缓慢而不需要被频繁地估计。而 UE 处于移动状态,导致 BS-UE 信道和 RIS-UE 信道的变化较快,因此需要被频繁地估计。在进行 BS-RIS 的信道估计时,由 BS 向 RIS 发送下行

导频信号,导频信号经 RIS 反射后再由 BS 接收,然后利用基于坐标下降的算法来恢复 BS-RIS 信道。在得到 BS-RIS 信道的估计结果后,利用 LS 算法即可对 BS-UE 信道和 RIS-UE 信道进行估计。

文献[39]首先介绍了一种无源单元与有源单元混合的 RIS 架构,在该架构中将射频链与有源 RIS 单元相连接以提升信道估计的性能。结合该 RIS 结构,提出了一种基于压缩感知的宽带信道估计方案,方法是采用同步 OMP 算法对多个子载波进行联合信道估计。此外,利用角度时延域的 MIMO 信道矩阵的相关性,提出了一种新型的深度去噪神经网络来进一步提高信道估计的性能。

在目前的信道估计方案设计中,可以考虑利用信道本身的特性(如信道具有稀疏性或信道衰落系数满足某种特定分布方式等)来设计信道估计的方案,并且还可通过设计 RIS 相位、导频序列等来辅助完成信道的估计。不过 RIS 的阵列较大,使得目前的信道估计算法复杂度较高,因此未来应重点关注低复杂度算法设计。另外,为了满足未来 RIS 的泛在部署的需求,可考虑多 RIS 场景下的信道信息获取的问题。

2.3 波束成形

通过调控 RIS 上每个单元的相位,可以使得 RIS 形成特定方向的波束。因此在基于 RIS 的通信系统中,除了收发端的数字预编码设计与模拟波束成形设计,还需要考虑 RIS 的模拟波束成形设计。基于 RIS 通信系统的波束成形设计如图 7 所示。

在基于 RIS 辅助的通信系统中,解决波束成形设计问题一般从最优化的角度出发。主要是通过优化发射端的预编码矩阵、RIS 相位阵和接收端的合并矩阵等参数来使目标函数最优化,常见的目标函数包括系统速率和、信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)、发射端功耗等。如何把优化问题转换成凸优化是波束成形设计的关键问题。

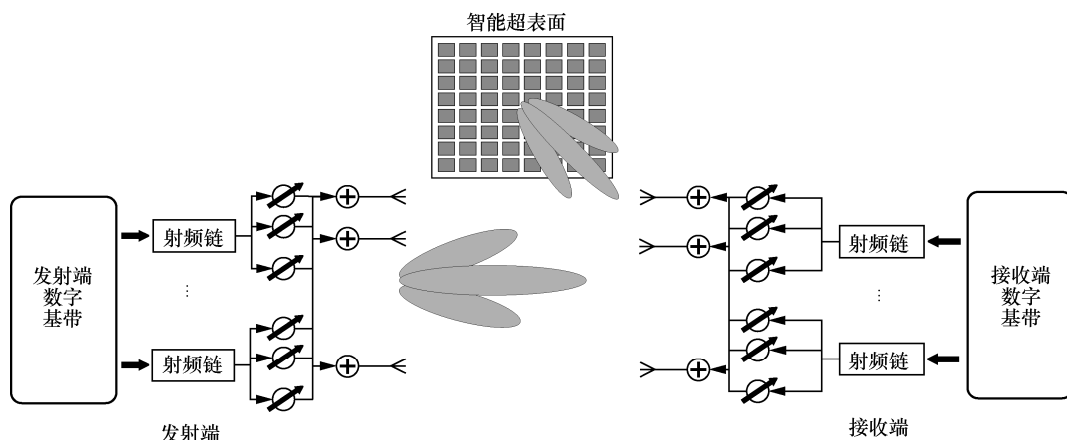


图 7 基于 RIS 通信系统的波束成形设计

文献[40]针对多用户场景下的多输入单输出（multiple input single output, MISO）系统提出了一种混合波束成形方案，该方案通过以系统速率和最大化为目标将优化问题拆分成两个子问题，以分别迭代优化发射端预编码矩阵和 RIS 相位阵。在发射端预编码矩阵的优化子问题中，优化问题被视为功率分配问题，通过获得最优功率分配以得到最优的发射端预编码矩阵。在 RIS 相位阵的优化子问题中，利用外逼近法求解半定规划问题，以获得最优的 RIS 相位阵。

