

# 2021年可重构智能超表面技术热点回眸

司黎明<sup>1,2</sup>, 汤鹏程<sup>1,2</sup>, 董琳<sup>1,2</sup>, 徐浩阳<sup>1,2</sup>, 吕昕<sup>1,2</sup>

1. 北京理工大学集成电路与电子学院, 北京 100081

2. 毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室, 北京 100081

**摘要** 2021年是可重构智能超表面技术井喷的一年。作为未来无线网络研究中可能出现的新兴范式,可重构智能超表面有望通过软件编程的方式实现对电磁波的灵活操控,从而构建智能无线环境。盘点了2021年可重构智能超表面技术研究的关键热点,围绕其与通信前沿技术的融合,简述了其多输入多输出技术、非正交多址技术、移动边缘计算技术和无人机技术的融合方面的进展。

**关键词** 可重构智能超表面;多输入多输出;非正交多址;移动边缘计算;无人机通信

电磁超材料是指基于电磁学理论,人工设计的微结构,具备自然界材料不具备的特殊特性。其往往由周期排列的亚波长超材料单元构成,单元个体相当于自然材料的“分子/原子”。通过对“分子/原子”结构和排列方式的调整,超材料对应的等效介电常数和磁导率会发生变化,进而能够实现各种奇妙的物理现象,例如负折射、电磁黑洞和幻觉光学等。

传统三维结构的超材料设计困难,制作工艺复杂。随着对超材料的深入研究,超表面结构的概念在2010年左右被提出<sup>[1]</sup>。超表面(图1)是一种二维形式的超材料,具备轻薄、占用空间小、集成度高等优点。

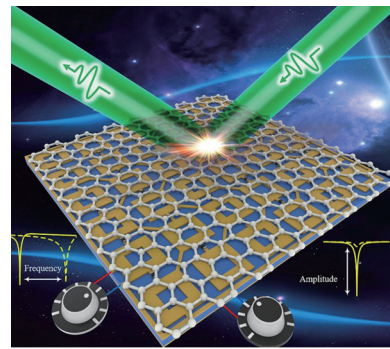


图1 超表面

超表面的形式一旦确定,功能就被确定,不能实现实时可调的效果。近年来,可编程超材料技术的出现,为无线网络中电磁信号的实时调控创造了

收稿日期:2021-12-29;修回日期:2022-01-05

基金项目:国家重点基础研究项目(2019-JCJQ-349);国家重点研发计划项目(2018YFF0212103);国家自然科学基金项目(61527805);高等学校学科科研创新引智计划项目(B14010);北京理工大学国际合作项目(BITBLR2020014)

作者简介:司黎明,副教授,研究方向为电磁场与微波技术,电子信箱:lms@bit.edu.cn

引用格式:司黎明,汤鹏程,董琳,等. 2021年可重构智能超表面技术热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(1): 175-183; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.01.012

可能。东南大学崔铁军团队<sup>[2]</sup>在2014年首次提出基于可编程技术的超表面,并进行了实验验证。通过对表面中每个单元的相位、幅度或极化等电磁特性的单独控制,可以实现以编程的方式调控电磁波的效果,为物理电磁世界和信息科学世界之间的连接提供了接口。

可重构智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)在可编程超表面发展的基础上应运而生(图2)<sup>[3]</sup>。RIS通常由3层面板和控制单元组成,外层包含大量的周期性重复超表面单元,可以对入射的电磁波信号进行直接作用,与传统超表面的区别在于引入了大量的可调器件(例如二极管)。中间层为金属隔离板,内层为控制电路,外加控制器,例如现场可编程器件(FPGA)。

