

基于反射型超表面的太赫兹偏折涡旋波束生成

施宏宇*^{①②} 李国强^{①②} 刘康^③ 李博林^{①②} 衣建甲^② 张安学^② 徐卓^{①④}

^①(西安交通大学多功能材料和结构教育部重点实验室 西安 710049)

^②(西安交通大学电信学部信息与通信工程学院 西安 710049)

^③(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

^④(西安交通大学电子陶瓷与器件教育部重点实验室 西安 710049)

摘要: 太赫兹涡旋波束可以提高雷达通信系统通信容量及成像系统的分辨率, 如何有效地产生这种波束成为近期研究热点之一。为了克服传统方式的缺点, 该文设计加工了5个工作在太赫兹频段的反射型超表面, 它们可以产生 ± 1 、 ± 2 和3共5个不同模态的涡旋波束。为了避免馈源对涡旋波束的遮挡, 通过平面反射阵原理控制了波束的偏转方向。超表面单元为3层结构, 其中, 上层为金属结构, 控制上层结构中8个枝节的长度, 可以在基本不改变超表面单元反射系数的情况下, 调整它的反射相位。中间层为介质层, 为了使超表面单元有较高的反射系数, 介质层下方为一金属地。超表面单元仿真显示, 其同极化反射率在90%以上, 相位分布也满足超表面设计需求。超表面的仿真及测试结果表明, 在340 GHz附近, 不同超表面在设计的方向上产生了对应模态的涡旋波束, 并且涡旋波束中的主模态能量占比最高。

关键词: 太赫兹; 涡旋波束; 超表面; 波束调控; 反射阵

中图分类号: TN82

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)05-0785-09

DOI: 10.12000/JR21070

引用格式: 施宏宇, 李国强, 刘康, 等. 基于反射型超表面的太赫兹偏折涡旋波束生成[J]. 雷达学报, 2021, 10(5): 785–793. doi: 10.12000/JR21070.

Reference format: SHI Hongyu, LI Guoqiang, LIU Kang, *et al.* Deflective vortex beams generation based on metasurfaces in the terahertz band[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(5): 785–793. doi: 10.12000/JR21070.

Deflective Vortex Beam Generation Based on Metasurfaces in the Terahertz Band

SHI Hongyu*^{①②} LI Guoqiang^{①②} LIU Kang^③ LI Bolin^{①②} YI Jianjia^②
ZHANG Anxue^② XU Zhuo^{①④}

^①(MOE Key Laboratory for Multifunctional Materials and Structures,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

^②(Branch of Information and Communications Engineering, Faculty of Electronic and Information Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

^③(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

^④(Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Terahertz vortex beams can be used to improve the communication capacity of radar communication systems and the resolution of imaging systems. This paper presents a deflective vortex beam generation method based on a reflective metasurface working in the terahertz band. Without the limitations of traditional

收稿日期: 2021-05-30; 改回日期: 2021-07-27; 网络出版: 2021-08-11

*通信作者: 施宏宇 honyo.shi1987@gmail.com *Corresponding Author: SHI Hongyu, honyo.shi1987@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61871315)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61871315)

责任编辑: 李龙 Corresponding Editor: LI Long

methods, metasurfaces are a good candidate to generate beams carrying an orbital angular momentum in the terahertz band. First, we designed and simulated a unit cell of the metasurface. The unit cell of our design consists of two metallic (gold) layers and one dielectric layer. An almost 360° phase shift was acquired by adjusting the length of the eight stubs of the top layer. The unit cell of the metasurface was simulated by CST Microwave Studio, and the simulation results showed that the co-polarization reflection efficiencies of the unit cells were more than 90%. To avoid performance degradation due to blockage of the feed horn, we controlled accurately the directions of vortex beams based on the concept of reflectarray. To verify the performance of our design, we simulated and measured five reflective metasurfaces. The results of simulation and measurement showed that these metasurfaces could generate five deflective vortex beams in the terahertz band. The topological charges of these beams are ± 1 , ± 2 , and 3, which account for the highest energy proportion in different vortex beams.

Key words: Terahertz; Vortex beam; Metasurface; Beam control; Reflectarray

1 引言

涡旋电磁波束可以被应用于雷达高分辨成像与目标运动参数估计^[1], 近年来引起科研工作者广泛的研究兴趣。携带轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)的电磁波具有涡旋状的波前相位分布, 又称为涡旋波束, 其波前相位分布可以表示为 $\exp(-il\varphi)$, 其中 l 为模态阶数, φ 为方位角^[2]。当一个物体被涡旋电磁波束照射时, 相当于平面波从连续的多个角度进行入射, 其相位的非平面结构使目标散射回波中包含更多的目标信息; 涡旋波束的模态阶数 l 可以取任意整数, 并且不同模态之间的涡旋波束具有良好的正交性, 若使用多种模态的涡旋波束对目标进行照射, 雷达的分辨力将会大大提高; 将涡旋电磁波应用于雷达系统, 有利于提高雷达系统的目标识别及成像能力^[1,3,4]。同时, 涡旋波束也可以用于高速通信、保密通信等领域^[5-8]。太赫兹(Terahertz, THz)波频率为0.3 THz~10 THz, 该频段的电磁波具有很多的独特优势, 如通信带宽大、光子能量低, 在通信、高精度成像等领域有很大的应用前景^[9-12]。涡旋波束及太赫兹波在雷达通信成像等领域的应用前景广阔, 在太赫兹频段有效地产生涡旋波束便显得十分重要。

