

非线性超表面新模式: 时空编码 数字超表面

戴俊彦^{1,2} 崔铁军^{1,†}

(1 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)

(2 香港城市大学毫米波与太赫兹国家重点实验室 香港 999077)

2021-04-03收到

† email: tjcui@seu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210502

New model of nonlinear metasurfaces: space-time-coding digital metasurfaces

DAI Jun-Yan^{1,2} CUI Tie-Jun^{1,†}

(1 State Key Laboratory of Millimeter Waves, Institute of Electromagnetic Space, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(2 State Key Laboratory of Terahertz and Millimeter Waves, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

摘要 超表面是由亚波长结构组成的超薄人工表面,对电磁波具有突出的调控能力。近年来,因其在非线性效应增强方面的巨大潜力,超表面引起了人们越来越多的重视。具有现场可编程能力和时空信息调制能力的时空编码数字超表面可精准、高效地操控非线性电磁效应和电磁信息,因此成为非线性超表面的一种新模式。文章首先介绍时空编码数字超表面的基本概念,重点讨论近几年在非线性电磁调控方面的研究进展,包括谐波生成、电磁参数控制和非线性波前调控等相关工作。最后,对时空编码数字超表面面临的挑战及未来的发展趋势进行了总结和展望。

关键词 超表面, 数字编码, 时空编码, 频率转换, 非线性谐波调控

Abstract A metasurface is an ultrathin artificial surface, composed of sub-wavelength structures, which exhibits an extraordinary capability in controlling electromagnetic waves. It has attracted more and more interest owing to its huge potential in enhancing nonlinear effects. In recent years, space-time-coding digital metasurfaces with field programmable capabilities and spatiotemporally modulated electromagnetic parameters have been successfully used to manipulate nonlinear electromagnetic effects accurately and efficiently, and have thus become a new model of nonlinear metasurfaces. In this article, we first briefly outline the basic concepts of space-time-coding digital metasurfaces, and then review the recent research on nonlinear electromagnetic manipulation, including harmonic generation, electromagnetic parameter control, and nonlinear wavefront control. Finally, current challenges and future development prospects will be summarized.

Keywords metasurfaces, digital coding, space-time-coding, frequency translation, nonlinear harmonic manipulation

1 引言

超表面是由周期或非周期性排列的单元结构组成的超薄人工表面,可以具备超越自然材料的一些参数特性。基本单元通常具有亚波长尺寸,通过精心设计其形状、尺寸、方向及排列方式,能够操纵电磁场和电磁波与物质的相互作用^[1]。十几年来,超表面凭借其轻薄、低损耗、易加工等特点实现了完美吸波器、超透镜、全息图等新奇的物理现象和器件^[2-4]。其中,由于超表面的二维属性大大放宽了在材料设计以及相位匹配条件中的限制,因而在频率转换等非线性光学领域具有广泛的应用前景。此外,超表面的非线性特性不仅取决于所使用的非线性材料,还与超表面单元结构息息相关,通过不同材料与单元结构获得的多种谐振效应,可以增强局部光场,从而实现较大的非线性效应,促进了非线性超表面的发展^[5-7]。然而,此类超表面往往仅考虑在空间维度上通过改变局部的非线性幅相响应来控制整体的非线性过程,但忽略了其在时间维度上的可能性。近年来,时变超表面和时空超表面吸引了众多学者们的关注^[8,9],成为了超表面领域内极具前景的研究热点之一。其中,时变超表面具有在时间域内按一定规律变化的本构参数,并能由这些时变参数进行表征,例如时变的介电常数、磁导率、表面阻抗等。在这一基础上,结合原有的空间

调制技术,可进一步衍生出具有时空调制本构参数的超表面,即时空超表面。这一类新的超表面极大地拓展了超表面对电磁波的调控能力,产生了一系列新物理现象,例如频率变换、非线性谐波调控、伪多普勒效应、非互易效应等。但这些时空超表面采用的是连续参数表征方法,受限于实际过程中复杂、低效的调控方式,因此大部分研究工作只有理论分析或数值仿真,缺乏实验验证。

