

文章编号: 2095-4980(2025)09-0942-08

太赫兹双频正交极化复用可编程超表面

陈国棚, 兰峰*, 吴崇鑫, 杨沐楠, 李玥廷, 聂小磊, 杨家焱, 胥麟*, 杨梓强, 张雅鑫
(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 针对可重构智能表面(RIS)对极化和频率复用波束调控的需求, 本文提出一种基于复合单元结构的太赫兹双频正交极化复用可编程超表面。通过设计基于高电子迁移率晶体管(HEMT)的工字型偶极子极化分集切换结构, 实现了双频段独立调控功能。CST 仿真结果表明, 在 Y 极化方向低频段(0.190~0.226 THz)和 X 极化方向高频段(0.358~0.373 THz)分别实现了 36 GHz 和 15 GHz 的 $180^\circ \pm 20^\circ$ 相移带宽, 频带内的平均幅值分别为 Y 极化低频段 0.44, X 极化高频段 0.53。通过分数化编码、分块编码以及卷积编码验证了阵列在 Matlab 仿真中的双极化双波束连续扫描($\pm 13.1^\circ \sim \pm 81^\circ$)、多波束重构(最多 4 波束)及单波束调控能力。相较于传统单频段单极化反射面, 本文设计的双频双极化编码 RIS 在频谱利用率、波束调控灵活性等方面具有显著优势, 为实现大容量、大视场和多功能的 6G 太赫兹通信系统提供了新的技术路径。

关键词: 太赫兹; 可重构智能表面; 双频编码; 波束调控; 极化分集

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025169

Terahertz dual-band orthogonal polarization multiplexing programmable metasurfaces

CHEN Guopeng, LAN Feng*, WU Chongxin, YANG Munan, LI Yueting, NIE Xiaolei, YANG Jiayao,
XU Lin*, YANG Ziqiang, ZHANG Yaxin

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: To address the demand for polarization- and frequency-multiplexed beam control in Reconfigurable Intelligent Surfaces(RIS), a terahertz dual-band, orthogonally polarized, programmable metasurface based on composite unit cells is proposed. By employing an HEMT-based I-shaped dipole with polarization diversity switching, independent control of the two frequency bands is achieved. CST simulations show $180^\circ \pm 20^\circ$ phase-shifting bandwidths of 36 GHz in the low-frequency band(0.190~0.226 THz) for Y-polarization and 15 GHz in the high-frequency band(0.358~0.373 THz) for X-polarization. Within these bands, the average magnitudes are 0.44 (Y-pol, low band) and 0.53 (X-pol, high band), respectively. Using fractional, block, and convolutional coding, Matlab-based array simulations verify continuous dual-polarized dual-beam scanning($\pm 13.1^\circ$ to $\pm 81^\circ$), multi-beam reconstruction (up to four beams), and single-beam steering. Compared with conventional single-band single-polarization reflectarrays, the proposed dual-band dual-polarization coded RIS offers significant advantages in spectral efficiency and beam-control flexibility, providing a new technological path toward high-capacity, wide-field-of-view, and multifunctional 6G terahertz communication systems.

Keywords: terahertz; Reconfigurable Intelligent Surface(RIS); dual-frequency coding; beam steering; polarization diversity

收稿日期: 2025-05-15; 修回日期: 2025-08-06

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFA1401004); 国家自然科学基金资助项目(62131007; 62305051; 62331015; U20A20212; 61931006); 中国科协青年人才托举工程资助项目(2022QNRC001); 空间微波技术重点实验室基金资助项目(2023-JCJQ-LB-007)

*通信作者: 兰峰 email:lanfeng@uestc.edu.cn; 胥麟 email:xulin@uestc.edu.cn

引用格式: 陈国棚, 兰峰, 吴崇鑫, 等. 太赫兹双频正交极化复用可编程超表面[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(9):942-949. DOI:10.11805/TKYDA2025169.

Citation format: CHEN Guopeng, LAN Feng, WU Chongxin, et al. Terahertz dual-band orthogonal polarization multiplexing programmable metasurfaces[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(9):942-949. DOI:10.11805/TKYDA2025169.

太赫兹通信技术具有高带宽、强穿透性及分子指纹特性, 在 6G 通信、安全检测、生物医学等领域展现出广阔的应用前景^[1-2]。可重构智能超表面(RIS)作为一种新型电磁波调控器件, 可通过动态调节单元相位实现信号波束的灵活操控。近年来, 国内外太赫兹 RIS 在阵列规模、集成度和多功能等方面取得了一定的突破^[3-8]。2025 年, 电子科技大学与东南大学联合提出了一种基于双极化透反一体的太赫兹可编程超表面, 实现了双通道复用的全空间跟瞄通信^[9]。XU Yucheng 基于液晶设计了双频段可编程超表面, 在 400 GHz 和 700 GHz 实现独立波束调控, 但低效率限制了实际应用性能^[10]。Javad Shabanpour 利用 VO₂ 相变实现了两个正交线极化的太赫兹可编程超表面, 但 5 层异质结构导致制造成本高^[11]。面对未来无线通信对频谱利用率与动态调控能力的需求, 太赫兹 RIS 在频率复用、多极化协同和多功能等方面仍面临挑战。