文献[41]采用流形优化的算法解决单用户场景下的 MIMO 系统中的波束成形设计问题，目的是通过联合优化 RIS 相位、BS 和 UE 的混合预编码矩阵与混合合并矩阵来最大化频谱效率。仿真结果表明，该方法可以在较小的信道矩阵条件数下实现较好的性能，并且算法的实现复杂度相对较低。

文献[42]考虑了单用户场景和多用户场景下的 MISO 系统中的波束成形设计问题，目标是通过联合优化发射端预编码和 RIS 相位，最小化发射端的发射功率。在单用户场景中，该优化问题可以被转变成整数线性规划问题，然后可以利用分支界限法获得该问题的最优解，紧接着为了降低复杂度，提出了一种连续细化算法来求得该问题的次优解。另外，可以将该连续细化算法推广到多用户场景中，并考虑在发射端进行次优迫零

线性预编码来提高性能。

文献[43]研究了基于 RIS 的正交频分多址（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）系统下的波束成形设计问题，目标是通过迭代优化发射端的发射功率和 RIS 相位来使得所有子载波的系统速率和最大化。其中，发射端的最优功率分配采用的是注水算法，而最优 RIS 相位是通过流形优化的方法来对分式规划问题进行求解而得到的。

文献[44]考虑了完美信道状态信息和非完美信道状态信息的情况下，RIS 辅助多用户的 MISO 通信场景下的波束成形设计问题，目标是通过联合设计发射端波束成形和 RIS 相位来使得所有用户的加权和速率和最大化。在完美信道状态信息的设置下，利用分式规划的方法将优化问题分解成多个不相交的块，并基于块坐标下降的方法来对该问题进行求解。另外，可将该方法扩展至非完美信道状态信息的情况，并利用随机连续凸逼近的方法来对该问题进行求解。

由于 RIS 包含了大量的电磁单元，计算每个 RIS 单元的反射系数以获得最优波束往往具有较高的复杂度。因此，在波束成形方案的设计中，需要权衡性能与算法复杂度之间的关系。另外，目前大多考虑的是单 RIS 场景下的波束成形设计，而为了实现系统容量的提升，未来必然会考



虑 RIS 的大规模部署, 因此多 RIS 场景下的波束成形设计也会是未来研究的主要问题之一。

2.4 定位

在传统的基于蜂窝网络的无线定位中, 定位的精度往往受基站部署位置以及部署数量的限制。而 RIS 具有硬件成本低、易部署的特点, 因此可以将其灵活地布置在基站服务范围内部, 以辅助基站进行定位。另外, 由于 RIS 上配备了大量的电磁单元并且具有智能调控电磁波的特点, 因此可以提升其对信号的空间分辨率, 以及减弱多径信号对定位误差的影响, 最终提升定位的精度。

文献[45]推导出了 UE 相较于 RIS 的不同位置的费雪信息矩阵和克拉美罗 (Cramér-Rao, CR) 下界, 并分析了 RIS 相位的不确定对于 CR 下界的影响。另外, 还研究了不同的 RIS 部署方式对于 CR 下界的影响。结果表明, 在总面积相同的情况下, 多个 RIS 的分布式部署相较于单个 RIS 的集中式部署更有利于定位精度的提升。

文献[46]考虑的是利用最优化的方法提升室内场景下多用户定位的精度问题。具体方法是, 利用路径损耗、用户实际所处位置与被估计位置的距离、用户位于不同位置处的先验概率等参数构造出定位损失函数, 然后利用全局下降算法对 RIS 相位进行优化, 以得到使得目标损失函数最小时的 RIS 相位, 从而提高利用接收信号强度进行定位时的精度。结果表明, 相较于现有的方法, 该方法能明显减小定位的误差。

文献[47]考虑的是发射端与接收端的直视链路被阻挡, 而利用 RIS 辅助 MIMO 系统进行精确定位和高数据速率传输的问题。首先, 基于分层码本来分别设计 RIS 相位和接收端的合并矩阵, 然后利用挑选的码字和接收的信号对 RIS 至接收端信道的发射角、到达角和到达时间进行估计, 最后利用这些被估计的参数可以计算出接收端相对于 RIS 的坐标和方向, 从而达到对接收端进行定位的目的。