为了拓展超表面的应用前景,东南大学崔铁军教授团队在2014年首次提出了数字编码与可编程超表面的概念^[10]。其中,数字编码超表面是由有限种基本单元按照特定的编码序列排布而成,例如,1比特数字编码超表面分别由“0”和“1”两种单元构成,它们之间具有 180° 的相位差;2比特数字编码超表面分别由“00”、“01”、“10”和“11”四种单元构成,彼此之间具有 90° 的相位差;而更高比特的情况则依次类推。使用这种离散的、数字化的编码序列来表征超表面,只需要改变序列的排布就可以方便、有效地改变超表面调控电磁波的方式,极大地简化了超表面的设计流程。同时,数字编码超表面通过引入一些可调节器件或材料(例如开关二极管、变容管等),辅以现场可编程门阵列(FPGA)或单片机(MCU)等程控器件,在不同的功能之间进行实时切换,形成了对电磁波的实时动态调控,从而实现了现场可编程超表面。此外,数字编码超表面通过将实际的物理结构抽象化为数字编码序列,构建了物理世界与数字世界新的纽带,为研究者们提供了一个从信息学科来研究超表面的全新角度,创建了信息超表面新体系^[11]。近年来,这一新概念超表面已被广泛应用于波束赋形、雷达散射截面缩减、电子对抗、微波成像以及无线通信等方面^[12-19]。

与传统超表面类似,在数字编码和可编程超表面早期的研究中只关注于在空间维度对其表征参数(如幅度、相位、极化、频率等)进行编码,因而只能调控电磁波的空间分布。通过将数字编码的概念拓展至时间域,设计出随时间周期变化的编码序列,便形成了可以灵活控制电磁波频谱分布的时间编码数字超表面^[20]。进一步地,如果

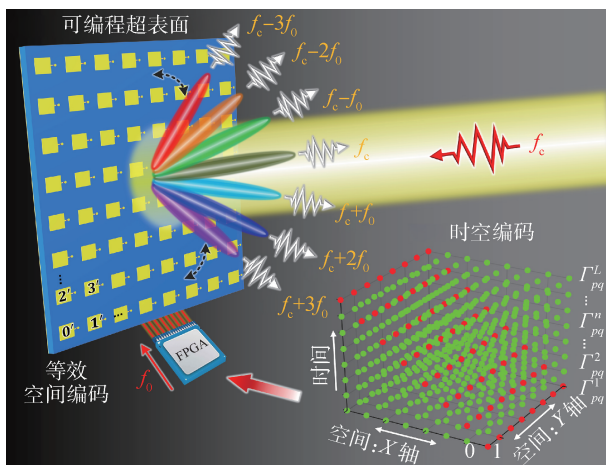


图1 时空编码数字超表面(左)与三维时空编码矩阵(右)示意图^[21]

将空间编码与时间编码相结合，时空编码数字超表面应运而生，其可以同时空间域(如空间传播方向)与频率域(如频谱能量分布)调控电磁波^[21]。与时空超表面不同的是，时空编码数字超表面得益于数字化编码带来的简化的设计流程与高效的调控方式，已成功实现了谐波生成、电磁表征参数控制、非线性波前调控等诸多非线性功能^[20-30]，展现出其强大的非线性调控能力，因而有望成为非线性超表面的一种新模式。

文章总结了时空编码数字超表面近年来在非线性超表面领域中的一些重要应用，首先简要介绍了时空编码数字超表面的基本原理，接着依次讨论了谐波生成与高效率频率转换过程，对谐波幅度/相位/极化等电磁表征参数的控制，以及非线性波前调控，最后对时空编码数字超表面当前面临的挑战以及未来的发展方向做了总结与展望。