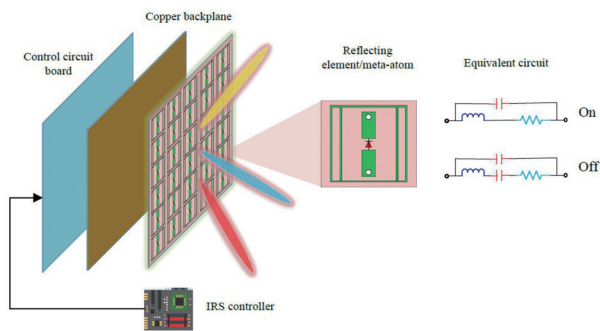


图2 可重构智能超表面

虽然受到新型冠状病毒肺炎疫情的影响,研究者们对于RIS的研究热情却未削减,在探究RIS的应用潜能方面做出很多努力(图3<sup>[4]</sup>),使得2021年成为RIS技术井喷的一年。随着第五代移动通信系统(5G)的广泛部署,现在正是为第六代通信系统(6G)开发使能技术的关键时刻。6G通信必将在传输容量、可靠性、安全性、覆盖范围、能耗等方面达到更高的标准。现有的5G技术,如毫米波通信、大规模多输入多输出、超密集异构网络等,主要以调整发射端和接收端的系统设计以应对不利的无线传播环境作为主要思路。由于RIS具备配置无线传播环境的能力,有望成为一种新兴范式。将其运用于通信系统,能够调整或改进现有的通信理念,从而有望满足6G通信的严格要求。本文将围绕RIS与通信前沿技术的融合,包括与多输入多输

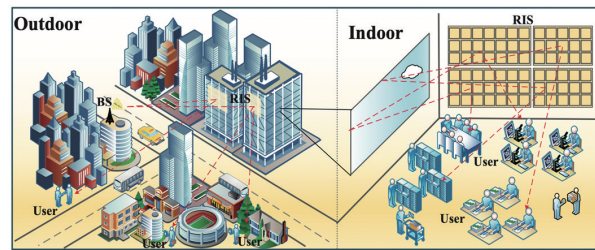


图3 RIS的应用场景

出技术、非正交多址技术、移动边缘计算技术和无人机技术的融合进行概述,并展望其未来发展。

## 1 RIS与MIMO的融合

无线通信中,信号常常被周围的环境反射、散射和折射,从而产生大量的多径干扰,严重影响通信质量。多输入多输出(multiple in multiple out, MIMO)技术通过在发送端和接收端配置多根天线,定义了空间中多个独立信道,可以在不增加带宽的情况下,成倍地提高通信系统的容量和频谱利用率,从而有效降低多径效应的影响。MIMO技术在近年得到快速发展,大规模MIMO有望成为6G通信的关键技术<sup>[5]</sup>。

将RIS应用到MIMO中能够进一步提高通信系统性能<sup>[6]</sup>。如图4<sup>[7]</sup>所示,Khaleel等<sup>[7]</sup>将RIS集成到基于VBLAST和 Alamouti 编码的2组经典MIMO系统中。通过RIS完成对电磁波信号的中继和传

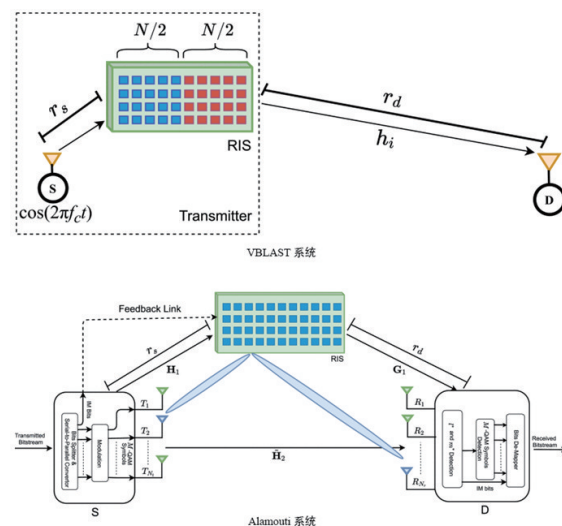


图4 RIS辅助的MIMO系统

输相位调控, VBLAST系统的频谱效率提高了50%。由64单元RIS与单个射频发生器构成发射端, 代替原来的2组射频链, Alamouti系统的复杂度降低, 误码性能提高10 dB。提高通信系统频谱效率的同时, 能量效率也需要得到保证。为了平衡二者关系, 东南大学高西奇团队<sup>[8]</sup>利用迭代均方误差最小化算法, 对用户终端设备发射预编码和RIS反射波束进行联合优化, 使得RIS辅助的MIMO系统上行链路的资源效率(评估频谱效率和能量效率之间平衡关系的指标)得到提高。

为探究RIS的阵面大小对MIMO系统性能的影响, Qian等<sup>[9]</sup>对RIS辅助的MIMO系统的信噪比分布特性进行了研究, 证明了大尺寸的RIS可以有效降低无线信道信噪比的衰落, 如图5所示。但是在实际的应用场景中, RIS受限于空间大小, 阵面不能做到无限大。如何使得较小的RIS阵面发挥出最大性能成为一个值得思考的问题。Perovic等<sup>[10]</sup>对此展开研究, 提出了一种基于投影梯度法(PGM)的迭代优化算法。通过对发射信号协方差矩阵和RIS单元进行联合优化, MIMO系统能够在RIS尺寸受限的前提下提高传输速率。

