

基于透射型超表面的模态可重构太赫兹涡旋波束生成

周晶仪 郑史烈* 余显斌 回晓楠 章献民

(浙江大学信息与电子工程学院 杭州 310027)

摘要: 太赫兹技术与轨道角动量(OAM)技术相结合在高速无线通信领域具有巨大潜力。理论上不同模态的OAM之间具备严格正交性,若能将OAM技术应用到太赫兹通信系统中,必能极大提升系统的通信容量。因此,如何产生高质量的THz-OAM波束,并给予它灵活的动态控制成为研究者们的一大研究热点。该文设计了一种双层透射型超表面,使用3D打印作为加工方式,成本低、加工难度小。超表面单元结构采用高度可变的介质单元,随着单元高度不断发生改变,透射相位覆盖 $0^\circ\sim 360^\circ$,且透射率保持在88%以上。采用WR-10标准波导喇叭天线进行馈电,在100 GHz工作频率下,通过改变双层超表面之间的相对旋转角度,产生了不同模态的OAM波束。仿真结果表明,该文设计的超表面天线能够实现 $l=1,2,3$ 的OAM波束,二维幅相结果符合对应模态的特征, $l=1,2,3$ 时,OAM波束的模态纯度分别为85.4%,84.9%,83.4%。通过太赫兹扫场测试平台测试了天线在90 GHz,100 GHz,110 GHz频点下的电场分布。结果表明:在20 GHz带宽内,产生的OAM波束质量较好,证明该文设计的超表面天线在高频工作具有一定的工作带宽,有望应用于高频OAM通信。

关键词: 太赫兹; 涡旋波束; 模态可重构; 超表面; 透射型

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2022)04-0728-08

DOI: 10.12000/JR22021

引用格式: 周晶仪, 郑史烈, 余显斌, 等. 基于透射型超表面的模态可重构太赫兹涡旋波束生成[J]. 雷达学报, 2022, 11(4): 728-735. doi: 10.12000/JR22021.

Reference format: ZHOU Jingyi, ZHENG Shilie, YU Xianbin, *et al.* Reconfigurable mode vortex beam generation based on transmissive metasurfaces in the terahertz band[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(4): 728-735. doi: 10.12000/JR22021.

Reconfigurable Mode Vortex Beam Generation Based on Transmissive Metasurfaces in the Terahertz Band

ZHOU Jingyi ZHENG Shilie* YU Xianbin HUI Xiaonan ZHANG Xianmin

(College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Combining Terahertz (THz) and Orbital Angular Momentum (OAM) technologies has great potential in high-speed wireless communication. Theoretically, OAM with different modes has strict orthogonality. The communication capacity of the system will improve significantly if OAM technology is applied to the THz communication system. Thus, the manner to generate a high-quality and dynamically controllable THz-OAM beam has been of significant interest to researchers in related fields. In this study, a double-layer transmissive metasurface that uses 3D printing as the processing method with a low cost and processing difficulty is designed. Note that the height of the unit cell for constructing the metasurface is configurable. As the height changes continuously, the phase of the transmitted wave covers $0\sim 2\pi$ within 90-110 GHz, while the transmittance of the units is always higher than 88%. At 100 GHz, which is fed by a WR-10 standard waveguide horn antenna, OAM beams with different modes are generated by changing the relative rotation angle between the double-layer metasurface. The simulation results show that the metasurface antenna designed

收稿日期: 2022-01-26; 改回日期: 2022-04-14; 网络出版: 2022-05-09

*通信作者: 郑史烈 zhengsl@zju.edu.cn

*Corresponding Author: ZHENG Shilie, zhengsl@zju.edu.cn

基金项目: 之江实验室重大项目(2020LC0AD01)

Foundation Item: This work is partly sponsored by Zhejiang Lab (2020LC0AD01)

责任编辑: 李龙 Corresponding Editor: LI Long

in this study can achieve OAM beams of $l = 1, 2, 3$, and the two-dimensional amplitude and phase results correspond with the characteristics of the corresponding modes. When $l = 1, 2, 3$, the OAM beam's modal purity is 85.4%, 84.9%, and 83.4%, respectively. The measurement results include the results at frequency points of 90, 100, and 110 GHz. The results show that the OAM beam has a high-quality bandwidth of 20 GHz, which indicates that the metasurface antenna designed in this study has a wide working bandwidth at a high frequency and can be applied to high-frequency OAM communication.

Key words: Terahertz; Vortex beam; Reconfigurable mode; Metasurface; Transmissive

1 引言

太赫兹(THz)波指频率为0.1~10 THz范围内电磁波,处于微波段和红外光波段之间,具有很多独特的性质和鲜明的技术特点,在太赫兹高速无线通信、太赫兹雷达成像、太赫兹无伤探测等领域具有广泛应用^[1-4]。轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)作为电磁波的基本属性,与电磁波的幅度、极化性质相同,都属于电磁波的物理属性,携带OAM波束又称为涡旋波束,其相位分布为 $e^{-j l \phi}$,特征为相位波前呈螺旋状^[5]。理论上,不同模态的OAM波束空间结构不同,且相互正交,利用其正交性,在同一频点上可传输多路复用正交信号^[6],大大提升通信系统的频谱效率和通信容量,因此受到研究者的广泛关注。太赫兹技术与轨道角动量技术相结合,发挥两者的优势,在高速无线通信领域具备巨大潜力,可增加无线通信系统的带宽和容量^[7]。因此,在太赫兹波段产生可重构的高质量OAM波束是太赫兹、轨道角动量技术能够相结合的前提。

