

基于环形结构的无源编码超表面设计

陈燕, 王静*, 王本贤

(新疆师范大学 物理与电子工程学院 新疆发光矿物与光功能材料研究重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 编码超表面可通过编码序列调控空间波束方向, 有利于无线通信系统目标用户定向传输和通信质量的提高。文章设计了工作在 3.5 GHz 的环形周期金属贴片的三层结构单元超表面, 通过改变单元结构尺寸, 得到基本编码单元, 将编码单元按照不同方式排布, 在此条件下实现单波束、双波束电磁波辐射。采用卷积运算的波束调控方法, 垂直入射平面波激励下, 反射波束角度的最大值由传统排布方式下的 30° 扩大至 51° , 而最小反射波束角度达到 5° , 为超表面上电磁波束的连续灵活调控提供了一种新思路。

关键词: 编码超表面; 波束调控; 卷积运算

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9659(2025)02-0027-09

无线信号传输距离有限, 特别是电磁波在传输过程中遇到障碍物或处于复杂环境时易出现多径效应, 信号衰减更加严重。传统无线通信系统一般通过增大发射功率、增加收发天线数量等方式克服无线信道的不确定性。突破传统无线信道不可控特性, 重塑无线传播环境, 大幅提升无线通信系统性能, 将为无线通信的发展提供新的可能^[1]。

超表面是将具有特定几何形状的亚波长尺寸单元按照周期性或非周期性排布的人工电磁材料。通过优化超表面的单元结构, 可以在透射和反射模式下灵活地控制目标频率处电磁波的振幅、相位和极化^[2-4], 智能操控无线传输环境, 解决盲区覆盖、增强边缘用户信号等通信难题。目前超表面在极化转换^[5-6]、波束调控^[7-11]和现代通信^[12-13]等领域得到了广泛应用。超表面与无线通信的结合, 可以打破传统无线信道环境不可控的限制。基于编码超表面的新型无线环境具有更多的潜在应用场景^[14-20]。

5G 无线通信技术具有高速率数据传输、低时延、大网络容量等特点, 有望改变人们的生活、工作和通信模式。3.5 GHz 频段是 5G 网络初始部署中的黄金频段, 将编码超表面的中心频率设定在 3.5 GHz 频段内有利于其在实际场景中的应用, 具有一定的实际价值, 商业化发展前景广阔。

编码超表面研究的关键在于如何设计出适当的编码序列, 以获得期望的电磁特性, 编码超表面可通过不同的排序方式产生单波束、双波束以及多波束的定向调控^[21-24]。Zhang 等人^[25]提出一种 2-bit 可重构智能超表面辅助的通信系统, 在 3.5 GHz 处成功实现了对 $(10^\circ, 0^\circ)$, $(10^\circ, 180^\circ)$, $(15^\circ, 0^\circ)$, $(15^\circ, 180^\circ)$ 和 $(30^\circ, 0^\circ)$, $(30^\circ, 180^\circ)$ 的多波束反射, 带宽为 40 MHz。Zhao 等人^[9]提出了在太赫兹频段三层结构的 C 型编码超表面, 经过卷积计算后的编码序列在 0.71 THz 处实现 52° 的偏转角, 具有 76% 的偏转效率。黄若彤等人^[22]提出了一种具有多波束控制的太赫兹编码反射超表面, 利用卷积运算处理圆偏振入射的太赫兹波束, 实现了偏转角为 50° 的双波束和四波束反射以及偏转角为 12° 和 24° 的单波束反射。

文章设计了一种可应用于 5G 通信场景的编码超表面, 设置工作频率为 3.5 GHz, 利用所设计的环形超表面单元, 以不同的排布方式实现单波束及双波束, 通过卷积运算实现反射角度由 51° 变化至 5° , 且以 10° 为间

[收稿日期] 2024-03-15

[修回日期] 2024-04-21

[作者简介] 陈燕 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事电磁表面材料设计、仿真分析方面研究, E-mail: 1534124843@qq.com.

* [通讯作者] 王静 (1977-), 女, 副教授, 主要从事通信与信号处理、电磁表面材料设计方面研究, E-mail: jing_3221@163.com.

隔。文章中编码超表面突破了传统梯度编码情况下反射角度的限制,实现了反射角度大范围调控。

1 理论分析

1.1 相位编码理论分析

在平面波垂直入射的情形下,编码超表面的远场函数可表示为

$$f(\theta, \varphi) = f_e(\theta, \varphi) \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \exp \left\{ -i \left[\varphi(m, n) + kD \sin \theta \left[\left(m - \frac{1}{2} \right) \cos \varphi + \left(n - \frac{1}{2} \right) \sin \varphi \right] \right] \right\} \quad (1)$$

其中, θ 和 φ 为任意方向上的俯仰角和方位角, θ 为超表面的方向函数, k 为波数, D 为编码序列的维度。 $\phi(m, n)$ 为位于 (m, n) 处单元的相位。

在采用一维编码图案的情况下,即编码只沿一个方向(x 轴或 y 轴)变化,俯仰角表达式可以表示为

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{\Gamma} \right) \quad (2)$$