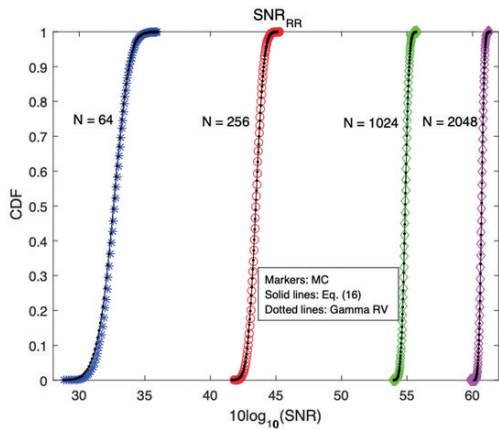


图5 不同阵面大小的RIS对MIMO信噪比的影响

毫米波MIMO在短距离无线通信中有着广泛的应用前景<sup>[11]</sup>。Ardah等<sup>[12]</sup>研究了RIS辅助的毫米波MIMO系统的信道估计问题。根据毫米波信道在角域中的低秩特性, 他们将信道估计问题转化为多维波到达方向(DOA)估计问题, 建立了TRICE分析框架。相较于传统的联合压缩感知算法, TRICE的计算原子数能够减少大约94%, 计算复杂度因此

降低。除了毫米波MIMO, RIS辅助的太赫兹MIMO也吸引了研究者的目光(图6), Wan等<sup>[13]</sup>对此进行了研究。由于太赫兹电子元件的小型化, 通过密集封装亚波长单元实现的RIS, 可以将传统的离散辐射孔径转变为连续或准连续孔径, 从而实现全息通信。

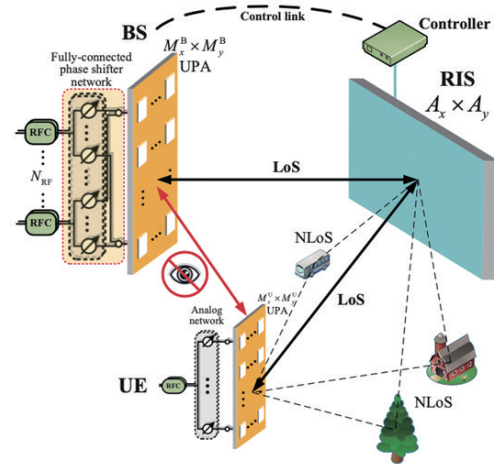


图6 RIS辅助的太赫兹大规模MIMO系统的硬件模型

RIS的作用不仅局限于辅助MIMO, 另外一部分研究者又提出使用RIS被动波束形成的功能替代某些应用场景下MIMO。Mursia等<sup>[14]</sup>指出在物联网大规模接入的应用场景下(图7), RIS具备实现大规模MIMO所能达到的信噪比增益的潜力。针对该应用提出的被动波束赋形算法, 可使速率性能相较于传统基准最大提高120%。



图7 物联网大规模接入应用场景

## 2 RIS 与 NOMA 的融合

非正交多址接入 (non-orthogonal multiple access, NOMA) 技术是 5G 通信中的关键技术<sup>[15]</sup>, 通过对同一信息单元的功率复用, 实现多用户接入, 可以使得无线接入总量提高 50%。NOMA 技术既融合了 3G 技术的串行干扰消除 (successive interference cancellation, SIC) 技术, 在通信系统的接收端消除干扰实现正确解调, 又融合了 4G 技术的正交频分复用技术, 解决了同频干扰问题, 真正实现了频域、时域、功率域的多用户复用。但是如图 8 所示, NOMA 的功率分配情况复杂。并且由于功率域叠加会造成强干扰, NOMA 对 SIC 性能提出较高要求。

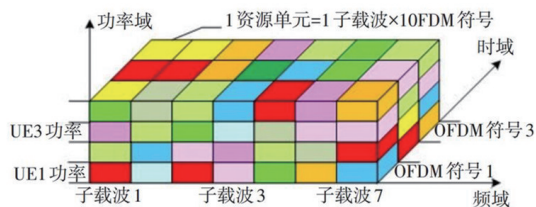


图 8 NOMA 资源分配示意

将 RIS 用于增强 NOMA 通信中不同用户的信道差异, 有利于提高功率分配效率。基于该原理, Fu 等<sup>[16]</sup>基于凸差分算法, 联合优化 RIS 辅助的 NOMA 系统中基站的波束形成矢量和 RIS 的相移矩阵, 提出了一种具有闭式表达式的高效用户排序方案, 使得 NOMA 系统总发射功率相较于直接链路降低 2.04 dBm。不同于求解闭式解的思路, Liu 等<sup>[17]</sup>将机器学习算法运用于部署 RIS 和设计无源波束形成, 提出 D<sup>3</sup>QN 算法。基于该算法所预测用户的电信业务需求和位置, 可以完成对 RIS 的反射相位设置的优化 (图 9)。

