

· 专题一:双清论坛“电磁空间信息资源的认知与利用” ·

## 时空编码数字超材料和超表面研究进展

张磊 崔铁军\*

东南大学 电磁空间科学与技术研究院/毫米波国家重点实验室, 南京 210096

**[摘要]** 超材料是物理、信息、材料等多学科交叉融合的方向,是探究电磁波与物质相互作用的重要载体。近年来,具有时空调制参数的超材料引起了国内外学者的广泛关注。与此同时,基于数字编码的信息超材料和信息超表面由于具有现场可编程功能和同时调控电磁波和数字信息的能力,因此成为超材料新的发展方向。其中,时空编码数字超表面可在时间和空间域调制电磁参数,因此被成功运用于电磁波的空间谱和频率谱的自由操控,它能集能量辐射和信息调制功能于一体,在多维度域内同时调控电磁波和数字信息。本文首先简要概述时空编码数字材料和超表面的基本概念和工作原理,重点介绍了该领域近两年的研究进展,包括谐波调控、非互易效应、智能无线通信等代表性应用,最后探讨了时空编码数字超表面所面临的挑战和未来的发展趋势。

**[关键词]** 信息超表面;数字编码;时空编码;非互易;无线通信;谐波调控

### 1 时空超材料的发展现状与研究意义

超材料是由亚波长尺寸的结构单元进行周期或非周期性排布而成的人工复合材料,可以获得自然界材料不具备的一些参数属性。近二十多年来,超材料发展迅速,已经被广泛地应用于调控电磁波<sup>[1]</sup>。从早期等效媒质理论到变换光学方法,超材料被设计用于实现电磁隐身衣、电磁黑洞、完美吸波器等,产生了很多新奇的物理现象和器件。相比于传统三维体结构的超材料,二维形式的超表面凭借其超薄、低损耗、易加工等优势引起了国内外学者的广泛关注<sup>[2]</sup>。尤其在2011年,广义斯涅耳定律的提出极大地推动了超表面的发展<sup>[3]</sup>,但是此类超表面仅考虑了在界面处引入空间梯度不连续相位,并未探索时间维度的相位不连续,因此仍受洛伦兹互易定理约束。近年来,时变超材料和时空超材料引起了学者们的密切关注<sup>[4,5]</sup>,成为了超材料领域最具有前景的研究方向之一。时变超材料的本构参数在时域按照一定规律被调制,与空间调制相结合,时空超材料可以由时空调制的本构参数来表征,例如时空变化的介电常数、电导率、表面阻抗等。时空超材料的兴起



**崔铁军** 东南大学首席教授,中国科学院院士,IEEE Fellow,长期从事电磁超材料和计算电磁学的研究工作,是科睿唯安全球高被引学者。创建了信息超材料新体系,负责开发了自主可控的电磁专用仿真软件,取得了显著的经济效益与社会效益。研究成果入选2010年中国科学十大进展,作为第一完成人获2011年教育部自然科学奖一等奖、2014年国家自然科学奖二等奖、2016年军队科学技术进步奖一等奖、及2018年国家自然科学奖二等奖等奖项。



**张磊** 博士,现为东南大学毫米波国家重点实验室博士后,2020年7月毕业于东南大学,获工学博士学位,主要从事电磁超材料、时空编码数字超表面以及新型天线设计等方向的研究。目前在国际著名刊物*Nature Electronics*、*Nature Communications*、*Advanced Materials*、*IEEE Transactions*等发表学术期刊论文40余篇,曾获得2019年度宝钢优秀学生特等奖、第六届亚太天线与传播会议最佳学生论文奖、中国光学优秀论文奖等。

产生了一些重要应用,包括光学隔离器、打破互易性、频率转换、谐波生成、多普勒隐身、全双工系统等,突破了传统的空间调制超表面的局限性。然而,

收稿日期:2021-02-18;修回日期:2021-09-18

\* 通信作者,Email: tjcui@seu.edu.cn

本文受到中国博士后创新人才支持计划项目(BX2021062)、中国博士后科学基金(2020M680062)、江苏省博士后科研资助计划(2021K058A)的资助。

这些时空超材料的连续参数表征方法都可归类为“模拟调制”，目前这类时空超材料的研究大都基于理论分析或者数值仿真，实验验证仍十分受限，因此限制了时空超材料的实际应用。