其中, λ 为自由空间波长, Γ 为一维梯度周期编码阵列的周期。由式(2)可得,排布方式与编码周期具有密切联系,改变编码周期长度即可得到不同的俯仰角和方位角^[26]。

1.2 傅里叶卷积理论

超表面阵列相当于数字信号处理中的时间信号,超表面的远场散射类似于数字信号处理中的频域,两个信号在时域上的乘积可以转换为频域上的卷积,对应的表达式为

$$f(t) \cdot g(t) \xrightarrow{FFT} f(\omega) * g(\omega) \quad (3)$$

卷积定理还具有频移特性。若 $g(t) = e^{i\omega_0 t}$ 是一个时移信号,那么根据傅里叶卷积理论,在频域内可以写为一个脉冲信号 $2\pi\delta(\omega_0)$, 可得

$$f(t) \cdot e^{i\omega_0 t} \xrightarrow{FFT} f(\omega) * g(\omega - \omega_0) = f(\omega - \omega_0) \quad (4)$$

分别用 x_λ 和 $\sin \theta$ 替换式(4)中的 t 和 ω , 可得

$$E(x_\lambda) \cdot e^{ix_\lambda \sin \theta_0} \xrightarrow{FFT} E(\sin \theta) * \delta(\sin \theta - \sin \theta_0) = E(\sin \theta - \sin \theta_0) \quad (5)$$

其中, x_λ 表示电长度, θ 表示反射波束与表面垂直法线的夹角, $e^{ix_\lambda \sin \theta}$ 表示具有梯度相位分布的超表面。由式(5)可知,一个初始编码超表面阵列和具有相位梯度分布的超表面阵列的乘积会导致超表面反射波束偏离原始反射方向。新的编码超表面的俯仰角可以表示为

$$\theta = \sin^{-1}(\sin \theta_1 \pm \sin \theta_2) \quad (6)$$

其中, θ_1 和 θ_2 是两个初始编码超表面的俯仰角。

2 超表面单元设计及编码阵列设计

文章设计的编码超表面的工作频率为 3.5 GHz, 波长 λ 为 86 mm。环形编码超表面的单元结构由两层金属和一层介质组成,顶层是金属环形贴片,底层为金属背板,金属层均由铜材料组成,厚度为 0.035 mm。环形贴片的外部边长为 a , 宽度为 w , 中间层选择低损耗的基底介质 F4B 基板(介电常数为 $\epsilon_r = 2.2$, 损耗正切值为 $\tan \delta = 0.001$), 厚度 h 为 5 mm, 金属背板和介质的长度 p 均为 21.5 mm。

将具有 180° 相位差的两个单元分别用数字编码为“0”和“1”单元,由这两个单元组成的编码超表面称作 1-bit 编码超表面; 2-bit 编码超表面由相位差为 90° 的四个单元结构组成,分别用“00”“01”“10”“11”表示。为了满足相位差条件,利用电磁仿真软件对超表面单元结构(图1)进行电磁仿真,针对外环边长 a 和环宽 w 进行参数优化,最终得到满足相位差的四种单元结构(表1)。 a 的值分别为 21.5 mm、18.8 mm、17.5 mm 和 15.3 mm 时, 1-bit 相位编码下两个单元的相位差为 180° 。将相位为 0 的单元编码为“0”, 相位为 180° 的单元编码为“1”。 2-bit 相位编码下四个单元的相位差为 90° , 相位为 0° 、 90° 、 180° 、 271° 的单元分别编码为“00”“01”“10”“11”。

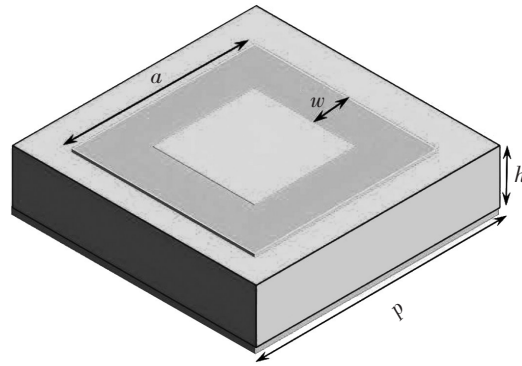


图1 超表面单元结构示意图

表1 1-bit和2-bit编码单元示意图

a (mm)	21.5	18.8	17.5	15.3
w (mm)	9.68	4.85	4.46	3.90
相位($^{\circ}$)	0	90	180	271
1-bit相位编码	0	—	1	—
2-bit相位编码	00	01	10	11

侧视图

仿真得到的反射振幅和反射相位如图2所示。在3.5 GHz处 x 极化方向和 y 极化方向的入射波分别沿 z 轴垂直入射。反射振幅如图2(a)所示,可以看出反射振幅均保持在0.97以上。反射相位如图2(b)所示,可以看出四种编码状态下相位差达到 90° ,具有214 MHz的带宽。此外,从图2还可以看出, x 极化波和 y 极化波的幅度和相位响应完全一致,表明设计的超表面单元具有双极化调控能力。

