# 智能超表面的设计及应用



# Design and Application of Reconfigurable Intelligent Surface

# 柯俊臣/KE Junchen,梁竟程/LIANG Jingcheng, 程强/CHENG Qiang

(东南大学,中国 南京 210096) (Southeast University, Nanjing 210096, China)

#### DOI:10.12142/ZTETJ.202203004 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220620.1712.010.html 网络出版日期: 2022-06-21 收稿日期: 2022-05-23

摘要:通过对智能超表面(RIS)基本概念、方法和应用的介绍,展现了其采用数字编码方式调控电磁波各种物理特性的独特能力。深入讨论了 RIS在时空域调控中的关键技术以及这些技术所衍生的示范性应用,包括成像、感知、通信与雷达等多个领域。充分展示了RIS在相关行业内的 应用前景。

关键词: RIS; 波束赋形; 非线性谐波调控; 全息成像; 无线通信

Abstract: Through the introduction of the basic concepts, methods, and applications of the reconfigurable intelligent surface (RIS), the unique ability of RIS to regulate various physical characteristics of electromagnetic waves is shown. The key technologies of RIS in space-time manipulation are discussed in detail, as well as some iconic applications derived from these technologies in the field of imaging, perception, communication, radar, etc., which fully demonstrates the application prospect of reconfigurable intelligent surface in related industries.

Keywords: RIS; beamforming; nonlinear harmonic manipulation; holography; wireless communication

**5**G技术目前正处于快速商用的时期,同时6G技术也在紧 锣密鼓地研发之中。万物互联带来的人与人、人与物、 物与物之间的海量数据传输,对现有网络的可靠性、实时 性、传输速率、网络容量、流量密度等方面提出了全新挑 战。在众多新兴技术中,具有智能感知、操控能力的智能超 表面(RIS)技术逐渐引起了全球通信领域学者的密切关 注<sup>[1]</sup>,成为6G无线通信的关键使能技术之一。

超表面是一种由亚波长尺度单元(典型值为1/10~1/3个 波长)按特定空间排布形成的人工电磁结构,具有轻质量、 低剖面、易集成、易共形等特点<sup>[2]</sup>。传统的超表面在设计制 造完成后,其电磁波响应及电磁功能就被固化了,无法再根 据实际需求进行改变。但为应对复杂电磁系统的需求,超表 面的电磁特性往往需要灵活调节,因此可编程超表面的概念 应运而生。2014年崔铁军教授首次提出了数字编码与可编 程超表面的概念<sup>[2]</sup>,将超表面单元的反射和透射响应的不同 状态用二进制数值0/1来表示,并将预先设计的二进制编码

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0700201、2017YFA0700202、2017YFA0700203); 国家自然科学基金(61631007、61571117、61138001、61371035、61722106、61731010、11227904); 高等学校学科创新引智计划(111-2-05); 江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20212002); 中央高校基本科研业务费专项资金(2242022R10053)

序列输入至超表面控制器,实现对整个超表面阵列电磁特性的编程,进而实现特定的电磁功能。数字编码与可编程超表面的提出为超表面设计提供了全新的思路,简化了超表面设计与优化流程,并可与数字信号处理器件相结合形成更为先进的RIS。

通过加载特定的调控器件,如PIN管(P-I-N型二极管)、变容管和微机电系统(MEMS)开关等,RIS可以对 电磁波的幅度、相位、频率、极化等特性进行实时可编程 调控<sup>[3-5]</sup>,进而控制电磁波在自由空间中的传播行为,突破 传统无线信道无法主动调控的局限,构建智能可编程无线 环境的新范式<sup>[6]</sup>。同时,基于RIS的无线通信收发机硬件架 构具有架构简单、功耗低、成本低等特点<sup>[7]</sup>,仅使用RIS和 基带模块即可完成信息调制与传输,省去了信号混频、上 变频、放大等过程,为下一代无线通信提供了新的解决 方案。

# 1 RIS对电磁波的操控原理

#### 1.1 空间波束赋形

图1(a)展示了一种由二进制数字"0"或"1"单元 构成1bit反射式RIS。其中,RIS在不同工作状态下的幅相 响应如图1(b)所示:单元在两种状态下的反射相位差为 180°。我们规定0°相位为编码"0",180°相位为编码"1"。 通过在RIS上输入不同的编码序列,实现对散射波束不同的 调控效果,如图1 (c)和 (d)所示。

