

编码超构表面实现双波束独立可重构

张娜 赵健民 陈克 赵俊明 姜田 冯一军

Independent dual-beam control based on programmable coding metasurface

Zhang Na Zhao Jian-Min Chen Ke Zhao Jun-Ming Jiang Tian Feng Yi-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 178102 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210344

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210344>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报. 2018, 67(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

基于二氧化钒的太赫兹编码超表面

Terahertz coding metasurface based vanadium dioxide

物理学报. 2020, 69(22): 228101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200891>

太赫兹频率编码器

Terahertz frequency coding metasurface

物理学报. 2019, 68(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190032>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

双频双波束加热电离层激发甚低频/极低频辐射理论分析

Theory of very low frequency/extra low frequency radiation by dual-beam beat wave heating ionosphere

物理学报. 2017, 66(1): 019401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.019401>

基于可调石墨烯超表面的宽角度动态波束控制

Dynamic beam-steering in wide angle range based on tunable graphene metasurface

物理学报. 2018, 67(18): 184101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180592>

编码超构表面实现双波束独立可重构*

张娜 赵健民 陈克[†] 赵俊明 姜田 冯一军[‡]

(南京大学电子科学与工程学院, 南京 210023)

(2021 年 2 月 23 日收到; 2021 年 4 月 12 日收到修改稿)

近年来, 有源超构表面因其对电磁波的灵活、动态调控而备受关注. 本文设计并分析了一种有源可编程超构表面单元, 并探讨了其在双波束、多波束独立可重构方面的应用. 理论分析了如何实现对称双波束、非对称双波束电磁波辐射以及多波束独立可重构, 并对所设计的编码超构表面进行仿真分析和实验验证. 全波仿真结果表明, 超构表面具有较好的辐射性能, 主瓣辐射方向与理论计算结果一致. 作为实验验证, 我们加工了样品并在标准微波暗室中进行了测试. 实验测试与仿真分析结果吻合良好, 均表明该超构表面在微波频率能够对双波束进行独立的动态调控, 且波束方向性较好. 因而, 这种可编程超构表面有望进一步实现多通道信息传输, 并在无线通信系统中具有良好的应用前景.

关键词: 编码超构表面, 可编程, 双波束, 波束调控**PACS:** 81.05.Xj, 07.05.Tp, 03.65.Vf, 52.25.Os**DOI:** 10.7498/aps.70.20210344

1 引言

超构表面是一种由亚波长单元结构周期或非周期排布在二维平面上的人工复合电磁材料. 通过对电磁波频率、幅度、相位和极化等固有性质的调控^[1–5], 可实现异常反射^[3]、电磁隐身^[6]和漫反射^[7]等功能, 在波束聚焦^[8]、全息成像^[9]和天线设计^[10]等方面具有良好的应用前景. 相比于传统的人工电磁材料, 超构表面由于其厚度远小于工作波长, 可大大缩减电磁器件的厚度, 更有利于实现器件小型化、平面化、多样化^[11–14].

近年来, 随着超构表面研究的不断深入, 采用全数字表征的编码超构表面为动态电磁波调控提供了新的机制和发展契机^[15,16]. 这类超构表面单元的电磁特性通常采用二进制数字编码的形式来表征, 即数字比特 0 和 1, 因此可将编码超构表面与

有源调控相结合, 通过在电磁超构表面单元中加载二氧化钒^[17]、石墨烯^[18]、电可调二极管^[19]等有源材料或元件的方式, 构造具有动态电磁响应的基本码元. 在此基础上, 进一步与现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 或单片机控制电路相结合, 通过动态地控制数字硬件系统实时输出高电平或低电平, 实现可编程超构表面空间相位的动态可调, 进而实现电磁波近远场特性的实时、动态调控^[15–19]. 相比于依靠单元尺寸变化来调控电磁响应的无源超构表面, 这种数字可调的设计思路提供了动态可调的相位响应, 打破了无源结构中电磁功能一经设计完成便很难或无法改变的设计局限, 不仅适用于反射型超构表面设计, 还可以拓展至透射型超构表面以及透/反型超构表面进行全空间散射场实时调控^[20–23], 提高了电磁超构表面的应用范围和功能利用效率.

随着现代无线通信技术的飞速发展, 人们对于

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0700201)、国家自然科学基金 (批准号: 61801207, 91963128, 61731010)、中央高校基本科研业务费和江苏省电磁波先进调控技术重点实验室资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ke.chen@nju.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: yjfeng@nju.edu.cn

通信速度和通信质量的要求也日益提高,能够实现多通道传输的功能器件一直是超构表面领域研究的热点. 在无线通信系统中,多波束天线能够对多目标区域实现同时覆盖,并利用空间波束隔离实现多通道传输,有助于提高系统的通信容量. 作为实现多波束天线技术的有效技术方案,相控阵天线通过将阵列单元连接到不同的馈电端口形成相位或幅度控制来产生多波束,利用空间波束复用实现多信道传输,很大程度上提高了频率利用效率^[24]. 这种基于复杂移相器网络进行高精度相位和幅度控制的相控阵天线性能稳定,波束调控灵活,但是馈电网络复杂、成本较高,同时存在体积较大的问题,不利于小型化平面化设计. 相比于规模庞大的相控阵天线,反射阵天线设计简单、成本更低,可结合具有相位调制特性的超构表面单元,利用几何分区、口径场叠加以及交替投影等方法实现多波束辐射^[24,25],波束调节方式更灵活. 但是目前大多数现有的多波束反射阵天线主要由无源超构表面单元组成,单元电磁响应固定,一经设计完成其功能也相对固定,并不能实现动态的波束扫描,无法满足动态的用户需求,这在很大程度上限制了其在实际中的应用^[26,27].