目前已有多种手段用于产生OAM波束,例如通过馈电组合方式产生OAM波束的阵列天线^[8,9],通过相位变化实现OAM的螺旋相位板(Spiral Phase Plate, SPP)^[10-12]、超表面技术(Metasurface)^[13,14]等。阵列天线产生OAM的原理比较简单,阵列单元以均匀的振幅进行馈电,只需控制单元上的相位即可实现涡旋波束的产生,在应用层面表现良好,但阵列天线的馈电网络往往比较复杂,且受限于加工工艺精度,难以应用于高频段OAM波束的产生。SPP的提出为产生OAM波束提供了更低的加工难度和更高的可行性。2014年, Miyamoto等人^[15]利用由 Tsurupica 烯烃聚合物制作而成的螺旋相位板在2 THz, 4 THz频率下产生THz涡旋光。因Tsurupica具有极高的透射率,该实验证明了SPP可用于产生高效的太赫兹OAM波束,但SPP只能产生特定模态的OAM波束,不具备可重构性。

超表面是由亚波长结构构成的薄膜器件,可在亚波长尺度的二维平面上获得相位突变^[13],剖面低、调控性强,且损耗小、易于加工,这些优势使

其成为产生THz-OAM波束的理想方法之一。2011年,哈佛大学Capasso课题组^[16]提出用V型单元结构,构成单层新型人工电磁表面,通过改变V型单元结构的夹角,对电磁波相位波前进行调控,产生涡旋波束。2019年, Shi等人^[17]提出基于石墨烯材料的超表面,通过改变石墨烯单元的化学势,在4.2~5.6 THz范围内实现模态可调谐的OAM波束。2020年, Wang等人^[18]提出基于VO₂材料的超表面,通过温度改变驱动VO₂绝缘态到金属态的变化,在0.69~0.79 THz范围内实现模态及波束转向角可重构的OAM波束。2021年,该课题组进一步提出通过VO₂在可调谐的THz工作频段内实现THz入射波转换成具有不同模态或频率的出射波束^[19]。2021年, Yang等人^[20]利用InSb材料的温控性质,基于几何相位原理,在1.8~4.5 THz频率范围内产生模态可重构的超表面。

本文仿真并测试了一种透射型模态可重构的THz-OAM波束双层超表面天线,以透明树脂为材料,通过3D打印技术加工了天线实物。在100 GHz工作频率下可实现模态变化 $l = 1, 2, 3$ 的OAM波束。仿真测试结果表明:简单改变双层超表面的相对旋转角度,即可实现OAM波束模态的可重构性,且调控灵活度高,产生的OAM纯度高。本文设计的超表面天线,加工成本低、加工周期短,具有一定的工程应用价值,有望应用于无线通信、目标成像等领域。

2 超表面单元设计及其仿真

本文提出的超表面单元结构如图1所示,其中透明部分为仿真边界,黄色部分为介质部分,材质为3D打印材料——Vero white^[21],超表面单元的边长 $p = \lambda_0/3$, λ_0 是100 GHz工作频率下的自由空间波长,介电常数 ϵ 为2.62。

超表面单元高度 h 为可变参数,随着 h 变化,可实现超表面单元对入射波透射相位的调节。蓝色部分为外加空气柱,用于保证透射相位观测平面的一致性。超表面单元结构的仿真在CST Microwave Studio仿真软件中进行,选择 x, y 方向上仿真边界

条件为unit cell, 用于模拟无限周期, 在线极化入射波条件下, 当超表面单元的高度 h 不断变化时, 单元的透射幅度、透射相位如图2所示。

单元高度 h 从0.5 mm变化到5.3 mm时, 单元结构的透射率整体达到0.88以上, 透射效率高, 适合用于透射型超表面的设计。根据透射相位曲线可以看到, h 高度变化范围内在90~110 GHz范围内相位覆盖均超过 360° , 可宽带工作且满足天线口径面上相位排布的需要。

3 超表面设计及仿真结果

超表面天线通常是无源器件, 需要外界激励。在超表面的设计和研究中, 一般将馈源的入射波看作平面波^[22,23], 但是在毫米波太赫兹波段, 往往距离馈源很远处才能认为其波前是平面波。并且, 太赫兹波段的喇叭天线往往增益较低, 若放置距离太远, 到达天线处时太赫兹波束的能量很低, 且整个天线系统会过大。考虑到上述种种情况, 在本文的仿真部分中, 馈源到超表面的距离不宜太远, 馈源出射的球面波达到超表面时引起的相位差就不可忽略, 在设计时需要加以考虑并予以补偿。

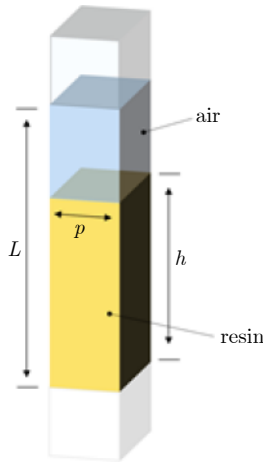
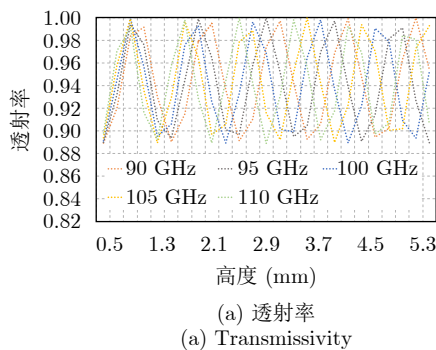