目前产生涡旋波束主要有阵列天线^[13,14]、反射或透射型螺旋相位板^[7,15]、超表面^[5,16-18]等方式。使用阵列天线如环形阵列天线产生涡旋波束的方法较为简单直接, 只需控制单元的相位差即可实现涡旋波束的产生。但阵列天线需要复杂的馈电网络, 系统成本较高。螺旋相位板只能产生单一模式的涡旋波束, 且厚度较大。超表面是一种二维人工结构, 具有结构简单, 易于加工的优势^[17], 是产生涡旋波束的一种较为理想的方法。在微波波段, Lv等人^[18]利用印刷在一层介质板上不同的透射型低剖面超表面单元, 实现了不同模态涡旋波束的产生。

Shi等人^[19]在超表面中引入变容二极管, 在微波频段可以将入射波转化为涡旋波束, 并且实现了电控调节涡旋波束的模态。Guo等人^[20]利用刻蚀在金属板上的六边形槽及变容二极管, 实现了涡旋波束的频率及模态可调。Yu等人^[21,22]利用反射型超表面, 在微波频段实现了双波束双模态及双极化双模态涡旋波束的产生。在太赫兹频段, 由于频率较高, 介质及金属的损耗都比较大, 并且传统的PCB加工工艺也无法满足太赫兹器件加工的要求; 产生质量较好的涡旋波束不仅要选择合适的超表面材料, 还要考虑到加工工艺的限制与要求, 在设计、加工、测试等方面面临新的困难与限制, 难度较微波频段大大增加。Shi等人^[23,24]利用石墨烯层来调节单元的相位, 分别在反射及透射模式下仿真得到了质量较好的太赫兹涡旋波束。Wang等人^[25]在超表面单元中添加二氧化钒, 实现了涡旋波束的模态及偏转角可重构, 然而文章中仅给出了仿真结果, 并未对超表面的实际工作效果进行测试。Li等人^[26]利用反射型超表面实现了宽带多模态太赫兹涡旋波束的产生, 但设计的超表面只能产生圆极化涡旋波束, 并且未对超表面进行加工验证。Fan等人^[27]利用双层超表面, 在不同的太赫兹频点分别实现了透射及反射涡旋波束的效果, 但超表面仅工作在两个频点, 潜在实用性较差, 且文中仅给出了模型仿真结果。

本文仿真并测试了一种反射型太赫兹涡旋波束超表面, 仿真结果表明其单元同极化反射率大于90%, 超表面在336 GHz~345 GHz范围内可以实现偏折涡旋波束的产生。由仿真及测试结果可以看出, 利用平面反射阵原理设计的超表面可以在太赫兹频段产生质量较好的偏折涡旋波束, 对波束方向的调控也非常准确, 设计的超表面在目标检测、成像、通信等领域有较大的潜在应用价值。

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，其中黄色部分为金属结构，材质为金，厚度为 $2\ \mu\text{m}$ ，电导率为 $4.561 \times 10^7\ \text{S/m}$ ；灰白色部分为介质层，其介电常数为9.9，损耗角正切值为0.0001，厚度为 $635\ \mu\text{m}$ 。为了使超表面单元保持较高的反射效率，介质层下方还有一层金属地，材质为金，厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 。上层结构的详细尺寸为：单元周期 $p=550\ \mu\text{m}$ ， $l=240\ \mu\text{m}$ ， $w=20\ \mu\text{m}$ ， r_0 代表超表面上层金属结构中8个金属枝节的长度，其为可变参数，调节 r_0 的大小可以实现对超表面单元反射相位的调节，考虑到加工精度问题，可以同时调整线宽 w ，以获得更密的反射系数分布范围，减小加工过程中对精度的需求。

使用仿真软件CST Microwave Studio对上述超表面单元进行了仿真验证。图2给出了超表面单元在340 GHz线极化波入射条件下，同极化反射波的反射幅度及相位随超表面单元上层结构枝节长度