文献[48]研究了 OFDM 系统中近场的非视距 (non-line of sight, NLOS) 场景下, RIS 辅助 BS 进行 UE 定位的问题。首先通过设计 RIS 相位序列为离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 指数序列或二进制哈达玛序列, 实现接收信号中直视信道分量与级联信道分量的拆分, 并且可以减小之后的信号到达时间 (time of arrival, TOA) 估计的误差。之后, 进行第一到达路径的 TOA 的估计, 并根据估计值进行到达时间差 (time difference of arrival, TDOA) 的计算, 以抵消非同步系统中初始时刻的影响。最后再根据线性 LS 算法完成对 UE 位置的估计。结果表明, 该方法即使在 RIS 受阻塞的情况下, 也能达到较好的定位精度。

由于 RIS 大多配备的是无源电磁单元, 不具备信号处理的能力, 因此基站对于 RIS 的精确控制对于 RIS 辅助定位的效果有很大的影响。另外, 在 RIS 辅助定位的方案设计中, 还需考虑 RIS 的部署方式、与基站的时间同步匹配等问题。

目前, 关于 RIS 辅助定位的研究主要针对的是静态、低速移动的场景, 未来可考虑高速移动场景下的 RIS 辅助定位的方案设计。

2.5 无线能量与信息传输

随着通信业务的增加以及数据传输速率的增长, 未来通信网络中会存在大量的通信设备以满足相应的通信需求。为了保证通信的可靠性, 不仅要保证对于通信设备的有效数据传输, 还要保证对于通信设备的有效能量供应。

目前, 通过射频传输实现有效的能量传输, 在工程上得到了有效的应用。但是受路径损耗、阴影衰落和多径衰落的影响, 尤其是当发射机与接收机的距离较远时, 其能量效率通常较低。由于 RIS 可以智能地调控电磁波, 因此利用 RIS 可以辅助能量的传输甚至信息与能量的同传, 以提高通信的质量^[28]。

目前基于 RIS 的无线能量与信息的传输主要包含 3 个系统方案,分别为无线能量传输(wireless energy transmission, WET)、无线携能通信(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)和无线能量通信网络(wireless powered communication network, WPCN)^[28]。

在 WET 方案中,发射端传输能量信号给接收端,而 RIS 可以作为中继来辅助能量信号的传输。无线能量传输示意图如图 8 所示。

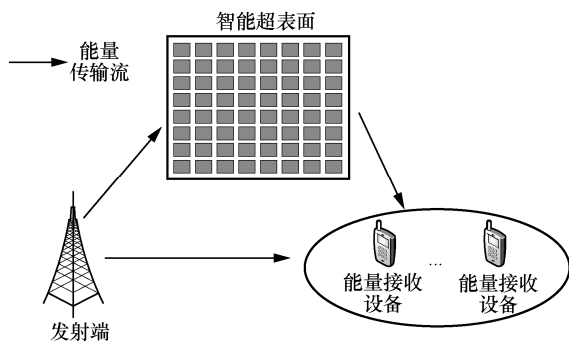


图 8 无线能量传输示意图

在 SWIPT 方案中,发射端既可以发送信息信号给信息接收设备,也可以发送能量信号给能量接收设备,而 RIS 作为中继来同时辅助信息信号与能量信号的传输。无线携能通信示意图如图 9 所示。