NOMA 系统功率域叠加的特性会造成信号干扰, 通常在接收端采用 SIC 接收机来实现多用户检测<sup>[18]</sup>。SIC 的基本思想是采用逐级消除干扰策略, 在接收信号中对用户逐个进行判决, 进行幅度恢复后, 将该用户信号产生的多址干扰从接收信号中减去, 并对剩下的用户再次进行判决, 如此循环操作, 直至消除所有的多址干扰。大规模的用户接入数给 SIC 带来巨大的运算压力, 对 SIC 的性能要求极

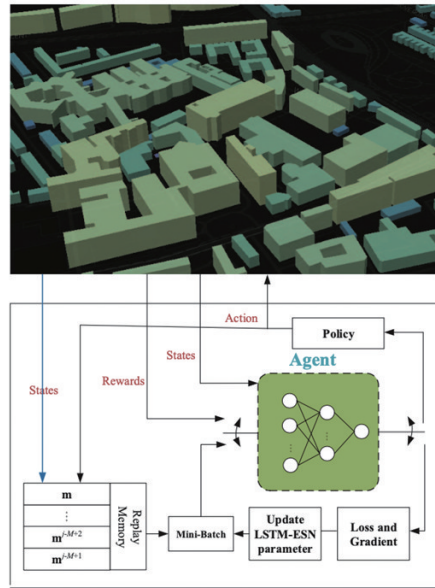


图 9 D<sup>3</sup>QN 算法流程图

高, 因而带来设计难度。de Sena 等<sup>[19]</sup>提出利用双极化 RIS 对用户的复用特性, 改善 NOMA 在不完全连续干扰消除下的性能表现 (图 10)。基于该方案, NOMA 系统和速率可以达到 9.81 BPCU, 相较于单极化 MIMO-NOMA 提高了 4.17 BPCU。在 RIS 足够大时, 即使 SIC 误差传播存在, 该系统的和速率依旧可以得到保证。

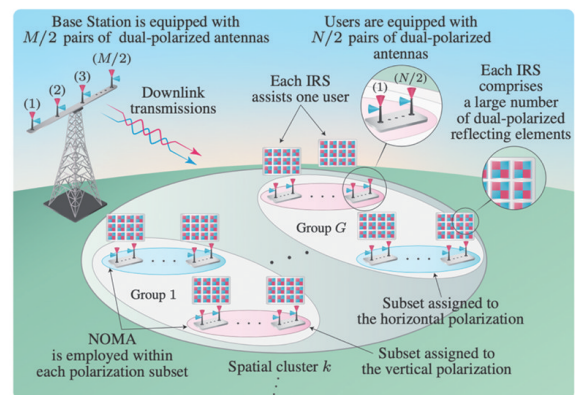


图 10 双极化 RIS 辅助 NOMA 的系统模型

除了利用 RIS 解决 NOMA 通信本身的局限, 研究者在探究 RIS 对于提升 NOMA 其他性能方面也作出巨大努力。Cheng 等<sup>[20]</sup>提出在 NOMA 网络的上下行链路中部署 RIS, 可以增加信号的覆盖率。Elhattab 等<sup>[21]</sup>将联合传输协调多点技术运用于 RIS 辅助的 NOMA 系统部署中, 信道增益最大提高

92%。Yang等<sup>[22]</sup>通过闭式算法计算出RIS辅助的NOMA系统中RIS最佳梯度相位。通过优化后的连续相移和3位离散相移设计分别使通信速率提高16%和14.9%。Le等<sup>[23]</sup>提出了基于背向散射RIS的近远双用户NOMA系统模型,评估了该模型的中断概率、遍历容量和吞吐量等性能指标,并分析了RIS中反射元件的数量与系统性能之间的关系。

### 3 RIS与MEC的融合

传统的无线网络架构中核心网负责数据的调度,并通过云计算提高调度能力。移动边缘计算(mobile edge computing, MEC)在无线端增强了计算、存储、处理能力,将集中式计算调度模式改成了分布式计算模式(图11),可以提高通信速率,降低通信延时<sup>[24]</sup>。

