

基于超宽带反射超表面产生太赫兹轨道角动量

韩晓冰 陈江侠 王焱 周远国

Terahertz orbital angular momentum generation based on ultra-wideband reflective metasurface

HAN Xiaobing, CHEN Jiangxia, WANG Yan, ZHOU Yuanguo

引用本文:

韩晓冰, 陈江侠, 王焱, 等. 基于超宽带反射超表面产生太赫兹轨道角动量[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 282–291. DOI: 10.5768/JAO202445.0201002

HAN Xiaobing, CHEN Jiangxia, WANG Yan, et al. Terahertz orbital angular momentum generation based on ultra-wideband reflective metasurface[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 282–291. DOI: 10.5768/JAO202445.0201002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超快太赫兹时域光谱系统

Ultra-fast terahertz time domain spectroscopy system

应用光学. 2019, 40(2): 229–232 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201008>

基于超表面材料的光波相位精密操控新技术

Accurate controlling of optical phase based on metasurfaces

应用光学. 2017, 38(2): 153–158 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201001>

太赫兹计量研究与标准研制进展

Progress of terahertz metrology research and standard construction

应用光学. 2020, 41(4): 651–661 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409002>

超表面图像显示技术研究

Study on metasurfaces image display technology

应用光学. 2019, 40(6): 1045–1049 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0602001>

太赫兹波通信技术研究进展

Research progress on terahertz communication technology

应用光学. 2018, 39(1): 12–21 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101003>

太赫兹光谱技术在四氢双环戊二烯检测中的应用

Application of terahertz spectroscopy in THDCPD isomers detection

应用光学. 2020, 41(4): 786–790 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409903>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0282-10

基于超宽带反射超表面产生太赫兹轨道角动量

韩晓冰¹, 陈江侠¹, 王 焱^{2,3,4}, 周远国¹

(1. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国航空研究院研究生院, 江苏 扬州 225000; 3. 电磁环境效应航空科技重点实验室, 辽宁 沈阳 110035; 4. 电磁信息控制与效应全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110035)

摘 要: 由于轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 有望成为新的通信复用自由度, 在拓展信道容量、提高频谱资源利用率方面有巨大潜力而受到越来越多研究人员的关注。目前的太赫兹涡旋波产生器件存在只能工作在单频点、带宽窄、转换效率低等问题, 如何在太赫兹频段高效产生 OAM 成为关键问题之一。该文设计了一种超宽带反射超表面单元, 结合几何相位原理和相位叠加原理设计了单层反射超表面。仿真结果表明: 设计的超表面实现了在 0.82 THz~2.09 THz (相对带宽 87.3%) 的宽频范围内, 将圆极化太赫兹波转换为携带轨道角动量的太赫兹涡旋波, 同极化反射谱的幅度大于 0.97, 转换效率高于 94.7%, 反射相位覆盖 0°~360°。利用傅里叶变换分解反射场中各个 OAM 模式, 定量分析了 OAM 模式纯度, 在不同频率下涡旋波中均为主模式 $l=-2$ 能量占比最高, 进一步对设计的超表面进行优化, 主模式能量占比明显提升。该文设计的超表面具有转换效率高、工作带宽大、主模式强度高等优势, 为宽带太赫兹涡旋波的高效产生提供了一种参考。

关键词: 轨道角动量; 太赫兹; 超宽带; 超表面

中图分类号: TN82/O43

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0201002

Terahertz orbital angular momentum generation based on ultra-wideband reflective metasurface

HAN Xiaobing¹, CHEN Jiangxia¹, WANG Yan^{2,3,4}, ZHOU Yuanguo¹

(1. College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Graduate School of Chinese Aeronautical Establishment, Yangzhou 225000, China; 3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Electromagnetic Environment Effects, Shenyang 110035, China; 4. National Key Laboratory of Electromagnetic Information Control and Effects, Shenyang 110035, China)

Abstract: Orbital angular momentum (OAM) has been increasingly investigated by researchers because it is expected to be a new physical quantity for communication multiplexing and has great potential for expanding channel capacity and improving spectrum resource utilization. Current terahertz vortex wave generation devices are limited by operating at only a single frequency, having a narrow bandwidth and having low conversion efficiency, so how to efficiently generate OAM in the terahertz band has become one of the key issues. An ultra-wideband reflective meta-atom was proposed, and a single-layer reflective metasurface was designed by combining the Pancharatnam-Berry phase concept and the phase superposition principle. The simulation results show that it achieves the conversion of circularly polarized terahertz waves into terahertz vortex waves carrying orbital angular momentum in a wide frequency range from 0.82 THz to 2.09 THz (with the relative bandwidth of 87.3%). The amplitude of the co-polarized reflection spectrum is higher than 0.97, the conversion efficiency is more than 94.7%, and the reflection phase covers 0°~360°. The Fourier transform

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-08-26

基金项目: 国家自然科学基金 (61801009); 陕西省自然科学基金面上项目 (2024JC-YBMS-556)

作者简介: 韩晓冰 (1965—), 男, 教授, 主要从事无线通信和超表面阵列天线等研究。E-mail: 64174946@qq.com

通信作者: 周远国 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事计算电磁学和计算光学等研究。E-mail: zyg@xust.edu.cn

was used to decompose each OAM mode in the reflected field, and the OAM mode purity was quantitatively analyzed, with the highest energy weight share of the dominant OAM mode $l=-2$ in all vortex waves at different frequencies, and the designed metasurface was further optimized to increase the energy share of the dominant mode. The designed metasurface has the advantages of high conversion efficiency, large operating bandwidth, and high main mode energy, which provides a reference for the efficient generation of wideband terahertz vortex waves.