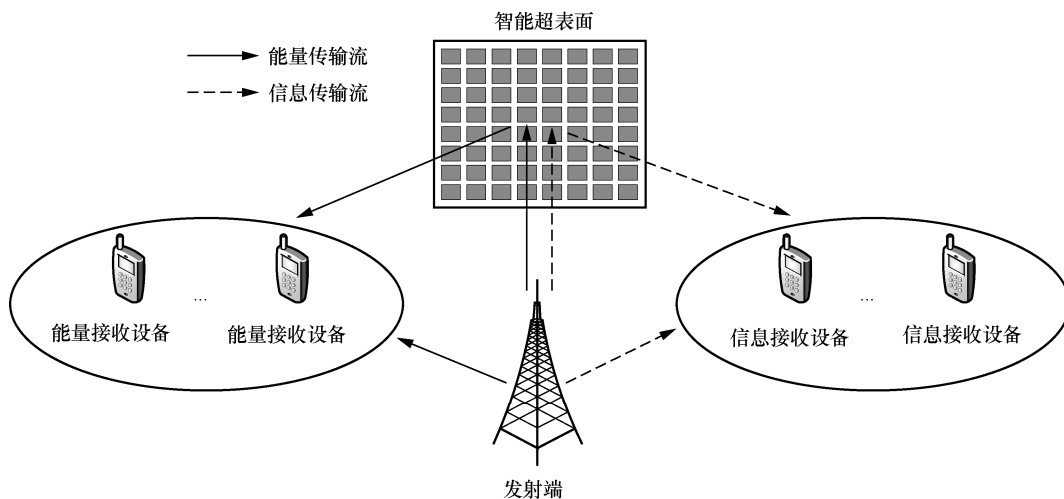


图 9 无线携能通信示意图

在 WPCN 中,发射端首先发送能量信号给接收设备,之后接收设备利用接收到的能量将信息信号传输给发射端。在该方案中,接收设备同时具备信息信号接收和能量信号接收的功能,并且信息信号的传输与能量信号的传输是在不同的链路中进行。无线能量通信网络示意图如图 10 所示。

目前,为了解决基于 RIS 通信场景下的无线能量与信息传输的问题,主要是利用最优化的方法。通过优化发射端的波束成形向量、RIS 相位、功率分配等参数来使得目标函数最优化,常见的目标函数包括系统吞吐量、能量接收设备的接收功率等。

文献[49]考虑了 WPCN 中, RIS 辅助用户的协作传输问题。目标是通过利用半定松弛规划方法,对能量信号与信息信号的传输时间、分配的功率以及 RIS 相位进行联合优化,以最大化系统的吞吐量。仿真结果表明,在 WPCN 中使用 RIS 辅助用户的协作传输,可以有效提高系统的吞吐量。

文献[50]考虑的是 RIS 辅助多用户 MISO 通信场景下的 SWIPT 系统。目标是在所有信息接收用户的 SINR 和发射端最大发射功率的约束下,利用半定松弛规划方法迭代优化发射端的有源信息波束成形向量、能量信号的协方差矩阵和 RIS 相位,

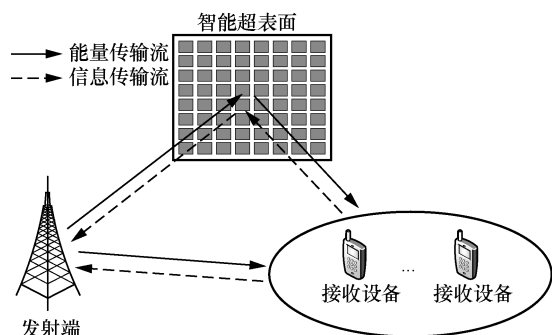


图 10 无线能量通信网络示意图

以最大限度地提高所有能量信号接收用户的最小接收功率。数值结果表明，与未部署 RIS、发射端未采用能量信号波束成形等的基准方案相比，本文所提出的 RIS 辅助多用户的 SWIPT 系统有显著的性能提升。

文献[51]考虑的是 RIS 辅助多用户 MISO 通信场景下的 SWIPT 系统。目标是通过联合优化发射端的波束成形向量和 RIS 相位，以最大限度地提高能量接收用户的最大加权功率和。仿真结果表明，通过部署 RIS 来辅助 SWIPT 系统可以显著提高性能增益。此外，最后验证表明在该系统中如果对发射端的能量信号做波束成形，不仅会消耗发射端的发射功率，还会对信息信号的接收用户产生干扰，由此带来性能上的损失。

由于无线能量与信息传输的问题，既包含了信息信号的传输，还包含了能量信号的传输，因此相较于传统场景下的传输方案设计，还需要考虑两种信号的时间分配、功率分配和不同信号间的干扰等问题，以在信息传输速率和收集的能量

之间达到平衡。

目前主要是针对传统通信场景下的无线能量与信息传输问题进行方案设计，未来还可考虑车联网通信、无人机通信等新型应用场景下的传输方案设计问题。

2.6 发射机与接收机设计

RIS 分为反射式和透射式两种类型^[21]。对于反射型 RIS，入射电磁波经过 RIS 单元的调控后转换为反射电磁波辐射出去；对于透射型 RIS，入射电磁波经过 RIS 单元的调控后会透过 RIS 转换为透射电磁波向外辐射。利用 RIS 对于电磁波的智能调控能力，可以将反射型 RIS 和透射型 RIS 应用于发射机与接收机的设计中，以降低硬件成本和功耗。反射型 RIS 与透射型 RIS 如图 11 所示。