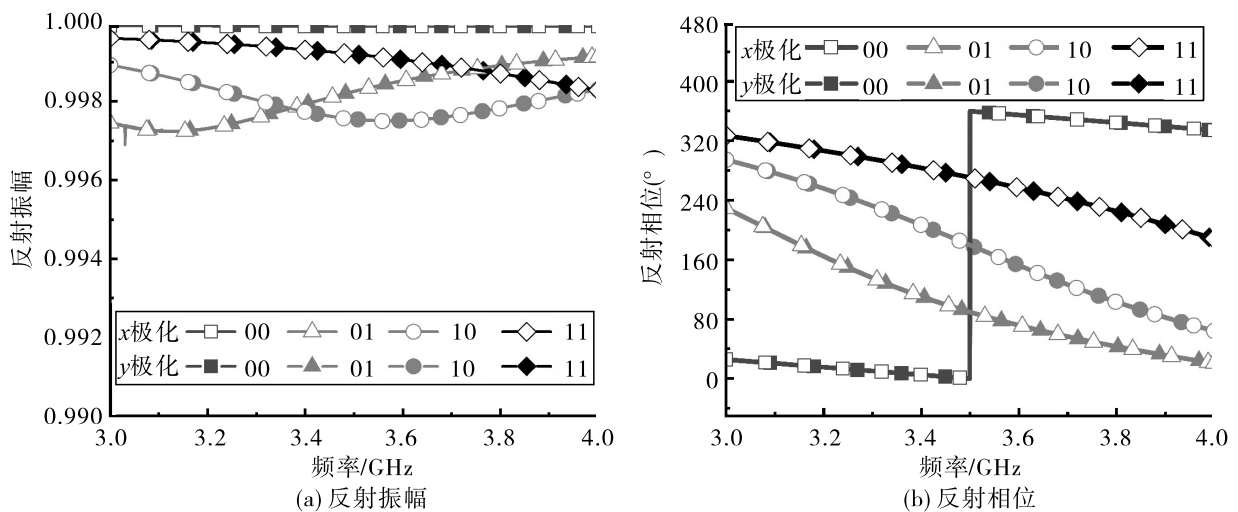


图2 x 与 y 极化波沿 z 轴入射时反射波的幅度和相位响应

3 编码相位梯度超表面设计

3.1 1-bit编码超表面设计

由式(2)可知,俯仰角与编码梯度序列的周期长度有关,改变周期长度可以得到不同俯仰角的反射波

束。利用设计相差 180° 的两种相位梯度超表面单元结构作为基本单元,构建阵列大小为 24×24 的编码超表面,入射波设置为垂直入射的平面波,采用时域有限差分法来模拟和分析超表面中波束的偏转角度。设计沿 x 轴方向进行一维排布的四种编码序列如下

$$\begin{aligned} &000111000111000111000111; 000011110000111100001111; \\ &000000111111000000111111; 000000000001111111111100. \end{aligned}$$

这四种编码序列沿 y 方向拓展得到编码阵列, N1、N2、N3 和 N4 编码阵列由 24×24 个基本单元构成,编码周期分别为 129 mm、172 mm、258 mm、473 mm.

对 N1、N2、N3 和 N4 阵列进行仿真,得到的结果如图 3 所示。图 3(a)展示四种编码阵列的相位分布。图 3(b)、图 3(c)分别为仿真得到的方向图与主瓣反射强度图。从图 3(b)可以看出,入射的平面波经过 1-bit 编码的超表面后形成了对称双波束。图 3(c)显示四种编码阵列下的主瓣波束最高反射强度为 17.48 dBm^2 ,最低反射强度为 16.86 dBm^2 ,四种编码方式下能够达到 42° 、 30° 、 18° 、 9° 的反射波束偏转,这说明文章设计的 1-bit 编码超表面阵列可实现以 10° 为梯度的波束调控能力。

表 2 列出了四种不同编码序列的周期 Γ 、俯仰角 θ 和主瓣反射强度值。俯仰角的理论值通过式(2)计算得出。

表 2 1-bit 不同编码序列的周期 Γ 、俯仰角 θ 和主瓣反射强度关系

编码序列	N1	N2	N3	N4
编码周期 $\Gamma(\text{mm})$	129	172	258	473
俯仰角 $\theta(^{\circ})$ 计算值	42	30	19	10
俯仰角 $\theta(^{\circ})$ 仿真值	42	30	18	10
主瓣反射强度 (dBm^2)	16.86	16.8	17.46	17.48

3.2 2-bit 编码超表面设计

与 1-bit 编码超表面的设计类似,利用设计相差 90° 的四种相位梯度超表面单元结构作为基本单元,构建阵列大小为 24×24 的 2-bit 编码超表面。设沿 x 轴周期排布的五种一维编码序列如下