图 1 超表面单元结构

Fig. 1 The unit structure



在超表面天线仿真之前, 首先对喇叭出射的球面波相位做了补偿。本文使用的喇叭天线是商用W波段圆锥喇叭天线, 天线增益为20~22 dBi, 天线照射超表面的示意图如图3所示。

假设馈源出射发自馈源的相位中心, 相位中心距离超表面天线 F , 在仿真过程中统一设定 $F = 50$ mm, 则球面波传输距离 F 到达超表面天线时的入射相位 φ_{horn} 表示为

$$\varphi_{\text{horn}} = \frac{2\pi F}{\lambda_0} \times \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta} \quad (1)$$

为了保证仿真的统一性, 根据 φ_{horn} 相位, 设计了一块球面波补偿板, 并将补偿板与喇叭天线集成, 如图4所示, 将 $F = 50$ mm处的球面波相位补偿成平面波。

为了实现模态可重构的涡旋电磁波波束, 本文通过相位叠加原理对超表面进行设计, OAM波束的特征为其波前呈螺旋状, 因此本文所设计的超表面最终呈现的相位分布为 $\phi(\rho, \varphi)$,

$$\phi(\rho, \varphi) = -l\varphi - \varphi_{\text{horn}} + C \quad (2)$$

其中, $-l\varphi$ 项为OAM特征相位, l 为OAM模态数,

$$l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (3)$$

通过对 $-l\varphi$ 进行分析可发现, $-l\varphi$ 项为OAM特征相位, 是 φ 的高次项方程中的一部分, 在本文中选取 φ 的二次项方程^[14]进行分析, 可以发现 $\phi(\rho, \varphi)$ 可以分解为两块相位板的叠加, 两块相位板的相位分布分别定义为 $\phi_1(\rho, \varphi_1), \phi_2(\rho, \varphi_2)$,

$$\phi(\rho, \varphi) = \phi_1(\rho, \varphi_1) + \phi_2(\rho, \varphi_2) \quad (4)$$

$$\phi_1(\rho, \varphi_1) = a_1\varphi_1^2 + b_1\varphi_1 + c_1 - \frac{1}{2}\varphi_{\text{horn}} \quad (5)$$

$$\phi_2(\rho, \varphi_2) = a_2\varphi_2^2 + b_2\varphi_2 + c_2 - \frac{1}{2}\varphi_{\text{horn}} \quad (6)$$

为了消除二次项, 令 $a_1 = -a_2$, 则

$$\phi(\rho, \varphi) = (b_1 + b_2)\varphi + c_1 + c_2 - \varphi_{\text{horn}} + C \quad (7)$$

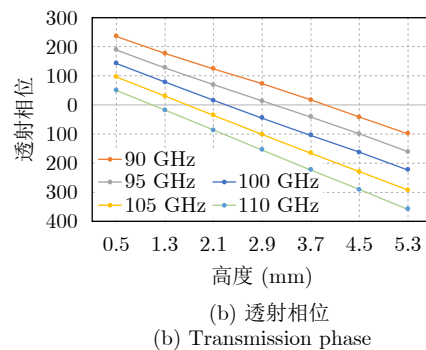


图 2 超表面单元结构透射率、透射相位仿真结果

Fig. 2 Simulation results of transmissivity and transmission phase of the unit structure

$$l = -(b_1 + b_2) \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_1(\rho, \varphi_1) &= -a_1\varphi^2 - \frac{1}{2}\varphi_{\text{horn}} \\ \phi_2(\rho, \varphi_2) &= a_1\varphi^2 - \frac{1}{2}\varphi_{\text{horn}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由于前文中已做了球面波相位补偿，在此处可以不用将 φ_{horn} 设计到超表面相位中，并且在本文中，设定 $a_1 = 1$ ，则双层超表面最终相位为

$$\left. \begin{aligned} \phi_1(\rho, \varphi_1) &= -\varphi^2 \\ \phi_2(\rho, \varphi_2) &= \varphi^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

当 ϕ_2 旋转一定角度 $\Delta\varphi$ 时，

$$\begin{aligned} \phi(\rho, \varphi) &= \phi_1(\rho, \varphi_1) + \phi_2(\rho, \varphi_2 + \Delta\varphi) \\ &= -\varphi^2 + (\varphi + \Delta\varphi)^2 + C \\ &= 2\Delta\varphi \cdot \varphi + \Delta\varphi^2 + C \end{aligned} \quad (11)$$