# 1.2 非线性谐波调控

在时间编码 RIS 提出之前,大多数研究工作只关注 RIS 的空间编码分布<sup>[8]</sup>,而忽视了其在时间维度上的应用。时间 编码 RIS 是一种利用时态参数来实现电磁波频谱调控的时变 器件。当 RIS 单元的电磁特性是时间函数时,它将变成一个 时变系统,并会产生非线性现象。文献[4]提出了时域 RIS 的 基础理论与设计方法。通过在时间域上对 RIS 的反射系数进 行周期性调制,反射波中将会产生非线性谐波分量,如图 2 (a)所示。此时,反射波的频谱相当于 RIS 的反射系数的频 谱被搬移到入射波频率处。那么对反射系数频谱的调控即可 简单地等效为对反射波频谱的调控。这意味着时间编码 RIS 拥有调控电磁波频谱的能力。

然而经进一步的研究发现,根据文献[4]提出的方法产

生的谐波的相位在幅度调节的过程中也发生了变化。为了解 除谐波幅度和相位之间的固有耦合,文献[9]提出了一种简 单高效的方法来实现谐波的幅度和相位的独立控制,如图2 (b)所示。由傅里叶变换理论可知,时间延迟的引入可以在 保持振幅的同时为频谱分量带来额外的相移。因此谐波幅度 和相位可以通过设计时间编码的相位差和时移来实现独立的 控制。

一个nbit的空间编码RIS包含2n种编码单元。RIS的比特数越高,其相位量化误差就越小,同时对电磁波的操控也更精准,但是过高的比特数会造成单元结构和控制线路与系统的设计非常复杂。文献[10]提出了一种基于时间编码来实现多比特相位的设计方法,具体如图2(c)所示。该方法利用一种矢量合成分析法来设计任意多比特的可编程相位,解决了多比特RIS设计的难题。通过设计时间编码序列,将原向量进行矢量叠加,可以实现任意的新向量。通过不同时间编码调制的反射波等效相位和幅度,相位覆盖率几乎可以达到预期的360°。在这种时空编码策略的支持下,可以用



1.3 多谐波联合调控

个任意多比特 RIS<sup>[11]</sup>。

文献[12]提出了时空编码RIS,通过在 空间域和时间域对RIS进行编码,可以实 现RIS在空、时、频域上对电磁波的多维 度调控<sup>[12-13]</sup>。如图2(d)所示,时空编码 RIS由加载了可调谐器件的单元构成,其 中每个单元可由周期性的时间编码独立控 制。通过将不同的控制信号加载到单元上, 时空编码RIS的状态在空域和时域上共同 编码,实现反射波波前和频谱的同时操控。 由于在空间编码的基础上引入了时间调制, 时空编码RIS可以在基波频率和谐波频率 下分别实现高精度的波束成形。

简单的单元结构和控制线路系统来实现一

为了实现灵活和连续的谐波波前控制, 参照空间域的卷积定理(即在一个 RIS上 进行傅里叶运算),文献[14]提出了非线性 散射方向波束偏转的方法。该方法可以将 谐波的散射波束偏折到任意方向,如图 2 (e)所示。文中将时间延迟 $t_0$ 引入时变反 射系数 $\Gamma(t)$ 中,因此在第k阶谐波频率上 将有一个额外的相位因子 $e^{-2\pi i f_0}$ 。通过动态 刷新单元之间的时延梯度,可以实时地调

#### ▲图1 RIS的空间波束赋形原理

热点专题



<sup>▲</sup>图2 RIS在非线性谐波调控中的应用

整 RIS上谐波的相位分布。将谐波的初始编码与预设的波束 偏转编码做卷积,就可以将谐波波束偏转到指定的角度。

# 2 RIS的应用

#### 2.1 可编程全息成像系统

全息成像是一种通过对空间中电磁波/光的特征参数进行编码来实现成像的技术。基于超表面的全息成像具有高效率、高分辨率以及低噪声等特性,在过去的十几年中,科研工作者们相继提出了适用于各个电磁波频段的超表面全息技术。然而,其中大多数工作都是基于无源超表面实现的,它们对电磁波/光的幅度/相位等特征参数的编码是固定的,因此仅能用于重建静态的全息图像,应用场景受限。为了打破这一限制,文献[15]提出了基于1bit相位编码RIS的可编程微波全息成像系统<sup>[15]</sup>。