作为电磁超表面的重要分支，数字编码与可编程超材料和超表面的概念由东南大学崔铁军院士团队在 2014 年首次提出<sup>[6]</sup>。数字编码超表面是由有限个基本单元按照一定的编码序列排布而成，例如，1 比特数字编码超表面是由相位相反的“0”和“1”单元构成；2 比特数字编码超表面是由相位差为 90 度的“00”“01”“10”和“11”单元构成；更高比特情况依次类推。这种离散化的数字编码表征方式可以被视作“数字调制”，通过改变编码序列排布就能高效地控制电磁波的辐射或散射特性，可极大程度地简化设计流程、便于优化仿真以及加工测试。在超表面中引入数字编码的概念，也非常适用于结合二极管、MEMS 开关等可调节器件或材料，在现场可编程门阵列(FPGA)的控制下形成数字化可编程超表面，实现对电磁波的动力调控，在不同功能之间实时切换。目前，数字编码与可编程超表面已经被广泛用于波束调控、散射缩减、全息成像、微波成像、信息处理以及无线通信等方面<sup>[7, 8]</sup>。更重要的是，数字编码超表面搭建了物理世界通往数字世界的桥梁，使得研究者能够从信息学科的角度来探索超表面，形成了信息超表面的研究体系<sup>[9]</sup>。

在早期的研究中，数字编码与可编程超表面仅仅考虑了空间编码<sup>[6]</sup>，即在空间域对超表面的表征参数(如相位、幅度、极化、频率等)进行编码，因此空间编码数字超表面只能控制电磁波的空间分布，如近场图案和远场波束。通过将数字编码从空间域拓展到时间域，设计相应的周期性时间编码序列，时间编码数字超表面可以在频率域控制电磁波的频谱分布特性<sup>[10]</sup>。2018 年，时空编码数字超表面的概念被首次提出<sup>[11]</sup>，其表征参数在空间域和时间域进行联合编码，进而可以同时空间域和频率域操控电磁波的散射或辐射特性。也就是说，可以同时调控电磁波的空间传播方向(空间谱)和谐波能量分布(频率谱)。图 1 给出了空间编码、时间编码和时空编码数字超表面的功能特性。时空编码数字超表面在一定程度上借鉴了传统“相位开关屏”和“时间调制阵列”的概念<sup>[11]</sup>，但是进行了时空联合编码的拓展，具备了更强大的电磁调控自由度，已经被成功用于谐波波束调控、多域散射缩减、非互易效应、任意多比特相位生成、频谱伪装、数学运算以及无线通信等实际应用场景中<sup>[12]</sup>。

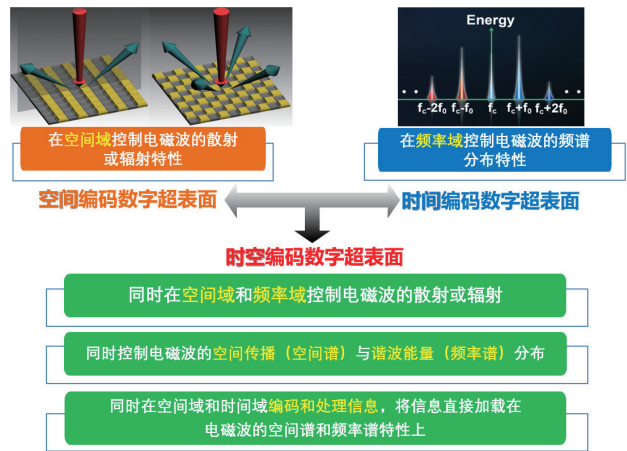


图 1 空间编码、时间编码以及时空编码数字超表面的功能特性

综上所述，时空超材料可以获得传统空间超材料无法实现的物理现象和电磁功能，但由于连续的模拟参数调制在硬件层面实施难度较大，因此很大程度上阻碍了其在实际中的应用。而时空编码数字超表面很好地解决了这个问题，凭借数字编码的方式和简单的硬件架构来执行时空调制，可以在时、空、频域对电磁波进行多维度调控，呈现出蓬勃的发展趋势，在未来无线通信、雷达、成像等新体制信息系统中具有广阔的应用前景。

## 2 时空编码数字超表面的基本概念及工作原理

时空编码数字超表面是在早期数字编码超表面概念的基础上发展而来，Zhang 等给出了其基本定义：时空编码数字超表面一般是由  $M \times N$  个可编程单元构成的二维阵列，如图 2 所示，每个单元(图 2 中黄色方块表示)都具有相同的结构并集成了一个开关二极管<sup>[11]</sup>。通过加载不同的偏置电压，每个单