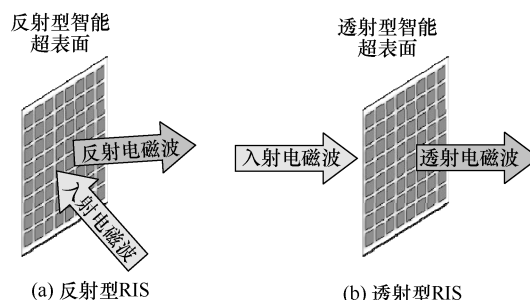


图 11 反射型 RIS 与透射型 RIS

基于反射型 RIS 的发射机设计如图 12 所示^[52]，在该发射机中使用 RIS 代替传统的相控阵以完成信号的直接调制和发射。其中，射频信号发生器产生单音载波信号，并经过馈源天线照射在 RIS

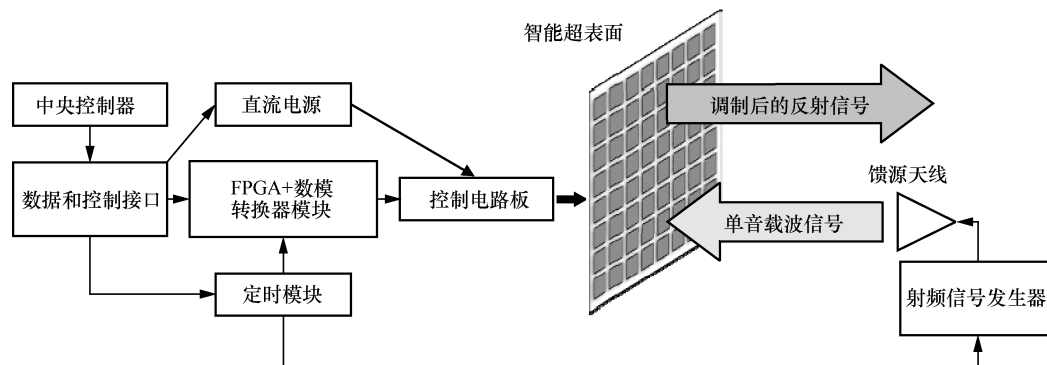


图 12 基于反射型 RIS 的发射机设计

上, 然后通过发射端数字基带产生的控制信号调节 RIS 单元的反射系数, 从而完成对入射电磁波的调控^[21]。

在图 12 展示的基于反射型 RIS 的发射机设计中, 每个模块的功能如下。

- 中央控制器: 中央控制器为整个系统提供了可编程环境, 生成了系统中的信息数据流、帧结构等, 并对其他模块进行必要的控制。
- 数据和控制接口: 作为中央控制器和其他模块的接口, 实现了中央控制器对其他模块的控制, 提供了必要的数据交换。
- FPGA+数模转换器模块: 实现了 RIS 相位数字控制序列的采样率调控, 并将数字控制序列转换为模拟电压信号序列, 作为控制电路板的输入信号。
- 控制电路板: 控制电路板将输入的模拟电压信号进行放大, 然后将其分配到 RIS 上的每个电磁单元以调节所有 RIS 单元的反射系数。
- 直流电源: 为控制电路板上的电压放大电路提供电压源。
- 定时模块: 为 FPGA+数模转换器模块和射频信号发生器提供相同的参考时钟。
- 馈源天线与射频信号发生器: 射频信号发生器产生单音载波信号, 并经过馈源天线

照射在 RIS 上。

在基于反射型 RIS 的发射机设计中, 基带模块可以直接连接到 RIS 的电磁单元上, 而不需要常规的射频链路^[52]。另外, 相较于传统的相控阵, 基于反射型 RIS 的发射机仅需要在射频信号发射器中配置一个窄带功率放大器来控制单音载波信号的功率, 而不需要配置大量的功率放大器。因此, 相较于传统的相控阵, 基于反射型 RIS 的发射机避免了大量的功率放大器、移相器和滤波器等硬件的使用, 从而显著降低了硬件成本和复杂度。

目前, 针对基于 RIS 的发射机设计已有大量的研究和验证工作, 包括基于 RIS 的二进制频移键控 (binary frequency shift keying, BFSK) 发射机设计^[53]、基于 RIS 的正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK) 发射机设计^[54]、基于 RIS 的 8 相移键控 (8 phase shift keying, 8PSK) 发射机设计^[55]、基于 RIS 的正交振幅调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 的发射机设计 (包含 16QAM 和 256QAM)^[52,56]以及基于双极化 RIS 的发射机设计^[57]等。