图3(a)是基于 RIS 的动态全息成像示意图。在不同偏 压下,加载 PIN 二极管的 RIS 单元具有不同的电磁性能,因 此可以通过改变偏压来动态调控其相位特性:当偏压分别为 3.3 V/0 V时,二极管的状态为"ON"/"OFF",单元分别工 作在"0"/"1"两种状态(7.8 GHz)。利用改进的 Gerchberg-Saxton 算法,可以计算出不同全息图像所需的编 码图案,并将其转换为电压编码序列预存在现场可编程门阵 列(FPGA)中。通过这些电压序列对20×20的 RIS 亚胞阵 列(每个亚胞包含5×5个单元)进行馈电。在平面波的照 射下, RIS 形成特定的1 bit 相位分布,从而在空间中实现了 一组动态全息图效果。实测的全息图像如图3(a)所示, 得到的全息影像清晰,且具有较高的分辨率和信噪比。另 外,通过设计幅度和相位独立可调的RIS,可以提高该成像 系统的性能。此外,该方法也可以向更高频段拓展。

#### 2.2 自适应智能感知

对于大多数数字编码和 RIS 而言,其丰富的电磁波调控 功能都是依靠预先编写好的 FPGA 控制程序来实现的,因此 人工干预的步骤必不可少。这使得一方面,基于超表面的系 统一直是一个开环系统,不利于复杂环境中的多系统协调运 作;另一方面,这些系统不包含传感和反馈组件,难以建立 具有自动决策功能的闭环智能系统。解决这个问题的关键在 于将传感器集成到可编程超表面中,从而构建具有自适应功 能的 RIS。

为了具体展示自适应RIS的应用,文献[16]预设了一个 RIS在卫星通信中的应用场景,如图3(b)所示。当飞机绕 地球飞行时,其飞行姿态将发生变化,RIS可以感知该变化 并自适应地调节波束辐射方向,从始至终聚焦于卫星来进行 稳定的通信。这种自适应RIS的特点是在超表面的背面集成 一个陀螺仪传感器、微控制器单元(MCU)和FPGA:传感 器可以检测RIS及其环境的空间姿态和运动状态,并将相应 的角度数据信息实时反馈并发送到FPGA;MCU和FPGA处 理这些数据并按预设的反馈算法产生相应的RIS波束赋形编 码序列。在这种机制下,RIS无需人工操作即可执行自主决 策功能,自动实现自适应波束转向,其波束随方位角的变化 情况如图3(b)所示。这种自适应智能感知模式在未来可 以与人工智能(AI)、大数据等先进技术相结合,从而进一





步扩展其对周围环 境的高精度感知、 学习和记忆等高级 功能。

# 2.3 新体制无线通 信系统

在无线通信领 域中,传统的通信 系统需要利用数 模/模数转展器、 调制/解调器、混 制/解调器以及射频组件 等器件和发射,其系 统架构繁杂,各组 件的成本也比较昂贵。RIS能够根据编码序列形成动态的远 场辐射方向图/近场图案,而不同的方向图/近场图案可以表 征不同的信息。基于这一思想, 文献[17]、[18]提出了一种 基于 RIS 的新体制无线通信架构,称之为直接数字调制 (DDM) 系统。DDM系统主要由FPGA、RIS和接收器组成, 图4(a)展示了信息调制在远场辐射方向上的DDM系统的通 信机制示意图;图4(b)展示了待传输的原始图像和接收到 的图像,该结果证明了该系统的有效性。