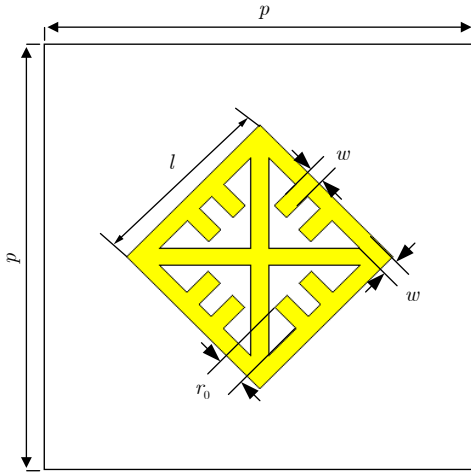


图1 单元上层结构图

Fig. 1 Schematics of top layer

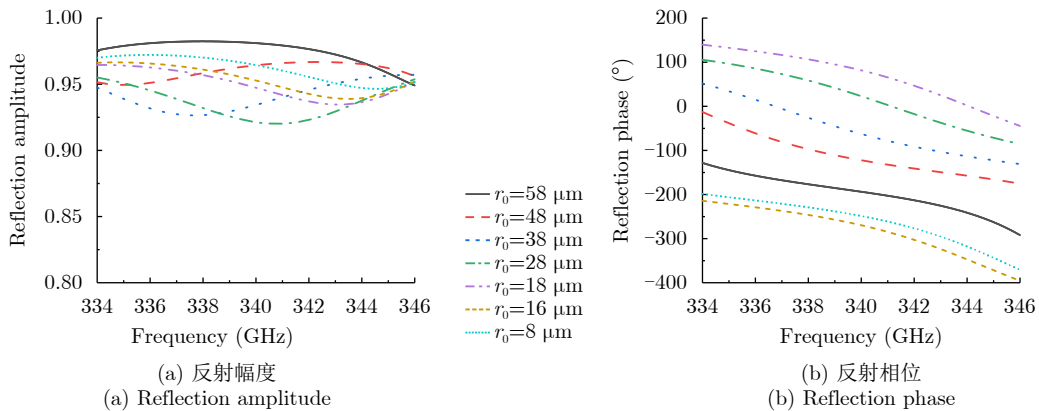


图2 不同 r_0 的同极化反射波的反射幅度及相位

Fig. 2 The reflection coefficient and phase of co-polarized reflected wave versus r_0

r_0 的变化情况，由于金属地的存在，超表面的反射效率非常高，相位分布范围也近似为 360° 。

3 超表面设计及仿真结果

为了同时调整涡旋波束的模式及偏转方向，本文利用了平面反射阵原理及相位叠加原理来计算超表面的相位分布。利用平面反射阵原理可以准确达到调控波束方向的目的，调控方式高效准确^[28,29]。若将涡旋波束的偏转方向调控至 (θ, φ) ，其中 θ 为俯仰角， φ 为方位角，则可以通过平面反射阵原理来计算设置超表面单元的相位分布为

$$\phi_{(\theta_i, \varphi_i)}(x_m, y_n) = -\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_i (x_m \cos \varphi_i + y_n \sin \varphi_i) \quad (1)$$

其中， (x_m, y_n) 代表超表面中心为坐标原点时各个超表面单元的坐标， m, n 为整数， λ 为电磁波所在频率的波长。

通过相位叠加原理，又可以在偏转的波束上引入轨道角动量^[25]，从而可以获得偏转涡旋波束超表面总的相位分布为

$$\phi_{(\theta_i, \varphi_i, l)}(x_m, y_n) = \phi_{(\theta_i, \varphi_i)}(x_m, y_n) + l \arctan \left(\frac{y_n}{x_m} \right), \quad l = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

按照上述方案，本文首先设计仿真了5个反射型超表面，其模式分别为 $l = \pm 1, \pm 2, 3$ ，偏转方向为 $\theta = 45^\circ$ ， $\varphi = 0^\circ$ 。不同超表面的单元相位分布情况由上述相位计算方法计算得到。图3展示了模式为1的超表面局部相位分布图。超表面的仿真由CST Microwave Studio完成，模式为1的超表面局部仿真模型图如图4所示。

超表面仿真时使用线极化平面波作为激励源，超表面大小为 30×30 个单元，5个不同超表面远场仿真幅值及其俯仰角、方位角分布信息如图5所

示, 其俯仰角及方位角大小分别为 $\theta=45^\circ, \varphi=0^\circ$ 。
 图6为涡旋波束幅度及其对应相位的分布情况, 从
 图6可以看出, 不同超表面的主模态分别为 $\pm 1,$
 $\pm 2, 3$, 与设计目标相同。

通过对仿真结果进行谱分析, 可以得到涡旋波束
 的纯度, 即涡旋波束中各个模态能量分布情况。

涡旋波纯度的计算依据为傅里叶变换, 分别以涡旋
 波束的相位奇点为圆心, 沿主波束选取一个环形电
 场数据, 并对其进行傅里叶变换即可得到该波束对
 应的OAM谱。其计算公式为

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E(\varphi) e^{-il\varphi} d\varphi \quad (3)$$