针对上述问题, 本文提出一种基于高电子迁移率晶体管(HEMT)双频正交极化复用可编程超表面。本研究为太赫兹频段智能反射面的双频动态编码技术提供了理论与实验依据, 可显著提升 6G 通信系统的频谱效率与波束赋形灵活性。

1 单元设计与仿真

1.1 太赫兹双频正交极化复用可编程超表面单元设计

设计的太赫兹双频正交极化复用可编程超表面单元如图 1 所示。该设计采用复合工字型偶极子单元结构, 目标频段为 Y 极化低频段(0.190~0.226 THz)与 X 极化高频段(0.358~0.373 THz), 单元周期为 300 μm, 通过控制 HEMT 的二维电子气浓度实现 HEMT 的导通与关断, 从而实现双极化分集下的动态相位调控。该超表面采用电控极化分集切换机制和分块编码方式, 可实现正交极化复用、多波束扫描(4 波束+连续扫描)和共面高集成(单层印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)兼容结构)的双频多功能快速波束调控, 如表 1 所示。

1 bit 反射式单元结构示意图如图 2 所示, 其中单元周期 $L=300\ \mu\text{m}$, $L_1=80\ \mu\text{m}$, $L_2=76\ \mu\text{m}$, $W=3\ \mu\text{m}$; 二维电子气等效区域在 3 个工字型结构中都一样, 均为长 14 μm、宽 18 μm、厚 0.013 μm 的红色区域; 介质为 SiC 半导体材料, 厚度为 100 μm; 基板背面为金属反射底板, 基板表面为工字型偶极子复合谐振结构, 由 3 组工字型金属贴片组成。HEMT 晶体管位于偶极子开口处, 其源漏极通过欧姆接触连接至左右两边的源漏极延长线, 栅极与二维电子气间为肖特基接触连接, 3 组工字型结构的 HEMT 栅极延长线通过中间馈线引出, 与左右两边的源漏极延长线形成共面馈电结构。

表 1 本工作与其他工作对比

Table 1 Comparison with other works

item	this work	reference [9]	reference [10]	reference [11]
switching mode	HEMT electrically controlled polarization diversity switching	HEMT electronic control	liquid crystal voltage regulation	VO ₂ electric field phase transition
polarization	dual polarization (X polarization, Y polarization)	dual polarization (X polarization, Y polarization)	single polarization (X polarization)	dual polarization (X polarization, Y polarization)
frequency	dual frequency band 0.190~0.226 THz 0.358~0.373 THz	single frequency band 0.117~0.151 THz	dual frequency band ~0.400 THz ~0.700 THz	single frequency band 1.45~1.73 THz
scanning beam	independent control of four beams + continue scanning(±13°~±81°)	transmission/reflection dual-mode independent scanning (transmission ±70°, reflection 30°~70°)	single/dual beam scanning (maximum deflection 75°)	near-field focus(multi-focus/vortex) far-field beamforming(four beams/OAM)
integration level	single layer planar structure, compatible with PCB process	bilayer structure	complex stacking	multilayered structure

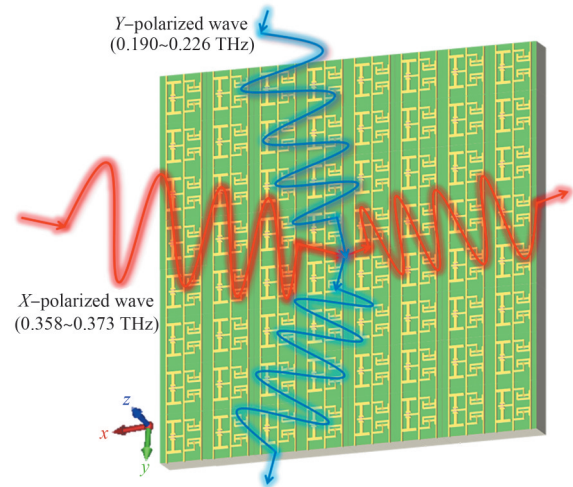


Fig.1 Schematic diagram of dual-band orthogonal polarization multiplexing programmable metasurfaces

图 1 双频正交极化复用可编程超表面示意图

基于 Drude 模型^[12-15], HEMT 的导通(ON)与关断(OFF)状态分别对应二维电子气的开启与耗尽。当施加 0 V 偏置电压时(ON 状态), 二维电子气层呈现低阻抗特性, 等效为短路状态, 偶极子谐振长度缩短, 调控高频段(X 极化方向)的相位响应; 当施加 -10 V 偏置电压时(OFF 状态), 二维电子气层耗尽, 等效为高阻抗特性, 偶极子谐振长度延长, 调控低频段(Y 极化方向)的相位响应。