2 时空编码数字超表面的基本原理

2018年，在数字编码与可编程超表面的基础上，时空编码数字超表面的概念被首次提出^[21]，如图1所示，一个由 $M \times N$ 个可编程基本单元构成的二维阵列，其中每个单元(图1左边黄色方块所示)均集成了可调节器件，其电磁特性(如幅度/相位/极化等)可被实时调控。基于可编程器件的外部控制电路FPGA可以同时输出 $M \times N$ 路控制信号分别控制超表面的每个单元，其中每路信号具体为在时间上周期变化的某一特定编码序列。以一个具有 8×8 规模的1比特时空编码数字超表面为例，其单元反射系数的相位响应可在“0”和“1”状态中切换，分别对应 0° 与 180° 的反射相位。在时间维度上，每个基本单元被1组独立的时间编码序列控制，其编码状态随着时间周期变化；在

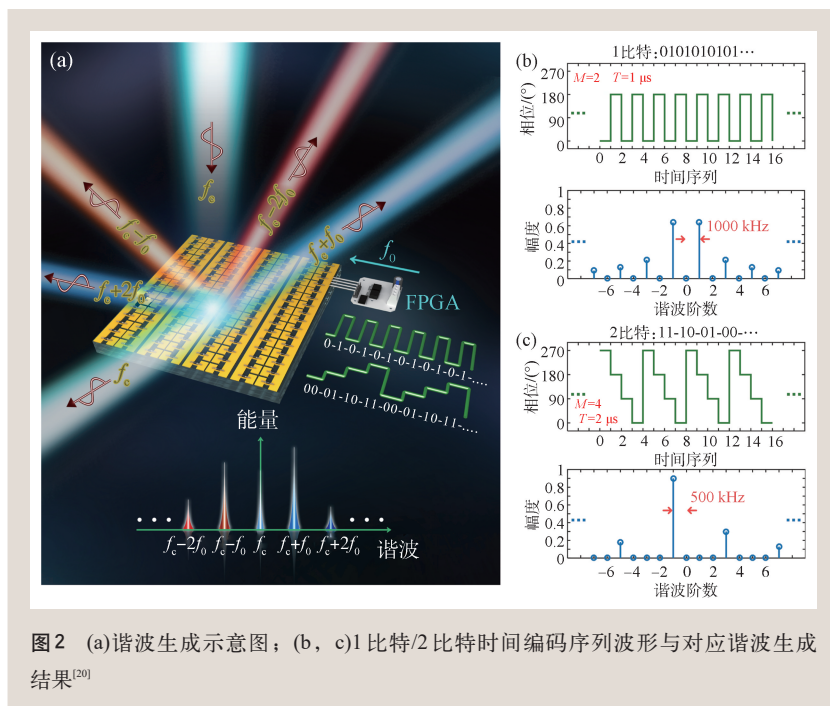


图2 (a)谐波生成示意图；(b, c)1比特/2比特时间编码序列波形与对应谐波生成结果^[20]

空间维度上，整个超表面在同一时刻由64组不同的编码序列控制，呈现特定的空间编码排布。这种在时间域与空间域联合编码的方式，使得整个超表面各单元的编码状态需要用一种全新的三维时空编码矩阵进行表征，如图1右边所示，其中绿点与红点分别代表编码状态“0”和“1”。

时空编码数字超表面对电磁波的调控原理可以从空间域与频率域进行分析。首先，超表面每个单元都由一组周期为 T 的时间编码序列控制，而根据傅里叶变换理论可知，周期时变信号在频率域具有由一系列离散谐波组成的频谱分布，其基本谐波频率为 $f_0=1/T$ 。当频率为 f_c 的电磁波经时空编码数字超表面调制时，会产生空间混频效应，电磁波能量将被调制到各阶谐波频率 f_c+kf_0 处，而时间编码序列可以同时调控这些谐波频率的幅度与相位。同时，由于超表面各个单元具有互相独立的时间编码序列，每组序列在同一谐波频率处具有相应的幅度与相位，因此可以结合空间编码原理，利用超表面各单元在谐波频率处的等效幅度与相位，实现谐波波前调控。最终，通过精心设计的时空编码矩阵，就可以实现控制电磁波频谱分布的同时，独立调控各阶谐波对应的电磁功能。