在环境复杂化、应用多样化的发展需求之下,有源编码超构表面的提出为实现动态波束调控提供了新的实现方式. 但是迄今为止,基于有源超构表面实现的反射阵天线大都仅能实现上半空间的单波束动态扫描,或者受限于有源控制电路的设计问题以及多波束实现方法的局限性^[24,25],并不能实现任意的对称、非对称多波束动态调控. 因此,如何实现高效率、低成本、波束调控灵活的可编程多波束独立调控超构表面一直是多通道传输领域研究的难点.

本文基于 1-比特编码超构表面提出了一种多波束独立可重构的设计思想,并通过在超构表面单元上加载 PIN 二极管与单片机控制电路相结合的方式,实现了动态、独立的多波束电磁波调控. 该编码超构表面工作于微波 X 波段,由 14×14 个编码单元组成. 其中,每个单元的电磁响应动态可调,由控制电路提供 196 路独立电压调控. 仿真与测试结果表明,编码超构表面可在上半空间实现灵活的波束设计,能够按照需求辐射多个独立的、覆盖不同角域的定向波束,从而实现多信道电磁波传输,为其进一步在多输入多输出 (multiple input

multiple output, MIMO) 通信系统中的研究奠定基础.

2 单元结构仿真分析

为实现独立、动态多波束电磁调控功能,我们设计并研究了一个由三层金属两层介质基板组成的反射型超构表面单元,如图 1(a) 所示. 该超单元由 3×3 个相同的子单元组成. 为了清晰地表述结构特征,我们分别给出了三层金属结构的平面示意图,如图 1(b)——(d) 所示. 顶层金属结构采用“工”字型拓扑结构. 其中,“工”字型金属结构的中间截断并焊接 PIN 二极管,较长的金属臂作为 PIN 二极管的负极与周围单元相连,而金属臂较短的一端焊接 PIN 二极管的正极. 作为正极的金属臂上刻蚀直径 0.6 mm 的金属通孔,并穿过两层介质基板与底层的“田”字型馈电网络相连接,如图 1(d) 所示. 3×3 个子单元工作于相同的状态,作为超构表面的一个独立码元. 中间层金属结构 (图 1(c)) 主要是为了保证编码单元工作于反射模式. 为实现单元独立馈电,在中间层金属结构相应位置上刻蚀掉直径 1 mm 的金属圆孔,与作为直流馈电的金属通孔实现有效电隔离.

基于以上设计,利用电磁仿真软件 CST Microwave StudioTM (CST) 对单元结构进行了电磁波全波仿真分析. 仿真时,单元周向采用周期性边界条件,纵向设为开放边界. 综合考虑仿真结果及样品制备要求,最终得出单元的结构参数:单元周期 $p = 18$ mm,上层介质基板厚度 $h = 3.0$ mm,以及其他结构参数 $a = 0.5$ mm, $b = 1.3$ mm, $c = 2.4$ mm, $l = 4.6$ mm, $w = 0.2$ mm, $w_1 = 0.2$ mm. 金属结构选用电导率为 5.8×10^7 S/m 的铜,两层介质基板均选用相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ 的聚四氟乙烯,损耗角正切 $\tan \delta = 0.001$. PIN 二极管型号为 SMP1320-079LF,仿真时利用等效电路模型模拟其开关 (ON/OFF) 状态,进而通过精细的谐振单元结构优化来构造 1-比特编码单元. 具体地,当二极管工作于“ON”状态时,等效为电阻与电感的串联形式, $R = 0.5 \Omega$, $L = 0.7$ nH; 当二极管工作于“OFF”状态时,等效为电容与电感的串联形式, $L = 0.5$ nH, $C = 0.24$ pF. 需要注意的是,1-比特编码通常有 0° 和 180° 两种反射相位,但这并不代表单元的绝对反射相位,而是指两种单元状态之间的相位差满足 180° 即可实现 1-比特编码超构表面.