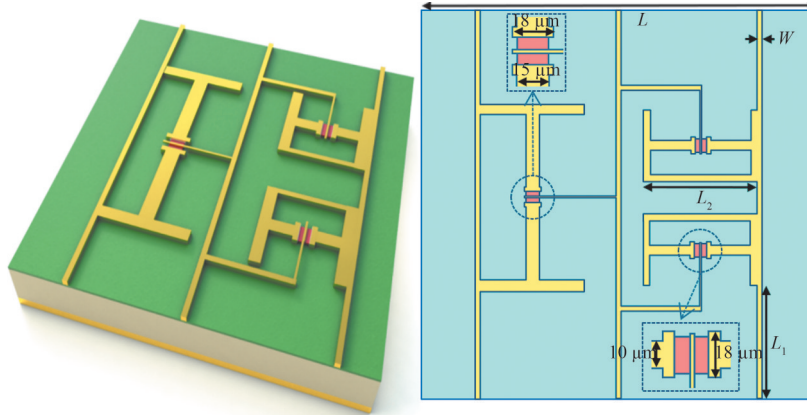


Fig.2 Dual-band orthogonal polarization multiplexing programmable metasurfaces unit
图2 双频正交极化复用可编程超表面单元

1.2 单元仿真结果

在三维电磁仿真软件 CST 中建立单元模型, 并利用 Drude 模型表征二维电子气层的电导率动态特性。图 3 为工字型偶极子单元在 Y 极化低频段(0.190~0.226 THz)和 X 极化高频段(0.358~0.373 THz)的反射幅度与相位响应。仿真结果表明: 在 Y 极化高频段, 导通与关断状态的反射幅度平均值达到 0.44, 且在频带内的相位差都可达到 180° ± 20°, 相移带宽为 36 GHz; 在 X 极化高频段, 相位差同样可以满足 180° ± 20°, 相移带宽为 15 GHz, 导通与关断状态的反射幅度平均值达到 0.53。

图 4 为 X 极化与 Y 极化入射下的表面电流和电场分布, 其极化分集原理为: Y 极化入射波主要激发低频段的工字型长偶极子谐振, 而 X 极化入射波则主要激发高频段的工字型短偶极子谐振。其相位调制的原理为: 通过 X 和 Y 方向的 HEMT 开关的导通和截止, 分别实现两个极化态的长短偶极子谐振式相移, 从而实现双频段极化解耦的 1 bit 相移调控。此外, 单元结构的共面布线设计简化了馈电网络复杂度, 可通过外部现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)驱动电路对不同极化独立编码, 从而实现对太赫兹波束的正交极化动态调控。

2 超表面编码方案及阵列仿真

基于广义斯涅尔定律^[16]: 若超表面单元按照相位梯度 $d\phi$ 排布成阵列, L 为单元周期, N 为相邻的同相单元间隔的数量, 根据 L 和 N 可得反射波束的角度:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\pm 2\pi + d\phi}{NL} \times \frac{c}{2\pi f}\right) \quad (1)$$

数字编码超表面的核心思想是将每个单元的相位响应用二进制数字表示: “0” 为 0° 相位响应; “1” 为 180° 相位响应, 以实现 360° 相移。在 1 bit 编码中, 每个单元可被表示为一个二进制数字, 因此当 $d\phi$ 被调整为 180° 时, 对应的 1 bit 编码情况分别为: 当 $N=1$ 时, 编码序列为 [...1010...]; 当 $N=2$ 时, 编码序列为 [...1100...]; 当 $N=3$ 时, 编码序列为 [...111000...]. 因此, N 可被取为任意正整数, 从而得到对应角度

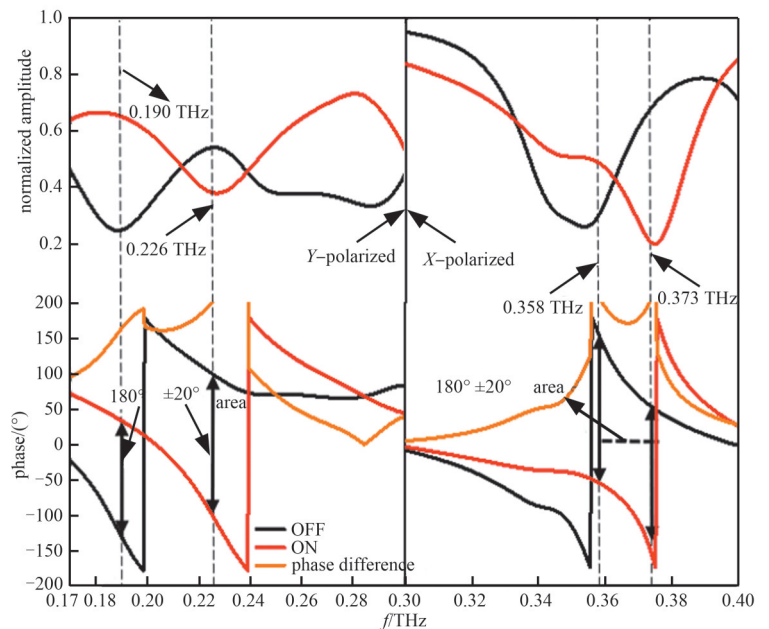


Fig.3 Amplitude(top) and phase(bottom) of the HEMT-工-shaped dipole composite unit
图3 HEMT-工字型偶极子复合单元的和幅值(上)和相位(下)