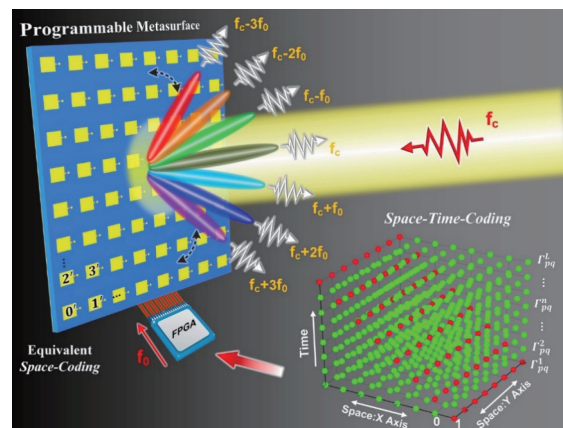


图 2 时空编码数字超表面的工作原理示意图<sup>[11]</sup>

元的反射系数都可以按照量化的幅度或相位在时间上进行动态切换。在 1 比特相位调制情形下,单元的相位响应将在“0”和“1”状态中切换,分别对应 0 度和 180 度反射相位。数字超表面在空间域和时间域进行联合编码,图 2 中右下角给出了一种三维时空编码矩阵表征,数字超表面按照相应的时空编码矩阵进行变化时,在空间维具有特定的空间编码排布,在时间维具有周期性时间编码序列,因此可以同时控制电磁波的空间传播方向和谐波频谱分布。

时空编码数字超表面中的每个单元都拥有一组周期为  $T_0$  的时间编码序列,在 FPGA 的控制下进行周期性循环切换。由傅里叶变换理论可知,时间上周期变换的函数将在频率域产生离散的谐波频谱分布。当频率为  $f_c$  的单音平面波入射到时空编码数字超表面上,在时间域上会受到频率为  $f_0 = 1/T_0$  的周期调制,因此入射波能量将会被搬移到各个谐波频率  $f_c + mf_0$  处。同时与空间编码分布相结合,可以独立设计不同谐波频率处的电磁波空间分布。值得一提的是,每个单元按照相应的时间编码序列周期性切换,会在不同谐波频率处产生等效相位和等效幅度<sup>[11]</sup>。通过设计不同时间编码序列,就可以在特定频率处控制每个单元的等效反射系数,进而独立地调控每个谐波的电磁功能。

### 3 研究进展及代表性应用

得益于时空联合编码机制,数字可编程超表面可以同时空间域和频率域实时操控电磁波。通过精心设计三维时空编码矩阵,能够同时在空间域和时间域编码与处理数字信息,将信息加载于电磁波的空间谱和频率谱特征上。时空编码方案极大地拓展了传统超表面的应用范围,在雷达、成像、无线通信等信息系统中将发挥无穷潜力。近两年来,时空编码数字超表面呈现了飞速的发展趋势,下面将介绍一些重要的研究进展和代表性应用。

#### 3.1 电磁波束和频谱的联合调控

时空编码数字超表面可以实现灵活的电磁波束和频谱调控,由此产生的一个重要应用就是谐波波束扫描。如图 2 所示,通过设计合适的时空编码矩阵,数字超表面可以同时产生多个谐波波束,不同谐波的波束指向不同的空间位置。时空编码数字超表面可以利用简单的时间梯度编码序列来实现谐波波束扫描,但是这种编码方案所实现的谐波最大电平值差别较大。为了解决这一问题,Zhang 等引入了二级制粒子群算法(BPSO)来优化时空编码矩阵,获

得了出色的谐波波束扫描效果,并加工了实际样品进行了实验验证<sup>[11]</sup>。此外,时空编码数字超表面还可以凭借物理层低比特相位实现等效多比特相位,Zhang 等提出了一种矢量分析方法,利用 2 比特时空编码数字超表面实现了任意多比特可编程相位,用于精确地实现复杂的波束赋形<sup>[13]</sup>。

通过赋予时空编码数字超表面不同的时域调制波形(即时间编码序列),可以获得任意的反射波频谱分布。如图 3 的示意图所示,通过 FPGA 输入不同的时间编码序列到数字可编程超表面中,例如 1 比特“010101...”和 2 比特“00-01-10-11...”序列,分别可以获得对称的奇次谐波分布和非对称的 +1 阶谐波占主导的频谱分布<sup>[10]</sup>。区别于传统低散射表面将入射波能量分散到空间域<sup>[6]</sup>,时空编码数字超表面还具有频谱扩散功能,不仅可以入射波能量分散到空间各个方向,也可以分布在频率域的各个谐波处。这种时空编码方案可以将入射电磁波均匀地分散到空间域和频率域,实现更出色的散射缩减效果<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 可编程非互易效应及频率转换