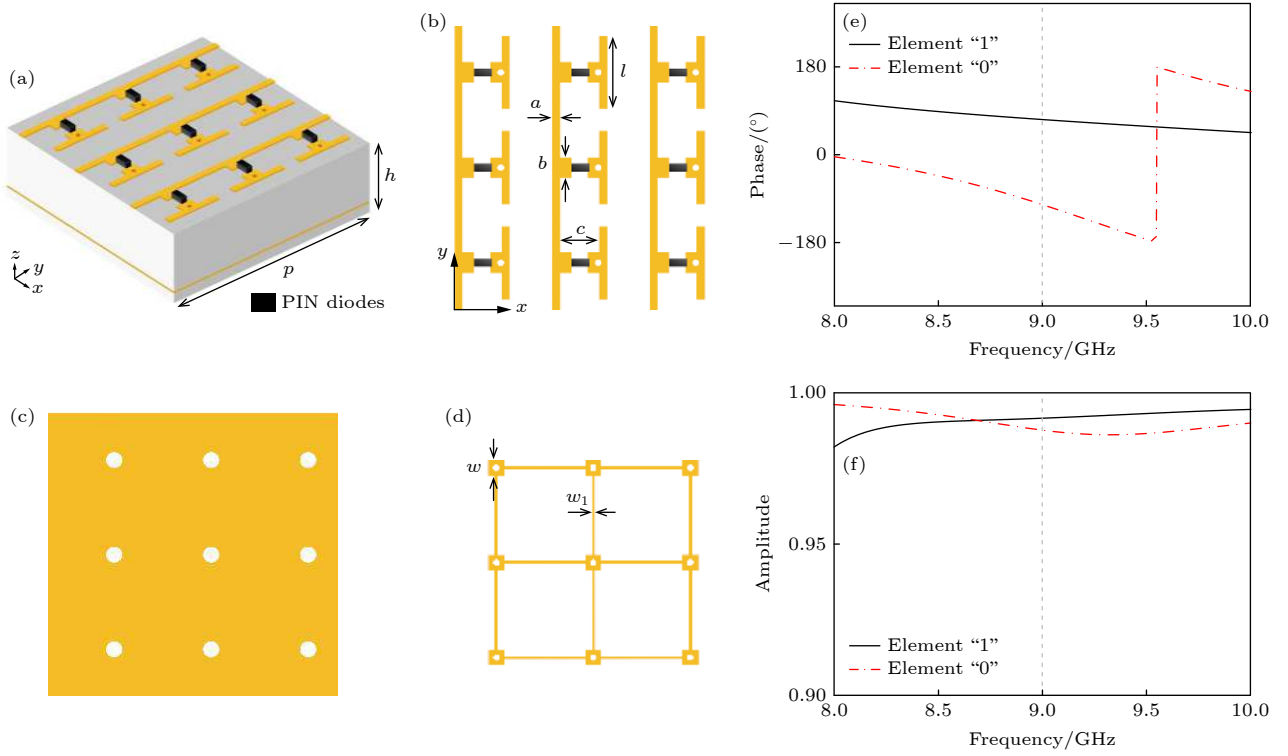


图 1 (a) 超构表面单元结构示意图; (b) 单元顶层金属结构示意图; (c) 单元中间层金属结构示意图; (d) 单元底层金属结构示意图; (e) 单元结构反射相位曲线; (f) 单元结构反射幅度曲线

Fig. 1. (a) Schematic of the coding metasurface elements; (b) schematic of the top-layer of metal structure; (c) schematic of the middle-layer of metal structure; (d) schematic of the bottom-layer of metal structure; (e) reflection phases of the elements; (f) reflection amplitudes of the elements.

单元结构的反射相位与反射幅度曲线分别如图 1(e) 和图 1(f) 所示. 此时在工作频点 9 GHz 处, “1”和“0”两种码元近似满足相位差 180° , 且反射幅度均大于 0.95, 因此能够实现高效的电磁相位调控. 此外, 编码超构表面研究中, 我们通常只关注相位差满足 180° 的频点, 而在实际应用中, 当反射相位差处于 $180^\circ \pm 20^\circ$ 范围内时, 编码超构表面都能正常工作.

3 理论分析

在超构表面单元研究与设计的基础上, 将进一步验证其对双波束、多波束的动态电磁波调控功能, 并结合反射阵列理论分析独立双波束、多波束的产生方法, 最终形成多波束独立调控的可编程超构表面天线. 如图 2(a) 所示, 假设可编程超构表面由 $M \times N$ 个单元组成, 以超构表面的几何中心为坐标原点. 平面波入射条件下, 为实现波束定向辐射 (θ_0, φ_0) , 超构表面第 (m, n) 单元的相位分布需满足 [10]:

$$\varphi_r(m, n) = -k_0 x_m \sin \theta_0 \cos \varphi_0 - k_0 y_n \sin \theta_0 \sin \varphi_0, \quad (1)$$

其中 (x_m, y_n) 表示超构表面第 (m, n) 单元的坐标位置; θ_0 为波束俯仰角 (辐射方向与 $+z$ 方向的夹角); φ_0 为波束方位角 (辐射方向在 xoy -平面投影与 $+x$ 方向的夹角). 波数 k_0 与自由空间工作波长 λ 相关, 可以表示为 $k_0 = 2\pi/\lambda$.

为实现 1-比特编码超构表面设计, 需要对 (1) 式计算得到的连续梯度相位进行离散化处理. 然而离散化过程中, 1-比特编码超构表面在平面电磁波照射条件下不能实现单波束扫描, 不可避免地会在主波束对称位置产生一个寄生波束. 因此, 为了利用 1-比特编码超构表面实现独立双波束调控, 将利用开口波导作为激励, 预先在梯度相位上引入额外的馈源补偿相位以实现多种波束赋形. 开口波导置于超构表面的几何中心上方, 焦距为 F . 馈源补偿相位用来补偿由于各单元到馈源相位中心距离不同造成的相位差, 可以表示为

$$\varphi_f(m, n) = k_0 d_{m,n}, \quad (2)$$

其中 $d_{m,n}$ 表示馈源到第 (m, n) 单元的距离. 综合

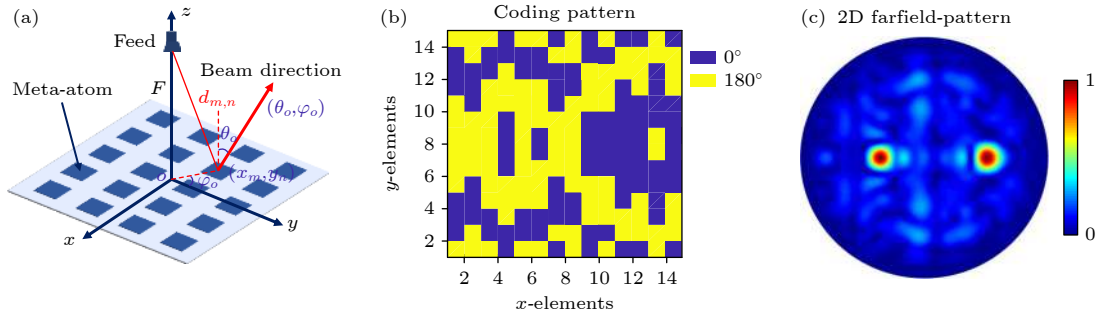


图 2 (a) 超构表面波束调控示意图; (b) 双波束 $(30^\circ, 0^\circ)$ 和 $(20^\circ, 180^\circ)$ 离散相位分布图; (c) 双波束 $(30^\circ, 0^\circ)$ 和 $(20^\circ, 180^\circ)$ u - v 平面归一化远场方向图 ($u = \sin\theta\cos\phi, v = \sin\theta\sin\phi$)

Fig. 2. (a) Schematic of the metasurface for three-dimensional beam-control; (b) the calculated discretized phase distributions for the radiation directions of $(30^\circ, 0^\circ)$ and $(20^\circ, 180^\circ)$; (c) the calculated normalized radiation patterns in uv -plane ($u = \sin\theta\cos\phi, v = \sin\theta\sin\phi$).