的编码序列。

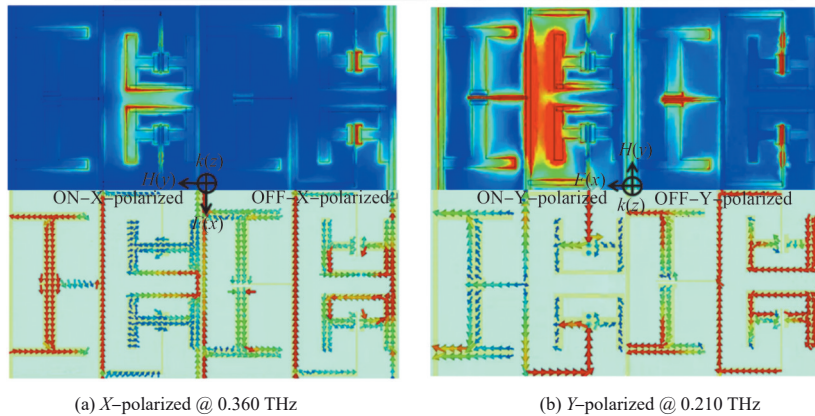


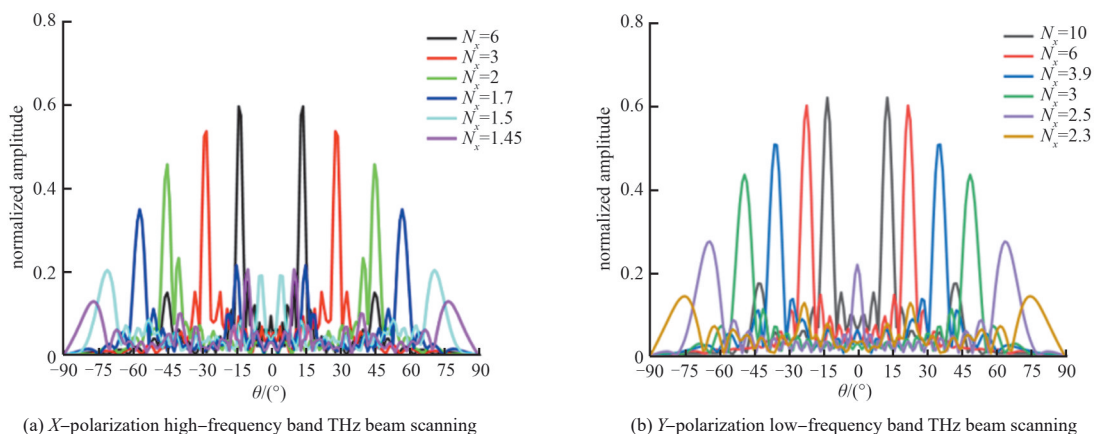
Fig.4 Field distribution(top) and surface current distribution(bottom) under X-polarization and Y-polarization incidence
图 4 X极化与Y极化入射下的场分布与表面电流分布

为实现连续波束扫描, 更精确地控制反射波的角度, 本文采用分数编码方案^[14]。以 x 方向进行编码, 通过离散化近似处理非零自然数 N 为 N_x , 从而得到更高的编码精确度。编码序列如表 2 所示。

表 2 编码序列
Table 2 Code sequence

N_x	encoding periodic sequence	angle of beam deflection/(°)
high-frequency band in the X-polarization direction		
6.00	...000000111111...	± 13.7
3.00	...000111...	± 28.4
2.00	...0011...	± 45.0
1.70	...00100110110011011...	± 57.0
1.50	...011...	± 72.0
1.45	...01101101101101001001001001...	± 80.0
low-frequency band in the Y-polarization direction		
10.00	...0000000001111111111...	± 13.1
6.00	...000000111111...	± 22.2
3.90	...000011110000111100011110000111100001111...	± 35.6
3.00	...000111...	± 49.2
2.50	...00111...	± 65.3
2.30	...00111001100111001100011...	± 81.0

通过 Matlab 仿真 64×64 阵列的远场方向图, 如图 5 所示, 验证了双频段波束在 X 极化方向 $\pm 13.7^\circ \sim \pm 80^\circ$ 和 Y 极化方向 $\pm 13.1^\circ \sim \pm 81^\circ$ 范围内的连续扫描能力。仿真结果表明, 随着 N_x 值增大, 双波束的扫描角度逐步减小, 因为分数化编码相较于整数编码精确度更高。 $N_x=1.45, N_x=1.5, N_x=1.7$ 的分数化编码相比整数编码 $N=1$ 至 $N=2$, 波束步进更小, 验证了双波束分数编码相较于整数编码在波束扫描时有更高的灵活性和扫描精确度。需注意的是, 由于大角度范围上的阵列有效面积减小和相位量化误差加剧, N_x 越小, 对应的大角度的波束幅值会越小。