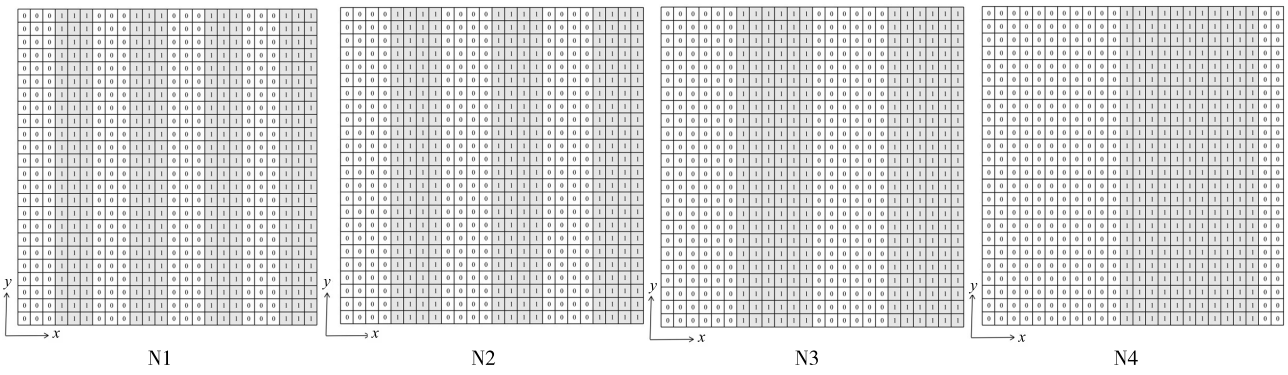
$$\begin{aligned} &001122330011223300112233; 0001112222333000111222333; 000011112222330000111122; \\ &0000011111222222333330000; 000000111111222222333333. \end{aligned}$$

这五种编码序列沿 y 方向拓展分别得到 24×24 编码阵列 P1、P2、P3、P4、P5。由式(2)计算得出 2-bit 编码周期 Γ 和俯仰角 θ ,计算与仿真结果如表 3 所示。

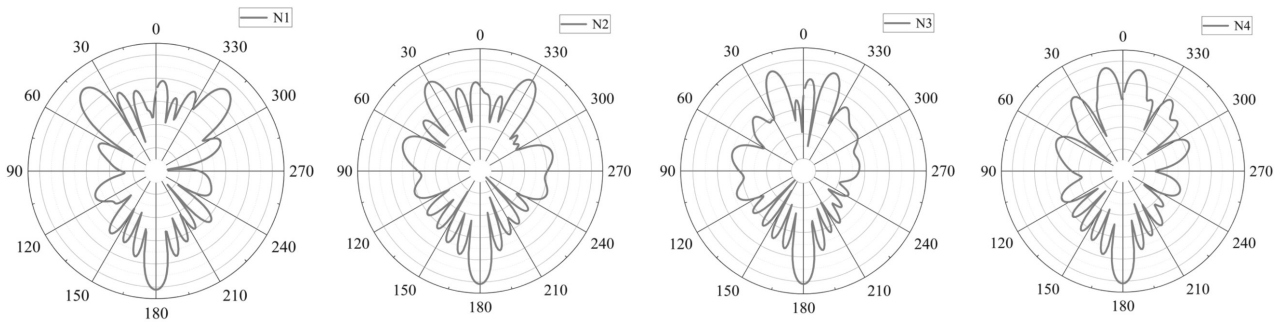
表 3 2-bit 不同编码序列的周期 Γ 、俯仰角 θ 和主瓣反射强度关系

编码序列	P1	P2	P3	P4	P5
编码周期 $\Gamma(\text{mm})$	172	258	344	430	516
俯仰角 $\theta(^{\circ})$ 计算值	30	19	14	12	10
俯仰角 $\theta(^{\circ})$ 仿真值	29	19	14	12	9
主瓣反射强度 (dBm^2)	19.48	19.30	19.87	19.63	20.40