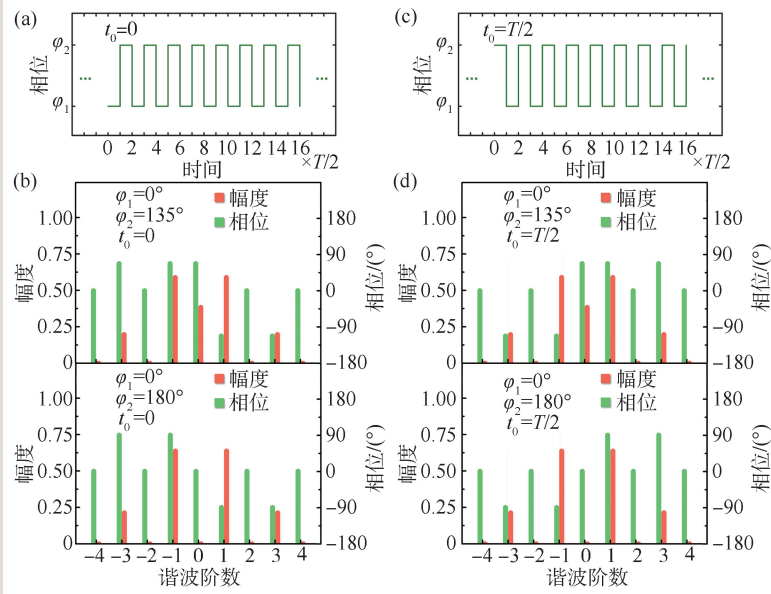


图3 单元反射系数相位波形与不同相位差 $|\varphi_2-\varphi_1|$ 下各阶谐波幅度与相位分布 (a, b) 无时移; (c, d) 时移 $T/2$

3 谐波生成

频率转换是非线性领域内的重要应用之一, 而时空编码数字超表面对电磁波频谱具有灵活的调控能力, 因此十分适用于实现非线性谐波生成。通过调整时间编码序列的长度、周期、排序方式等参数, 可以对电磁波频谱中各阶谐波的频率及强度进行任意控制。如图2(a)所示, 文献[20]使用FPGA将不同的时间编码序列加载至超表面, 获得了不同的谐波生成结果。例如, 当加载1比特时间编码序列“010101...”时, 序列长度为2, 周期为 $1\ \mu\text{s}$, 基本谐波频率为1000 kHz, 可以生成对称分布的一系列奇次谐波, 如图2(b)所示; 当加载2比特时间编码序列“11-10-01-00...”时, 序列长度为4, 周期为 $2\ \mu\text{s}$, 基本谐波频率为500 kHz, 可以生成具有非对称分布的奇次谐波, 如图2(c)所示。值得注意的是, 利用时空编码数字超表面进行谐波生成的方案, 所生成的谐波能量来自于对入射电磁波能量的重新分配, 因此具有很高的能量转化效率。例如上述两种时间编码序列情形下, -1阶谐波的能量转化效率分别达到了40%和81%。不难推断, 当采用更高比特时间编码序列进行谐波生成时, 可以获得

更高的能量转化效率。同时, 当更多的能量都集中于某一阶谐波时, 其他阶谐波将被抑制, 使得谐波生成后的频谱更加纯净。基于此, 文献[22]设计了一个高效率频率转化的时空编码数字超表面, 其利用接近线性相位变换的高比特时间编码序列, 在实验中获得高达88%的能量转化效率和超过21 dB的杂散谐波抑制比。而与之相反的是, 文献[21]提出了利用二级制粒子群算法(BPSO)优化时空编码矩阵的方法, 使得入射的电磁波能量尽量均匀、无序的分散到各阶谐波处, 同时还能将各阶谐波的能量分散到空间各个方向。区别于传

统随机表面将入射波能量分散到空间域来降低雷达散射截面积的方式, 这一方法同时考虑了将能量分散至空间域和频率域, 因而能获得更好的雷达散射缩减效果^[21]。需要强调的是, 利用FPGA控制的时空编码数字超表面可以灵活调控谐波生成的频率、数量与转化效率, 在未来频率综合器、混频器、电子对抗、无线通信以及雷达系统中将产生重要影响。

