

Multi–Antenna Communication System by Transmissive Reconfigurable Meta–Surface

李博江/LI Bojiang,李振东/LI Zhendong,陈文/CHEN Wen

(上海交通大学,中国上海 200240) (Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China) DOI:10.12142/ZTETJ.202203006 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220617.1739.002.html 网络出版日期: 2022-06-20 收稿日期: 2022-05-20

摘要:为了解决5G通信中的高能耗、高成本问题,提出了基于透射可重构超表面(RMS)的多天线通信系统,并阐述了该通信系统中的信息 收发方式、信道模型和信道估计,最后探讨了RMS在未来通信中的应用。认为透射RMS多天线系统在未来通信系统中具有广阔的应用前景。

关键词:5G;透射超表面;信道模型;收发设计;分集-复用增益

Abstract: In order to solve the problems of high energy consumption and high cost in 5G communication system, a multi-antenna communication system based on transmissive reconfigurable meta-surface (RMS) is proposed, and the transceiver design, the channel model and the channel estimation in the communication system are described. Finally, the application of transmissive RMS in future communication is discussed. It is considered that the multi-antenna communication system based on transmissive RMS has a good application prospect in future communication systems.

Keywords: 5G; transmissive meta-surface; channel model; transceiver design; diversity-multiplexing gain

1 可重构超表面的研究背景

2019年,三大运营商陆续公布5G商用套餐,标志着中国 正式进入5G商用时代。5G带给人们更好的通信使用体验 和更广泛的应用范围。然而,技术的升级换代也会导致资源 需求激增。5G所使用的频段更高,基站的覆盖范围更小, 在满足更高技术要求的同时会带来能耗和成本的增加。根据 中国铁塔的统计,目前5G单基站满载功率近3700 W,是 4G单基站的2.5~3.5倍,其中增加的功耗主要源于基带信号 的调制和发射。因此,寻求一种低功耗和低成本的新型收发 装置成为B5G乃至6G技术发展的一个亟待解决的问题^[1]。

1.1 可重构超表面简介

5G基站配备了大量由射频天线组成的大规模多输入多 输出(MIMO)阵列和信号处理模块。在无线网络中,为了 扩大网络覆盖率,实现高可靠传输,基站还需要额外配备一 些中继器或射频拉远头(RRH)。这些器件通常都是有源 的,这无疑增加了整个系统的能耗和复杂度^[2]。可重构超表 面(RMS),也被称为智能超表面(RIS),被认为是一种降 低系统功耗和成本的解决方案。RMS主要由大量无源的超 材料元件构成。超材料是将材料内部的原子进行人工重新排 列组合得到的物质,不同的排列组合方式也就决定了材料会 具有不同的物理化学性质。这些超材料可以由二极管、三极 管、微机电系统(MEMS)、石墨烯、温敏器件、光敏器件 等构成,在不同电压下可以实现"通"或"断"的状态,因 而具有动态编码能力。这使得超表面可以通过内置的控制芯 片来改变入射电磁波的幅度和相位,从而实现信号的波束赋 形和无线信道的重构。与中继不同的是,RMS一般不包含 射频链路,因而无法对信号进行解码转发或放大转发。但正 是也得益于此,RMS的实现复杂度以及自干扰和噪声问题 才得以有效解决^[3]。根据对信号操作方式的不同,RMS可以 被分为反射型RMS和透射型RMS两种。具体来说,反射型 RMS通信的馈源与接收机在RMS的同一侧,而透射型RMS 通信的馈源与接收机在RMS的不同侧^[4]。它们都能提升整个 系统的频谱效率、能量利用效率和网络覆盖范围。

1.2 反射型 RMS

目前关于反射 RMS的研究已取得较大进展。由于具有 类似光学的反射特性和可重构性,反射型 RMS 可以用于加 强非视距路径信道增益。反射型 RMS 主要部署在基站或用 户端周围,根据信道特性的变化动态调整反射因子,可以实 现频谱效率的提高和系统能耗的优化。当视距路径被遮挡

基金项目:国家重点研发计划(22020YFB1807700、018YFB1801102);上海市科委基础项目(20JC1416502);国家自然科学基金(62071296)

时,由多个RMS构成的散射路径可提高信号的分集增益。 目前,已经有很多工作研究了基于反射型 RMS 的系统资源 与反射因子优化问题。中兴通讯股份有限公司等成立了主要 以反射型RMS为研究课题的项目组。反射型RMS的推广与 应用已经初见成效。

1.3 透射型 RMS

对于透射型RMS的研究目前还处于起步阶段。通过调 节超材料元件的反射特性,就可以将信号透射穿过超表面。 相较于反射型超表面,透射型超表面具有以下几个优点:

(1) 无自干扰。在信号收发端距离较近的情况下,当利 用反射型 RMS 时, 馈源与用户位于 RMS 的同一侧, 用户在 收发信息时容易产生自干扰;而当利用透射型RMS时,馈 源与用户位于RMS的不同侧, 使自干扰问题不易产生, 更 适用于用户密集的场景。

(2) 无馈源遮挡。对于反射型 RMS, 用户接收到的电 磁波容易被同侧的馈源吸收,而透射型RMS分隔了馈源与 用户,因而不存在这一问题。

(3) 更高的孔径效率。研究表明,高频条件下RMS的 透射因子一般要高于反射因子,这使得透射型RMS可以具 有更高的孔径效率^[5]。

(4) 更大的工作带宽。研究表明,透射型超表面的相位 差较稳定,因而具有更大的工作带宽^[5]。

2 基于透射型 RMS 的多天线系统

图1是一种基于透射型RMS的多天线系统架构,收发机 由透射型RMS和射频天线构成,并通过内置芯片进行控制。 RMS支持全双工工作模式,可以利用不同的通信资源进行 上行和下行通信。RMS的第m个单元的透射因子表示为:

 $f_m = \beta_m e^{j\theta_m},$ (1)



其中 $\beta_m \in [0,1], \theta_m \in [0,2\pi)$ 分别表示 RMS 第m个单元的振 幅和相移。收发机的基本功能包括两个方面:可通过控制器 芯片实现编程控制,在控制器内实现信息调制和波束赋形。

2.1 透射 RMS 下行空间分集

基于透射型RMS的多天线系统在下行链路采用空分多 址接入(SDMA)方式,即在馈源布置一根天线,使得电磁 波通过透射大规模 RMS 实现空间分集。在通信过程中,信 源将信息发送到RMS控制器内进行调制和波束赋形,并通 过RMS的大规模点阵向外发射电磁波。RMS控制器根据信 道状态信息和波束赋形参数动态调节超表面上每个单元的透 射系数,最大限度地提高频谱效率和能量利用效率。

2.2 透射 RMS 上行频率分集

由于馈源为单天线,基于透射型 RMS 的多天线系统在 上行链路采用正交频分多址接入(OFDMA)方式,实现多 用户频率分集。上行信号同样经过RMS被转发送入控制芯 片,以进行解码和解调。联合优化多用户功率分配、子载波 分配和RMS传输系数有助于使系统状态达到最优,使速率 达到最大。由于优化变量的高度耦合,该问题是一个非凸优 化问题,因此可应用基于拉格朗日对偶分解法的交替优化算 法、差分凸规划、逐次凸逼近法和罚函数法来解决。

2.3 RMS 高阶调制

在调制方法上,透射型RMS多天线系统可沿用传统的恒 包络和非恒包络调制。恒包络调制包括二进制相移键控 (BPSK)、正交相移键控(QPSK)等。超材料元件具有二进 制特性,可以实现1 bit或2 bit 的编程控制。虽然更高阶的相 移键控在理论上也可以实现,但是因为一个元件仅能够实现 1 bit 控制,更高阶的相移键控势必会需要更多的超材料元件, 而空间条件的限制会使这种超表面在物理上很难实现。恒包 络调制的控制自由度只有一个。一些非恒包络调制,例如高 阶的正交幅度调制(16QAM、256QAM等),需要同时控制幅 度和相位两个参数,然而现有的技术条件还无法实现。大部 分高阶调制通过非恒包络调制来提高系统传输速率,这使得 透射型超表面多天线系统的传输速率受到一定的限制。

为了解决这个问题,可以使用非线性调制技术(即时序 调制)来实现高阶相位和振幅联合调制。值得注意的是,在 采用时间调制后,控制信号的波形具有两个控制自由度,即 相位开始时间和传导持续时间。通过展开控制符号的傅里叶 级数,我们可以得到其在1阶谐波(基波)上的振幅和相移。

通过设置两个自由度,系统可以独立调整基波的振幅和相移,还可以实现相应的调制方案与基波的幅度和相位之间的映射关系,即可以实现相位和幅度的联合调制。因此,采用时间调制方案可以实现16QAM或更高阶QAM,极大地提高系统的传输速率⁶⁶。

2.4 信道模型

透射型 RMS 多天线系统的信道模型可以分为近场模型 和远场模型。模型根据瑞利距离 2D²Λ来划分,其中D和λ 分别表示天线阵列孔径和电磁波波长。当收发机距离大于瑞 利距离时,信道被视为远场模型,波阵面被近似视为平面 波;当收发机距离小于瑞利距离时,信道被视为近场模型, 波阵面被视为球面波。RMS 到用户处的距离一般大于瑞利 距离,因此信道模型被视为远场信道,且RMS-用户信道有 视距路径和非视距路径,服从莱斯分布。视距路径信道可以 被建构为均匀平面阵列;非视距路径信道路径分量独立同分 布服从于零均值,单位方差的圆对称复高斯分布。馈源到 RMS 的距离要小于瑞利距离,因此信道模型被视为近场信 道。馈源到 RMS之间没有遮挡,因此可以直接被建构为视 距路径的均匀平面阵列模型^Π。