时空超材料已经被证明可以打破洛伦兹互易性,Zhang 等利用一款 2 比特时空编码数字超表面从实验的角度验证了非互易效应<sup>[14]</sup>。如图 4 所示,2 比特数字超表面是由  $N$  列可编程单元构成,在 FPGA 的控制下按照特定的时空梯度编码矩阵进行切换。图 4 展示了基于时空编码数字超表面的二端口反射系统,在前向反射情形下,频率为  $f_1$  的平面波(红色波束)以  $\theta_1$  的角度斜入射到超表面上,将主要转换成  $\theta_2$  方向上频率为  $f_2$  的反射波(绿色波

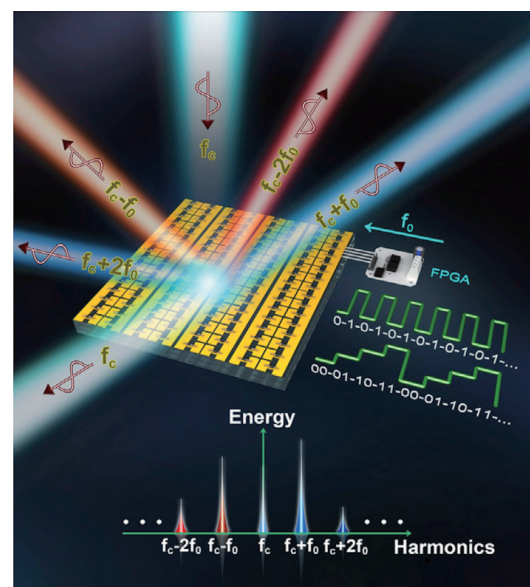


图 3 灵活调控电磁波的频谱分布<sup>[10]</sup>

束);而在时间反演情形下,频率为  $f_2$  的平面波(绿色波束)以  $\theta_2$  的角度斜入射到超表面上,将主要转换成  $\theta_3$  方向上频率为  $f_3$  的反射波(紫色波束)。由于时空调制的作用,时间反演情形下反射波的频率  $f_3$  和角度  $\theta_3$  分别与初始入射波的频率  $f_1$  和角度  $\theta_1$  产生偏离,即  $f_3 \neq f_1, \theta_3 \neq \theta_1$ ,这也就表明时空编码数字超表面实现了非互易的反射过程。

在时间反演情形下的反射波不再沿着前向反射情形下初始入射波的方向传播,并且伴随着一定的频率转换。也就是说,对于斜入射情形,时间反演的反射通道与前向反射的入射通道在空间域和频率域都产生了隔离,如图 4 所示。由于目前商用二极管的切换速率有限,难以在空间域分辨出明显的角度偏差  $|\theta_3 - \theta_1|$ ,但是可以利用高精度频谱分析仪在频率域观察到频率隔离  $|f_3 - f_1|$ ,因此也首次通过实验验证了基于时空调制超表面的非互易效应。需要强调的是,FPGA 控制的时空编码数字超表面可以实现完全可编程的非互易效应及频率转换<sup>[14]</sup>,非互易反射的角度和频率都可以通过切换时空编码矩阵来实时控制,在未来隔离器、混频器、双工器、单向传输、无线通信和雷达系统中将发挥重要作用。

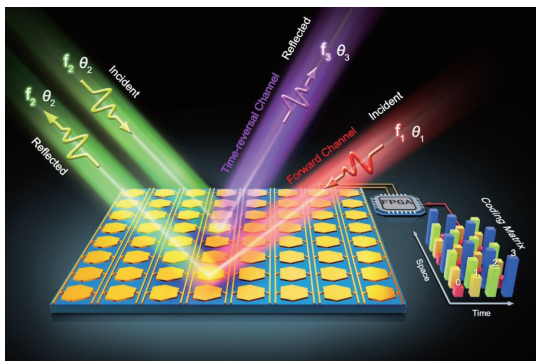


图 4 非互易效应的原理示意图<sup>[14]</sup>

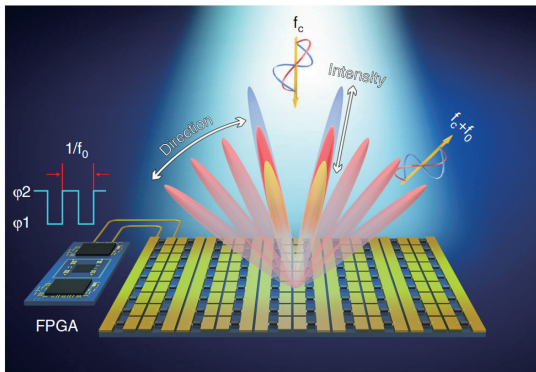
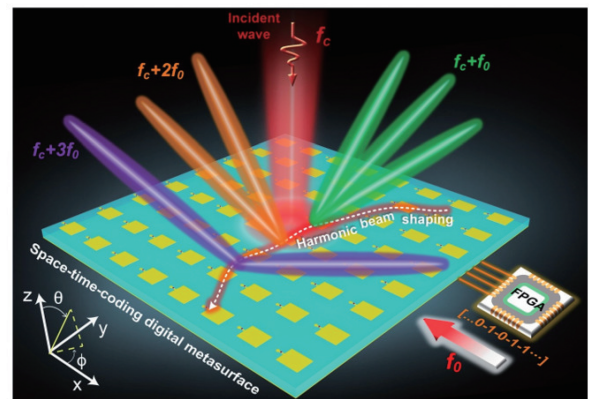