(a) X-polarization high-frequency band THz beam scanning (b) Y-polarization low-frequency band THz beam scanning

Fig.5 2D beam-scanning patterns

图 5 二维波束扫描图

为进一步验证分块编码的多波束调控能力，将 64×64 阵列划分为 2×1、1×2 或 2×2 子块，如图 6 所示，分别加载不同编码序列，入射波均采用垂直入射。

2×1 分块编码方式为：上子块采用“000111” ($N_x=3$)，下子块采用“000000111111” ($N_x=6$)。仿真结果如图 7(a)所示，X 极化方向 (0.360 THz) 主瓣角度为 ±27° 与 ±13°，Y 极化方向 (0.220 THz) 为 ±49° 与 ±22°，与全阵列独立仿真结果一致。1×2 分块编码方式为：右边子块采用“000111” ($N_x=3$)；左边子块采用“000000111111” ($N_x=6$)。仿真结果如图 7(b)所示，X 极化方向 (0.360 THz) 主瓣角度为 ±27.5° 与 ±12.5°，Y 极化方向 (0.220 THz) 为 ±49° 与 ±20.5°。与全阵列独立仿真结果基本对应，但与 2×1 分块编码的波束稍有不同，原因是编码方向不同，阵列大小虽一样但周期不同，波束形成的方向不一样，合成后的方向图也就不一样。2×2 分块子阵是将 64×64 大阵列平均分成 4 块单独编码的阵列，在 X 极化方向 (0.360 THz)，4 块子阵列编码 N_x 依次为 1.5、2、3 和 6；在 Y 极化方向 (0.220 THz)，4 块子阵列编码 N_x 依次为 2.5、3、6 和 10，仿真结果如图 7(c)所示。X 极化高频段 4 分块阵列合成的主瓣波束角度分别为 ±66.5°、±44°、±27° 和 ±13°；Y 极化低频段 4 分块阵列合成的主瓣波束角度分别为 ±64.5°、±47.5°、±21.5° 和 ±12.5°，与全阵列独立仿真结果基本吻合。需要注意，2 分块和 4 分块的子阵波束主瓣归一化幅值，相较于整个完整阵列的波束主瓣归一化幅值，分别降低了约 1/2 和约 1/4。这是因为单个子阵的有效辐射面积减小，能量分散到多个子阵波束中。分块后子阵的主瓣波束角度也存在略微差异，旁瓣毛刺也更为明显，这是因为分块后的单个编码阵列变小，周期变短，毛刺是由于分块编码产生多个波束，不同编码的旁瓣波束交织在一起，合成了另外一个方向的副瓣波束。但分块的优点是能够同时独立地控制多个波束的扫描角度，为复杂通信场景提供了适配性方案。