基于透射型 RIS 的接收机设计如图 13 所示, 在该接收机中通过设置 RIS 上所有单元的相位随时间线性变化, 并保持幅度不变, 从而可以实现电磁波在穿过 RIS 后频率的下降。由于高频电磁波在经过 RIS 后变成了低频电磁波, 从而使得接

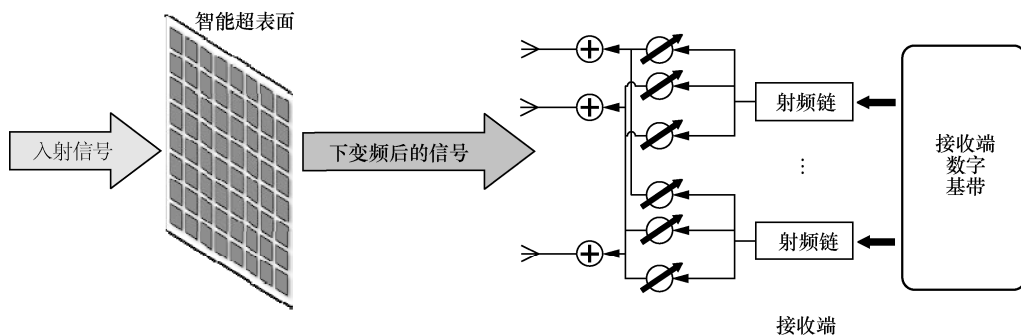


图 13 基于透射型 RIS 的接收机设计



收机上的滤波器、混频器和本地振荡器等硬件只需在相对较低的频率上工作，由此节省了硬件成本并降低了功耗^[21]。

3 主要挑战

RIS 作为一项全新的技术，在给移动通信的发展提供新的网络范式的同时，也同样面临诸多的困难与挑战，包括硬件实现、算法设计和网络部署等。

3.1 硬件实现

从硬件实现的角度，关于 RIS 的单元结构设计、材料选择等方面还面临着很多问题。例如，单元的密集排列会造成单元之间的耦合，这将极大地影响对于电磁波调控的性能；由于单元结构的局限性，目前 RIS 单元支持的量化级数相对较低，因此未来需要考虑更优的单元结构设计以支持更多的量化级数；未来频谱将扩展至更高频段，对 RIS 的单元结构设计、控制电路设计和材料选择等的要求也会更高。

3.2 算法设计

在基于 RIS 的通信场景中，针对相应的关键技术开展了众多算法设计的研究。但是，RIS 往往配备了大量的电磁单元，导致目前算法设计的复杂度较高。另外，RIS 通常配备的是无源电磁单元，不具备信号处理的能力，所以需要考虑算法设计的实际应用问题。而且，未来 RIS 应用的场景会更多（如高速场景、分布式场景等），需要开展针对于不同场景的高效算法设计。因此，在 RIS 辅助通信的算法设计中，需要考虑复杂度、实际应用场景等问题。

3.3 网络部署

RIS 作为一项全新的技术，其未来在通信网络中的泛在部署依然会面临很多问题。例如，在通信网络中存在众多的业务与系统，因此在通信网络中部署 RIS 时需要考虑与多个系统的共存问题；在高密度区域，密集部署 RIS 需要考虑 RIS

间的协同以及 RIS 间的信号干扰等问题；不同的场景需要不同的部署策略，可以根据实际通信需求进行 RIS 的相应部署^[58]，并且需要考虑 RIS 的部署位置、密度和部署成本与性能的平衡等。

4 结束语

RIS 可以智能地调控电磁波，以形成智能可重构的无线环境，因此给未来移动通信的发展提供了一种新范式。而且 RIS 可以实现空间补盲、边缘覆盖增强和抑制邻小区干扰等功能，并且可以与多技术融合以产生更多新的应用，因此成为 6G 的关键技术之一。但是将 RIS 服务于未来的实际应用依然存在很多问题，包括硬件实现、算法设计和网络部署等。因此，还需要开展更多的关键技术评估和实际测试，以加快 RIS 的商用和标准化进程。