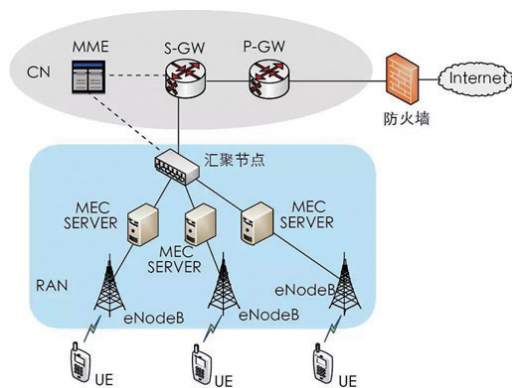


图11 移动边缘计算框架

近年来,由于地面、空中和空间通信的集成,空间信息网络(SIN)作为一种新型网络体系结构被提出<sup>[25]</sup>。SIN旨在使人们能够向任何地方的任何物体提供无缝连接服务,极大地扩展了无线覆盖范围,还为网络运营商和服务提供商在各种应用场景上部署多功能、不间断的服务开辟了许多新领域。在SIN中提供高速和高容量服务,需整合地面、空中和空间基础设施,因此给设计带来严峻的挑战。SIN必须与新兴网络技术相结合,以适应这种复杂的通信环境。在此基础上,Cao等<sup>[26]</sup>提出了一种RIS辅助MEC的空间信息网络体系结构的概念(图12)。

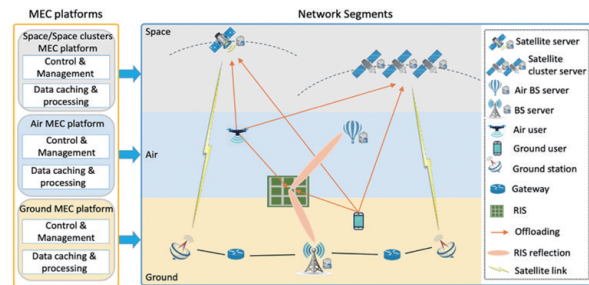


图12 空间信息网络框架

如何更合理地配置RIS,成为众多研究者们思考的问题。Li等<sup>[27]</sup>研究了RIS辅助的单小区多用户MEC系统,在其中部署了RIS完成配备MEC服务器的基站和多个单天线用户之间的通信。通过联合优化无源移相器、传输数据大小、传输速率、功率控制、传输时间和解码顺序,降低所有用户设备的总能耗。

MEC拥有丰富的计算资源,并且能够对移动和物联网设备生成的数据进行低延迟访问。这样的优势使其能为人工智能应用提供一个自然的平台。当RIS被运用于衔接MEC与用户设备时,相当于桥梁的作用,可以对过往数据进行处理。Huang等<sup>[28]</sup>提出了在MEC中,引入RIS以构建完成机器学习任务的基础设施。基于CARLA平台和第二网络开发了一个统一的通信训练推理平台,并在该平台中展示了该方案在自动驾驶中三维目标检测的应用范例(图13)。

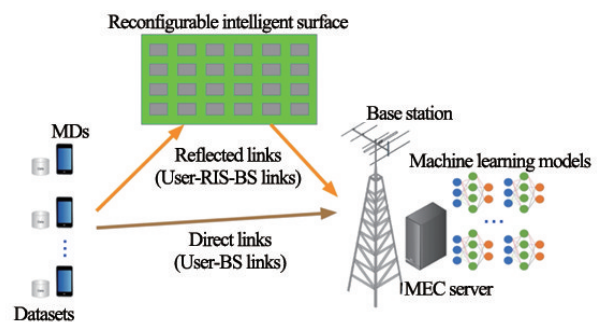


图13 RIS辅助的移动边缘计算框架

MEC的资源调度问题同样值得深入研究。Hu等<sup>[29]</sup>探讨了基于优化和数据驱动,以提高RIS辅助的多用户MEC系统资源调度效率的方案。通过联合优化RIS反射系数、无线接入点(AP)的接收波束

形成向量和用户设备(UE)的本地计算和卸载能量分配策略,在有限的能量预算内,增加给定时隙内所有用户设备的总输入比特。所提出的三步块坐标下降(BCD)算法能够优化 MEC 计算资源的调度。同年 6 月,该团队<sup>[30]</sup>又在 IEEE 国际通信会议上,详细介绍在上述工作基础上进一步构建的轻量级在线深度学习体系结构。该体系结构降低了 BCD 算法的计算复杂度,并且当 UE 和 AP 之间存在视线直接链路时,鲁棒性更强,对信道状态信息和反馈的需求更低。