4 电磁表征参数控制

除了谐波生成之外, 时空编码数字超表面还能有效地调控所生成各谐波的幅度、相位、极化等表征参数^[23-27]。理论上, 利用傅里叶变换关系设计出相应的时间编码序列就可获得任意的谐波幅相分布。然而, 这需要对超表面的各项电磁响应参数进行独立调控, 但就目前而言其实现的单元设计方案十分有限。因此, 文献[23]提出了一种新方法, 仅使用常见的反射系数相位可调单元就实现了对谐波幅度和相位的独立控制。该方法首先构建一个基础时间编码序列, 使单元反射系数相位以方波形式在 φ_1 和 φ_2 间快速切换, 如图3(a)所示。通过改变波形切换的相位差 $|\varphi_2-\varphi_1|$, 即

可改变谐波的幅度，如图3(b)所示。接下来，根据傅里叶变换时移特性，如果在相位波形中引入一段时移 t_0 ，如图3(c)所示，各阶谐波在保持幅度不变的条件下各自引入 $-2k\pi t_0/T$ 的额外相移，如图3(d)所示。这一方法有效解决了谐波幅相之间的纠缠问题，为进一步调控非线性谐波波前提供了理论基础。不过，该方法也有一定缺陷，即仅适用于独立控制单一阶谐波。因此，文献[24]在此基础上又给出了一种任意双阶谐波的操控方法，其核心就是在反射系数相位信号波形中再引入一个可控变量，即初始相位。改变初始相位，同样能够达到谐波幅度保持不变而相位改变的效果，不过其在各阶谐波引入的额外相移均为一个固定值。因此，通过不同初始相位和时移的组合，就可以对任意双阶谐波相位进行独立合成。除此之外，文献[25]更提出了一种多谐波相位联合独立调控方法，通过精心设计的时间交织编码序列，对多阶谐波进行解耦，最终实现了多阶谐波相位的独立调控。

利用时移特性调控谐波相位的方法还可以进一步拓展至谐波极化状态的任意操控上。文献[26]设计了一个各向异性的时空编码数字超表面，具有 x 和 y 两个方向的控制通道，可以对 x 和 y 两个极化波的反射相位进行独立调控。该工作的原理在于，先独立设计 x 和 y 两个通道的时间编码序列以分别生成具有特定幅度的 x 和 y 极化谐波，再引入不同的时移调整两种极化谐波间的相位差，从而可以任意控制谐波的极化状态，包括任意角度线极化、左/右旋圆极化和左/右旋椭圆极化，如图4所示。

5 非线性波前调控

对于电磁波波前的灵活调控一直以来是超表面的重要特性之一，由传统超表面设计原理可知，波前调控的核心在于实现特定的空间幅相分布。而前面提及的对谐波幅度、相位等表征参数进行灵活调控的方法就可以被时空编码数字超表面用于对

特定谐波进行波前调控，从而实现非线性涡旋光产生、波束偏折、波束聚焦、全息成像等应用。如图5(a)所示，文献[23]在谐波幅相独立控制方法的基础上，先在时间维度内将不同的时间编码序列作为初始序列，以控制谐波频率处的幅度，再在空间维度内根据单元位置引入不同的时移，从而操控谐波频率处的空间相位分布，最终实现了对特定谐波波束与幅度的独立调控。该工作所使用的超表面由8列基本单元构成，由FPGA将所设计的时空编码矩阵转换为相应的控制信号加载至可编程单元上。图5(b)展示了超表面对+1阶谐波非线性波前调控的实验结果，直观地说明了该方法的正确性。

除了专注于调控某一阶谐波波前外，人们也致力于研究利用时空编码数字超表面对多阶谐波

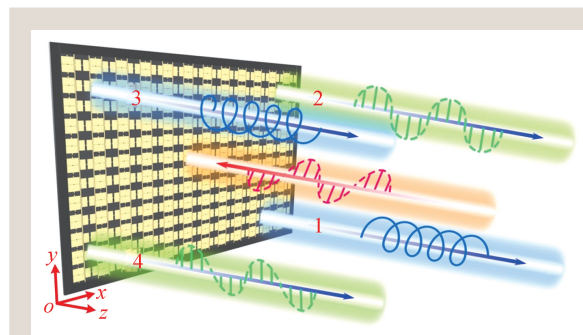


图4 非线性谐波极化状态任意操控示意图^[26]