Key words: orbital angular momentum; terahertz; ultra-wideband; metasurface

引言

太赫兹(Terahertz, THz)波是一种波长介于微波与红外之间的电磁波, 波长范围在 0.03 mm~3 mm, 频率范围一般为 0.3 THz~10 THz。与微波相比, 太赫兹波波束较窄, 具有通信带宽大、抗干扰能力强、分辨率高、光子能量低等优势, 并且兼具毫米波的穿透性与光波的操控性, 太赫兹在光谱检测^[1]、生物成像^[2-3]、全息投影^[4]、高速通信^[5-6]等领域已经展现出广阔的应用前景。电磁波携带线动量和角动量, 其中角动量包括自旋角动量(spin angular momentum, SAM)和轨道角动量(orbital angular momentum, OAM), OAM 作为电磁波的基本物理量, 在 1992 年由 ALLEN L 等^[7]人在拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束中发现并定义后受到了国内外研究人员的广泛关注。携带 OAM 的电磁波束具有中心为 0 的环形强度分布和螺旋的空间相位分布 $\exp(i l \theta)$, 所以又将其称为涡旋波束, 其中 θ 是空间方位角, l 为 OAM 拓扑电荷数, 又被称为模式数, 可以取小数或整数。由于具有不同模式的涡旋波相互正交互不干扰, 使得 OAM 有望成为全新的传输复用自由度, 在光学、通信领域中有广泛的应用。目前 OAM 已经在光学微操控^[8]、超分辨率成像^[9]和高速率信息传输^[10]等领域成功应用。因此, 如何在宽带高效地产生太赫兹涡旋波成为相关领域研究的关键问题之一。

传统的涡旋波产生方法有环形阵列天线^[11]、螺旋相位板^[12]和全息衍射光栅等。其中, 环形阵列天线需要设计复杂的馈电网络, 系统成本高; 其他光学器件尺寸大、造价高, 不利于集成化和小型化。超表面^[13-14]作为一种新颖的由亚波长单元组成的人工结构, 能够灵活地调控电磁波的振幅、相位和极化, 并且避免了复杂的馈电设计, 具有体积小、重量轻、制造成本低和易于加工等优势而受到研究人员的青睐, 超表面成为产生太赫兹涡旋波束的一种理想方法。近年来, 越来越多的研究人

员尝试通过超表面来产生涡旋波, 如 2011 年, YU N 等^[15]提出的“V”字单元结构的超表面, 实现了在红外波段产生 $l=1$ 的涡旋光; 2016 年, CHANG Z 等^[16]利用在超表面加载可重配置的石墨烯, 在 1.6 THz 处产生了涡旋波束; 2017 年, SHI Y 等^[17]提出了一种基于多层石墨烯结构的反射式超表面, 在 1.8 THz~2.8 THz 频率范围内产生了涡旋光束; 2019 年, 李晓楠等^[18]提出十字架结构单元超表面在 0.8 THz~1.4 THz 产生了涡旋波束, 转换效率为 86%; 2022 年, 仲敏等^[19]提出了频率可切换超表面, 分别在 0.7 THz 和 1.23 THz 产生了不同模式的涡旋波。上述超表面在产生太赫兹涡旋波时存在工作频率单一、带宽较小、转换效率低等问题。

本文提出了一种利用单层几何相位单元组成的宽带太赫兹涡旋波超表面, 几何相位又名 pancharatnam-berry(P-B)相位, 利用 P-B 相位与频率无关, 仅与单元旋转角度相关的相位调控相关, 实现了在太赫兹频段高效率产生涡旋波。通过旋转超表面单元获得 $0^\circ \sim 360^\circ$ 反射相位范围, 根据补偿相位分布构建了 $l=\pm 2$ 的超表面, 并对其进行了数值模拟。在圆极化平面波激励下的仿真结果表明, 本文提出的超宽带太赫兹涡旋波超表面具有以下优势: 1) 实现了在 0.82 THz~2.09 THz(相对带宽 87.3%)宽带内产生涡旋波; 2) 超表面的转换效率高于 94.7%; 3) OAM 模式纯度高, 为太赫兹涡旋波的高效产生提供了一种参考。

1 理论分析与单元设计

反射型超表面产生涡旋波束的原理是, 将具有 SAM 的平面波反射为携带 OAM 的结构波。为了简化设计过程, 以及更加方便地设计出高性能单元, 本文使用琼斯矩阵对超表面的入射场和散射场进行分析。如图 1 所示, 在直角坐标系中, 将超表面单元旋转角度 φ 后, 在圆极化波入射下 SAM-OAM 的转换过程如下:

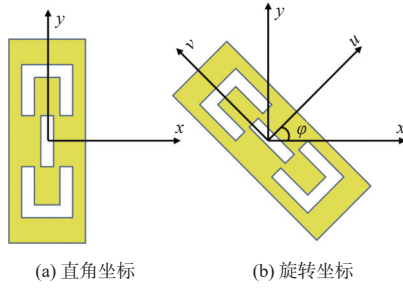


图1 超表面单元旋转示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflective meta-atom with rotation angle

$$r_{ll} = \frac{1}{2}[(r_{xx} - r_{yy}) + j(r_{xy} + r_{yx})] \exp(-j2\varphi) \quad (1)$$

$$r_{lr} = \frac{1}{2}[(r_{xx} + r_{yy}) + j(r_{xy} - r_{yx})] \quad (2)$$

$$r_{rr} = \frac{1}{2}[(r_{xx} - r_{yy}) - j(r_{xy} + r_{yx})] \exp(j2\varphi) \quad (3)$$

$$r_{rl} = \frac{1}{2}[(r_{xx} + r_{yy}) - j(r_{xy} - r_{yx})] \quad (4)$$

式中: r_{xx} , r_{yy} 分别为 x -, y -极化波垂直入射下的同极化反射系数; r_{ll} 和 r_{rr} 分别为左圆和右圆极化波垂直入射下的同极化反射系数; r_{xy} , r_{yx} , r_{lr} 和 r_{rl} 为对应的交叉极化反射系数; φ 为超表面单元相对 x 轴的旋转角度。从式(1)~式(4)中可以看出, 当反射场的圆极化状态相对于入射场不变时, 反射场将携带一个额外的、与单元旋转角 φ 相关的相位项 $\exp(-j2\varphi)$ 和 $\exp(j2\varphi)$, 当反射场的圆极化状态被转换时, 在入射场和散射场之间将不存在相位差。

根据 P-B 相位理论, 可以通过旋转超表面单元的方法获得 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的任意相位差, 将螺旋相位波前调制成反射波, 这是超表面能够产生涡旋波束的必要条件。利用具有不同旋转角的单元构造出设计的超表面补偿相位面, 可以实现对反射电磁波的任意预期波前调控。在圆极化波入射下, 为了实现较高的 SAM-OAM 转换效率, 超表面单元的反射系数 r_{ll} 和 r_{rr} 的幅度应该尽可能地接近于 1。因此, 实现高效同极化转换只需要设计的超表面单元满足如下条件:

$$|r_{xx}| \approx |r_{yy}| \approx 1 \quad (5)$$

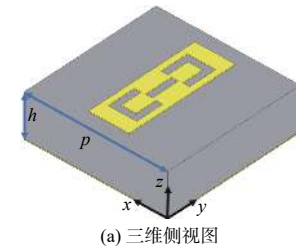
$$|\arg(r_{xx}) - \arg(r_{yy})| = 180^\circ \quad (6)$$

为了实现更大的系统工作带宽, 在宽频带中高效地产生涡旋波束, 要求超表面单元在不同旋转角度下同极化反射系数的相位在 $(f_{\min}, f_{\max})$ 带宽内具有相似的斜率, 可用公式表示为

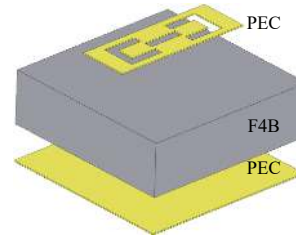
$$\frac{\partial \Phi(l, l)}{\partial f_{\min}} \approx \frac{\partial \Phi(l, l)}{\partial f_i} \approx \frac{\partial \Phi(l, l)}{\partial f_{\max}} \quad (7)$$

式中: $f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 分别为较低和较高的截止频率; f_i 为 $(f_{\min}, f_{\max})$ 频带内的任意频率; $\Phi(l, l)$ 为左旋圆极化 (left-hand circular polarization, LCP) 波入射下的反射相位。在右旋圆极化 (right-hand circular polarization, RCP) 波入射下时与之相同。

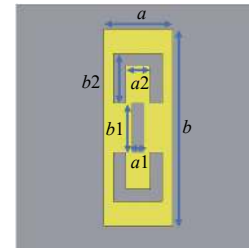
基于上述讨论, 为了实现高性能的 SAM-OAM 转换, 本文设计了一个各向异性的超表面单元, 如图 2(a) 所示。该单元由 3 层结构组成, 如图 2(b) 所示。上层为中心挖口, 上下对称的“凹”字型挖槽矩形金属; 中间层为介质基板, 其材料为聚四氟乙烯 (F4B, $\epsilon_r=2.65$, $\tan\delta=0.001$), 高度 $h=30 \mu\text{m}$; 下层为金属地。该单元为镜像对称结构, 周期为 $p=100 \mu\text{m}$ 。为了实现更大的带宽, 结合遗传算法对单元结构参数进行优化, 最终得出满足上述理论要求的超表面单元结构, 如图 2(c) 所示。其具体参数为 $a=28 \mu\text{m}$, $b=80 \mu\text{m}$, $a1=5 \mu\text{m}$, $b1=20 \mu\text{m}$, $a2=10 \mu\text{m}$, $b2=20 \mu\text{m}$ 。通过对上层金属结构进行旋转, 使超表面单元具有连续的 $0^\circ \sim 360^\circ$ 反射相位范围, 提出的超表面单元的电尺寸约为中心频率 $f_c=1.5 \text{ THz}$ 的 $0.5\lambda_0$ (λ_0 为中心频率波长)。