参考文献：

- [1] 中国信息通信研究院. 国际电信联盟 (ITU) 启动 6G 研究工作[EB]. 2020.
CAICT. International Telecommunication Union (ITU) launches 6G research work[EB]. 2020.
- [2] 广东省新一代通信与网络创新研究院, 清华大学, 北京邮电大学, 等. 6G 无线热点技术研究白皮书[R]. 2020.
Guangdong Communications & Networks Institute, Tsinghua University, Beijing University of Posts & Telecommunications, et al. 6G wireless hotspot technology research white paper[R]. 2020.
- [3] IMT-2030 推进组. IMT-2030 (6G) 推进组正式发布《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书[EB]. 2021.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. IMT-2030 (6G) Promotion Group officially released the white paper "6G overall vision and potential key technologies"[EB]. 2021.
- [4] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): 1-9.
- [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] 马红兵, 张平, 杨帆, 等. 智能超表面技术展望与思考[J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 70-77.
MA H B, ZHANG P, YANG F, et al. Reflections on reconfigurable intelligent surface technology[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(3): 70-77.
- [7] 移动通信网. 中兴通讯、东南大学、中国联通联合承办第一届智能超表面技术论坛[EB]. 2021.
MSCBSC.com. ZTE, Southeast University and China Unicom jointly organized the first Reconfigurable Intelligent Surfaces Technology Forum[EB]. 2021.
- [8] STDAILY. 智能超表面技术联盟在京成立[EB]. 2022.
STDAILY. Reconfigurable intelligent surface technology alliance was established in Beijing [EB]. 2022.
- [9] 中国移动通信有限公司研究院. 中国移动联合崔铁军院士团队完成 6G 智能超表面技术试验[EB]. 2021.
Research Institute of China Mobile Communications Co., Ltd.. China Mobile cooperated with Academician Cui Tiejun's team to complete the 6G reconfigurable intelligent surface technology test[EB]. 2021.
- [10] C114 通信网. 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]. 2021.
C114.com. ZTE and China Telecom completed the industry's first reconfigurable intelligent surface technology verification test in 5G high-frequency outfield[EB]. 2021.
- [11] DAI L L, WANG B C, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results[J]. IEEE Access, 2020(8): 45913-45923.
- [12] SRRC. NTT DoCoMo, Metawave test 5G mobile system in Tokyo[EB]. 2018.
- [13] ARUN V, BALAKRISHNAN H. RFocus: practical beamforming for small devices[EB]. 2019.
- [14] 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. New York: ACM Press, 2020.
- [15] 梅中磊, 张黎, 崔铁军. 电磁超材料研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 27-39.
MEI Z L, ZHANG L, CUI T J. Recent advances on metamaterials[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18): 27-39.
- [16] WU Q Q, ZHANG R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 106-112.
- [17] 周儒雅, 唐万恺, 李潇, 等. 基于可重构智能表面的移动通信简要综述[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 63-69.
ZHOU R Y, TANG W K, LI X, et al. A brief survey of mobile communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 63-69.
- [18] 程强, 戴俊彦, 柯俊臣, 等. 智能超表面在波束及信息调控中的应用[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 30-37.
CHENG Q, DAI J Y, KE J C, et al. Application of reconfigurable intelligent surface in beamforming and information modulation[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 30-37.
- [19] HEATH R W, GONZÁLEZ-PRELCIC N, RANGAN S, et al. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2016, 10(3): 436-453.
- [20] PEI X L, YIN H F, TAN L, et al. RIS-aided wireless communications: prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(12): 8627-8640.
- [21] 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.
- [22] WYMEERSCH H, HE J G, 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.
- [23] AI Y, DEFIGUEIREDO F A P, KONG L, et al. Secure vehicular communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(7): 7272-7276.
- [24] AL-HILO A, SAMIR M, ELHATTAB M, et al. Reconfigurable intelligent surface enabled vehicular communication: joint user scheduling and passive beamforming[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(3): 2333-2345.
- [25] MAKARFI A U, RABIE K M, KAIWARTYA O, et al. Physical layer security in vehicular networks with reconfigurable intelligent surfaces[C]//Proceedings of 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [26] LI S X, DUO B, YUAN X J, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted UAV communication: joint trajectory design and passive beamforming[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 716-720.
- [27] ZHANG Q Q, SAAD W, BENNIS M. Reflections in the sky: millimeter wave communication with UAV-carried intelligent reflectors[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [28] WU Q Q, GUAN X R, ZHANG R. Intelligent reflecting surface-aided wireless energy and information transmission: an overview[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(1): 150-170.