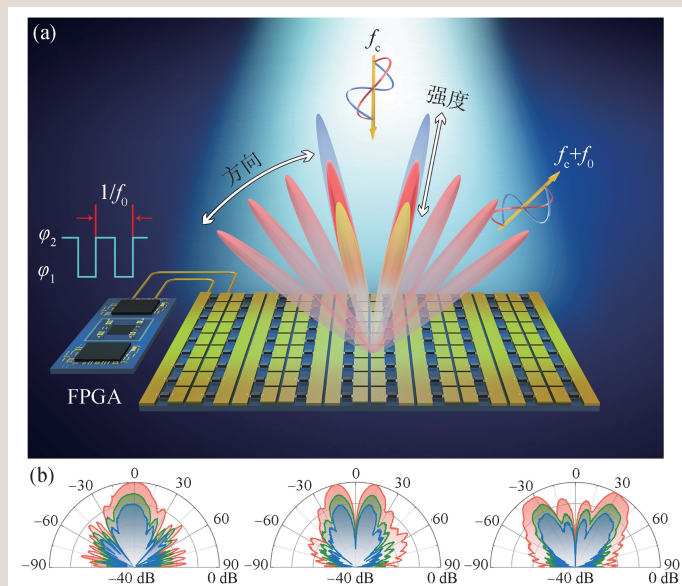


图5 (a)谐波波束与幅度独立调控示意图^[23]；(b)对+1阶谐波波束与幅度进行独立调控的测量结果^[23]

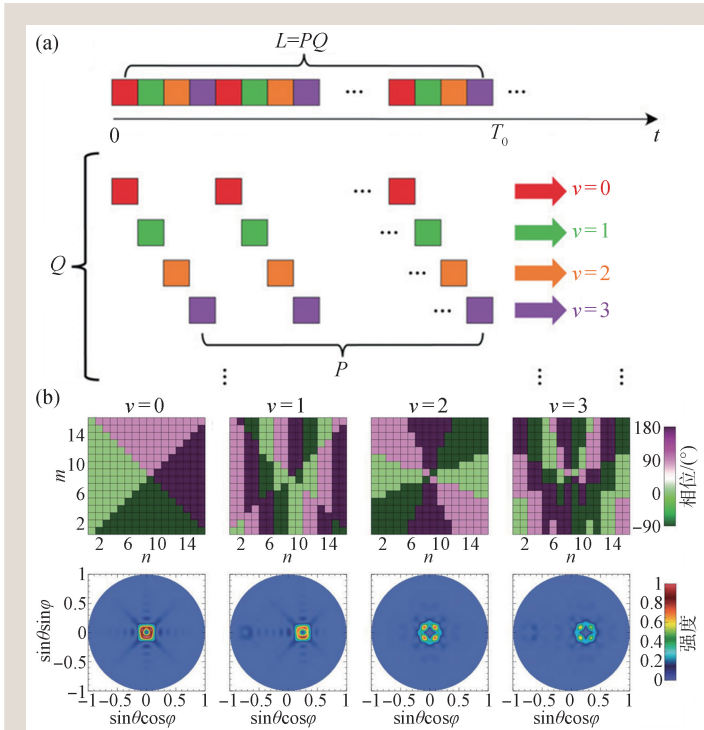


图6 (a) 时间交织编码序列示意图^[25]; (b) 电磁波阶数 $v=0, +1, +2, +3$ 谐波的相位分布及对应的二维散射方向图^[25]