考虑波束赋形需要的梯度相位以及引入的馈源补偿相位, 最终第 (m, n) 单元连续相位分布可表示为

$$\varphi_o(m, n) = \varphi_r(m, n) + \varphi_f(m, n) + \Delta\varphi, \quad (3)$$

这里, $\Delta\varphi$ 为初始相位, 是一个常量, 用于补偿不同相位离散方法带来的误差. 在 1-比特单波束赋形的基础上, 可进一步利用场叠加原理进行独立多波束设计. 具体来说, 对于 N 个不同的定向波束, 通过相位复相加运算获得口径面上的相位分布 [24]:

$$\varphi^{mn} = \arg \left(\sum_{q=1}^N e^{-j\varphi_q^{mn}} \right) + \Delta\varphi, \quad (4)$$

φ_q^{mn} 代表产生第 q 个波束所需的相位分布. 这里同样引入初始相位 $\Delta\varphi$ 以补偿不同相位离散方法带来的误差. 也就是说, 通过合理设计超构表面, 我们不仅能够产生独立的双波束, 理论上可产生任意的多波束. 为实现 1-比特编码超构表面设计, 需对 (4) 式所实现的连续相位进行离散化处理, 离散化过程遵循以下方式:

$$\phi_{1\text{-bit}} = \begin{cases} 0^\circ, & \phi_{\text{element}} \notin [90^\circ, 270^\circ) \\ 180^\circ, & \phi_{\text{element}} \in [90^\circ, 270^\circ) \end{cases}. \quad (5)$$

为了验证该方法, 设计了能够实现独立双波束调控的可编程编码超构表面并进行理论计算. X 波段标准开口波导 (BJ100) 作为激励, 此时超构表面的远场方向图函数可表示为 [28]

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{F_{\theta_r}(m, n)}{d_{mn}} E_{mn}(\theta, \varphi) \Gamma^{mn} \times \exp[jk_0(x_m \sin\theta \cos\varphi + y_n \sin\theta \sin\varphi)], \quad (6)$$

其中 Γ^{mn} 为单元反射系数, 包含幅度与相位; $E_{mn}(\theta, \varphi) = \cos^{q_e}\theta$ 为单元因子, $F_{\theta_r}(m, n) = \cos^{q_f}\theta_r$

为馈源坐标系下的馈源方向图函数, 均按照经典的天线阵理论采用 q 模型来近似模拟其远场方向图幅度分布. 这里以双波束 $(30^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 180^\circ)$ 为例简述设计过程. 首先, 根据 (1)–(4) 式计算独立双波束辐射所需的反射相位分布, 包含梯度相位以及馈源补偿相位; 然后, 进行 1-比特离散化处理, 离散后的编码相位分布如图 2(b) 所示; 最后, 将离散后的单元反射相位代入 (6) 式, 进行远场方向图计算, 计算结果如图 2(c) 所示. 计算过程中将球坐标系与 u - v 坐标进行了转换 ($u = \sin\theta\cos\phi, v = \sin\theta\sin\phi$). 理论计算结果显示, 9 GHz 时超构表面产生了两个非对称的独立波束, 且具有较低的副瓣. 此时波束辐射角度与预设角度吻合, 这说明相位经 1-比特离散后, 仍然具有较好的辐射性能, 证明了 1-比特独立多波束设计方法的可行性.

4 编码超构表面仿真分析

在无线通信系统中, 每个波束都可视为一个独立的信道, 设计能够覆盖多角度区域的超构表面是实现多信道传输的关键. 本文将反射阵天线理论与编码超构表面相结合, 通过在超构表面单元中加载有源元件并与单片机控制电路相结合, 设计了一种可在空间上进行任意独立波束调控的可编程超构表面.

超构表面由 14×14 个可进行独立相位调制的基本编码单元组成, 阵元尺寸 $252 \text{ mm} \times 252 \text{ mm}$. 考虑到馈电网络以及安装固定, 在阵面周围预留了一定的空间, 最终设计完成的超构表面总尺寸为 $270 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$. 通过合理排布直流馈电网络, 并结合单片机控制电路, 来实现对电可

调元件的实时调控, 进而实现动态波束扫描功能. 超构表面设计时以 X 波段的标准开口波导天线 (BJ100) 作为馈源, 焦距 $F = 150$ mm. 利用商用软件 CST 进行全波电磁仿真验证. 仿真时, 四周边界条件设为开放边界, 电场极化方向沿 x 方向. 首先利用超构表面实现了对称双波束设计, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 编码图案中的蓝色与黄色分别代表“0”和“1”两种码元. 通过优化编码序列, 超构表面可在不同的二维平面上分别产生对称双波束, 并且改变编码图案, 双波束在二维平面内的波束辐射角度 θ 会同时发生改变, 实现动态的对称波束扫描

功能. 图 3(c) 和图 3(d) 给出了超构表面在 xoz -平面以及 yoz -平面内的二维归一化远场方向图的仿真结果, 此时双波束的偏折角度依次为 $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 28.5^\circ$, $\pm 38^\circ$, 与波束预设结果 $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 40^\circ$ 基本吻合. 角度的误差主要是由于相位离散误差以及单元间耦合造成的. 此外, 由于馈源波导 E 面 (E -plane) 与 H 面 (H -plane) 辐射方向图的不对称性, 使得超构表面在 xoz -平面和 yoz -平面上远场仿真结果存在差异, 但是这并不影响超构表面的辐射性能, 所设计超构表面仍然在 xoz -平面和 yoz -平面内具有对称双波束辐射的能力.