(a) 三维侧视图



(b) 3层结构示意图



(c) 单元结构示意图

图2 超表面单元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reflective meta-atom

2 宽带涡旋波超表面设计

考虑到本文设计的超表面中心频率为 1.5 THz, 由 $M \times N$ 个单元组成, 设计中选取 $M=N=16$ 。超表面需要具有涡旋相位分布才能使反射波携带涡旋相位, 因此, 为了在超表面反射场中产生 OAM 涡旋波束, 需要在超表面上调制 $\exp(il\theta)$ 的相位分布。超表面产生涡旋波原理如图 3 所示。

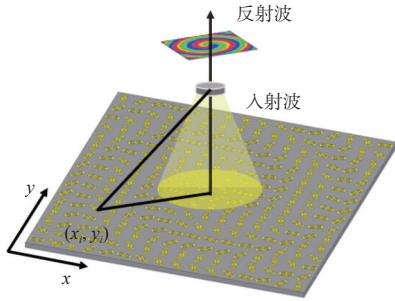


图 3 超表面产生涡旋波原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of OAM vortex wave generation based on metasurface

将超表面设置在图 3 所示 x - o - y 平面上, 则超表面中的任意一个单元的位置可以用坐标表示为 (x_i, y_i) 。涡旋相位分布可表示为

$$\varphi_1(x_i, y_i) = l \arctan(y_i/x_i) \quad (8)$$

式中 l 表示相位奇点的 OAM 模式数, 也称拓扑电荷数, 可以为任意整数或小数。本文将以 $l=\pm 2$ 为例说明其原理, 如图 4(a) 所示。

由于馈源天线辐射球面波不满足涡旋超表面的平面波入射条件, 需要结合聚焦相位将球面波转化为平面波。本文将馈源天线放置在焦点 F 处, 其聚焦相位分布函数表示为

$$\varphi_2(x_i, y_i) = k_0(\sqrt{F^2 + x_i^2 + y_i^2} - F) \quad (9)$$

式中: $k_0(k_0=2\pi/\lambda_0)$ 为自由空间波数; F 为焦距, 大小可以在设计中自由选择, 本文设为 $F=1\,000\,\mu\text{m}$ 。聚焦相位分布如图 4(b) 所示。根据相位叠加原理, 每个位置的超表面单元所需要的补偿相位可以由下式计算:

$$\varphi_{\text{tot}}(x_i, y_i) = \varphi_1(x_i, y_i) + \varphi_2(x_i, y_i) \quad (10)$$

根据补偿相位可以得到任意位置处单元的旋转角度为 $\varphi_{\text{tot}}/2$ 。图 4(c) 所示的数值结果表明, 反射波的相位分布覆盖 $0^\circ \sim 360^\circ$ 并呈现螺旋状分布。理论上, 通过补偿相位计算并排列不同旋转角度的超表面单元, 可以得到产生具有任意拓扑电荷数的连续空间相变 OAM 涡旋波超表面。