图 5 谐波幅度和相位的独立控制<sup>[15]</sup>

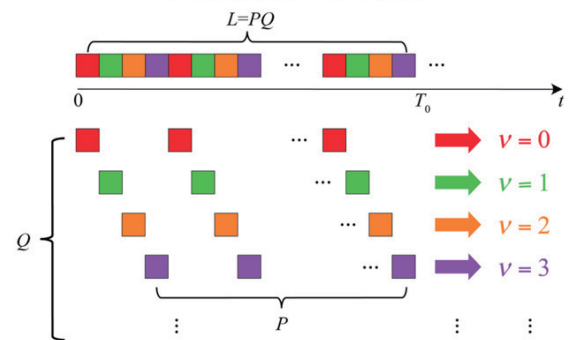
### 3.3 电磁参数的全方位控制

如何有效控制电磁波的幅度、相位、频率、极化等参数,一直是电磁学领域研究者们关心的问题。Dai 等给出了一种独立控制谐波频率幅度和相位的方法,通过改变方波型时间调制信号的初始相位差  $|\phi_1 - \phi_2|$  来控制特定谐波频率的幅度,并引入时移  $t_0$  来改变该谐波频率的相位<sup>[15]</sup>。如图 5 所示,通过时移改变相位可以实现波束赋形,而改变谐波的幅度可以控制波束能量的大小。然而,这种谐波幅相独立调控方法仅适用于单一谐波频率。Dai 等给出了一种任意双谐波的操控方法,核心思想就是通过改变时间调制信号的初始相位和时移来实现对任意双谐波相位的独立综合<sup>[16]</sup>。

时空编码数字超表面产生的多个谐波之间存在固有的纠缠特性,传统的时空编码方案无法同时对多谐波的独立调控。虽然 Zhang 等利用优化算法来实现多个谐波处的波束控制,但是这种方法复杂度高,需要耗费较多的计算资源和时间<sup>[11]</sup>。Castaldi 等提出了一种更通用的多谐波联合独立调控方法,通过精心设计的时间交织编码序列,可以有效地对多个谐波进行解耦,从而在多个频率处(包括基波频率)实现独立的波束控制与赋形,如图 6(a) 所示<sup>[17]</sup>。图 6(b) 给出了时间交织编码序列的基本



(a) 多谐波联合独立调控示意图



(b) 交织时间编码序列示意图

图 6 多谐波联合独立调控<sup>[17]</sup>

构造:一组长度为  $L$  的时间编码序列可以由  $Q$  组长度为  $P$  的编码子序列构成,相同颜色方块表示的子序列用于控制  $\nu$  阶谐波频率处的幅度和相位,从而实现不同谐波频率的解耦,最终在多个频率处独立地实现完全不同的电磁功能。

在特定的应用场景中需要提高抑制高阶谐波来减少频谱污染,为了提高非线性谐波的生成效率,Dai 等提出了一种高效率的  $\pm 1$  阶谐波产生方法,通过 FPGA 输入锯齿型时间调制信号给时空编码数字超表面,可以获得近 90% 的转换效率,高阶谐波能量低于  $-21$  dB<sup>[18]</sup>。另一方面,目前大多数时空编码数字超表面只能在单一线极化波的激励下工作,而 Ke 等给出了一种双极化时空编码数字超表面,各向异性的单元结构在  $x$  和  $y$  线极化波照射下可以获得独立的相位响应,具有  $x$  和  $y$  两个方向独立的控制通道<sup>[19]</sup>。通过改变  $x$  和  $y$  两个方向通道的时间调制信号,可以在基波频率和谐波频率处实现极化转换,包括任意角度线极化、交叉线极化、左旋圆极化和右旋圆极化,该方法实现了对线性和非线性反射波的任意极化调控。