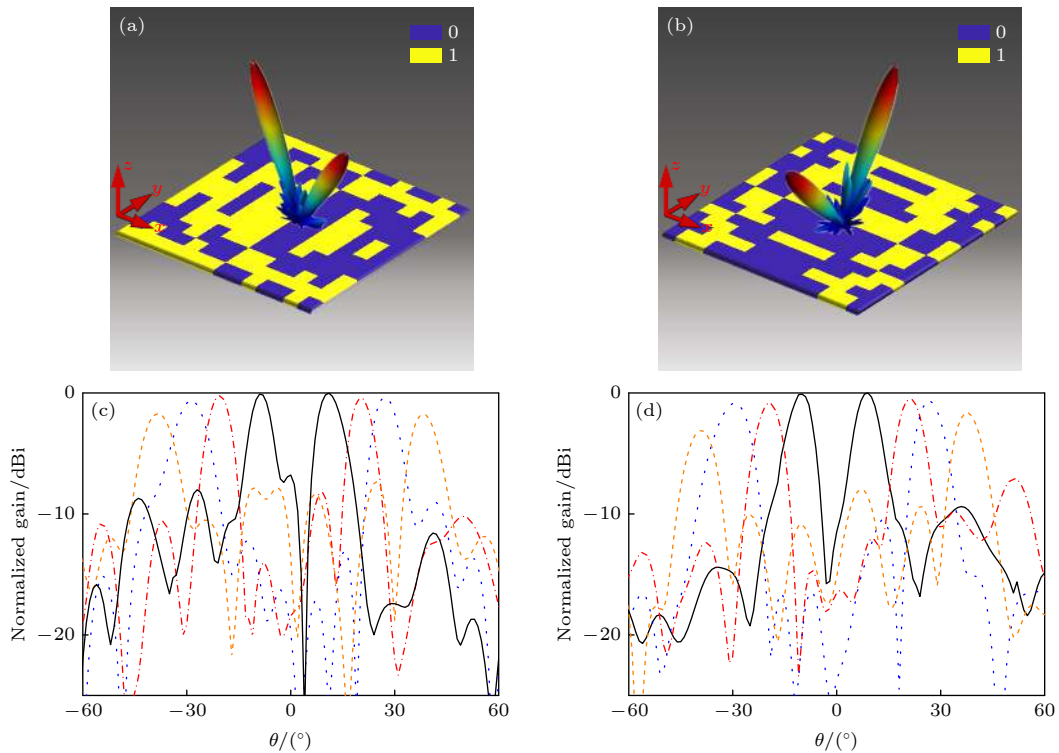


图 3 (a) 超构表面在 xoz -平面实现对称双波束扫描功能示意图; (b) 超构表面在 yoz -平面实现对称双波束扫描功能示意图; (c) 超构表面在 xoz -平面上的远场仿真结果; (d) 超构表面在 yoz -平面上的远场仿真结果

Fig. 3. (a) Schematic of the symmetric-beam scanning of the metasurface in xoz -plane; (b) schematic of the symmetric-beam scanning of the metasurface in yoz -plane; (c) the simulated radiation patterns of the metasurface in xoz -plane; (d) the simulated radiation patterns of the metasurface in yoz -plane.

为进一步证明该超构表面对电磁波的调控能力, 将以上研究内容拓展至任意非对称双波束动态赋形, 并且在双波束功能的基础上实现了多波束的动态产生. 图 4 为所设计的几种典型波束分布方式及其三维远场方向图仿真结果. 其中, 编码图案中黄色和蓝色分别代表“1”和“0”两种基本编码单元. 第 3 节的仿真分析中, 利用超构表面实现了二维平面内 (xoz -平面或 yoz -平面) 的对称波束扫描功能. 这里, 将利用超构表面实现在两个正交平面内的独

立双波束调控. 如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 超构表面可在 xoz 与 yoz 两个正交平面内实现对称以及非对称的波束调控. 波束辐射方向 (θ, φ) 分别设计在 $(20^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 90^\circ)$ 和 $(20^\circ, 180^\circ)$, $(30^\circ, 270^\circ)$. 基于真实的超构表面单元, 利用全波仿真软件 CST 得到了超构表面的三维远场方向图. 仿真结果显示, 波束的主瓣方向分别在 $(20^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 90^\circ)$ 和 $(19^\circ, 180^\circ)$, $(30^\circ, 270^\circ)$, 与预设结果基本吻合, 即我们所设计的超构表面理论上可在方位

角(φ)维度上进行任意的波束调控. 图4(c)和图4(d)探索了超构表面在俯仰角(θ)维度上的波束调控. 在有限尺寸条件下, 通过编码优化, 可实现不同俯仰角度上的独立双波束辐射. 作为示例, 这里设计的双波束主瓣方向分别在 $(30^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 180^\circ)$ 以及 $(0^\circ, 0^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$. 双波束产生时, 随偏折角度 θ 增大, 主瓣增益减小明显. 因此在理论计算过程中, 引入了优化算法, 通过对编码序列进行优化以提高不同角度上波束辐射能量的均匀度. 仿真结果显示, 编码经优化后波束辐射方向与理论预测结果基本保持一致, 且双波束主瓣增益相当, 副瓣较低, 具有较好的定向性.

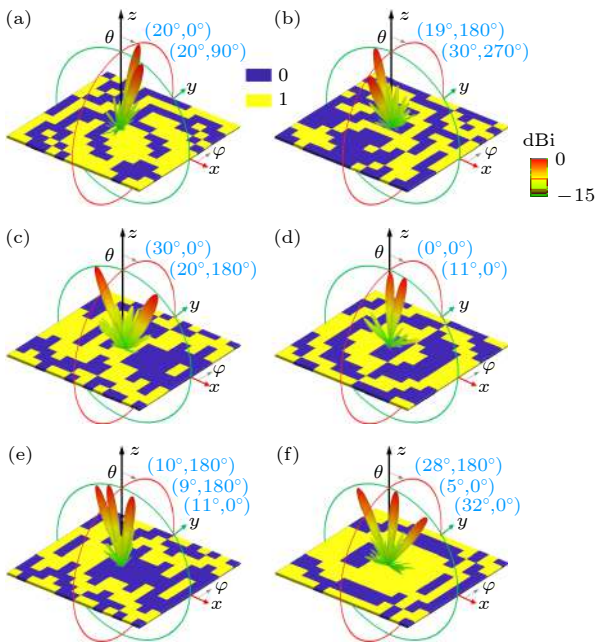


图4 超构表面非对称波束设计的远场仿真结果图. 波束辐射方向 (θ, φ) 依次为(a) $(20^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 90^\circ)$; (b) $(19^\circ, 180^\circ)$, $(30^\circ, 270^\circ)$; (c) $(30^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 180^\circ)$; (d) $(0^\circ, 0^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$; (e) $(19^\circ, 180^\circ)$, $(9^\circ, 180^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$; (f) $(28^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(32^\circ, 0^\circ)$.