可见， $l = -2\Delta\varphi$ ，因此，当两层超表面平面发生

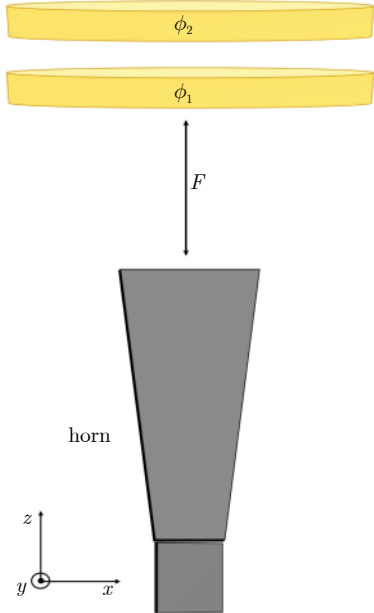


图3 双层超表面及馈源位置关系图

Fig. 3 The setup of the feed and the double-layer metasurface

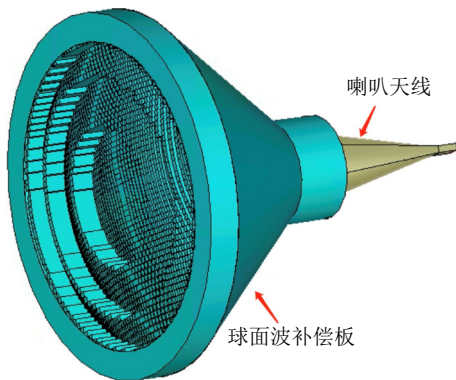


图4 球面波补偿板-喇叭天线集成示意图

Fig. 4 Integration of the compensation board and the horn antenna

相对旋转时，引起 $\Delta\varphi$ 变化，即可实现出射涡旋波束模态的可重构性。

按照上述方案设计的双层超表面相位分布如图5所示。通过CST Microwave Studio对上述超表面进行仿真，CST建模如图6所示。

单层超表面共由1576个单元结构组成，直径约为45 mm。使用前文设计的球面补偿喇叭天线作为馈源，改变双层超表面相对旋转角度得到仿真结果如图7所示，取观测平面距离天线 $z = 30\lambda_0$ 处进行观察。随着双层超表面发生相对旋转， $\Delta\varphi$ 发生改变时，当 $\Delta\varphi$ 分别等于 $1/2$ rad, 1 rad, $3/2$ rad时，可以实现 $l = 1, 2, 3$ 的OAM波束。图7(a)展示了 $\Delta\varphi = 1/2$ rad时产生的OAM波束的幅相分布，对应产生的OAM模态 $l = 1$ ；图7(b)展示了 $\Delta\varphi = 1$ rad时产生的OAM波束的幅相分布，对应产生的OAM模态 $l = 2$ ；图7(c)展示了 $\Delta\varphi = 3/2$ rad时产生的OAM波束的幅相分布，对应产生的OAM模态 $l = 3$ ，可以看到OAM波束的幅相分布，与理论分析一致，在相位分布上有清晰的涡旋相位分布。但是随着双层超表面相对旋转角度越大，产生的模态数越高，

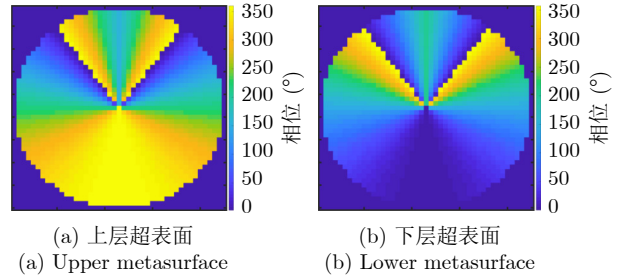


图5 双层超表面相位分布

Fig. 5 Phase distributions of double-layer metasurface

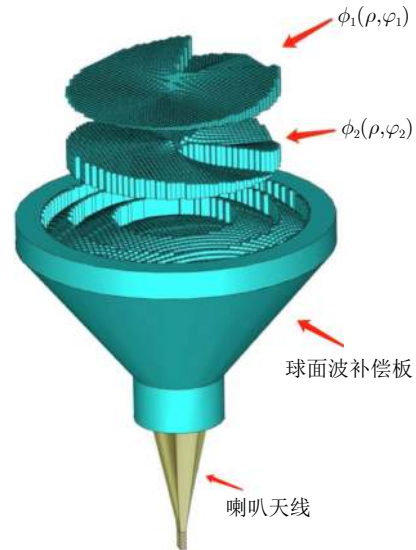


图6 CST仿真模型

Fig. 6 CST simulation the simulation model in CST

高模OAM波束的幅度逐渐不均匀。这是因为双层超表面发生相对旋转时, $\Delta\varphi$ 取决于双层超表面之间的相对旋转角度, 而单层超表面上相位分布经设计后确定无法更改, 因此旋转后天线系统能够产生OAM的对应相位分布, 只存在于 $[2\pi - \Delta\varphi, 2\pi]$ 范围

内, 在 $[0, \Delta\varphi]$ 存在相位混叠部分, 随着 $\Delta\varphi$ 增大, 相位混叠覆盖部分越多, 满足产生OAM的有效区域会减小。这将造成天线辐射性能下降, 使得出射的OAM波束在幅度分布上不是一个均匀的甜甜圈状, 导致了该天线在高模态OAM波束的产生过程中波束质量欠佳。

为定量说明所形成的OAM波束的质量, 根据仿真结果对OAM谱进行模态纯度分析^[24], 图8给出不同模态下OAM谱模态纯度分析结果, 与预想结果对应, 每一种主导模态的纯度占比最高, 证明所设计的双层超表面天线形成的OAM波束具有较高的模态纯度。