- [29] 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.
- [30] ELLINGSON S W. Path loss in reconfigurable intelligent surface-enabled channels[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 829-835.
- [31] GRADONI G, DI RENZO M. End-to-end mutual coupling aware communication model for reconfigurable intelligent surfaces: an electromagnetic-compliant approach based on mutual impedances[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(5): 938-942.
- [32] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L. Rayleigh fading modeling and channel hardening for reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(4): 830-834.
- [33] 杨坤, 姜大洁, 秦飞. 面向 6G 的智能表面技术综述[J]. *移动通信*, 2020, 44(6): 70-74, 81.
YANG K, JIANG D J, QIN F. Overview of the intelligent surface for 6G communications[J]. *Mobile Communications*, 2020, 44(6): 70-74, 81.
- [34] WANG Z R, LIU L, CUI S G. Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted multiuser communications[C]//*Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [35] 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.
- [36] ZHANG J M, QI C H, LI P, et al. Channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided massive MIMO system[C]//*Proceedings of 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] LIU S C, GAO Z, ZHANG J, et al. Deep denoising neural network assisted compressive channel estimation for mmWave intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(8): 9223-9228.
- [40] DI B Y, ZHANG H L, SONG L Y, et al. Hybrid beamforming for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications: achievable rates with limited discrete phase shifts[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1809-1822.
- [41] WANG P L, FANG J, DAI L L, et al. Joint transceiver and large intelligent surface design for massive MIMO mmWave systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(2): 1052-1064.
- [42] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1838-1851.
- [43] FENG K M, CHEN Y J, HAN Y, et al. Passive beamforming design for reconfigurable intelligent surface-aided OFDM: a fractional programming based approach[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [44] GUO H Y, LIANG Y C, CHEN J, et al. Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 3064-3076.
- [45] HU S, RUSEK F, EDFORS O. Beyond massive MIMO: the potential of positioning with large intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2018, 66(7): 1761-1774.
- [46] ZHANG H B, ZHANG H L, DI B Y, et al. MetaLocalization: reconfigurable intelligent surface aided multi-user wireless indoor localization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(12): 7743-7757.
- [47] HE J G, WYMEERSCH H, SANGUANPUAK T, et al. Adaptive beamforming design for mmWave RIS-aided joint localization and communication[C]//*Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [48] DARDARI D, DECARLI N, GUERRA A, et al. Localization in NLOS conditions using large reconfigurable intelligent surfaces[C]//*Proceedings of 2021 IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 551-555.
- [49] ZHENG Y, BI S Z, ZHANG Y J, et al. Intelligent reflecting surface enhanced user cooperation in wireless powered communication networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 901-905.
- [50] TANG Y Z, MA G G, XIE H L, et al. Joint transmit and reflective beamforming design for IRS-assisted multiuser MISO SWIPT systems[C]//*Proceedings of ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.

- [51] WU Q Q, ZHANG R. Weighted sum power maximization for intelligent reflecting surface aided SWIPT[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 586-590.
- [52] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: system design, analysis, and implementation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(11): 2683-2699.
- [53] ZHAO J, YANG X, DAI J Y, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems[J]. National Science Review, 2019, 6(2): 231-238.
- [54] TANG W K, LI X, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: Transceiver design and experimental results[J]. China Communications, 2019, 16(5): 46-61.
- [55] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter[J]. Electronics Letters, 2019, 55(7): 417-420.
- [56] CHEN M Z, TANG W K, DAI J Y, et al. Accurate and broadband manipulations of harmonic amplitudes and phases to reach 256 QAM millimeter-wave wireless communications by time-domain digital coding metasurface[J]. National Science Review, 2022, 9(1): nwab134.
- [57] CHEN X Y, KE J C, TANG W K, et al. Design and implementation of MIMO transmission based on dual-polarized reconfigurable intelligent surface[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(10): 2155-2159.
- [58] 赵亚军, 菅梦楠. 6G 智能超表面技术应用与挑战[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 679-691.

ZHAO Y J, JIAN M N. Applications and challenges of reconfigurable intelligent surface for 6G networks[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(6): 679-691.

[作者简介]



高子路 (1995-), 男, 北京航空航天大学博士生, 主要研究方向为大规模天线技术、智能超表面技术。



孙韶辉 (1972-), 男, 博士, 中信科移动通信技术股份有限公司副总经理, 无线移动通信国家重点实验室 (电信科学技术研究院有限公司) 高级研究人员、正高级工程师, 长期从事移动通信新技术研究与标准制定工作, 主要研究方向包括移动通信系统设计及多天线技术、卫星通信和定位等。



李丽 (1985-), 女, 电信科学技术研究院学历教育部主任, 长期从事信息与通信工程、通信与信息系统、电子科学与技术等领域的硕士、博士联合培养工作。