Fig. 4. The simulated three-dimensional radiation patterns of asymmetric-beam control of the metasurface. The radiation angles (θ, φ) are: (a) $(20^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 90^\circ)$; (b) $(19^\circ, 180^\circ)$, $(30^\circ, 270^\circ)$; (c) $(30^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 180^\circ)$; (d) $(0^\circ, 0^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$; (e) $(19^\circ, 180^\circ)$, $(9^\circ, 180^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$; (f) $(28^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(32^\circ, 0^\circ)$, respectively.

在双波束调控的基础上, 进一步探索了多波束动态产生的可能性. 根据(4)式, 理论上通过合理设计超构表面可实现任意多波束设计, 但实际应用中多波束性能会受到所设计超构表面有限口径大小(阵元数目)的影响. 为保证超构表面的辐射性

能, 这里仅给出了独立三波束设计作为探索多波束动态调控的实例. 首先根据(4)式计算得到相应的连续相位并进行1-比特离散化处理, 然后按照离散相位分布进行超构表面排布, 最终利用全波仿真软件进行电磁仿真分析. 仿真得到的三维远场方向图分别如图4(e)和图4(f)所示, 波束辐射方向 (θ, φ) 依次在 $(19^\circ, 180^\circ)$, $(9^\circ, 180^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$ 及 $(28^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(32^\circ, 0^\circ)$, 三波束主瓣增益相差不大且无明显副瓣, 具有较好的辐射性能. 作为验证, 这里仅给出了超构表面在 xoz -平面上的任意三波束设计. 事实上, 通过合理的扩大阵元数目, 结合优化算法, 可利用超构表面在上半空间进行任意独立的多波束动态调控.

5 编码超构表面实验验证

在理论与仿真分析结果的基础上, 利用平面印刷电路板技术加工制作了样品, 如图5(a)所示. 介质基板选用相对介电常数2.2的聚四氟乙烯, 双层介质基板压合后样品总厚度3.404 mm. 样品由 14×14 个单元组成, 加载的二极管型号为SMP1320-079LF. 为实现有效的电磁调控, 在阵元周围预留空间进行直流馈电网络设计, 最终制备的样品总尺寸 $270 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$. 超构表面每个单元电磁响应独立可调, 由控制电路提供196路独立电压调控. 具体地, 超构表面与控制电路通过直流馈电网络相连接, 利用计算机向控制电路发送可实现不同电磁功能的编码信息, 实时、动态地改变可编程超构表面单元中电可调元件的工作状态, 以实现单元反射相位的实时调控进而实现独立多波束调控.

在标准微波暗室中对样品进行了测试. 测试过程中, 利用支架将馈源天线置于超构表面的几何中心, 焦距 $F = 150 \text{ mm}$. 宽带双脊喇叭天线置于远场区作为接收天线. 图5(b)和图5(c)给出了超构表面在 xoz -平面以及 $yoze$ -平面上俯仰角 $\pm 40^\circ$ 方向内的波束调控结果, 角度间隔为 10° . 实验测试结果显示波束辐射情况与仿真结果基本吻合, 辐射角度与理论计算结果保持一致, 证明了超构表面对称双波束调控的能力. 旁瓣区域的误差主要是由于边缘效应以及加工误差等因素造成的, 尤其是在电路连接过程中, 加载的电路连接装置也会对超构表面的辐射性能产生一定的影响. 为了进一步验证该超构表面独立双波束调控的能力, 除了对称双波束