4 超表面加工测试结果

对上述设计的双层超表面天线进行了实际的加工与测试, 样品使用Object30打印机进行加工, 考虑最小加工精度为 $16\ \mu\text{m}$, 对超表面单元高度进行离散化处理。图9为3D打印技术加工的双层超表面天线实物图, 单层超表面厚度为 $6\ \text{mm}$, 直径为 $66\ \text{mm}$, 其中, 相位实际覆盖部分直径为 $45\ \text{mm}$, 外环余量用于夹具固定, 打孔用于标识旋转角度。我们搭建了二维平面扫描测试平台, 图10为双层超表面天线系统的实验装置图, THz探针天线距离超表面 $100\ \text{mm}$, 测量区域为 $70\ \text{mm} \times 70\ \text{mm}$, 电机扫描步长为 $1.25\ \text{mm}$ 。图11为 $100\ \text{GHz}$ 双层超表面天线的测试扫描结果, 可以看到, 旋转单层超表面使双层超表面之间相对旋转角达到 $1/2\ \text{rad}$, $1\ \text{rad}$, $3/2\ \text{rad}$ 时, 可以得到模态 $l = 1, 2, 3$ 的OAM波束, 与仿真结果相似, 在高模OAM产生的过程中, 因相位混叠, 波束质量会受到一定损害。图12为扫场平台在 $90\ \text{GHz}$, $100\ \text{GHz}$, $110\ \text{GHz}$ 频率下OAM谱的纯度分析结果^[22], 可以看到超表面天线工作在 $90 \sim 110\ \text{GHz}$ 内, 旋转超表面时产生的OAM波束

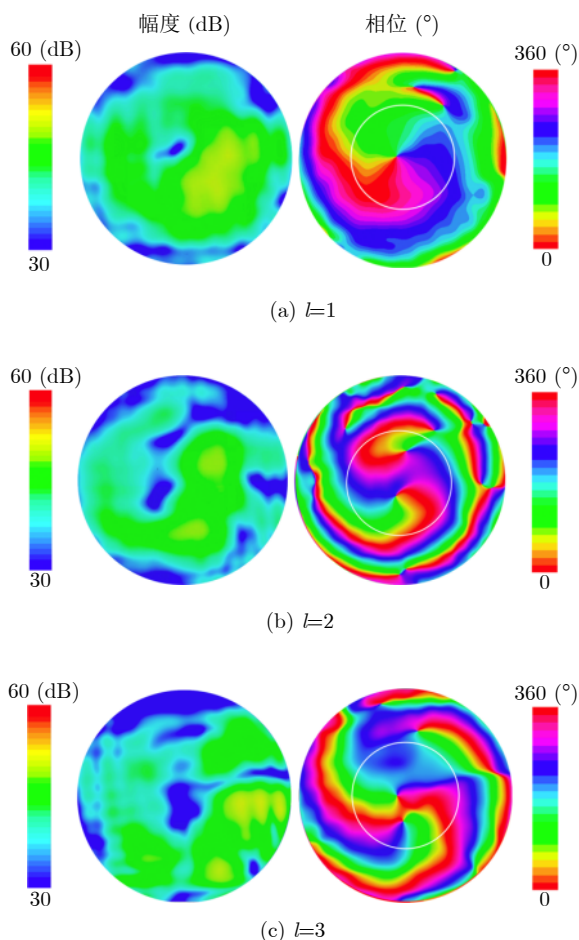


图 7 双层超表面天线不同OAM模态时仿真的幅度相位分布图

Fig. 7 The simulated amplitude and phase distribution of the double-layer metasurface antenna at different OAM mode