#### 4 RIS 与 UAV 的融合

凭借无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)的高机动特性,无人机辅助的无线中继通信系统具备机动灵活、覆盖范围广、部署方便等优点。将 RIS 集成到无人设备中,可以将两者优势进一步结合,在应急通信和军事通信中具有巨大的应用潜力<sup>[31]</sup>。

UAV 的部署策略会直接影响到通信的可靠性。以 UAV 辅助的短数据超可靠低延迟技术(URLLC)为例,Ranjha 等<sup>[32]</sup>指出为了实现数据传输的公平性,提高传输速率,无人机的位置至关重要。但受限于飞行环境,比如城市中高楼大厦的阻挡、战场复杂环境中有限的飞行区域,无人机的位置并不能任意设置。RIS 的出现给 UAV 部署策略的构建提供了新思路(图 14)。凭借 RIS 单元的无源波束形成功能,通过直接搜索法在理论模型中确定 UAV 的最佳位置和区块长度,总解码误码率得以降低。

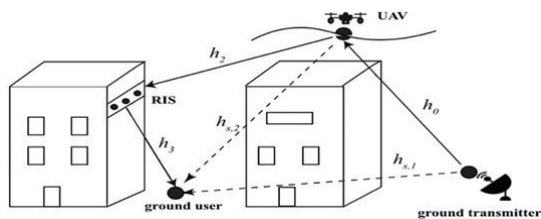


图 14 UAV 中继和 RIS 辅助的 URLLC 系统

当 RIS 被用于辅助 UAV,新的性能优化问题随之出现。为了提高通信速率,Pan 等<sup>[33]</sup>提出一种基于逐次凸逼近和速率约束惩罚(CAR)的迭代算法,

实现了无人机弹道、RIS 相移、太赫兹子带分配和功率控制的联合优化。为了优化能耗,Liu 等<sup>[34]</sup>基于机器学习衰减深度 Q 网络方法(图 15),提出联合设计无人机的位移、RIS 的相移、功率分配策略以及动态解码顺序的优化框架。

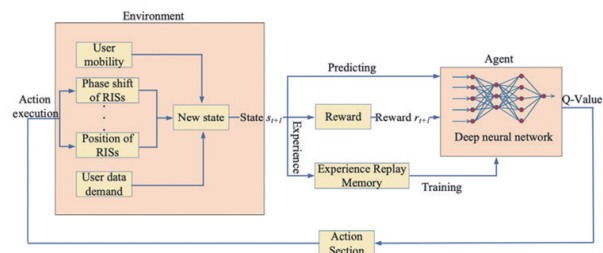


图 15 基于深度学习的 RIS 辅助 UAV 系统的优化流程

UAV 的部署形式灵活,RIS 的部署也具备便利性,二者的自由组合为通信性能的提高提供了无限的可能性。当 RIS 安装于 UAV 上,凭借 UAV 的灵活性和机动性,可以实现三维信号反射。与传统地面 RIS(TRIS)相比,空中 RIS(ARIS)具有更高的部署灵活性、可靠的空对地链路和全景全角度反射<sup>[35]</sup>。但是由于 UAV 的有效载荷和电池容量有限,UAV 很难携带带有大量反射元件的 RIS,无法保证孔径增益的可伸缩性。但在实践中,多个 UAV 可以形成一个 UAV 群,使 ARIS 能够协同工作。Shang 等<sup>[36]</sup>提出支持群集的空中可重构智能超表面(SARIS)协同通信的思想。SARIS 可以通过调整无人机上的反射系数来增加孔径增益。基于大规模路径损耗的视距和非视距连接,SARIS 三维部署设计为提高通信系统的孔径增益提供了新思路。

通信安全在 UAV 通信中是一个不可忽视的问题。考虑到无人机与地面用户通信被窃听的隐患,Li 等<sup>[37]</sup>利用基于交替优化(AO)技术的高效算法,构造了对无人机的弹道、RIS 的无源波束形成和合法发射机的发射功率的联合设计的方案,以提高 UAV 通信的保密率。Guo 等<sup>[38]</sup>针对不完全信道状态信息(CSI)条件下 RIS 辅助的毫米波 UAV 通信(图 16)中的安全传输问题,提出基于机器学习的深度决策策略梯度(DDPG)框架,创建了双 DDPG 深度强化学习(TDDRL)算法。该算法可以有效应对 CSI 与无人机弹道耦合导致的复杂约束情形,通