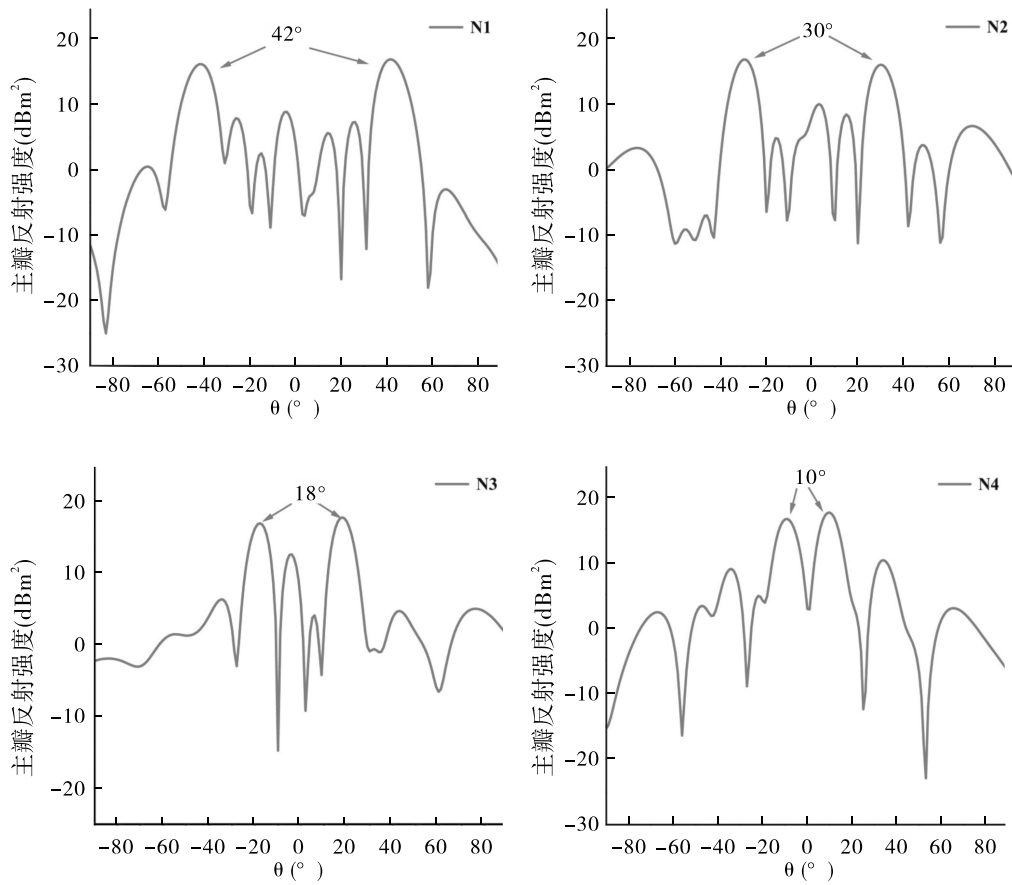
以 P1 阵列为例,图 4 表明 2-bit 相位编码排布下沿 z 轴垂直入射的波束生成了单波束的反射波。图 4(a)展示超表面阵列相位排布,理论计算以及仿真得到的远场散射图和主瓣反射强度如图 4(b)、图 4(c)所示,俯仰角的理论计算值为 30° ,仿真得到的俯仰角为 29° ,误差为 $\pm 1^\circ$ 。通过表 3 可观察到编码周期 Γ 越大,俯仰角则越小, n 的值由 2 增加到 6,对应的俯仰角则由 30° 减小至 10° 。根据这一规律,在设计 2-bit 周期排布时可以指定编码周期长度,达到目标俯仰角度值。值得注意的是,利用该方法排布时,俯仰角的角度调控具有局限性。为了增强俯仰角的调控性能,文章采用傅里叶卷积运算,对基本序列做到更为灵活的反射波束偏转角度调控。



(a) 相位分布示意图



(b) 四种编码阵列的方向图



(c) 仿真得到的主瓣反射强度图

图3 N1、N2、N3和N4四种编码阵列的仿真结果

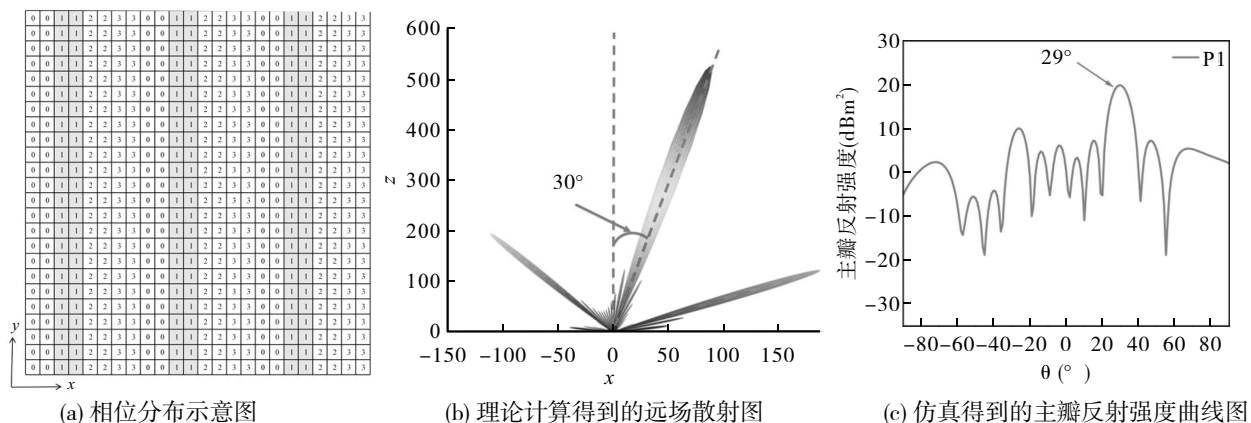


图4 P1阵列的理论仿真对比

3.3 基于卷积运算的2-bit编码设计

对P1、P5排布方式采用卷积运算,将P1和P5序列相位相加,形成新的编码排列超表面S2.由式(6)可知,在相同激励条件下,S2产生反射角为 42° 、主瓣反射强度达 19.1 dBm^2 的单波束反射(图5(i)).这说明,在一维相位梯度编码下,反射波束调控能力较小的两种编码排列方式在卷积运算后可生成更大调控范围的单波束角度,为提高反射波束控制性能提供可行的方法。