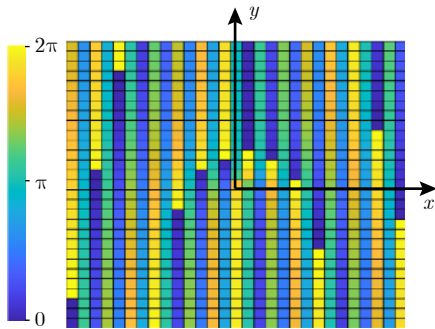


图 3 超表面相位分布

Fig. 3 The phase distribution scheme of a metasurface

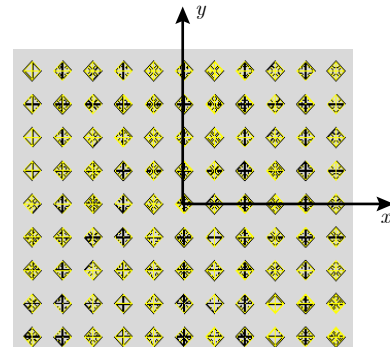
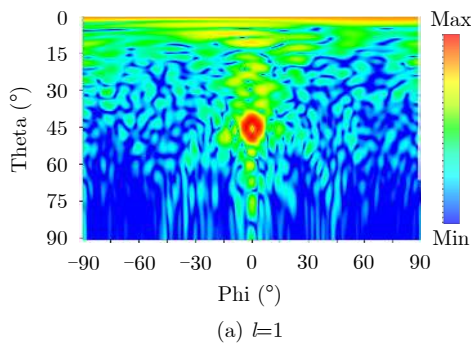
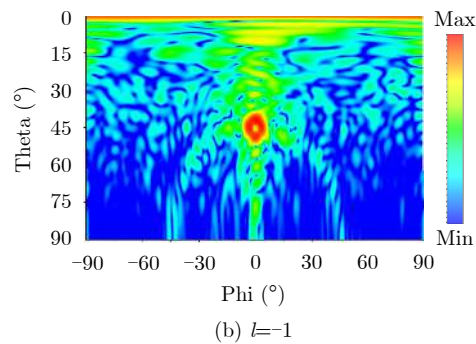


图 4 超表面仿真模型

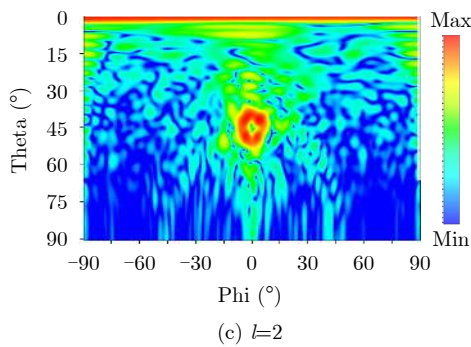
Fig. 4 The simulation model of a metasurface