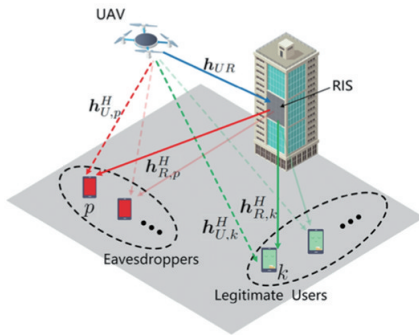


图16 RIS辅助的毫米波UAV系统

过UAV的主动波束形成、RIS单元的反射特性和无人机轨迹共同设计,优化在多个窃听者的情况下所有合法用户的总保密率。

UAV与RIS融合,未来将在物联网、车联网等领域发挥强大的作用。例如, Samir等<sup>[39]</sup>提出将RIS集成至UAV,可以提高物联网设备的中继效率。Michailidis等<sup>[40]</sup>提出通过双RIS无人机辅助MEC,实现对车联网能量分配的优化(图17)。

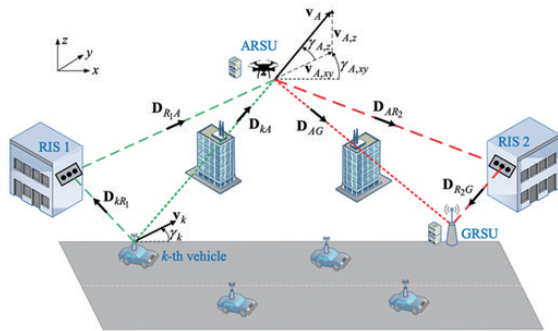


图17 双RIS辅助的车联网UAV系统

## 5 结论

2021年,RIS技术发展迅速,与通信前沿技术能够很好地融合。研究者对于RIS在未来的应用,也纷纷提出了精彩的构想。现阶段的研究主要集中在理论模型的构建与计算仿真,RIS在现实中的标准制定、工程实现等大量问题依然有待研究。但不可否认,RIS作为新生技术,已经开始展现出其巨大的魅力。随着RIS被人们熟悉,未来必将成为6G通信的研究热点,其应用范围也会越来越深入和广泛。

## 参考文献 (References)

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333–337.
- [2] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): 218.
- [3] Li L L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding–metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 197.
- [4] Wang J H, Tang W K, Han Y, 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.
- [5] Alsabah M, Naser M A, Mahmmud B M, et al. 6G Wireless Communications Networks: A Comprehensive Survey [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 148191–148243.
- [6] 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.
- [7] Khaleel A, Basar E. Reconfigurable intelligent surface–empowered MIMO systems[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021, 15(3): 4358–4366.
- [8] You L Xiong J Y, Ng D W K, et al. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in RIS–aided multiuser MIMO uplink transmission[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 69: 1407–1421.
- [9] Qian X W, Di Renzo M, Liu J, et al. Beamforming through reconfigurable intelligent surfaces in single–user mimo systems: SNR distribution and scaling laws in the presence of channel fading and phase noise[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(1): 77–81.
- [10] Perovic N S, Tran L N, Di Renzo M, et al. Achievable rate optimization for MIMO systems with reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(6): 3865–3882.
- [11] Wild T, Braun V, Viswanathan H. Joint design of communication and sensing for beyond 5G and 6G systems [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 30845–30857.
- [12] Ardah K, Gherekhloo S, de Almeida A L F, et al. TRICE: A channel estimation framework for RIS–aided Millimeter–wave MIMO systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2021, 28: 513–517.