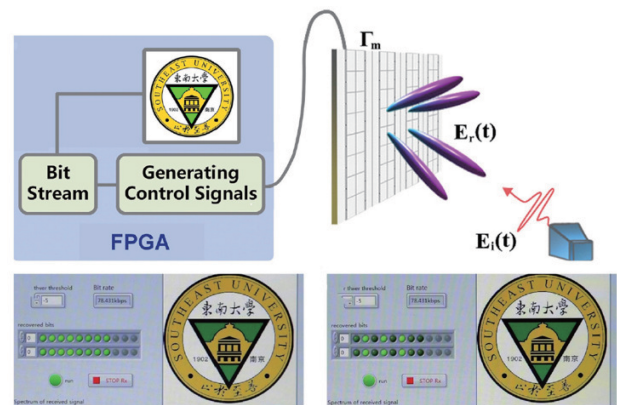
### 3.4 无线通信发射机新架构

时空编码数字超表面带来最激动人心的应用之一就是用于构造新架构的无线通信系统。目前 5G 通信网络正在商业化部署,毫米波通信和大规模 MIMO 系统都对高性能的射频链路和天线阵列提出了极大的需求,从而导致了硬件复杂度、成本以及功耗等问题。时空编码数字超表面可以凭借简单的硬件架构来精确地控制电磁波的幅度和相位,在超表面界面上处理信息,将基带信号直接调制到载波上,省去了传统通信系统中数模转换、滤波和混频的过程。

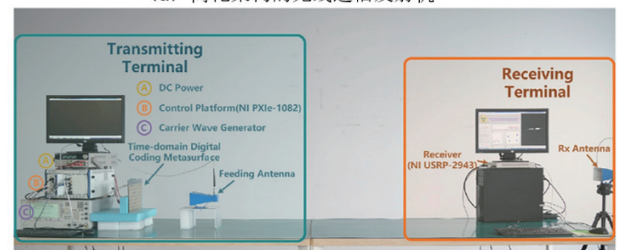
Zhao 等提出了一种利用数字超表面来实现二进制频移键控(BFSK)的调制方法,通过改变时间编码序列,可分别将载波频率搬移到  $+1$  阶和  $-1$  阶谐波,因此实现 BFSK 的信息调制方式<sup>[10]</sup>。图 7(a)展示了这种简化的无线通信系统发射机架构,作为新体制无线通信的平台,极大程度上降低了系统的复杂度、功耗和成本。Zhao 等实现的 BFSK 无线通信系统的数据传输速率仅为 78.125 Kps<sup>[10]</sup>,为了进一步提高数据传输速率,Dai 等提出了一种基于可编程超表面的正交相移键控(QPSK)调制方法,实现了 1.6 Mbps 的数据传输速率,并进行了视频传输的实验验证,该新体制无线通信系统的实验场景如图 7(b)所示<sup>[20]</sup>。此外,8PSK 和 16QAM 等更高阶的调制方式也在 Dai 等的研究中得到了实验验证<sup>[21]</sup>。

### 3.5 信息超表面无线通信新体制

随着各国 5G 通信商业化部署的有序开展,6G 无线通信技术逐渐兴起。信息超表面在通信领域亦被称为可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS),近年来受到了电磁学和通信领域学者和工程师们的密切关注<sup>[22]</sup>,目前已被列为 6G 通信的候选技术之一。信息超表面可以智能地调整无线信道环境,提高设备之间的通信性能,以低成本和低功耗的优势实现无线中继的功能。时空编码数字超表面可以控制其反射无线信号的幅度、相位、频率甚至极化特性,非常适用于实时调整和重新配置无线传播环境,因此可重构智能表面也可归属于时空编码数字超表面的功能范畴。Tang 等深入研究了可重构智能表面的物理电磁特性,建立了不同场景下可重构智能表面辅助无线通信在自由空间的路径损耗模型<sup>[23]</sup>,如图 8(a)所示。图 8(b)给出了可重构智能表面辅助实现波束赋形的场景,根据用户移动位置重新定向波束,使得用户接收信号的功率最大化。通过对三种不同尺寸的可重构智能表面进行实验测量,揭示了自由空间路径损耗与距离 RIS 接收/发射的距离、RIS 尺寸、RIS 近远场效应以及收发天线和 RIS 单元的方向图之间的关系,实验测试结果与理论预测非常符合,为可重构智能表面应用于 6G 无线通信提供了理论与实验指导。



(a) 简化架构的无线通信发射机



(b) 新架构无线通信系统

图 7 新架构无线通信发射机<sup>[10,20]</sup>

#### 4 未来展望及建议

尽管近年来时空编码数字超表面得到了快速发展、引发了国内外学者的广泛关注,但目前还有很多亟待解决的问题,依然面临着一些技术上的挑战:

(1) 现有的时空编码数字超表面在实验中仅采用纯相位调制,在实际应用中幅度可编程和幅相可编程的时空编码数字超表面平台还未实现。因此,一个重要的挑战就是如何设计可编程单元达到幅度和相位联合调制,幅相联合时空编码的数字超表面将具有更强大的电磁波操控能力,例如可以提高多谐波调控的频谱效率。

(2) 现有的时空编码数字超表面均是反射型设计,在一些应用场景下,需要由前置馈源天线来提供激励电磁波信号,因此在馈源位置的方向就会造成一定的遮挡效应。因此,设计透射型或者波导馈电型的可编程超表面成为了解决遮挡问题的一个有效途径<sup>[24, 25]</sup>,当然这些方案对可编程超表面的设计也提出了更高的要求,需要攻克电磁原理和工程技术上的难点。

(3) 现有的时空编码数字超表面都是基于商用开关二极管和变容二极管来实现可编程调控<sup>[10-21]</sup>,这些方法的调制速率受限并且无法拓展到更高的频率(如太赫兹频段和光波段)。因此,提高可编程的切换速率以及开发新的调控手段是提升时空编码数字超表面性能的关键因素。未来需要探索一些更快切换速率的调控方法,例如引入微机电系统(MEMS)、二氧化钒、二维电子气、液晶、石墨烯等技术<sup>[26]</sup>,使得时空编码数字超表面可以工作于更高的频段,实现更快的调制速率、更大的调控范围、工作

带宽以及更低的损耗。

(4) 探索时空编码数字超表面在未来无线通信场景中的更多应用潜力,充分利用其同时具备电磁调控和信息处理的优势,凭借简单的硬件结构和低廉的成本实现直接信息调制、改善信道、增强信号覆盖、抑制干扰等功能。此外,需要结合更多信息论和信号处理中的相关理论来分析时空编码数字超表面,充分挖掘时空编码方案给数字超表面带来的物理内涵,为无线通信、雷达、成像、识别感知、数学运算等新型信息超表面系统提供理论指导。随着人工智能技术的飞速发展,信息超表面硬件平台与机器学习算法的结合迎来了新的发展契机<sup>[27, 28]</sup>,时空编码数字超表面也将朝着软件定义、自适应以及可认识的智能化方向演进,最终实现对电磁波的智能感知与多维度实时调控。

#### 参 考 文 献

- [1] Cui TJ. Microwave metamaterials from passive to digital and programmable controls of electromagnetic waves. *Journal of Optics*, 2017, 19(8): 084004.
- [2] Glybovski SB, Tretyakov SA, Belov PA, et al. Metasurfaces: from microwaves to visible. *Physics Reports*, 2016, 634: 1–72.
- [3] Yu NF, Genevet P, Kats MA, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 2011, 334(6054): 333–337.
- [4] Caloz C, Deck-Leger ZL. Spacetime metamaterials—part I: General concepts. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1569–1582.
- [5] Caloz C, Deck-Leger ZL. Spacetime metamaterials—part II: theory and applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1583–1598.
- [6] Cui TJ, Qi MQ, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 2014, 3: e218.
- [7] 张磊, 刘硕, 崔铁军. 电磁编码超材料的理论与应用. *中国光学*, 2017, 10(1): 1–12.
- [8] Cui TJ, Li LL, Liu S, et al. Information metamaterial systems. *iScience*, 2020, 23(8): 101403.
- [9] Cui TJ, Liu S, Zhang L. Information metamaterials and metasurfaces. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(15): 3644–3668.
- [10] Zhao J, Yang X, Dai JY, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems. *National Science Review*, 2018, 6(2): 231–238.
- [11] Zhang L, Chen XQ, Liu S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4334.
- [12] Zhang L, Dai JY, Moccia M, et al. Recent advances and perspectives on space-time coding digital metasurfaces. *EPJ Applied Metamaterials*, 2020, 7(7): 2020007.
- [13] Zhang L, Wang ZX, Shao RW, et al. Dynamically realizing arbitrary multi-bit programmable phases using a 2-bit time-domain coding metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 2984–2992.
- [14] Zhang L, Chen XQ, Shao RW, et al. Breaking reciprocity with space-time-coding digital metasurfaces. *Advanced Materials*, 2019, 31(41): e1904069.