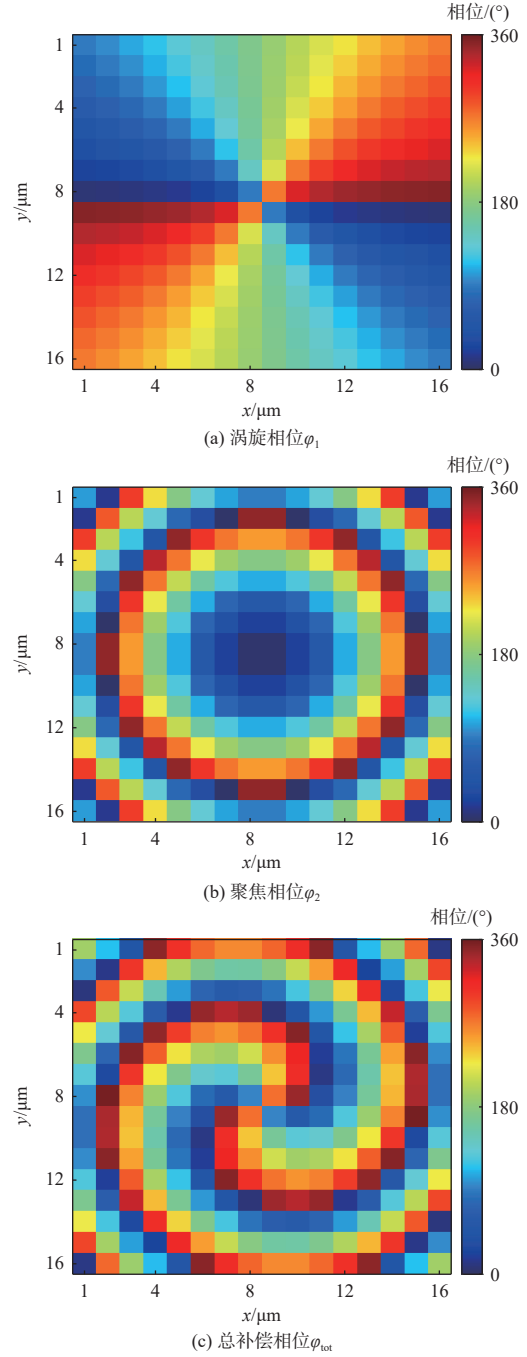


图 4 超表面补偿相位计算示意图

Fig. 4 Schematic diagram of calculating phase distribution of reflective metasurface

3 仿真结果与分析

3.1 单元仿真结果与分析

前面我们给出了超表面单元的结构及参数, 超表面单元的仿真设置和仿真结果如图 5 所示。如图 5(b) 所示, 在 x -和 y -极化波入射下反射谱的幅度都接近于 1, 满足式(5); 在宽频带内具有 180° 的相位差, 满足式(6), 这两点是在宽带内产生涡旋波的必要条件。

圆极化波入射下单元的转换效率可通过下式计算:

$$E_{\text{efficiency}} = r_{ll}^2 / (r_{ll}^2 + r_{lr}^2)$$

(11)

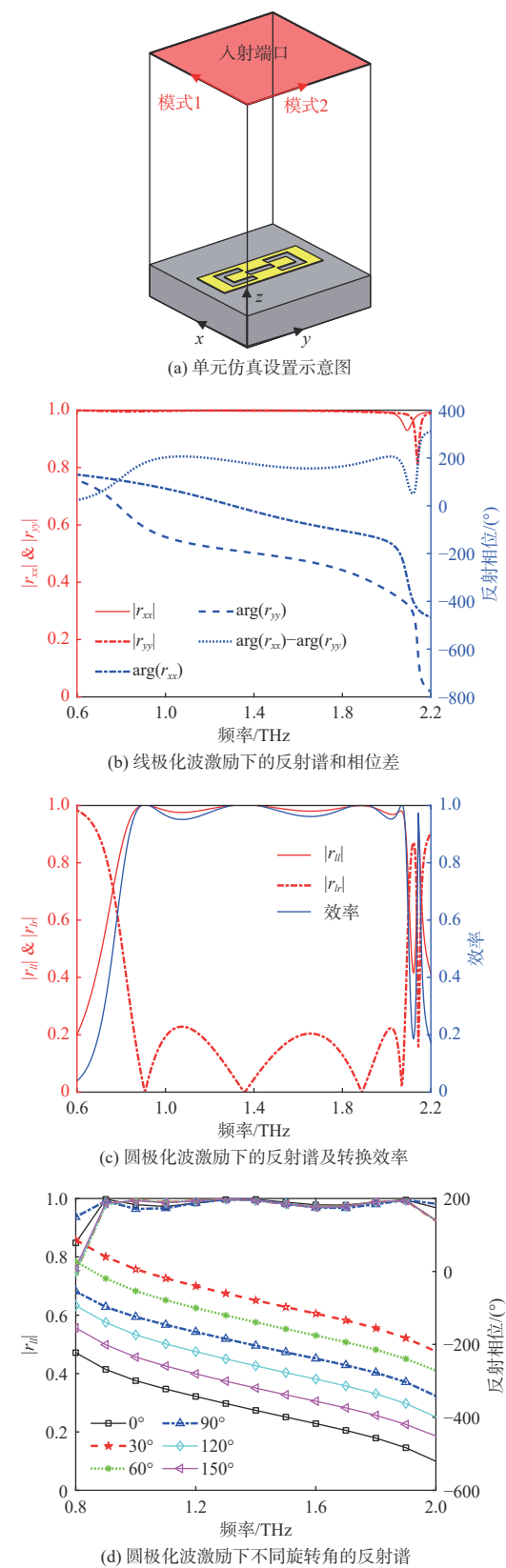


图 5 超表面单元仿真设置和仿真结果

Fig. 5 Simulation settings and results of reflective meta-atom

如图 5(c)所示,在圆极化波入射下,设计的宽带单元在 0.82 THz~2.09 THz(相对带宽为 87.3 %)频率范围内,其同极化反射系数幅度均大于 0.97,转换效率均高于 94.7%,交叉极化反射系数幅度均小于 0.23。更重要的是,从图 5(d)中可以观察到,对于不同旋转角度下的超表面单元,其反射谱的相位如预期的那样在带宽频率范围内保持平行,满足式(7),并且同极化反射谱的幅度均高于 0.95,这两点对于构建具有高性能、高纯度 OAM 特性的超表面十分重要。

上面超表面单元的电磁响应仿真结果,表明了本文提出的超表面单元具有高性能,能够用于构造高效的宽带涡旋波超表面。表 1 给出了我们设计的单元与其他在太赫兹频段产生 OAM 涡旋波束的单元性能比较。表 1 中采用的数据均为相应文章中公开的仿真数据,结果表明,我们设计的单元可以在更大的带宽内实现高效工作,同时在带宽和效率之间获得了良好的平衡。