近几年,科研人员在时域编码和时空编码RIS的理论研 究中取得了丰硕的成果<sup>[4],[9-14]</sup>。时域编码和时空编码RIS能够 便捷、精确地控制信号幅度谱和相位谱,这使得基带信息的 调制可以直接在 RIS 界面上进行,无需经过数模转换、混 频、射频发射等过程。基于时域编码RIS理论, 文献[4]提出 了一个二进制频移键控(BFSK)无线通信系统。图4(c) 为BFSK系统的示意图,图4(d)展示了接收端恢复出来的 图像信息,该结果证明了BFSK通信系统高效传输信息的能 力。系统在3.6 GHz的载波频率下工作,其数据传输速率为 78.125 kbit/s。为了提高通信系统的数据传输速率, 文献[19] 进一步提出了基于RIS的正交相移键控(QPSK)无线通信 系统[19],系统的数据传输速率可达到1.6 Mbit/s,实现了流 畅、无损的视频传输。图4(e)展示了电影的无线传输场 景实物图。此后, 文献[7]、[20]、[21]基于 QPSK 通信架构进 一步地开发了基于RIS的八进制相移键控(8PSK)、正交幅 度调制16QAM、256QAM的高阶调制体制无线通信方案,其 中文献[21]甚至推广到了毫米波领域应用,使得基于RIS的 新体制无线通信架构得到了广泛推广。

在5G和6G移动通信中,服务于多用户场景的多信道无 线通信技术一直备受重视。解决多信道无线通信的一条重要 技术途径是信道复用技术。文献[22]提出了一种基于时空编 码RIS的空间-频率分集复用的多通道无线通信系统,它实 现了为多个不同位置的用户以不同频率独立地传输多个信息 源的功能,系统示意图如图4(f)所示:从图中可以看出,

波达方向估计技术



<sup>▲</sup>图4 RIS在新体制无线通信系统中的应用

键技术。通过处理接收到的来波信号来估测、定位待测目标 的距离、方位等重要信息,该技术有助于构建智能无线网 络。RIS能够在一定的孔径面上同时、准确地感知和操控空 间电磁波,这为构建新型DOA估计系统提供了有力支持。 最近,文献[25]提出了一种基于RIS的DOA估计方案:作为 一个"随机电磁采样接收器",RIS生成一系列随机的辐射 方向图来感知、接收入射信号,随后通过压缩感知(CS) 和正交匹配追踪(OMP)算法对信号进行处理,从而恢复出 DOA信息。系统原理图如图5(a)所示。更进一步地,文献 [26]所提出的系统将DOA概念和方法应用在毫米波测向应用 中,利用时空编码RIS在毫米波频段实现了DOA估计,并且 可以根据不同的来波方向产生不同的电磁功能。系统原理图 如图5(b)所示。上述两种新型DOA估计系统为高精度电磁 波探测和操控铺平了道路,也促进了先进成像、雷达和无线 通信系统的开发。

# 3 结束语

本文首先系统地介绍了 RIS 的基本概念、物理机理和设 计方法,展现了其在时-空-频等多维度内对电磁波进行调 控的能力,如空间波束赋形、非线性谐波调控与多谐波联合 操控。其次,展示了 RIS 的一些突破性应用,包括全息成 像、智能感知、无线通信与波达方向估计。作为超表面领域 的里程碑之一,RIS 将会为扩展超表面的应用领域,激发新 的活力,并且在未来更先进的系统中发挥重要作用。

## 致谢

本文得到了东南大学信息科学与工程学院戴俊彦老师和

#### 在读博士生汪正兴的帮助和支持,在此表示感谢!

#### 参考文献

- [1] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE access, 2019, 7: 116753-116773. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2935192
- [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): e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
- [3] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces [J]. Journal of materials chemistry C, 2017, 5(15): 3644–3668. DOI: 10.1039/ c7tc00548b
- [4] ZHAO J, YANG X, DAI J Y, et al. Programmable time-domain digitalcoding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems [J]. National science review, 2018, 6(2): 231–238. DOI: 10.1093/nsr/nwy135
- [5] DEBOGOVIC T, PERRUISSEAU-CARRIER J. Low loss MEMSreconfigurable 1-bit reflectarray cell with dual-linear polarization [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(10): 5055-5060. DOI: 10.1109/TAP.2014.2344100
- [6] 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. DOI: 10.1109/JSAC.2020. 3007211
- [7] 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. DOI: 10.1049/el.2019.0400
- [8] LIU S, CUI T J, ZHANG L, et al. Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams [J]. Advanced science, 2016, 3(10): 1600156. DOI: 10.1002/advs. 201600156
- [9] DAI J Y, ZHAO J, CHENG Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface [J]. Light: science & applications, 2018, (7): 90. DOI: 10.1038/s41377-018-0092-z
- [10] ZHANG L, WANG Z X, SHAO R W, et al. Dynamically realizing arbitrary multi-bit programmable phases using a 2-bit time-domain coding metasurface [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68 (4): 2984–2992. DOI: 10.1109/TAP.2019.2955219
- [11] KE J C, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Linear and nonlinear polarization syntheses and their programmable controls based on anisotropic time– domain digital coding metasurface [J]. Small structures, 2021, 2(1): 2000060. DOI: 10.1002/sstr.202000060