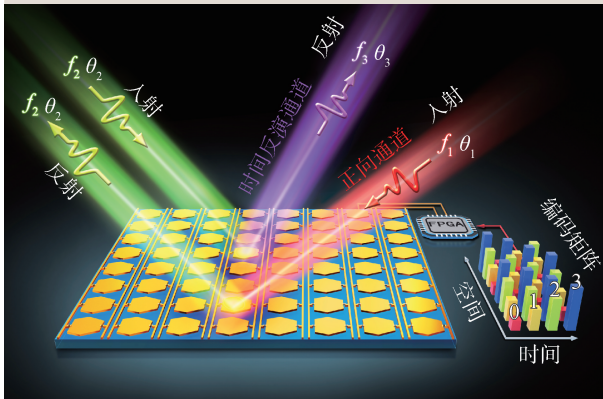


图7 非互易效应的原理示意图^[29]

波前进行联合调控。其中，文献[25]利用多谐波相位联合合成方法，设计不同的时间交织编码序列，对多阶谐波频率的相位分布分别进行操控，最终在多个频率处独立地实现完全不同的电磁功能。其中，时间交织编码序列的基本构造如图6(a)所示：长度为 L 的时间编码序列分为 Q 组长度为 P 的编码子序列，其中相同颜色的子序列仅会调控第 v 阶谐波的相位，而不会对其他阶谐波产生影响。作为示例，该工作在一个 16×16 的超表面上分别独立合成出 $v=0, +1, +2, +3$ 阶谐波的

相位分布，并设计出超表面各单元相应的时间交织编码序列，组成时空编码矩阵，其中各阶谐波对应的二维散射方向图如图6(b)所示。此外，文献[24]通过在时间编码序列中引入时移与初始相位的方法实现了任意双阶谐波的独立波束扫描，而文献[28]则基于该方法在 ± 1 阶谐波频率处生成了具有不同拓扑数的轨道角动量波束。

进一步地，借助时空编码数字超表面灵活的非线性波前调控特性，文献[29]首次通过实验展示了非互易效应，验证了其可以打破洛伦兹互易性的能力。如图7所示，时空编码数字超表面由8列2比特可编程单元构成，每列单元的编码状态由FPGA独立控制。在前向反射情形下，当频率为 f_1 的电磁波(红色)从 θ_1 的角度斜入射到超表面上时，将转换成频率为 f_2 的反射波(绿色)朝 θ_2 方向反射；而在时间反演情形下，当频率为 f_2 的电磁波(绿色)从 θ_2 的角度斜入射到超表面上时，将转换成频率为 f_3 的反射波(紫色)朝 θ_3 方向反射。由于时空编码对电磁波频域与空域的共同影响，时间反演情形下反射波的频率和反射角分别与前向反射情形下入射波的频率和入射角产生了偏离，即 $f_3 \neq f_1$ ， $\theta_3 \neq \theta_1$ ，这充分证明了时空编码数字超表面实现了非互易的电磁反射。值得注意的是，通过FPGA切换不同的时空编码矩阵可以灵活控制时空编码数字超表面在非互易反射过程中频率及角度偏离的程度，在未来隔离器、双工器、单向传输等应用中将发挥重要作用。

6 总结与展望

近几年来，时空编码数字超表面发展迅速，引起了国内外学者和工程师的广泛关注，并凭借其出色的电磁信息非线性调控能力成为非线性超表面的一种新模式。但目前仍有很多问题亟待解决，同时也面临着一些技术上的挑战。

(1)设计具有幅相联合调制能力的可编程单元。现有时空编码数字超表面的研究大多采用相位调制单元,但具有幅相联合调制能力的时空编码数字超表面平台还未实现。相比于相位调制超表面,这种幅相联合调制时空编码数字超表面在非线性调控方面不仅具有更高的效率,还可以减少优化时空编码矩阵所需的时间与算力消耗。因此,设计出具有幅相联合调制能力的可编程单元是时空编码数字超表面在未来的重要挑战之一。

(2)挖掘多种形式的时空编码数字超表面。目前大多数时空编码数字超表面都是反射式设计,而在很多传统非线性超表面的应用场景下,需要的是透射式超表面。因此,透射式时空编码数字超表面的研制工作对扩展其应用前景也十分重要。当然,这对超表面单元结构以及馈电网络的设计也提出了更高的要求,还有很多电磁理论和