表 1 OAM 超表面单元比较

Table 1 Comparison with meta-atoms for OAM vortex wave generation

参考文献	工作频率/THz	相对带宽/%	效率/%	调相方式	数据来源
[17]	1.8~2.8	43.5	—	石墨烯化学势	仿真
[18]	0.8~1.4	54.5	92	几何相位	仿真
[20]	0.9~1.8	66.7	90	几何相位	仿真
[21]	0.3~0.45	40	—	几何相位	仿真
[22]	5.1~7.4	36.8	80	传输相位	仿真
本文	0.82~2.09	87.3	94.7	几何相位	仿真

3.2 超表面仿真结果与讨论

根据上面分析的 SAM-OAM 转换概念,通过将上述超表面单元以一定的旋转角度在不同位置进行排列,就可以构造出具有期望涡旋相位分布 $\exp(il\theta)$ 的超表面。本文设计的 $l=\pm 2$ 的超表面如图 6 所示。图 6 中 l 的正负仅与入射波的极化方

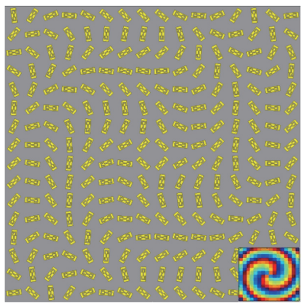


图 6 $l=\pm 2$ 的超表面拓扑结构

Fig. 6 Topology of proposed metasurface with OAM mode of $l=\pm 2$

向有关,具体拓扑结构由 16×16 个旋转的超表面单元阵列组成。

为了说明提出的超表面能够在宽带上产生涡旋波,取 $1 \text{ THz} \sim 2 \text{ THz}$ 频率范围对其进行数值模拟,并用近场和远场电磁性能验证它的涡旋特性。在 RCP 波激励下,本文提出的超表面产生了模式数为 $l=-2$ 的太赫兹涡旋波。对不同频率下反射场中的右旋分量进行采样和分解,采样平面尺寸为 $1600 \mu\text{m} \times 1600 \mu\text{m}$,如图 7 所示。从采样场中右旋分量可以发现电场幅度表现为空心环形,相位分布呈现为围绕奇点的对称双螺旋状,相位变化范围在 $0^\circ \sim 360^\circ$,这与 OAM 特征一致,证明了本文设计的超表面在宽带上可使反射电磁波携带 OAM。图 8 给出了阿基米德螺旋天线激励的反射场中右旋分量的几个典型频率下三维远场辐射方向图,所有频率下的辐射增益均大于 10 dB 。

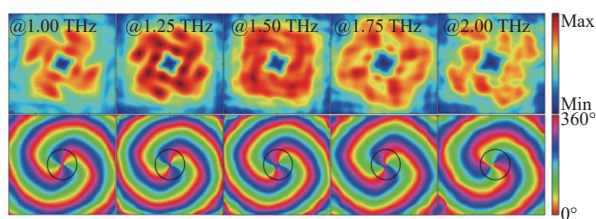


图 7 不同频率下 $l=-2$ 涡旋波近场仿真结果的幅度与相位
Fig. 7 Amplitudes and phases of simulated near-field vortex waves for $l=-2$ at different frequencies

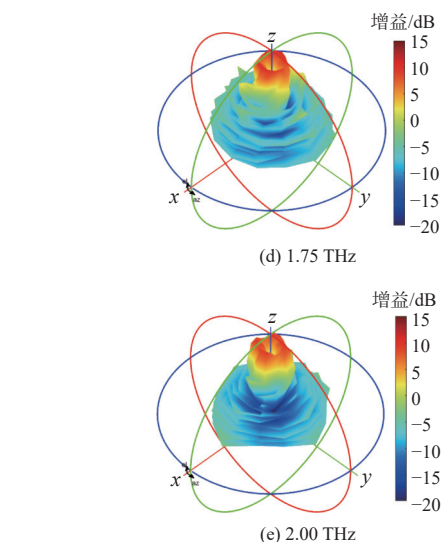
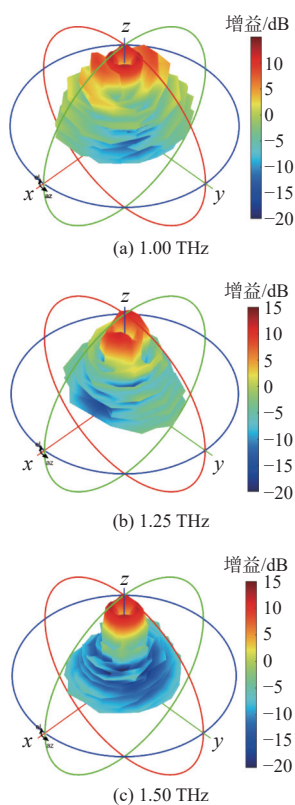