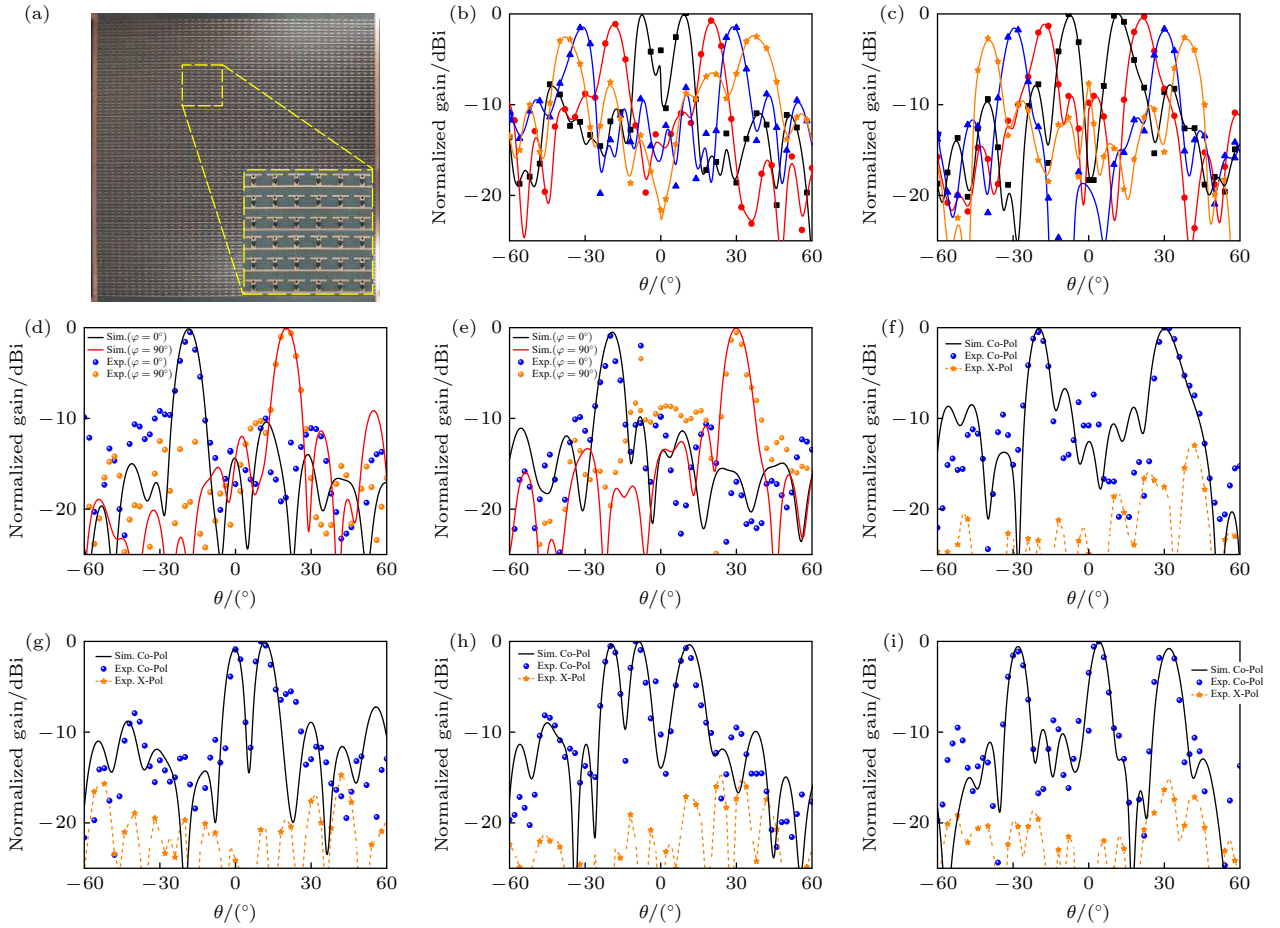


图 5 (a) 超构表面样品图; (b)–(i) 超构表面独立波束设计远场测试结果图. 超构表面实现对称双波束扫描功能的测试结果图, 分别在 (b) xoz -平面与 (c) yo z -平面; 超构表面非对称独立波束设计的测试结果图, 波束辐射方向 (θ, φ) 依次为 (d) $(20^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 90^\circ)$; (e) $(19^\circ, 180^\circ)$, $(30^\circ, 270^\circ)$; (f) $(30^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 180^\circ)$; (g) $(0^\circ, 0^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$; (h) $(19^\circ, 180^\circ)$, $(9^\circ, 180^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$; (i) $(28^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(32^\circ, 0^\circ)$

Fig. 5. (a) Photograph of the fabricated metasurface; (b)–(i) the measurement results of the metasurface. measurement results of symmetric-beam scanning in (b) xoz -plane and (c) yo z -plane; measurement results of asymmetric-beam control of the metasurface, and the radiation angles (θ, φ) are (d) $(20^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 90^\circ)$; (e) $(19^\circ, 180^\circ)$, $(30^\circ, 270^\circ)$; (f) $(30^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 180^\circ)$; (g) $(0^\circ, 0^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$; (h) $(19^\circ, 180^\circ)$, $(9^\circ, 180^\circ)$, $(11^\circ, 0^\circ)$; (i) $(28^\circ, 180^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(32^\circ, 0^\circ)$, respectively.

的测试, 还对图 4 中设计的非对称独立波束进行了测试, 分别如图 5(d)–(i) 所示, 测试结果与仿真结果 (图 4(a)–(f)) 一一对应. 由于图 4(a) 和图 4(b) 中设计的独立双波束分别辐射在 xoz 与 yo z 两个正交平面内, 因此测试时为了更好地体现波束的性能分别测试了超构表面在 $\varphi=0^\circ$ (xoz -平面) 与 $\varphi=90^\circ$ (yo z -平面) 两个正交平面内的归一化远场方向图 (图 5(d) 和图 5(e)), 其余给出了超构表面 xoz -平面内的远场测试结果, 包含同极化以及交叉极化, 如图 5(d)–(i) 所示. 测试结果显示, 波束主瓣与仿真结果吻合良好, 由于加工精度以及焊接等原因旁瓣区域存在一定的测试误差, 但并不影响超构表面整体的辐射性能, 充分验证了该超构表面功能的有效性. 结果表明, 我们设计的 1-比特编码超

构表面可在上半空间进行独立的双波束动态调控, 并且在有限阵面尺寸下产生的独立三波束仍然能够保持良好的性能, 具有多波束独立调控的潜力, 可应用于无线通信系统以满足同一时刻多用户同时使用的需求.

6 结 论

本文基于电可调的实现方式设计了有源可编程超构表面, 并将其应用于双波束、多波束电磁波独立动态调控, 提出了一种利用 1-比特编码超构表面实现多波束动态调控的方法, 丰富了有源编码超构表面的研究内容. 具体地, 超构表面由加载 PIN 二极管的电磁谐振单元组成, 每个单元通过直

流馈网络与控制电路相连,可独立调控.因此,利用计算机实时改变控制电路的输出电压即可实现对可调单元反射相位状态的动态切换,进而实现超构表面电磁功能的实时调控.通过编码优化,实现了对称双波束、非对称双波束产生,并且在有限阵面尺寸下实现了多波束动态调控.仿真分析表明超构表面的辐射波束主瓣增益均匀、副瓣较低,具有较好的定向性.实验测试与仿真分析结果吻合良好,证明了该编码超构表面对双波束、多波束独立电磁波调控的能力.这种独立动态多波束调控的设计方案为多通道信息传输提供了新的设计思路,并且可拓展至透射型以及透/反型超构表面设计以实现全空间复杂电磁调控,有利于增加信道容量,在动态信号传输、天线设计以及无线通信系统中都具有较大的应用潜力.