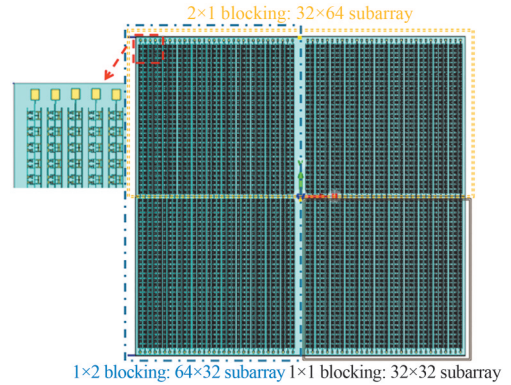


Fig.6 2×1 block, 1×2 block and 2×2 block diagram
图 6 2×1 分块、1×2 分块、2×2 分块示意图

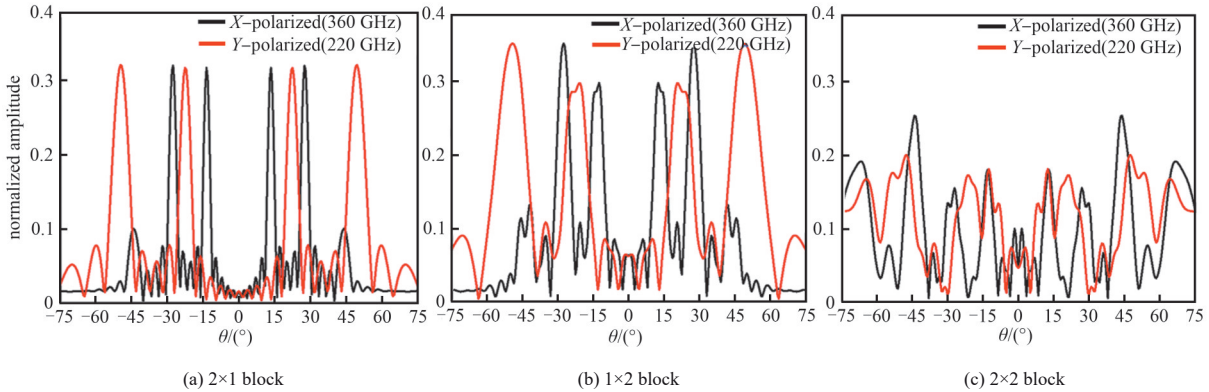


Fig.7 Beam pattern simulation of block array in Matlab
图 7 分块阵列在 Matlab 中的仿真波束图

卷积编码通过在超表面单元之间设置精确的相位差来控制整体超表面在时域上产生的响应，实现对反射或透射波的操控。卷积编码^[17]如式(2)所示。

$$E(x_i) e^{ix_i \sin \theta_0} \xleftrightarrow{\text{FFT}} E(\sin \theta) \delta(\sin \theta - \sin \theta_0) = E(\sin \theta - \sin \theta_0) \quad (2)$$

式中： x_i 为电长度； θ 为相对于法线方向的角度； $e^{ix_i \sin \theta_0}$ 为电场分布； $\sin \theta$ 为偏移角度值。最后合成的多波束角度关系为 $\theta = \arcsin(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)$ ； θ_0 为目标波束的偏转角度； θ_1 为两个卷积编码序列对应的波束方向。

时域项目映射为相位(指数形式)，频域项目与波束定向相关，两个编码矩阵相位相乘恰等于它们的编码数模(如“0”+“0”=“0”、“0”+“1”=“1”、“1”+“0”=“1”、“1”+“1”=“0”)。卷积编码通过叠加不同周期序列的相位分布，实现多波束重构。与分块编码相比，卷积编码可实现更加平滑的相位变化，控制灵活性更高。如图 8 所示，以 X 极化方向 0.360 THz 为例，将 $N_x=16(\pm 4.5^\circ)$ 与 $N_x=2.5(\pm 33.5^\circ)$ 编码序列卷积，生成 ±28.5° 与 ±39.5° 的多波束。类似地，如图 9 所示，Y 极化方向 0.220 THz 通过 $N_x=32(\pm 3^\circ)$ 与 $N_x=5.5(\pm 24.5^\circ)$ 卷积，获得 ±21° 与 ±27.5° 的多波束。仿真结果表明，卷积编码可扩展波束角度范围，提升调控灵活性。