图 8 不同频率下 $l=-2$ 涡旋波三维远场辐射方向图
Fig. 8 3D far-field radiation diagram of vortex waves for $l=-2$ at different frequencies

OAM 模式纯度可以用来描述反射场中各种不同模式数的涡旋波的能量占比分布情况,能够很好地说明涡旋波质量。为了定量分析 OAM 模式纯度,本文利用傅里叶变换来分解反射场中各个 OAM 模式。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。相应的计算公式如下:

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E(\varphi) \exp(-i l \varphi) d\varphi \quad (12)$$

$$E_{\text{energy weight}} = \frac{A_l}{\sum_{l'=-7}^7 A_{l'}} \quad (13)$$

式中: $E(\varphi)$ 为选取的环形电场; A_l 为各个模式的幅度。考虑 $l=-7 \sim l=7$ 的 OAM 模式,傅里叶谱分析结果如图(9)所示。从图(9)可以看出,在不同频率下的 OAM 模式占比中,主模式 $l=-2$ 所占的能量都最高,表明超表面产生的涡旋波主模式与超表面设计的模式相同。

3.3 超表面优化仿真与讨论

上面我们对由 16×16 个单元组成的超表面进行了仿真及模式强度占比分析,从图 9 中可以看出,在各个频率下主模式 $l=-2$ 的强度占比均在 0.6 左右。为了提升主模式强度占比,我们首先对超表面尺寸进行优化,增加单元数量,设计了由 20×20 个超表面单元组成的矩形超表面,如图 10(a)所示。矩形超表面在不同频率下反射的涡旋波和对应谱如图 11 所示。

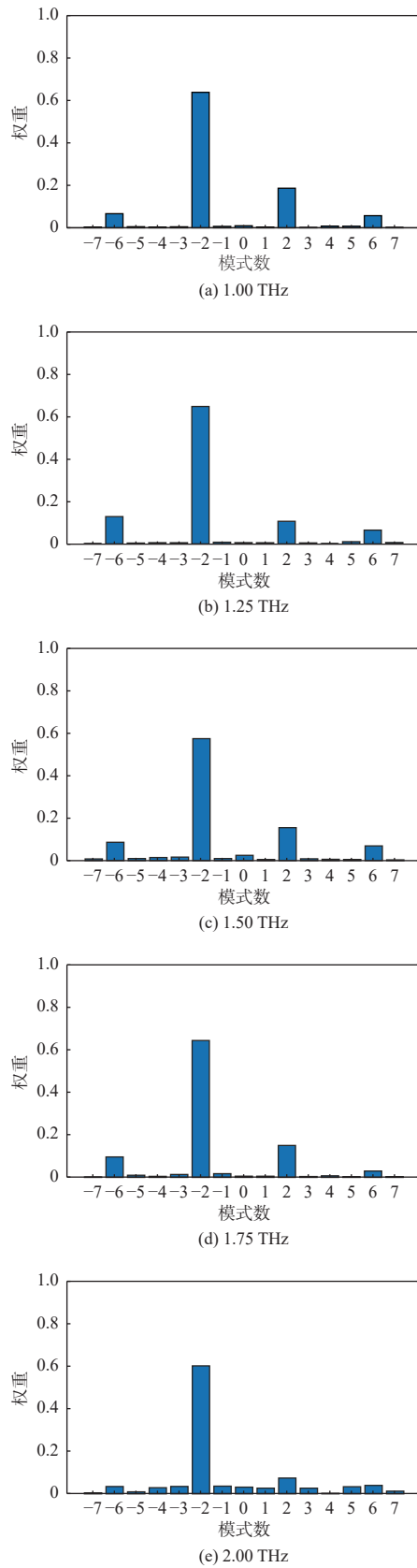


图9 不同频率下 OAM 谱分析

Fig. 9 OAM spectrum weight for simulated results at different frequencies

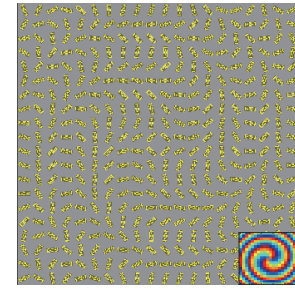
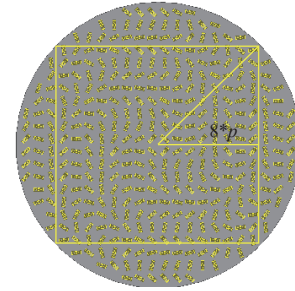
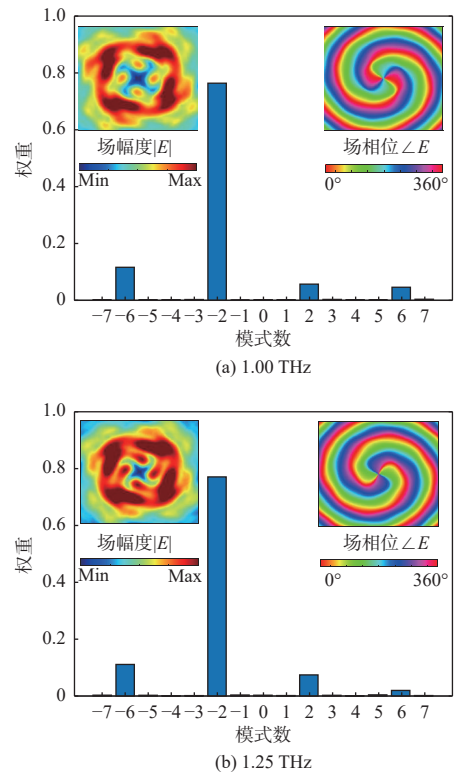
(a) $l=\pm 2$ 矩形超表面结构(b) $l=\pm 2$ 圆形超表面结构