参考文献

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] Ding G W, Chen K, Luo X Y, Zhao J M, Jiang T, Feng Y J 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 044043
- [3] Sun S, Yang K Y, Wang C M, Juan T K, Chen W T, Liao C Y, He Q, Xiao S, Kung W T, Guo G Y, Zhou L, Tsai D P 2012 *Nano Lett.* **12** 6223
- [4] Liu S, Cui T J, Xu Q, Bao D, Du L, Wan X, Tang W X, Ouyang C, Zhou X Y, Yuan H, Ma H F, Jiang W X, Han J, Zhang W, Cheng Q 2016 *Light: Sci. Appl.* **5** e16076
- [5] Yan L, Zhu W, Karim M F, Cai H, Gu A Y, Shen Z, Chong P H J, Tsai D P, Kwong D L, Qiu C W, Liu A Q 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800728
- [6] Chen K, Cui L, Feng Y, Zhao J, Jiang T, Zhu B 2017 *Opt. Express* **25** 5571
- [7] Chen K, Feng Y, Yang Z, Cui L, Zhao J, Zhu B, Jiang T 2016 *Sci. Rep.* **6** 35968
- [8] Chen K, Feng Y, Monticone F, Zhao J, Zhu B, Jiang T, Zhang L, Kim Y, Ding X, Zhang S, Alu A, Qiu C W 2017 *Adv. Mater.* **29** 1606422
- [9] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, Huang Y W, Sun G, Chiang I D, Liao C Y, Hsu W L, Lin H T, Sun S, Zhou L, Liu A Q, Tsai D P 2014 *Nano Lett.* **14** 225
- [10] Yang H H, Yang F, Cao X Y, Xu S H, Gao J, Chen X B, Li T 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 6
- [11] Luo X Y, Guo W L, Chen K, Zhao J M, Jiang T, Liu Y, Feng Y J 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 6
- [12] Luo X 2019 *Adv. Mater.* **31** e1804680
- [13] He Q, Sun S, Xiao S, Zhou L 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800415
- [14] Li X N, Zhou L, Zhao G-Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 238101 (in Chinese) [李晓楠, 周璐, 赵国忠 2019 物理学报 **68** 238101]
- [15] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light: Sci. Appl.* **3** e218
- [16] Della Giovampaola C, Engheta N 2014 *Nat. Mater.* **13** 1115
- [17] Kim M, Jeong J, Poon J K S, Eleftheriades G V 2016 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **33** 980
- [18] Zhang Y, Feng Y J, Jiang T, Cao J, Zhao J M, Zhu B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 204101 (in Chinese) [张银, 冯一军, 姜田, 曹杰, 赵俊明, 朱博 2017 物理学报 **66** 204101]
- [19] Cui T J, Liu S, Li L L 2016 *Light Sci. Appl.* **5** e16172
- [20] Li Y, Lin J, Guo H, Sun W, Xiao S, Zhou L 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1901548
- [21] Luo Z, Chen M Z, Wang Z X, Zhou L, Li Y B, Cheng Q, Ma H F, Cui T J 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1906635
- [22] Bai X, Kong F, Sun Y, Wang G, Qian J, Li X, Cao A, He C, Liang X, Jin R, Zhu W 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 2000570
- [23] Li H, Ma C, Ye D, Sun Y, Zhu W, Li C, Ran L 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 4
- [24] Nayeri P, Yang F, Z. Elsherbeni A 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 2
- [25] Martinez-de-Rioja E, A. Encinar J, Florencio R, Tienda C 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 1
- [26] Chou H T, Lertwiriayaprapa T, Akkaraekthalin P, Torrungruang D 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 6
- [27] Somolinos A, Florencio R, González I, A. Encinar J, Cátedra F 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 6
- [28] Ding G, Chen K, Qian G, Zhao J, Jiang T, Feng Y, Wang Z 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 2000342

Independent dual-beam control based on programmable coding metasurface^{*}

Zhang Na Zhao Jian-Min Chen Ke[†] Zhao Jun-Ming
Jiang Tian Feng Yi-Jun[‡]

(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

(Received 23 February 2021; revised manuscript received 12 April 2021)

Abstract

Programmable metasurfaces incorporating with tunable materials or components are emerging as an attractive option to realize reconfigurable manipulations of electromagnetic (EM) behaviors in real-time. Many efforts have been devoted to the realization of active EM manipulations of the metasurface and significant progress has been achieved, showing their unprecedented ability to arbitrarily manipulate wavefronts in dynamic functions. However, most of the existing multi-beam metasurfaces are based on passive building blocks, only possessing one or a few functions, which cannot provide tunable and independent multi-beam control, thus limiting their further uses in wireless communications. Hence, a 1-bit coding metasurface with high-efficiency, programmable, and independent multi-beam control is proposed in this paper, providing dynamic EM responses with real-time reconfigurability, and controlled by external digital circuits through direct current (DC) bias networks. Specifically, the meta-atom loaded with PIN diodes is employed to achieve independently tunable phase characteristics, thus complex EM functions can be manipulated by redistributing the spatial phases of the metasurface. Symmetric/asymmetric independent dual- and multi-beam manipulations are analyzed theoretically and simulated by EM software. Then as an experimental verification, a metasurface consisting of 14×14 meta-atoms is fabricated and tested in a standard microwave anechoic chamber, and the measured results accord well with the simulations. The proposed metasurface has promising ability to generate the arbitrary and independent multi-beams, which may largely enhance the information capacity of the metasurfaces, offering untapped potentials in wireless communication systems.

Keywords: coding metasurface, programmable, dual-beam, independent control

PACS: 81.05.Xj, 07.05.Tp, 03.65.Vf, 52.25.Os

DOI: 10.7498/aps.70.20210344

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0700201), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61801207, 91963128, 61731010), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China, and the Jiangsu Key Laboratory of Advanced Techniques for Manipulating Electromagnetic Waves, China.

[†] Corresponding author. E-mail: ke.chen@nju.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: yjfeng@nju.edu.cn