2.5 信道估计

当完成信道建模后,在信号发射接收前还需要知道下行/ 上行信道状态信息,以便实时调整发射功率、RMS透射因子 和波束赋形矢量等参数。透射型RMS多天线系统的信道估计 可以分为馈源-RMS和RMS-用户两个部分。前者被视为近场 信道,相应的信道状态信息可以很方便地被计算或测量出; 后者为远场信道,由于此时每个用户同时有视距和非视距路 径,相应的信道状态信息需要通过一些信道估计方法才能得 出。通常情况下,由于系统的上下行链路在相同频率资源的 不同时隙上传输,在相对较短的时间内(信道传播的相干时 间),我们可以认为上行链路和下行链路的传输信号所经历 的信道衰落是相同的,即所谓的信道互易性。因此,可以通 过估计上行链路来获得下行信道的状态信息。目前的信道估 计方法主要分为直联型信道估计^[8]和可分离的信道估计^[9]。

直联型信道估计就是将两部分信道合并估计,常见的直 联型信道估计方法主要有:基于信道稀疏性的消息传递算 法、基于信道相关性的估计算法、基于分解和插值恢复的信 道估计算法、利用联邦学习和深度学习的神经网络估计算 法。基于神经网络的信道估计算法正符合近年来发展迅速的 人工智能技术与5G通信结合的趋势。该方法将人工智能技 术的高效、多连接和去中心化等特点与通信系统的高速率、 高可靠性和海量连接等关键指标完美融合。

可分离的信道估计分别对馈源-RMS和RMS-用户信道 进行估计。具体做法是:在RMS上布置部分有源元件,收 发机和用户分别向超表面发送用于信道估计的导频序列,随 后通过RMS的有源元件获取两段级联信道的信道状态信息。 这样做的好处是降低了导频开销,但同时超表面还须将信道 状态信息回传到收发机和用户处以实现波束赋形,反而降低 了传输效率。透射型超表面多天线系统主要运用直联型信道 估计方法,在近场信道状态信息测量得到后,通过数据处理 方法得到远场信道状态信息。

3透射RMS多天线系统应用

基于透射 RMS 的多天线系统具有低功耗、低成本的优势,在未来具有很好的应用前景。

(1) RMS 与非正交多址接入结合的通信系统。非正交 多址接入是多址接入的一项新技术,它颠覆了正交多址接入 中一个无线资源(频率、时间、编码)只能分给一个用户使 用的概念,采用功率复用的方式将一个资源分配给多个用 户,有效提高了系统的频谱效率、吞吐量和接入数量。非正 交多址接入在发射端使用功率复用技术,并在接收端采用串 行干扰删除以消除多径干扰,很好地提升了透射型超表面多 天线系统的性能。然而,复杂的接收算法和接收机设计将成 为当前的巨大挑战^[10]。

(2) RMS与速率分割多址接入结合的通信系统。速率分 割多址接入结合了空分多址接入和非正交多址接入,其原理 是将用户的信息分为共同部分和私有部分,并将所有用户共 同部分的信息合并,然后将其与用户的私有部分一起送入信 道,在接收端根据串行干扰删除进行规则解码。这种技术弥 补了空分多址接入只能在强干扰条件以及非正交多址接入只 能在弱干扰条件下工作的缺点,提高了系统的抗干扰能力和 总通信速率。这种技术在最近被广泛地研究,它与透射RMS 大规模多天线系统的结合会是一个有潜力的发展方向^[11]。

(3) RMS与人工智能结合的通信系统。RMS的可重构 性和低功耗等特点可以结合人工智能技术给通信系统带来一 次全新的变革。根据卷积神经网络和循环神经网络的概念, 将 RMS上的超材料原子视为神经网络中的神经元,可以构 建一个低功耗神经网络通信系统,这将极大提高通信系统的 成像、感知和识别能力。一些机器学习的架构,如深度学 习、联邦学习等,用在信号监测、信道估计、波束赋形矢量 设计等通信模块上,在减小算法复杂度的同时还可以提高系 统传输性能。目前,基于人工智能的通信系统模型正在快速 发展,将在未来5G和6G的发展中占据重要地位^[12]。 (4) RMS 与移动边缘计算结合的通信系统。移动边缘 计算是蜂窝通信下的一种新颖的数据处理方式。以往设备终 端需要同时采集和处理数据,而利用 5G 的低时延、高可靠 性特点,可以将数据上传至具有高算力的中心服务器,再将 结果反馈给终端。这种方式不需要终端进行大量计算,从而 在物联网中极大节省了设备的功耗和算力,也保证了数据获 取的可靠性。透射 RMS 多天线基站与边缘计算结合可以提 升系统物理层性能,优化系统资源^[13]。