工程技术上的难点需要克服。

(3)研制具有更高调制速率、适用于更高频段的时空编码数字超表面。目前时空编码数字超表面的主流实现方式都是基于商用开关二极管或变容二极管的可编程单元,其调制速率通常被限制在2 GHz以下,且很难适用于更高的太赫兹频段。因此,为了进一步提升时空编码数字超表面的工作频段、适用范围与调控性能,未来需要结合一些更先进的材料和技术手段用于单元设计,例如微机电系统(MEMS)、液晶、二氧化钒、石墨烯等。

时空编码数字超表面作为一种新型的超表面,虽然其相关研究仍处于起步阶段,但已展示了良好的发展趋势以及巨大的应用潜力。随着科学和技术的不断发展,时空编码数字超表面将在未来的非线性超表面领域及新体制通信系统中赢得重要的一席之地。

参考文献

- [1] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A *et al.* *Phys. Rep.*, 2016, 634: 1
- [2] Zheng G X, Muhlenbernd H, Kenney M *et al.* *Nat. Nanotechnol.*, 2015, 10: 308
- [3] Akselrod G M, Huang J N, Hoang T B *et al.* *Adv. Mater.*, 2015, 27: 8028
- [4] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C *et al.* *Science*, 2016, 352: 1190
- [5] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. *Science*, 2013, 339: 1232009
- [6] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. *Nat. Photonics*, 2014, 8: 889
- [7] Yu N F, Capasso F. *Nat. Mater.*, 2014, 13: 139
- [8] Caloz C, Deck-Leger Z L. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2020, 68: 1569
- [9] Caloz C, Deck-Leger Z L. *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2020, 68: 1583
- [10] Cui T J, Qi M Q, Wan X *et al.* *Light-Sci. Appl.*, 2014, 3: e218
- [11] Cui T J, Liu S, Zhang L. *J. Mater. Chem. C*, 2017, 5: 3644
- [12] Zhao H T, Shuang Y, Wei M L *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11: 1
- [13] Cui T J, Liu S, Bai G D *et al.* *Research*, 2019, 2019: 2584509
- [14] Tang W K, Dai J Y, Chen M Z *et al.* *IEEE J. Sel. Area Comm.*, 2020, 38: 2683
- [15] Dai J Y, Tang W K, Yang L X *et al.* *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2020, 68: 1618
- [16] Qian C, Zheng B, Shen Y C *et al.* *Nat. Photonics*, 2020, 14: 383
- [17] Ma Q, Hong Q R, Gao X X *et al.* *Nanophotonics*, 2020, 9: 3271
- [18] Cui T J, Li L L, Liu S *et al.* *iScience*, 2020, 23: 101403
- [19] Zhang L, Chen M Z, Tang W K *et al.* *Nat. Electron*, 2021, 4: 218
- [20] Zhao J, Yang X, Dai J Y *et al.* *Natl. Sci. Rev.*, 2019, 6: 231
- [21] Zhang L, Chen X Q, Liu S *et al.* *Nat. Commun.*, 2018, 9: 1
- [22] Dai J Y, Yang L X, Ke J C *et al.* *Laser Photonics Rev.*, 2020, 14: 1900133
- [23] Dai J Y, Zhao J, Cheng Q *et al.* *Light-Sci. Appl.*, 2018, 7: 1
- [24] Dai J Y, Yang J, Tang W K *et al.* *Appl. Phys. Rev.*, 2020, 7: 041408
- [25] Castaldi G, Zhang L, Moccia M *et al.* *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 2007620
- [26] Ke J C, Dai J Y, Chen M Z *et al.* *Small Structures*, 2020, 2: 2000060
- [27] Zhang L, Wang Z X, Shao R W *et al.* *IEEE T. Antenn. Propag.*, 2020, 68: 2984
- [28] Yang J, Ke J C, Chen M *et al.* *Photonics Res.*, 2021, 9: 344
- [29] Zhang L, Chen X Q, Shao R W *et al.* *Adv. Mater.*, 2019, 31: 1904069
- [30] Zhang L, Dai J Y, Moccia M *et al.* *Epj Appl. Metamat.*, 2020, 7: 7