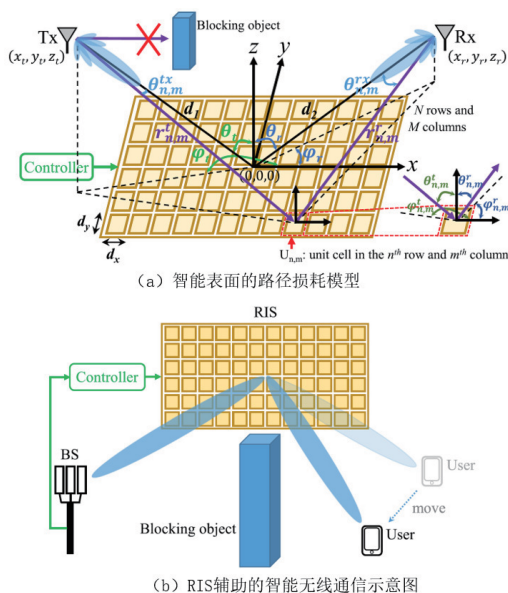


图 8 基于智能表面的无线通信新体制<sup>[23]</sup>

- [15] Dai JY, Zhao J, Cheng Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 90.
- [16] Dai JY, Yang J, Tang WK, et al. Arbitrary manipulations of dual harmonics and their wave behaviors based on space-time-coding digital metasurface. *Applied Physics Reviews*, 2020, 7(4): 041408.
- [17] Castaldi G, Zhang L, Moccia M, et al. Joint multi-frequency beam shaping and steering via space-time-coding digital metasurfaces. *Advanced Functional Materials*, 2020, 31(6): 2007620.
- [18] Dai JY, Yang LX, Ke JC, et al. High-efficiency synthesizer for spatial waves based on space-time-coding digital metasurface. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(6): 1900133.
- [19] Ke JC, Dai JY, Chen MZ, et al. Linear and nonlinear polarization syntheses and their programmable controls based on anisotropic time-domain digital coding metasurface. *Small Structures*, 2020, 2(1): 2000060.
- [20] Dai JY, Tang WK, Zhao J, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900044.
- [21] Dai JY, Tang W, Yang LX, et al. Realization of multi-modulation schemes for wireless communication by time-domain digital coding metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1618–1627.
- [22] Renzo M, Zappone A, Debbah M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces; how it works, state of research, and road ahead. (2020-04-20)/[2021-02-02]. <https://arxiv.org/abs/2004.09352>.
- [23] Tang WK, Chen MZ, Chen XY, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement. (2020-09-14)/[2021-02-11]. <https://arxiv.org/abs/1911.05326>.
- [24] Li YB, Li LL, Xu BB, et al. Transmission-type 2-bit programmable metasurface for single-sensor and single-frequency microwave imaging. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23731.
- [25] Smith DR, Yurduseven O, Mancera LP, et al. Analysis of a waveguide-fed metasurface antenna. (2017-11-04)/[2021-01-11]. <https://arxiv.org/abs/1711.01448>.
- [26] Wang L, Zhang Y, Guo X, et al. A review of THz modulators with dynamic tunable metasurfaces. *Nanomaterials*, 2019, 9(7): 965.
- [27] Li LL, Ruan HX, Liu C, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1082.
- [28] Li L, Shuang Y, Ma Q, et al. Intelligent metasurface imager and recognizer. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 97.

## Recent Progress of Space-Time-Coding Digital Metamaterials and Metasurfaces

Zhang Lei    Cui Tiejun\*

*Institute of Electromagnetic Space and State, Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096*

**Abstract** Metamaterial is a research direction of interdisciplinary integration of physics, information, and material sciences, which can be used to explore the nature of the interaction between electromagnetic waves and matters. In recent years, metamaterials with spatiotemporally modulated parameters have attracted great attention from related researchers all over the world. In the meantime, information metamaterials and metasurfaces characterized by digital coding have powerful field programmable capabilities and can manipulate electromagnetic waves and digital information simultaneously, hence they have become a very promising research area. Among the information metasurfaces, space-time-coding digital metasurfaces have already been used to control the space and frequency spectra of the electromagnetic waves, which integrate the functions of energy radiation and information modulation, and regulate the electromagnetic waves and digital information simultaneously in multi-dimensional domains. In this article, we will first briefly outline the basic concepts and working principles of the space-time-coding digital metasurfaces, and then introduce important research progress in this area over the past two years, including harmonic manipulations, nonreciprocity effects, and intelligent wireless communications. Finally, we discuss the existing challenges and future development trends of the space-time-coding digital metasurfaces.

**Keywords** information metasurfaces; digital coding; space-time-coding; nonreciprocity; wireless communication; harmonic manipulation

(责任编辑 姜钧译)

\* Corresponding Author, Email: [tjcui@seu.edu.cn](mailto:tjcui@seu.edu.cn)