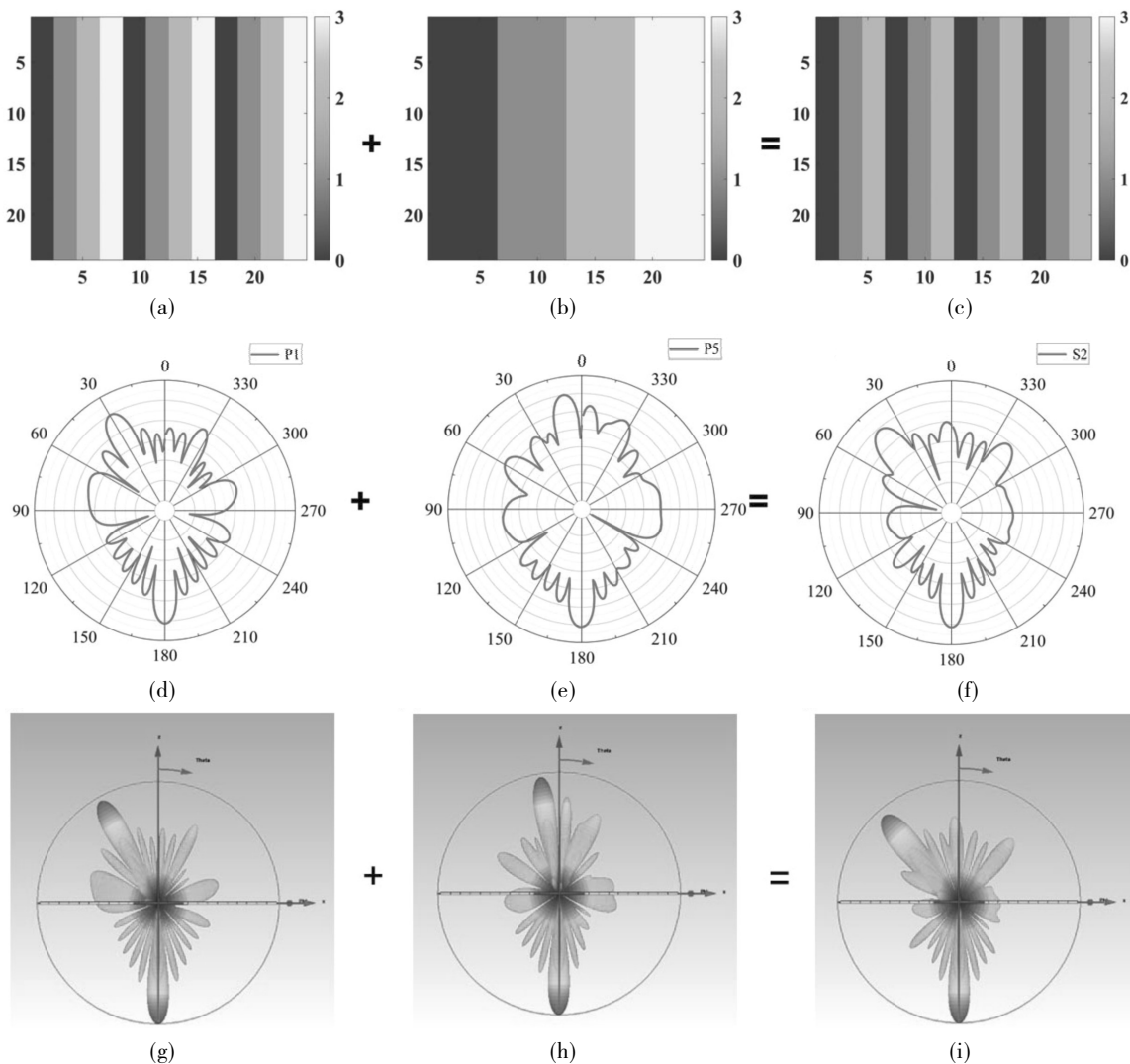


图5 3.5 GHz处平面波垂直入射下,编码超表面卷积过程示意图

(a)~(c)为P1、P5和S2的相位分布示意图;(d)~(f)为远场方向图;(g)~(i)为3D远场散射图。

基于此方法,对P1、P2、P3、P4、P5五种相位梯度编码超表面进行多次叠加和混合相加、相减,通过计算仿真和实验验证,获得更多排布方式和可调控的反射角度。将选定的五种超表面进行线性叠加运算,得到序列如下: $S1=P1+P2-P3+P4$, $S2=P1+P5$, $S3=P2+P4$, $S4=P1$, $S5=P4+P5$, $S6=P2$, $S7=P3$, $S8=P4$, $S9=P2-P4$, $S10=P3-P5$ 。

相关仿真和实验验证数据如表4所示。十种不同排布方式下的超表面可以实现反射角度由 51° 至 5° 的变化,且角度梯度可控制在 10° 以内,主瓣反射强度在 $16.3\sim 19.8\text{ dBm}^2$ 范围内。以1-bit的编码阵列N1和卷积后得到的编码阵列S2为例,对比卷积前后的俯仰角、主瓣反射强度可以发现,N1和S2阵列的反射角度都为 42° ,但S2的主瓣反射强度可达 19.1 dBm^2 ,而N1仅有 16.86 dBm^2 。这说明,对编码超表面进行卷积运算,不仅可以扩大反射角度的调控范围,还可以增强反射波束的主瓣反射强度,使波束指向更为聚集。