<sup>▲</sup>图5 RIS在波达方向估计中的应用

- [12] ZHANG L, CHEN X Q, LIU S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces [J]. Nature communications, 2018, 9(1): 4334. DOI: 10.1038/ s41467-018-06802-0
- [13] DAI J Y, YANG J, TANG W K, et al. Arbitrary manipulations of dual harmonics and their wave behaviors based on space-time-coding digital metasurface [J]. Applied physics reviews, 2020, 7(4): 041408. DOI: 10.1063/5.0017885
- [14] ZHANG C, YANG J, YANG L X, et al. Convolution operations on timedomain digital coding metasurface for beam manipulations of harmonics [J]. Nanophotonics, 2020, 9(9): 2771–2781. DOI: 10.1515/nanoph-2019– 0538
- [15] LI L L, TIE J C, JI W, et al. Electromagnetic reprogrammable codingmetasurface holograms [J]. Nature communications, 2017, (8): 197. DOI: 10.1038/s41467-017-00164-9
- [16] MA Q, BAI G D, JING H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions [J]. Light: science & applications, 2019, (8): 98. DOI: 10.1038/s41377-019-0205-3
- [17] CUI T J, LIU S, BAI G D, et al. Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface [J]. Research (Washington, D C), 2019, 2019: 2584509. DOI: 10.34133/2019/2584509
- [18] WAN X, ZHANG Q, CHEN T Y, et al. Multichannel direct transmissions of near-field information [J]. Light, science & applications, 2019, (8): 60. DOI: 10.1038/s41377-019-0169-3
- [19] DAI J Y, TANG W K, ZHAO J, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface [J]. Advanced materials technologies, 2019, 4(7): 1900044. DOI: 10.1002/ admt.201900044
- [20] DAI J Y, TANG W K, YANG L X, et al. Realization of multi-modulation schemes for wireless communication by time-domain digital coding metasurface [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68 (3): 1618–1627. DOI: 10.1109/TAP.2019.2952460
- [21] 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, 2021, 9(1): nwab134. DOI: 10.1093/nsr/nwab134
- [22] ZHANG L, CHEN M Z, TANG W K, et al. A wireless communication scheme based on space- and frequency-division multiplexing using digital metasurfaces [J]. Nature electronics, 2021, 4(3): 218–227. DOI: 10.1038/s41928-021-00554-4
- [23] 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. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007055
- [24] 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. DOI: 10.1109/LWC.2021.3095172

- [25] LIN M T, XU M, WAN X, et al. Single sensor to estimate DOA with programmable metasurface [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8 (12): 10187–10197. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3051014
- [26] DAI J Y, TANG W K, WANG M T, et al. Simultaneous in situ direction finding and field manipulation based on space-time-coding digital metasurface [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2022, (99): 1. DOI: 10.1109/TAP.2022.3145445

者简介

ľΈ



**柯俊臣**,东南大学信息科学与工程学院在读博士 生;主要研究方向为可编程超表面、阵列天线和 基于智能超表面的无线通信系统;发表论文2篇。



**梁竟程**,东南大学信息科学与工程学院在读博士 研究生;主要研究方向为智能超表面设计;发表 论文2篇。



程强,东南大学信息科学与工程学院教授,2008年 和2010年担任南京超材料国际研讨会副主席;主要 研究方向为超材料的物理机理、设计理论及其在通 信、雷达和天线中的应用;获2010年《New Journal of Physics》最佳论文奖、2010年中国科学 十大进展奖、2014年国家自然科学奖\_\_等奖;发表 论文100余篇,被引用2000余次。