(5) RMS 与车联网结合的通信系统。第3代合作伙伴计划(3GPP)第16版公布了基于5G新空口(5G NR)的蜂窝 式车联网标准。车联网已成为5G中最有潜力的应用场景。基 于超表面的透射,车联网系统演进并形成了两种侧链模式 (主动发送和被动透射模式),可以随时根据资源分配情况动 态优化系统负载和能耗。此外,这两种模式所具有的独特帧 结构可以大大减少信令开销。如今RMS在车联网中的应用尚 处于萌芽阶段,相关技术难点还需要更多的研究来解决^[14]。

4 结束语

在5G加速部署的大环境下,5G的一些优点和缺点都会 被放大。在追求极致通信的有效性和可靠性的同时,系统对 资源和技术的要求势必会更加严格。RMS具有的低能耗、 低成本和可重构性等特点,能弥补5G在这方面的不足。改 变 RMS的传播特性可以实现基于透射和反射两种架构的通 信系统。基于透射 RMS多天线系统具有更好的抗干扰能力 和频谱、能量使用效率,这为 B5G/6G 无线收发机架构设计 提供了新的思路。RMS不仅能适应原有系统的调制、波束 赋形和信道估计等,还能结合非正交多址接入、人工智能、 移动边缘计算、车联网和速率分割多址接入等新技术在 B5G/6G 时代大放异彩。目前,学术界和工业界已开展 RMS 技术和应用的深入研究,更多关于 RMS 的关键技术还有待 挖掘。虽然目前有关 RMS 的应用仍有许多亟待解决的问题, 但是我们相信在未来通信系统中 RMS会占据一席之地。

参考文献

- [1] LI Z, CHEN W, HE C, et al. Multi-antenna systems by transmissive reconfigurable meta-surface [EB/OL]. [2022-04-25]. https://arxiv.org/abs/ 2109.05462
- [2] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(11): 5394–5409. DOI: 10.1109/TWC.2019.2936025

[3] 李南希, 朱剑驰, 郭婧, 等. 面向6G的可重构智能表面部署与应用思考 [J]. 移动 通信, 2021, 45(4): 105-109. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2021.04.017

- [4] ZENG S, ZHANG H, DI B, et al. Reconfigurable intelligent surfaces in 6G: reflective, transmissive, or both? [J]. IEEE communications letters, 2021, 25 (6): 2063–2067. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3062615
- [5] BAI X, KONG F, SUN Y, et al. High-efficiency transmissive programmable metasurface for multimode OAM generation [J]. Advanced optical

materials, 2020, 8(17): 2000570. DOI: 10.1002/adom.202000570

- [6] TANG W, DAI J, CHEN M, 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. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007055
- [7] LI Z, CHEN W, WU Q, et al. Uplink transceiver design and optimization for transmissive RMS multi-antenna systems [EB/OL]. [2022–04–25]. https:// arxiv.org/abs/2112.08880
- [8] ZHANG W, XU J, XU W, et al. Cascaded channel estimation for IRS-assisted mmWave multi-antenna with quantized beamforming [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(2): 593–597. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3028878
- [9] HE J, WYMEERSCH H, JUNTTI M. Channel estimation for RIS-aided mmWave MIMO systems via atomic norm minimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(9): 5786–5797. DOI: 10.1109/TWC.2021.3070064
- [10] LI Z, CHEN W, WU Q, et al. Joint beamforming design and power splitting optimization in IRS-assisted SWIPT NOMA networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(3): 2019–2033. DOI: 10.1109/TWC.2021.3108901
- [11] MAO Y J, DIZDAR O, CLERCKX B, et al. Rate-splitting multiple access: fundamentals, survey, and future research trends [EB/OL]. [2022-04-25]. https://arxiv.org/abs/2201.03192
- [12] WANG J, TANG W, 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. DOI: 10.1109/JSAC.2021.3087259
- [13] HUANG S, 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. DOI: 10.1109/TCCN.2021.3056707
- [14] CHEN Y, WANG Y, ZHANG J, et al. Reconfigurable intelligent surface (RIS) –aided vehicular networks: their protocols, resource allocation, and performance [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2022, 17(2): 26–36. DOI: 10.1109/MVT.2022.3158046



市5G/6G 专家委员会特聘专家;研究领域为4G/ 5G/6G 网络,主要研究方向为超表面通信、无线 AI和多址接入技术;获国家级项目13项、奖励20 余项,发布团体标准3项;发表论文200余篇(引 用8 000余灾),获专利20余项。