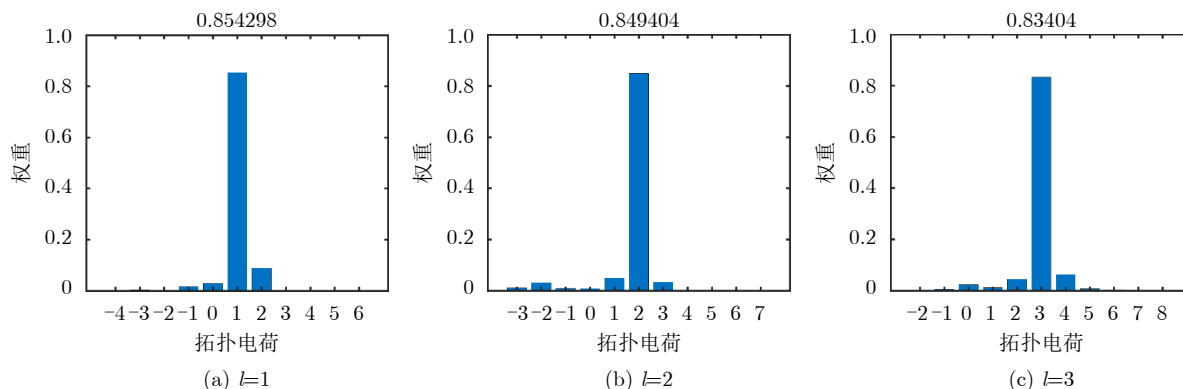


图 8 根据仿真场分布得到的不同模态OAM的纯度分析

Fig. 8 The OAM purity analysis based on the simulated field distribution

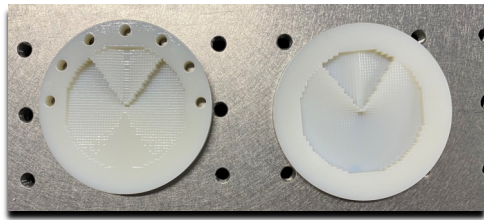


图9 双层超表面天线实物图

Fig. 9 Photograph of the double-layer metasurface

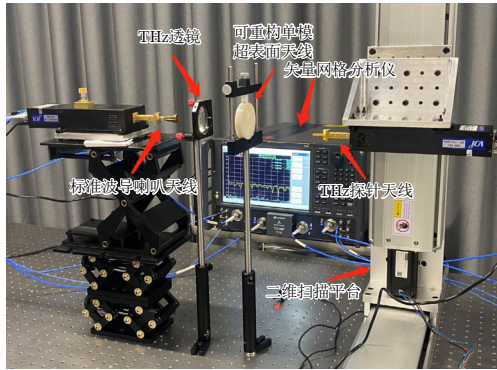


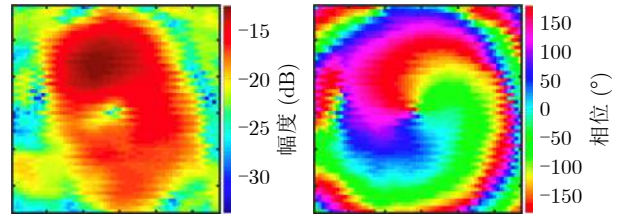
图10 双层超表面天线实验装置

Fig. 10 Experimental setup for the field scanning of the double-layer metasurface antenna

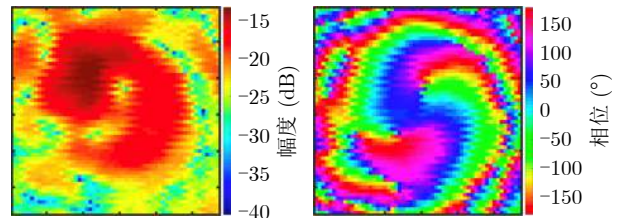
主模占比最高，但由于切换模态需要手动旋转，放置超表面时存在一定的人工误差，并且超表面受限于前文提到的设计问题，实验产生高模态OAM波束时，OAM谱会展宽，质量受到一定损害，在OAM谱纯度数值计算中表现为高模OAM纯度欠佳，但综合来看，预想的主模纯度仍是最高，因此证明所设计的双层超表面天线能够有效地实现OAM波束，并且具有宽带工作的能力。

5 结语

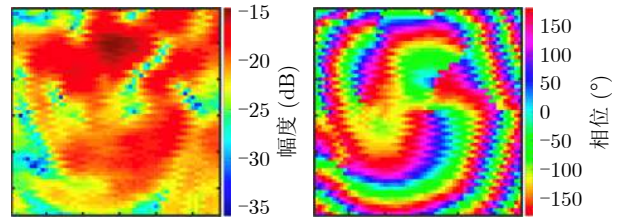
本文设计并加工了100 GHz工作频率下，模态可重构的太赫兹涡旋波束超表面，只需简单改变双层超表面之间相对旋转的角度，即可实现出射涡旋



(a) $l=1$



(b) $l=2$

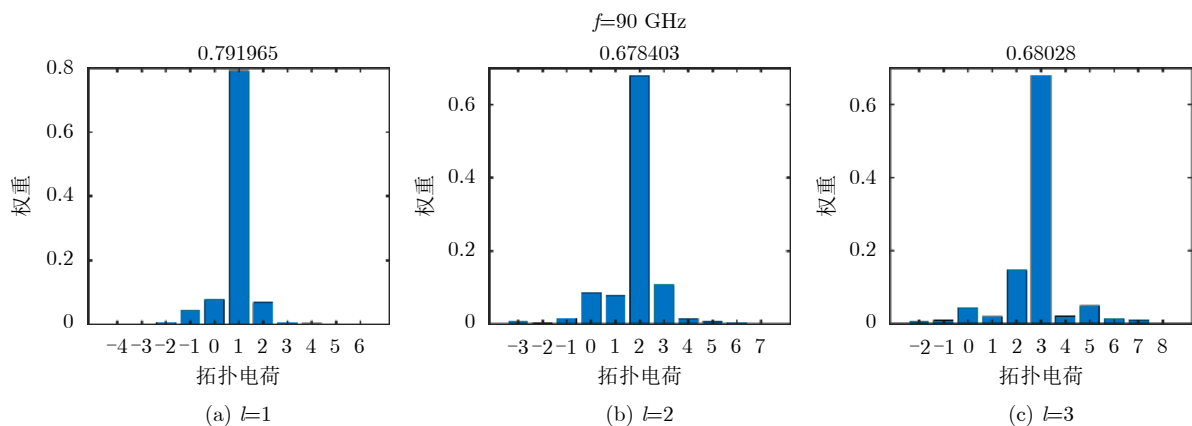


(c) $l=3$

图11 双层超表面不同重构模态时测量的幅度相位分布图

Fig. 11 The measured amplitude and phase distribution of the double-layer metasurface antenna at different OAM mode

波束模态的可重构性，具有较好的灵活性和可操作性。仿真结果和实测结果一致证明了设计天线的可行性和有效性，在 $l = 1, 2, 3$ 模态下得到了具有对应OAM特征的涡旋波束，通过OAM谱纯度分析，定量说明了产生的OAM波束质量较好，期望产生的OAM波束主模占比高。本文设计的超表面能够在THz频段产生模态可重构的太赫兹涡旋波束，且波束质量好，工作带宽大，有望应用于太赫兹无线通信领域，为拓展通信系统容量提供可能性。