- [13] Wan Z W, Gao Z, Gao F F, et al. Terahertz massive MIMO with holographic reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(7): 4732–4750.
- [14] 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.
- [15] Ahmed A, Elsaraf Z, Khan F A, et al. Cooperative non-orthogonal multiple access for beyond 5G networks[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 990–999.
- [16] Fu M, Zhou Y, Shi Y M, et al. Reconfigurable intelligent surface empowered downlink non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(6): 3802–3817.
- [17] Liu X, Liu Y W, Chen Y, et al. RIS enhanced massive non-orthogonal multiple access networks: Deployment and passive beamforming design[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(4): 1057–1071.
- [18] Ding Z G, Schober R, Poor H V. Unveiling the importance of SIC in NOMA systems—Part II: New results and future directions[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(11): 2378–2382.
- [19] de Sena A S, Nardelli P H J, da Costa D B, et al. IRS-assisted massive MIMO-NOMA networks: Exploiting wave polarization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(11): 7166–7183.
- [20] Cheng Y Y, Li K H, Liu Y W, et al. Downlink and uplink intelligent reflecting surface aided networks: NOMA and OMA[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(6): 3988–4000.
- [21] Elhattab M, Arfaoui M A, Assi C, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted coordinated multipoint in downlink NOMA networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(2): 632–636.
- [22] Yang G, Xu X Y, Liang Y C, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted non-orthogonal multiple access [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(5): 3137–3151.
- [23] Le C B, Do D T, Li X W, et al. Enabling NOMA in backscatter reconfigurable intelligent surfaces-aided systems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 33782–33795.
- [24] Ning Z L, Dong P R, Wang X J, et al. Mobile edge computing enabled 5G health monitoring for internet of medical things: A decentralized game theoretic approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(2): 463–478.
- [25] Al-Hraishawi H, Minardi M, Chougrani H, et al. Multi-layer space information networks: Access design and softwarization[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 158587–158598.
- [26] Cao X L, Yang B, Huang C W, et al. Converged reconfigurable intelligent surface and mobile edge computing for space information networks[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(4): 42–48.
- [27] Li Z Y, Chen M, Yang Z H, et al. Energy efficient reconfigurable intelligent surface enabled mobile edge computing networks with NOMA[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 427–440.
- [28] Huang S F, Wang S, Wang R, 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.
- [29] Hu X Y, Masouros C, Wong K K. Reconfigurable intelligent surface aided mobile edge computing: From optimization-based to location-only learning-based solutions [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(6): 3709–3725.
- [30] Hu X, Masouros C, Wong K K. Removing channel estimation by location-only based deep learning for RIS aided mobile edge computing[C]//*ICC 2021—IEEE International Conference on Communications*. Montreal: IEEE, 2021: 1–6.
- [31] Liu C X, Feng W, Chen Y F, et al. Cell-free satellite-UAV networks for 6G wide-area internet of things[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(4): 1116–1131.
- [32] Ranjha A, Kaddoum G. URLLC facilitated by mobile UAV relay and RIS: A joint design of passive beamforming, blocklength, and UAV positioning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(6): 4618–4627.
- [33] Pan Y J, Wang K Z, Pan C H, et al. UAV-assisted and intelligent reflecting surfaces-supported terahertz communications[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(6): 1256–1260.
- [34] Liu X, Liu Y W, Chen Y. Machine learning empowered trajectory and passive beamforming design in UAV-RIS wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in*

- Communications, 2021, 39(7): 2042–2055.
- [35] Li Y J, Yin C, Do-Duy T, et al. Aerial reconfigurable intelligent surface-enabled URLLC UAV systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 140248–140257.
- [36] Shang B D, Shafin R, Liu L J. UAV swarm-enabled aerial reconfigurable intelligent surface (SARIS) [J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(5): 156–163.
- [37] Li S X, Duo B, Di Renzo M, et al. Robust secure UAV communications with the aid of reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6402–6417.
- [38] Guo X F, Chen Y B, Wang Y. Learning-based robust and secure transmission for reconfigurable intelligent surface aided millimeter wave UAV communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(8): 1795–1799.
- [39] Samir M, Elhatab M, Assi C, et al. Optimizing age of information through aerial reconfigurable intelligent surfaces: A deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4): 3978–3983.
- [40] Michailidis E T, Miridakis N I, Michalas A, et al. Energy optimization in Dual-RIS UAV-Aided MEC-enabled internet of vehicles[J]. Sensors, 2021, 21(13): 4392.

## Hot spots of reconfigurable intelligent surface technology in 2021: A review

SI Liming<sup>1,2</sup>, TANG Pengcheng<sup>1,2</sup>, DONG Lin<sup>1,2</sup>, XU Haoyang<sup>1,2</sup>, LÜ Xin<sup>1,2</sup>

1. Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Beijing 100081, China
2. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** In 2021, reconfigurable intelligent surface technology made a series of breakthroughs. As a possible emerging paradigm in future wireless network research, reconfigurable intelligent surface is expected to be a way to flexibly control electromagnetic waves through programming so as to build an intelligent wireless environment. In this paper, key hotspots of reconfigurable intelligent surface technology in 2021 are summarized. By reviewing the integration of intelligent reconfigurable surface and advanced communication technologies, including multiple input multiple output technology, non-orthogonal multiple access technology, mobile edge computing technology and UAV communication technology, the future development of reconfigurable intelligent surface technology is discussed.

**Keywords** reconfigurable intelligent surface; multiple input multiple output; non-orthogonal multiple access; mobile edge computing; UAV communication ●



(责任编辑 徐丽娇)