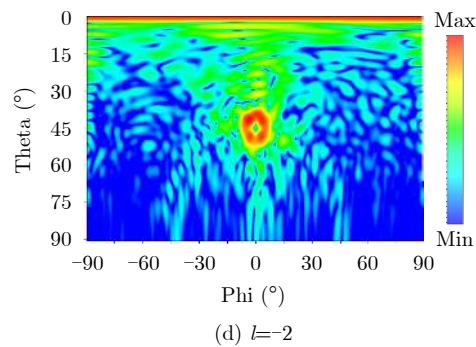
(a) $l=1$



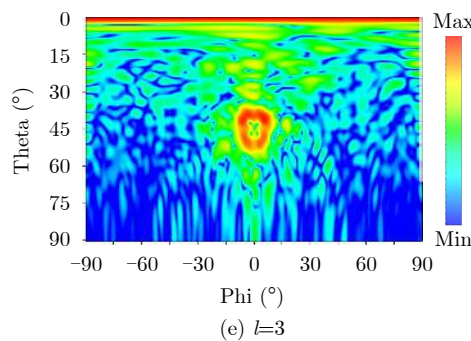
(b) $l=-1$



(c) $l=2$



(d) $l=-2$



(e) $l=3$

图 5 超表面仿真的涡旋波束远场分布图

Fig. 5 The simulated far-field vortex beam distributions

其中， $E(\varphi)$ 为选取的环形电场数据， A_l 为各个模式的幅度。

图7给出的是上述超表面的归一化OAM谱分析

结果，从各个模式占比情况可以看出，模式为 $\pm 1, \pm 2, 3$ 的能量占比最高，表明5个超表面主模态与设计模态相同。

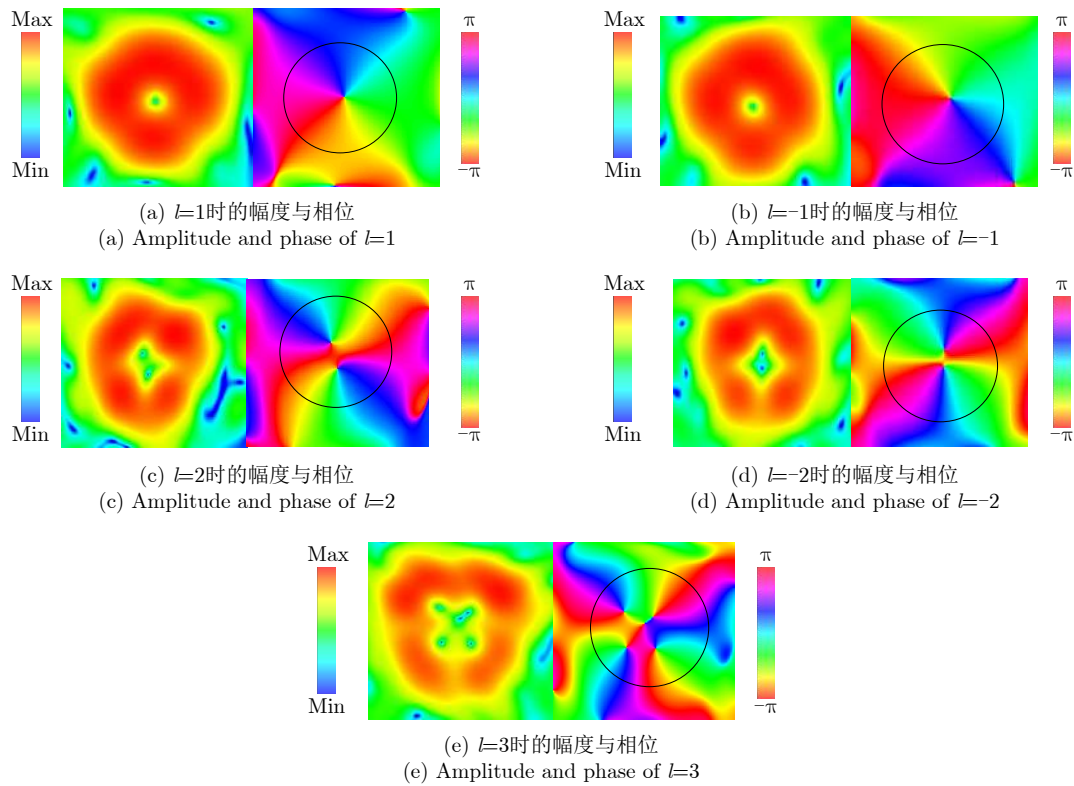


图6 涡旋波束远场仿真结果的幅度与相位

Fig. 6 The amplitudes and phases of simulated far-field vortex beams

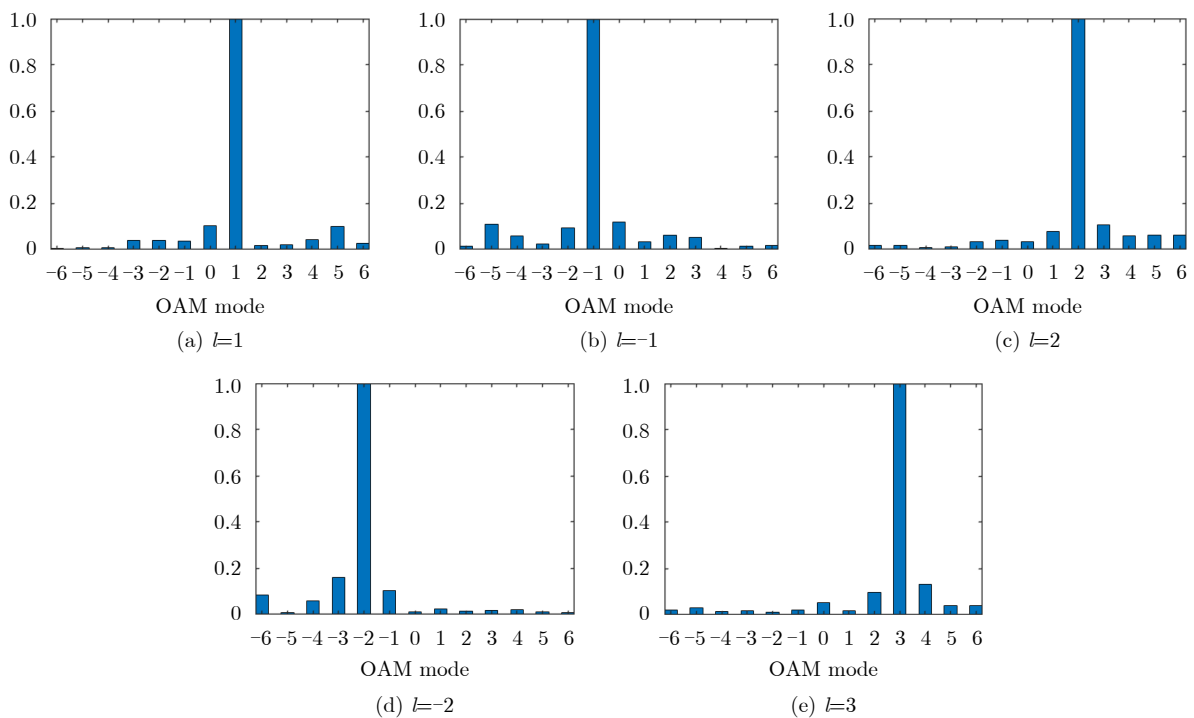


图7 仿真结果的频谱分析

Fig. 7 OAM spectrum weight for the simulated results

4 超表面加工测试

仿真结束后, 本文对超表面进行了加工与测试。其中一个超表面的加工成品如图8所示。加工方式为光刻加工。由于加工工艺及实验要求, 超表面按照文中给出的设计方法被设计为直径为5 cm的圆形。图9中的测试环境为西安交通大学电信学部毫米波暗室, 该暗室的测试范围为40 GHz~500 GHz。图9给出了馈源模块、接收模块及待测件的特写, 馈源模块与接收模块的极化方式相同。测试时, 馈电喇叭到超表面的距离为100 mm, 340 GHz电磁波波长为0.88 mm, 馈电喇叭到超表面的距离大于100个波长, 满足远场测试条件。探头到超表面中心的距离为150 mm, 采样面的大小为60 mm×60 mm, 采样点数为41×41个。由于加工及测试误差, 测试