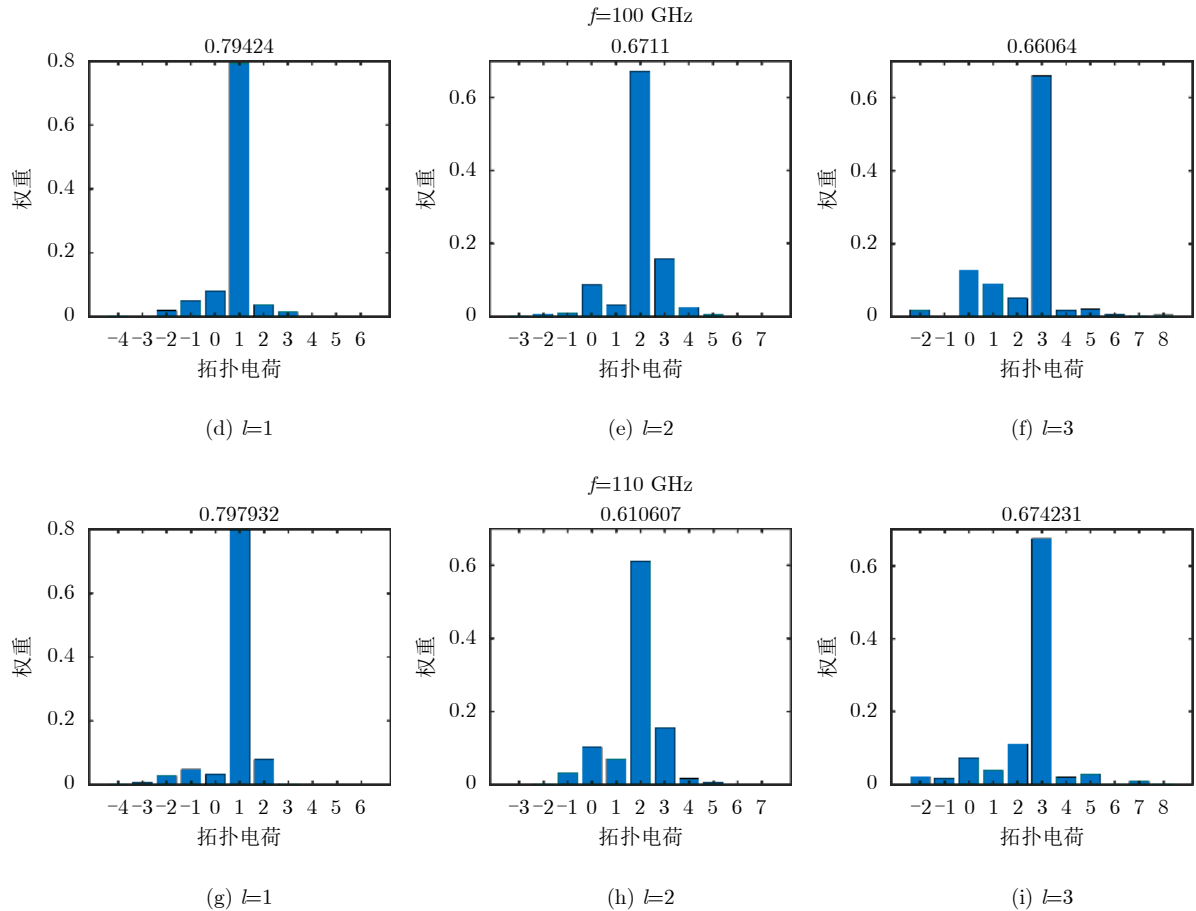


图 12 90, 100, 110 GHz 下根据测量场分布得到的不同模式 OAM 的纯度分析

Fig. 12 The OAM purity analysis based on the measured field distribution at 90, 100 and 110 GHz

参考文献

- [1] JIA Shi, ZHANG Lu, WANG Shiwei, *et al.* 2×300 Gbit/s Line rate PS-64QAM-OFDM THz photonic-wireless transmission[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(17): 4715–4721. doi: [10.1109/jlt.2020.2995702](https://doi.org/10.1109/jlt.2020.2995702).
- [2] DING Shenghui, LI Qi, LI Yunda, *et al.* Continuous-wave terahertz digital holography by use of a pyroelectric array camera[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 1993–1995. doi: [10.1364/OL.36.001993](https://doi.org/10.1364/OL.36.001993).
- [3] BECK M, PLÖTZING T, MAUSSANG K, *et al.* High-speed THz spectroscopic imaging at ten kilohertz pixel rate with amplitude and phase contrast[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 10866–10872. doi: [10.1364/OE.27.010866](https://doi.org/10.1364/OE.27.010866).
- [4] MOON S R, SUNG M, LEE J K, *et al.* Cost-effective photonics-based THz wireless transmission using PAM-N signals in the 0.3 THz band[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(2): 357–362. doi: [10.1109/JLT.2020.3032613](https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3032613).
- [5] AILEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian Laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185–8189. doi: [10.1103/PhysRevA.45.8185](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185).
- [6] YAO A M and PADGETT M J. Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161–204. doi: [10.1364/AOP.3.000161](https://doi.org/10.1364/AOP.3.000161).
- [7] 魏旭立. 太赫兹特殊光束的产生及其在太赫兹通信和成像中的应用[D]. [博士学位论文], 华中科技大学, 2016.
- [8] WEI Xuli. Generation of terahertz exotic beams and their application in terahertz communication and imaging systems[D]. [Ph. D. dissertation], Huazhong University of Science & Technology, 2016.
- [9] BAI Qiang, TENNANT A, and ALLEN B. Experimental circular phased array for generating OAM radio beams[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(20): 1414–1415. doi: [10.1049/el.2014.2860](https://doi.org/10.1049/el.2014.2860).
- [10] TENNANT A and ALLEN B. Generation of OAM radio waves using circular time-switched array antenna[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(21): 1365–1366. doi: [10.1049/el.2012.2664](https://doi.org/10.1049/el.2012.2664).
- [11] TURNBULL G A, ROBERTSON D A, SMITH G M, *et al.* The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1996, 127(4/6): 183–188. doi: [10.1016/0030-4018\(96\)00070-3](https://doi.org/10.1016/0030-4018(96)00070-3).
- [12] CHEN Yiling, ZHENG Shilie, LI Yue, *et al.* A Flat-lensed spiral phase plate based on phase-shifting surface for generation of millimeter-wave OAM beam[J]. *IEEE*

- Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 15: 1156–1158. doi: [10.1109/LAWP.2015.2497243](https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2497243).
- [12] HUI Xiaonan, ZHENG Shilie, HU Yiping, *et al.* Ultralow reflectivity spiral phase plate for generation of millimeter-wave OAM beam[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 966–969. doi: [10.1109/LAWP.2014.2387431](https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2387431).
- [13] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, 44(3): 255–275. doi: [10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.001).
LI Xiong, MA Xiaoliang, and LUO Xiangang. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255–275. doi: [10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.001).
- [14] WU Gengbo, CHAN Kafai, QU Shiwei, *et al.* Orbital angular momentum (OAM) mode-reconfigurable discrete dielectric lens operating at 300 GHz[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(5): 480–489. doi: [10.1109/TTHZ.2020.2984451](https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2984451).
- [15] MIYAMOTO K, SUIZU K, AKIBA T, *et al.* Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(26): 261104. doi: [10.1063/1.4886407](https://doi.org/10.1063/1.4886407).
- [16] YU Nanfang, 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. doi: [10.1126/science.1210713](https://doi.org/10.1126/science.1210713).
- [17] MENG Zankui, SHI Yan, WEI Wenyue, *et al.* Graphene-based metamaterial transmitarray antenna design for the generation of tunable orbital angular momentum vortex electromagnetic waves[J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(9): 3709–3716. doi: [10.1364/OME.9.003709](https://doi.org/10.1364/OME.9.003709).
- [18] WANG Ling, YANG Yang, LI Shufang, *et al.* Terahertz reconfigurable metasurface for dynamic non-diffractive orbital angular momentum beams using vanadium dioxide[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 4600712. doi: [10.1109/JPHOT.2020.3000779](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.3000779).
- [19] WANG Ling, YANG Yang, DENG Li, *et al.* Vanadium dioxide embedded frequency reconfigurable metasurface for multi-dimensional multiplexing of terahertz communication[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(25): 255003. doi: [10.1088/1361-6463/abf166](https://doi.org/10.1088/1361-6463/abf166).
- [20] YANG Qili, WANG Yan, LIANG Lanju, *et al.* Broadband transparent terahertz vortex beam generator based on thermally tunable geometric metasurface[J]. *Optical Materials*, 2021, 121: 111574. doi: [10.1016/j.optmat.2021.111574](https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111574).
- [21] FORMLABS[EB/OL]. <https://formlabs.com>, 2020.
- [22] MAHMOULI F E and WALKER S. Orbital angular momentum generation in a 60 GHz wireless radio channel[C]. 2012 20th Telecommunications Forum (TELFOR). Belgrade, Serbia, 2012: 315–318. doi: [10.1109/TELFOR.2012.6419210](https://doi.org/10.1109/TELFOR.2012.6419210).
- [23] WANG Yicheng, ZHANG Huajin, YU Haohai, *et al.* Light propagation in an optically active plate with topological charge[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(17): 171114. doi: [10.1063/1.4764546](https://doi.org/10.1063/1.4764546).
- [24] SUN Changzheng, ZHANG Juan, XIONG Bing, *et al.* Analysis of OAM mode purity of integrated optical vortex beam emitters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1–7. doi: [10.1109/JPHOT.2017.265272](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.265272).

作者简介



周晶仪(1996–), 女, 浙江杭州人, 浙江大学信息与电子工程学院硕士研究生。主要研究方向为太赫兹涡旋波束的产生及应用。



郑史烈(1975–), 女, 浙江宁波人, 浙江大学信息与电子工程学院教授。主要研究方向为电磁波轨道角动量新理论与新技术、携带轨道角动量电磁波的产生与应用、新型可重构天线理论与设计等。



余显斌(1976–), 男, 湖北咸宁人, 浙江大学信息与电子工程学院教授。主要研究方向为光电毫米波&太赫兹波器件、技术与应用以及超快光子射频信号处理等。



回晓楠(1988–), 男, 辽宁大连人, 浙江大学信息与电子工程学院研究员。主要研究方向为无线传感理论与技术、射频系统、物联网技术与应用、电磁波轨道角动量新理论与新技术。



章献民(1965–), 男, 浙江兰溪人, 浙江大学信息与电子工程学院教授。主要研究方向为微波光子学、电磁波理论和应用、电磁波轨道角动量新理论与新技术。

(责任编辑: 于青)