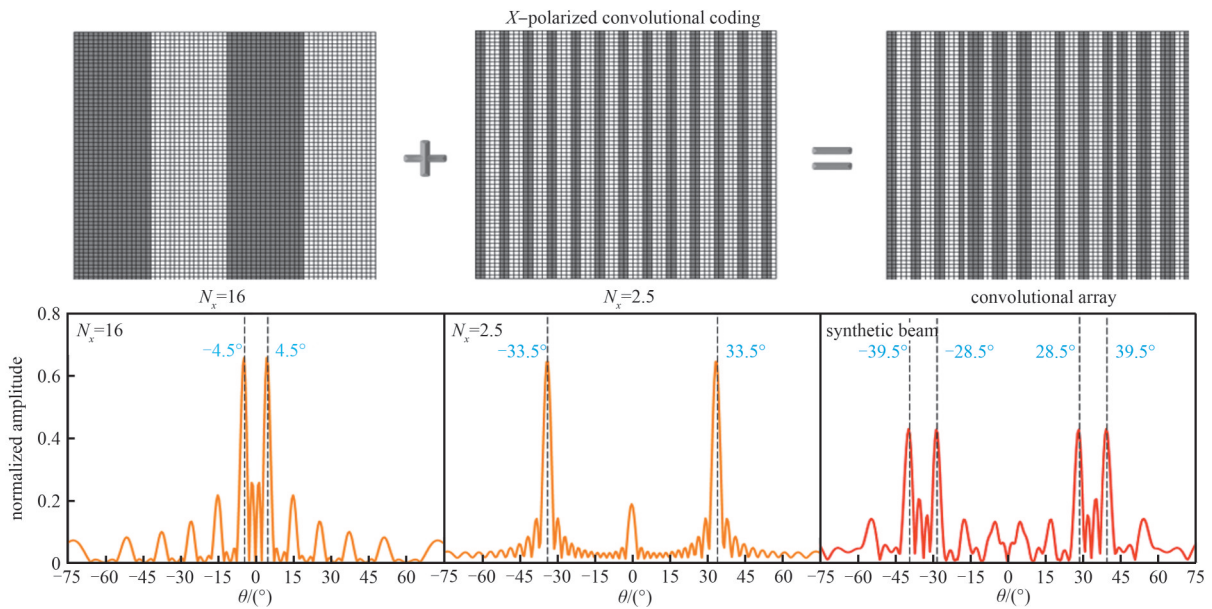


Fig.8 X-polarized convolutional coded beam synthesis diagram
图 8 X极化高频段卷积编码波束合成图

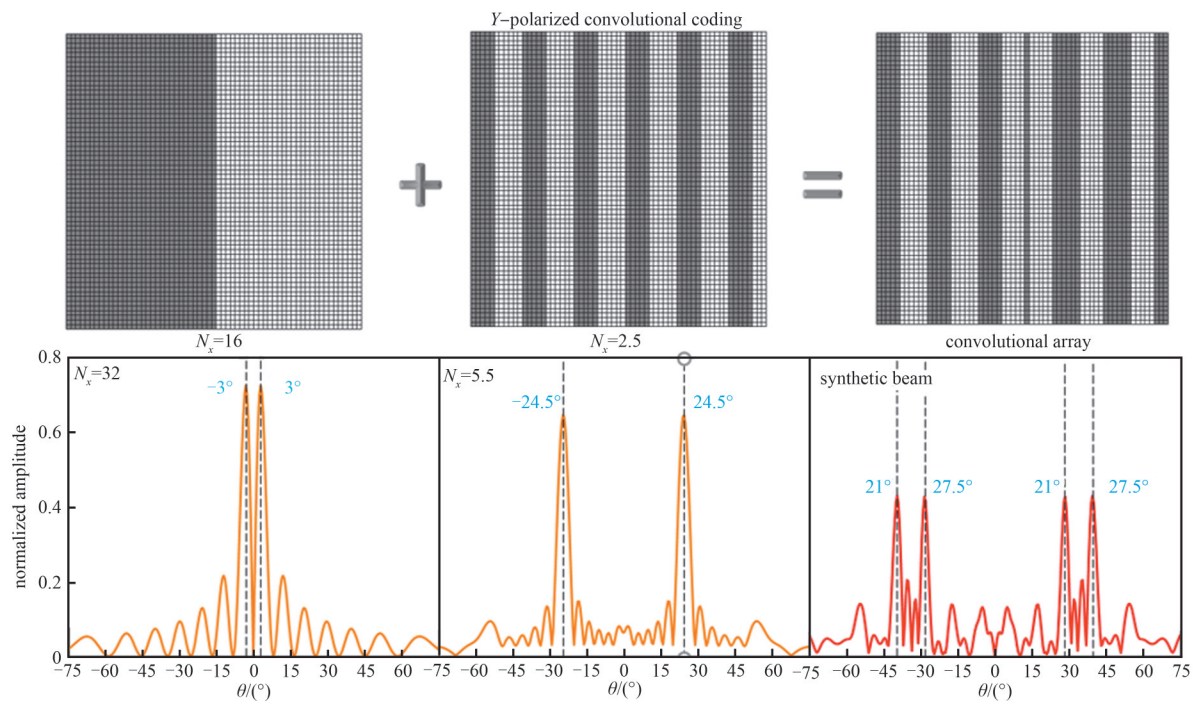


Fig.9 Y-polarized convolutional coded beam synthesis diagram
图 9 Y极化低频段卷积编码波束合成图

为优化反射效率，进一步采用单波束控制方案。当入射角为45°时，可实现单波束反射。对X极化高频段以“000000111111”编码，对Y极化低频段以“000000111111”编码，采用Matlab进行波束仿真。仿真结果如图10所示，X极化方向0.360 THz频点下，归一化幅值有明显提升(主瓣角度-43°)，Y极化方向0.220 THz频点下，归一化幅值也有明显提升(主瓣角度19°)，较双波束方案显著改善。与法向入射相比，斜入射角可获得更高的波束控制精确度和反射增益。

3 结论

本文基于双频编码调控理论，提出了一种基于HEMT的工字型偶极子复合结构的双频正交极化复用可编程超表面。通过极化分集切换机制实现了双频段的高效波束调控。仿真结果表明，该结构在Y极化低频段(0.190~

0.226 THz)与 X 极化高频段(0.358~0.373 THz)分别实现 36 GHz 和 15 GHz 的 $180^\circ \pm 20^\circ$ 相移带宽, 频带内的平均幅值分别为 Y 极化低频段 0.44, X 极化高频段 0.53, 具有较好的幅值一致性与相位调控精确度。通过分数化编码、分块编码以及卷积编码验证了该结构在双频段下的多波束连续扫描、多波束独立重构以及单波束调控能力, 实现了在 X 极化高频段(0.360 THz)的 $\pm 13.7^\circ \sim \pm 80^\circ$ 的波束扫描, Y 极化低频段(0.220 THz)的 $\pm 13.1^\circ \sim \pm 81^\circ$ 的连续调控。综上, 本研究提出的可编程超表面具备双频正交极化复用、宽角度、高灵活性等特点, 为太赫兹频段 6G 通信系统中的动态波束赋形、多用户接入与频谱效率优化提供了可行的技术支撑。

参考文献:

- [1] YANG Ping, XIAO Yue, XIAO Ming, et al. 6G wireless communications: vision and potential techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(4):70–75. DOI:10.1109/MNET.2019.1800418.
- [2] GIORDANI M, POLESE M, MEZZAVILLA M, et al. Toward 6G networks: use cases and technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(3):55–61. DOI:10.1109/mcom.001.1900411.
- [3] HE Xunjun, WU Mingzhong, LU Guangjun, et al. High-efficiency multi-channel focusing and imaging enabled by polarization-frequency multiplexing non-interleaved metasurfaces[J]. Photonics Research, 2025, 13(4):976–986. DOI:10.1364/PRJ.545173.
- [4] LYNCH J J, HERRAULT F, KONA K, et al. Coded aperture subreflector array for high resolution radar imaging[C]// Proceedings of Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XXII. Baltimore MD, United States: SPIE. 2019: 1099405. DOI: 10.1117/12.2525061.
- [5] PAN Xiaotian, YANG Fan, LIU Fengfeng, et al. A 220 GHz reconfigurable reflectarray antenna using GaN HEMT device[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2025, 15(4):704–714. DOI:10.1109/tthz.2025.3563715.
- [6] WU Mingzhong, HE Xunjun, LU Guangjun, et al. Multi-mode non-diffraction vortex beams enabled by polarization-frequency multiplexing transmissive terahertz metasurfaces[J]. Journal of Applied Physics, 2024, 136(10): 103102. DOI: 10.1109/TAP.2020.3044382.
- [7] ZHANG Xin'ge, SUN Yalun, ZHU Bingcheng, et al. A metasurface-based light-to-microwave transmitter for hybrid wireless communications[J]. Light, Science & Applications, 2022, 11(1):126. DOI:10.1038/S41377-022-00817-5.
- [8] LI Weili, CHEN Benwen, HU Xinyu, et al. Modulo-addition operation enables terahertz programmable metasurface for high-resolution two-dimensional beam steering[J]. Science Advances, 2023, 9(42):eadi7565. DOI:10.1126/sciadv.adi7565.
- [9] WANG Luyang, LAN Feng, LIANG Shixiong, et al. A dual-programmable metasurface with duplex beam steering for full-space terahertz communications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 126(19):191702. DOI:10.1002/lpor.202500480.
- [10] XU Yucheng, ZHAO Tingzi, CHEN Guanyu, et al. A dual-band programmable metasurface for terahertz beam steering[J]. Applied Physics Letters, 2025, 126(19):191702. DOI:10.1063/5.0248242.
- [11] SHABANPOUR J. Programmable anisotropic digital metasurface for Independent manipulation of dual-polarized THz waves based on a voltage-controlled phase transition of VO_2 microwires[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(21):7189–7199. DOI:10.1039/D0TC00689K.
- [12] HE Jiaqi, CHENG Weichi, WANG Qing, et al. Recent advances in GaN-based power HEMT devices[J]. Advanced Electronic Materials, 2021, 7(4):2001045. DOI:10.1002/aelm.202001045.
- [13] CHUDNOVSKY E M. Theory of spin hall effect: extension of the Drude model[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(20):206601. DOI:10.1103/PhysRevLett.99.206601.
- [14] LEMKUL J A, HUANG J, ROUX B, et al. An empirical polarizable force field based on the classical Drude oscillator model: development history and recent applications[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(9): 4983–5013. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00505.
- [15] YU N F, GENEVE T P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054):333–337. DOI:10.1126/science.1210713.
- [16] WANG Luyang, LAN Feng, ZHANG Yaxin, et al. A fractional phase-coding strategy for terahertz beam patterning on digital metasurfaces[J]. Optics Express, 2020, 28(5):6395–6407. DOI:10.1364/oe.385691.

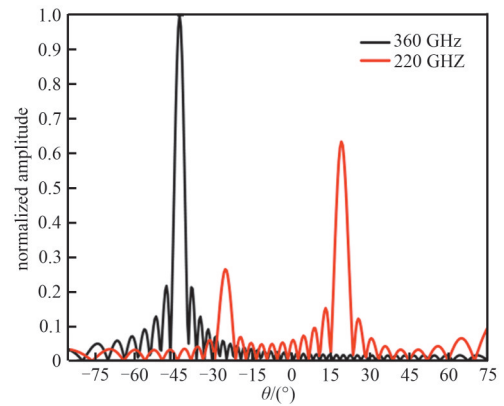


Fig.10 Far-field characteristics of 1 bit coding array under oblique incidence

图10 斜入射情况下, 1 bit 编码阵列的远场特性

- [17] LIU Shuo,CUI Tiejun,ZHANG Lei,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.

作者简介:

陈国棚(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹可重构智能超表面 .email:1822936673@qq.com.

兰 峰(1977-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹传输器件、数字超材料等.

吴崇鑫(2002-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹可重构智能超表面.

杨沐楠(2000-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹智能超表面架构及系统应用等.

李玥廷(1998-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹源、毫米波传输发射器件等.

聂小磊(2002-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹可重构超表面、太赫兹通信等.

杨家焱(2001-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹可重构超表面、太赫兹通信、太赫兹雷达探测.

胥 麟(1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹源、毫米波传输发射器件和太赫兹应用系统.

杨梓强(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹功能器件等.

张雅鑫(1981-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型太赫兹信号源、太赫兹功能器件等.