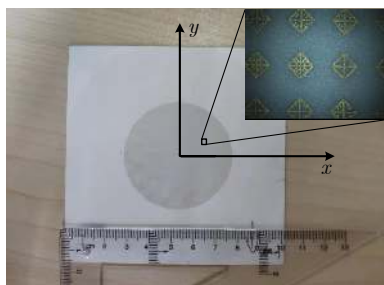


图 8 加工的超表面

Fig. 8 Photograph of the fabricated metasurface

结果较仿真结果有一定差距且存在频偏(频偏小于5%)。图10给出了5个超表面的近场测试结果, 波束指向与上述仿真结果基本相同。

图11给出了超表面近场测试结果的谱分析情况, 与仿真结果类似, 超表面各个测试结果中, 主模态的能量占比最高。

5 结论

本文设计并加工了5个工作在太赫兹频段的反射型超表面, 它们分别可以产生模态为 $\pm 1, \pm 2, 3$ 的涡旋波束并且涡旋波束效果较好, 体现了文中设计方案的准确性与可行性。由超表面整体仿真及测试结果也可以看出, 使用平面反射阵原理来调控太赫兹涡旋波束的方向, 可以得到更好的波束调节效果, 其对涡旋波束偏转方向调控非常准确, 并且

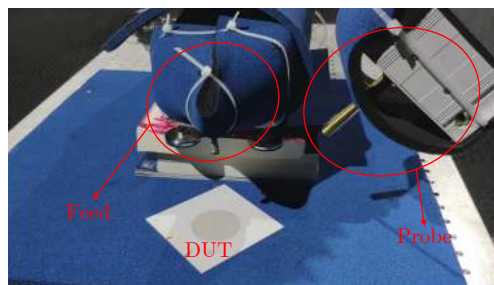
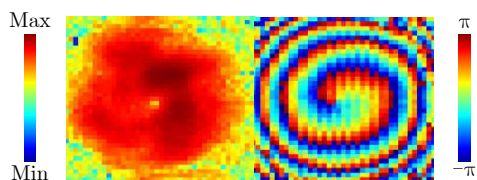
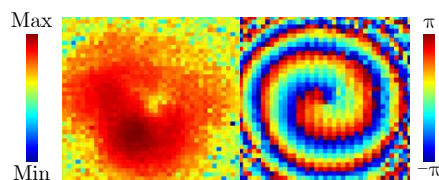


图 9 测试中的超表面

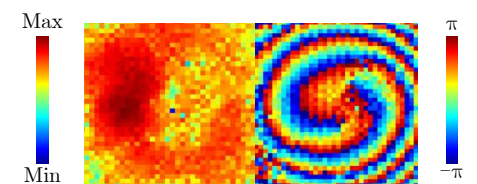
Fig. 9 Metasurface under test



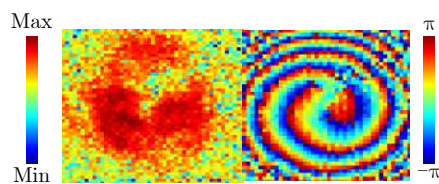
(a) $l=1$ 时的幅度与相位
(a) Amplitude and phase of $l=1$



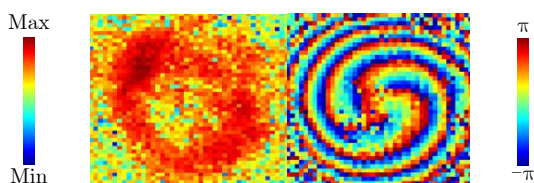
(b) $l=-1$ 时的幅度与相位
(b) Amplitude and phase of $l=-1$