表4 不同排布方式下的反射角度和主瓣反射强度

超表面不同排布方式	反射角度		主瓣反射强度(dBm^2)
	理论值($^\circ$)	仿真值($^\circ$)	
S1	51	51	16.3
S2	42	41	19.1
S3	32	32	18.2
S4	30	29	19.7
S5	22	20	18.4
S6	20	19	19.3
S7	15	14	19.7
S8	12	12	19.5
S9	8	8	19.8
S10	5	5	19.2

3.4 二次卷积运算的2-bit编码设计

基于公式(2)的传统调控方法存在局限性,即因为周期只能成倍增加,随着周期的增加,反射角度的变化是离散的。因此,这种方式无法对角度进行连续调控,因此反射波束反射角度的变化是不连续的。根据以上卷积运算对电磁反射波束连续调控问题的解决方案实现验证,在2-bit编码下,实现了反射角度从 51° 至 5° 共十种角度变化,继续对上述实验生成的S编码阵列进行二次卷积,拟实现多种反射角度的可能性,增大反射角度变化范围,进一步提高波束调控灵活性。

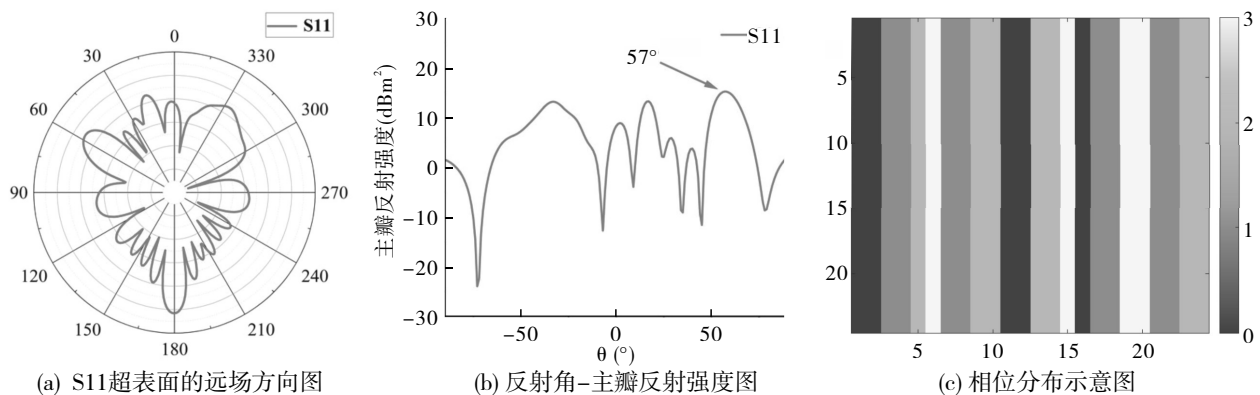


图6 S11超表面的数值模拟结果

理论上,上述超表面结构还可继续进行卷积叠加计算。例如,将超表面S4与S5再次卷积叠加后得到新序列S11,根据式(6)计算得出新序列的反射角度为 61° ,大于一次卷积生成的 51° ,最大调控范围为 10° 。对S11进行数值模拟验证,结果如图6所示。由图6(b)可以看出,在同样的垂直入射平面波激励下,入射波被反射至 57° ,与理论计算出的 61° 相比,有 4° 的误差值,且反射波束的主瓣反射强度降低,旁瓣较大,超表面的

反射性能降低,故增加卷积运算虽可以生成更大范围调控波束,但也存在波束能量不够集中的缺点。因此,如何减小副瓣,提升主瓣能量,是在后续研究中有待解决的问题。

4 结论

文章设计了一种工作在 3.5 GHz 通信频段下的环形单元结构的编码超表面,可应用于双波束和单波束电磁波束的调控。其以多种编码序列为基础,进行卷积运算编码方式获得多种编码周期,实现垂直入射平面波的异常反射。在 3.5 GHz 垂直入射平面波激励下,反射波角度实现了从 51° 至 5° 共十种角度变化,并对比了二次卷积结果,可达到 57° 的单波束调控性能。相较于一次卷积编码,二次卷积编码超表面反射性能有所下降,波束聚集能力下降,表明二次以上卷积将会损失波束的聚集能力以换取更精确的角度控制。通过超表面的设计,可以将波束聚焦在特定的区域,提高信号的接收灵敏度和传输效率,所设计的超表面阵列对 5G 无线通信信道性能的增强以及无线信号局部区域研究补充具有一定的应用价值和现实意义。

参考文献:

- [1] CHEN Q, DAI J Y, KE J C, et al. Application of Reconfigurable Intelligent Surface in Beamforming and Information Modulation[J]. *Telecommunications Science*, 2021, 37(09): 30-37.
- [2] HUANG L, CHEN X Z, MÜHLENBERND H, et al. Dispersionless Phase Discontinuities for Controlling Light Propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [3] DING G, CHEN K, LUO X, et al. Dual-helicity Decoupled Coding Metasurface for Independent Spin-to-orbital Angular Momentum Conversion[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(04): 043-044.
- [4] YAN L, ZHU W, KARIM M F, et al. Arbitrary and Independent Polarization Control in Situ via a Single Metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(21): 1800728.
- [5] XU Z, SHENG H, WANG Q, et al. Terahertz Broadband Polarization Converter based on the Double-split Ring Resonator Metasurface[J]. *SN Applied Sciences*, 2021, 3: 763.
- [6] HUANG J, YIN X, XU M, et al. Switchable Coding Metasurface for Flexible Manipulation of Terahertz Wave based on Dirac Semimetal[J]. *Results in Physics*, 2022, 33: 105204.
- [7] SHANG T, ZHAO J, XU J, et al. Convolution Operations on Coding Metasurface for RCS Reduction[J]. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 2021, 36(10): 1054-4887.
- [8] ZHONG M, LI J S. Multi-function Terahertz Wave Manipulation Utilizing Fourier Convolution Operation Metasurface[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(05): 054207.
- [9] ZHAO T Q, JING X F, TANG X Y, et al. Manipulation of Wave Scattering by Fourier Convolution Operations with Pancharatnam-Berry Coding Metasurface[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106556.
- [10] ZHANG C, YANG J, YANG L X, et al. Convolution Operations on Time-domain Digital Coding Metasurface for Beam Manipulations of Harmonics[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(09): 2771-2781.
- [11] 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.
- [12] ZHAO J, YANG X, DAI J Y, et al. Programmable Time-domain Digital Coding Metasurface for Nonlinear Harmonic Manipulation and New Wireless Communication Systems[J]. *National Science Review*, 2019, 6(02): 231-238.
- [13] LIU S, CUI T J, XU Q, et al. Anisotropic Coding Metamaterials and Their Powerful Manipulation of Differently Polarized Terahertz Waves[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5: e16076.
- [14] CUI T J, LIU S, BAI G D, et al. Direct Transmission of Digital Message via Programmable Coding Metasurface[J]. *Research*, 2019, 10: 2584509.
- [15] TANG W, LI X, DAI J Y, et al. Wireless Communications with Programmable Metasurface: Transceiver Design and Experimental Results[J]. *China Communications*, 2019, 16(05): 46-61.
- [16] ATALOGLOU V G, TARAVATI S, ELEFTHERIADES G V, et al. Metasurfaces: Physics and Applications in Wireless Communications[J]. *National Science Review*, 2023, 10: 164.
- [17] 马向进, 韩家奇, 乐舒瑶, 等. 可重构智能超表面设计及其无线通信系统应用[J]. *无线电通信技术*, 2022, 48(02): 258-268.
- [18] LI Y H, BETTINGA S, EISENBEIS J, et al. Beamsteering for 5G Mobile Communication Using Programmable Metasurface[J]. In *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(07): 1542-1546.

- [19] CASTALDI G, ZHANG L, MOCCIA M, et al. Joint Multi-frequency Beam Shaping and Steering via Space-time-coding Digital Metasurfaces[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, 31(06):2007620.
- [20] 李小兵, 陆卫兵, 刘震国, 等. 基于可调石墨烯超表面的宽角度动态波束控制[J]. *物理学报*, 2018, 67(18):99-105.
- [21] SAID A M, MAROT M, AFIFI H, et al. Optimal Mobile IRS Deployment for Empowered 6G Networks[J]. In *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5(10):540-552.
- [22] 黄若彤, 李九生. 太赫兹多波束调控反射编码超表面[J]. *物理学报*, 2023, 72(05):231-239.
- [23] 张娜, 赵健民, 陈克, 等. 编码超构表面实现双波束独立可重构[J]. *物理学报*, 2021, 70(17):274-282.
- [24] YU N, GENEVET P, KATS M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054):333-337.
- [25] ZHANG S, SUN H, YU R, et al. Two-bit RIS-aided Communications at 3.5 GHz: Some Insights from the Measurement Results Under Multiple Practical Scenes[C]. *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Dalian, China, 2023:1-6.
- [26] 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.

Design of Passive Reconfigurable Coding Metasurface based on Ring Structure

CHEN Yan, WANG Jing*, WANG Ben-xian

(*Xinjiang Key Laboratory of Luminescent Minerals and Photofunctional Materials, School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830054, China*)

Abstract: Coding metasurfaces can regulate the spatial beam direction through coding sequences, which facilitates directional transmission and improves the communication quality for target users of wireless communication systems. In this paper, a three-layer structured cellular hypersurface with ring-shaped periodic metal patches operating at 3.5 GHz is designed. By changing the dimensions of the cell structure, the basic coding unit is obtained, and single-beam, dual-beam electromagnetic wave radiation is achieved by arranging the coding unit in different ways. With the beam regulation method of convolutional operation, the maximum value of the reflected beam angle under the vertical incident plane wave excitation is expanded from 30° to 51° under the traditional arrangement, and the minimum reflected beam angle reaches 5° , which provides a new idea for the continuous and flexible regulation of the electromagnetic beam on the metasurfaces.

Keywords: Coding metasurfaces; Beam steering; Convolution operation