(c) $l=2$ 时的幅度与相位
(c) Amplitude and phase of $l=2$



(d) $l=-2$ 时的幅度与相位
(d) Amplitude and phase of $l=-2$



(e) $l=3$ 时的幅度与相位
(e) Amplitude and phase of $l=3$

图 10 近场测试结果的幅度与相位

Fig. 10 The amplitudes and phases of measured near-field

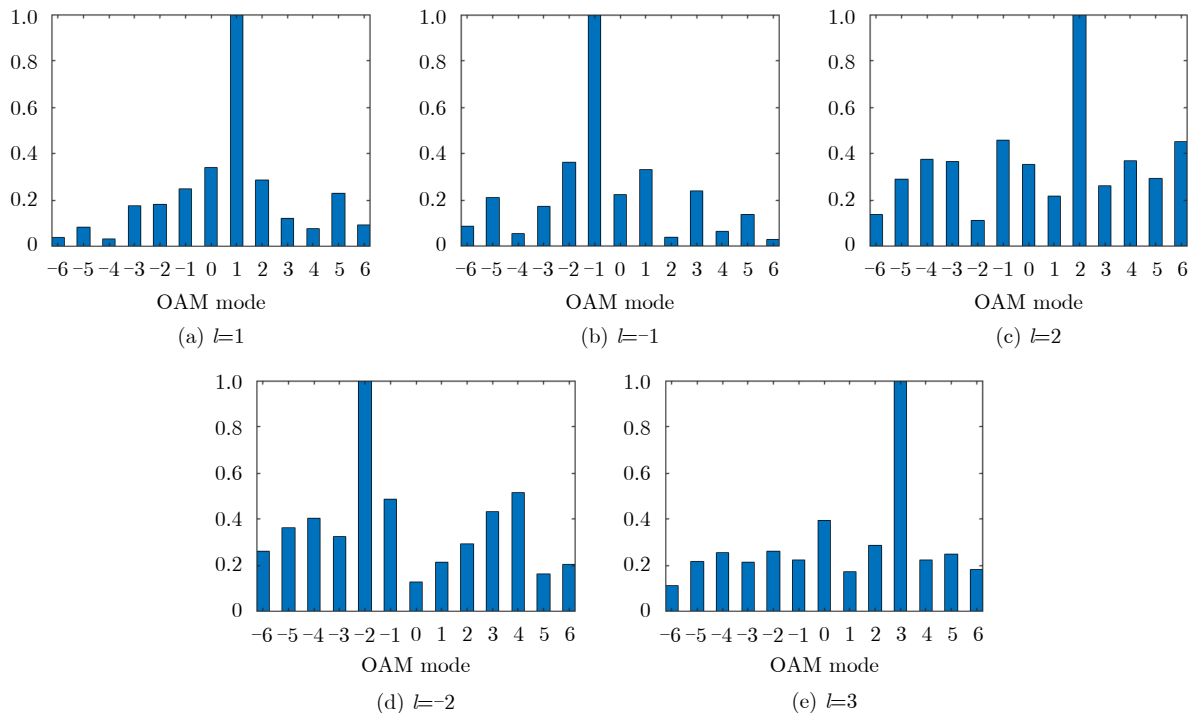


图 11 近场测试结果的频谱分析

Fig. 11 OAM spectrum weight for the measured near-field results

避免了馈源对涡旋波束的遮挡。利用本文的设计方案也可以较为直接地设计出其他模态及偏转方向的涡旋波束，扩展性较强。本文设计的超表面能够在太赫兹频段产生质量较好的涡旋波束，设计出的超表面在太赫兹雷达成像、目标探测、通信等领域有较大的潜在应用价值。

参考文献

- [1] LIU Kang, CHENG Yongqiang, GAO Yue, *et al.* Super-resolution radar imaging based on experimental OAM beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(16): 164102. doi: [10.1063/1.4981253](https://doi.org/10.1063/1.4981253).
- [2] JIANG Zhihao, KANG Lei, HONG Wei, *et al.* Highly efficient broadband multiplexed millimeter-wave vortices from metasurface-enabled transmit-arrays of subwavelength thickness[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(6): 064009. doi: [10.1103/PhysRevApplied.9.064009](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.9.064009).
- [3] LI Lianlin and LI Fang. Beating the Rayleigh limit: Orbital-angular-momentum-based super-resolution diffraction tomography[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(3): 033205. doi: [10.1103/PhysRevE.88.033205](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.033205).
- [4] LIU Kang, LI Xiang, GAO Yue, *et al.* Microwave imaging of spinning object using orbital angular momentum[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(12): 124903. doi: [10.1063/1.4991655](https://doi.org/10.1063/1.4991655).
- [5] YAN Yan, XIE Guodong, LAVERY M P J, *et al.* High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4876. doi: [10.1038/ncomms5876](https://doi.org/10.1038/ncomms5876).
- [6] WANG Jian, YANG J Y, FAZAL I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488–496. doi: [10.1038/nphoton.2012.138](https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.138).
- [7] ZHANG Zhuofan, ZHENG Shilie, CHEN Yiling, *et al.* The capacity gain of orbital angular momentum based multiple-input-multiple-output system[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25418. doi: [10.1038/srep25418](https://doi.org/10.1038/srep25418).
- [8] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448–5456. doi: [10.1364/OPEX.12.005448](https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005448).
- [9] GOMPFF B, GEBERT N, HEER H, *et al.* Polarization contrast terahertz-near-field imaging of anisotropic conductors[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(8): 082104. doi: [10.1063/1.2680016](https://doi.org/10.1063/1.2680016).
- [10] CHEN Zefeng, CHEN Xuequan, TAO Li, *et al.* Graphene controlled Brewster angle device for ultra broadband terahertz modulation[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4909. doi: [10.1038/s41467-018-07367-8](https://doi.org/10.1038/s41467-018-07367-8).
- [11] 刘峻峰, 刘硕, 傅晓建, 等. 太赫兹信息超材料与超表面[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 46–55. doi: [10.12000/JR17100](https://doi.org/10.12000/JR17100).
LIU Junfeng, LIU Shuo, FU Xiaojian, *et al.* Terahertz information metamaterials and metasurfaces[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 46–55. doi: [10.12000/JR17100](https://doi.org/10.12000/JR17100).

- [12] 李龙, 薛皓, 冯强. 涡旋电磁波的理论与应用研究进展[J]. 微波学报, 2018, 34(2): 1–12. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201802001](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201802001).
- LI Long, XUE Hao, and FENG Qiang. Research progresses in theory and applications of vortex electromagnetic waves[J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(2): 1–12. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.201802001](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.201802001).
- [13] LIU Kang, LIU Hongyan, QIN Yuliang, *et al.* Generation of OAM beams using phased array in the microwave band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(9): 3850–3857. doi: [10.1109/TAP.2016.2589960](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2589960).
- [14] MENG Zankui, SHI Yan, WEI Wenyue, *et al.* Multifunctional scattering antenna array design for orbital angular momentum vortex wave and RCS reduction[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 109289–109296. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3001576](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001576).
- [15] SHEN Yong, CAMPBELL G T, HAGE B, *et al.* Generation and interferometric analysis of high charge optical vortices[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(4): 044005. doi: [10.1088/2040-8978/15/4/044005](https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/4/044005).
- [16] YU Shixing, LI Long, SHI Guangming, *et al.* Design, fabrication, and measurement of reflective metasurface for orbital angular momentum vortex wave in radio frequency domain[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(12): 121903. doi: [10.1063/1.4944789](https://doi.org/10.1063/1.4944789).
- [17] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 可重构电磁超表面及其应用研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 206–219. doi: [10.12000/JR20137](https://doi.org/10.12000/JR20137).
- YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, GAO Jun, *et al.* Recent advances in reconfigurable metasurfaces and their applications[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 206–219. doi: [10.12000/JR20137](https://doi.org/10.12000/JR20137).
- [18] LV Huanhuan, HUANG Qiulin, YI Xiangjie, *et al.* Low-profile transmitting metasurface using single dielectric substrate for OAM generation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(5): 881–885. doi: [10.1109/LAWP.2020.2983400](https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2983400).
- [19] SHI Hongyu, WANG Luyi, PENG Gantao, *et al.* Generation of multiple modes microwave vortex beams using active metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(1): 59–63. doi: [10.1109/LAWP.2018.2880732](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2880732).
- [20] GUO Kai, ZHENG Qun, YIN Zhiping, *et al.* Generation of mode-reconfigurable and frequency-adjustable OAM beams using dynamic reflective metasurface[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 75523–75529. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2988914](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988914).
- [21] YU Shixing, LI Long, SHI Guangming, *et al.* Generating multiple orbital angular momentum vortex beams using a metasurface in radio frequency domain[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(24): 241901. doi: [10.1063/1.4953786](https://doi.org/10.1063/1.4953786).
- [22] YU Shixing, LI Long, and SHI Guangming. Dual-polarization and dual-mode orbital angular momentum radio vortex beam generated by using reflective metasurface[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(8): 082202. doi: [10.7567/APEX.9.082202](https://doi.org/10.7567/APEX.9.082202).
- [23] SHI Yan and ZHANG Ying. Generation of wideband tunable orbital angular momentum vortex waves using graphene metamaterial reflectarray[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 5341–5347. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2740323](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2740323).
- [24] 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).
- [25] 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).
- [26] LI Jiusheng and ZHANG Lina. Simple terahertz vortex beam generator based on reflective metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36403–36412. doi: [10.1364/OE.410681](https://doi.org/10.1364/OE.410681).
- [27] FAN Junpeng, CHENG Yongzhi, and HE Bin. High-efficiency ultrathin terahertz geometric metasurface for full-space wavefront manipulation at two frequencies[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(11): 115101. doi: [10.1088/1361-6463/abcd0](https://doi.org/10.1088/1361-6463/abcd0).
- [28] LIU Haixia, XUE Hao, LIU Yongjie, *et al.* Generation of multiple pseudo Bessel beams with accurately controllable propagation directions and high efficiency using a reflective metasurface[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(20): 7219. doi: [10.3390/app10207219](https://doi.org/10.3390/app10207219).
- [29] NAYERI P, YANG Fan, and ELSHERBENI A Z. Reflectarray Antennas: Theory, Designs, and Applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018: 9–13.

作者简介



施宏宇(1987-), 男, 陕西人, 西安交通大学电信学部副教授。主要研究方向为电磁超材料理论与应用、人工智能在超材料电磁波调控中的应用、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、新型功能材料在电磁波调控中的应用等。



李国强(1996-), 男, 山东人, 西安交通大学电信学部信息与通信工程学院硕士研究生。主要研究方向为电磁波综合调控等。



刘康(1990-), 男, 江苏泗阳人, 国防科技大学电子科学学院副教授。主要研究方向为雷达前视成像及电磁涡旋技术。



李博林(1996-), 男, 陕西人, 西安交通大学电信学部信息与通信工程学院硕士研究生。主要研究方向为新型太赫兹和毫米波器件等。



衣建甲(1986-), 男, 吉林人, 西安交通大学电信学部研究员。主要研究方向为智能电磁波器件、声学人工材料、可控太赫兹器件等。



张安学(1972-), 男, 河南安阳人, 西安交通大学电信学部教授, 博士生导师。主要研究方向为新型天线与分集技术、移动通信微波射频技术、智能雷达信号处理、多天线通信系统与阵列信号处理、微波测试理论与系统设计等。



徐卓(1960-), 男, 四川人, 西安交通大学电信学部教授。主要研究方向为弛豫型铁电单晶、电场诱导和压力诱导的铁电体、反铁电体和低相变压力铁电陶瓷材料及微结构等。