图10 优化的超表面拓扑结构

Fig. 10 Topology of optimized metasurface with OAM mode of $l=\pm 2$

从图 11 可以看出, 各个频率下主模式 $l=-2$ 的能量占比在 0.76 左右, 比 16×16 个单元组成的矩形超表面明显增加。矩形是超表面设计中最常用的形状, 我们将其优化为圆形研究其对主模式强度的影响, 设计了半径为 $8\sqrt{2}\times p$ 的圆形超表面, 如图 10(b) 所示。图 12 给出了圆形超表面的仿真结



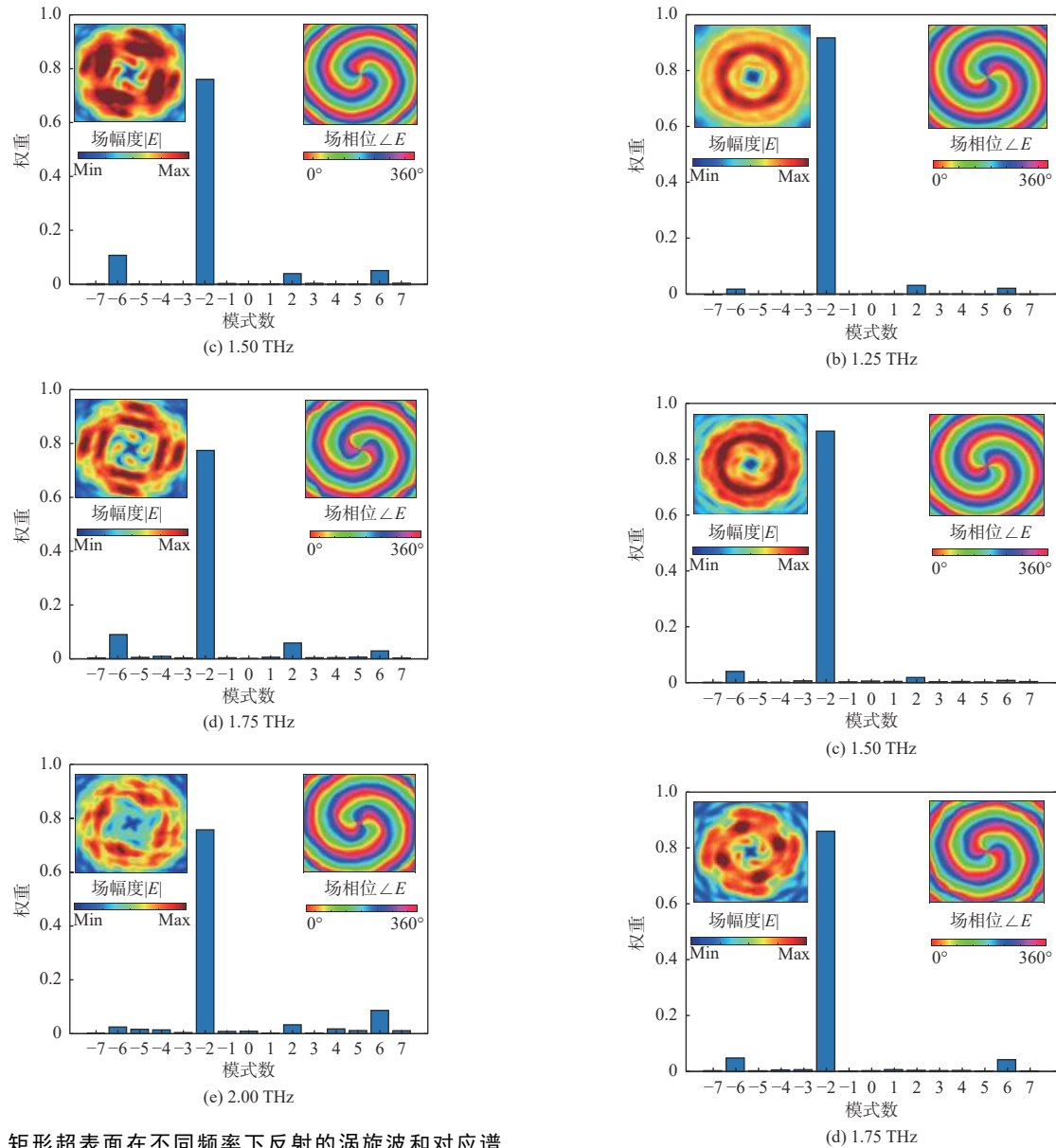


图 11 矩形超表面在不同频率下反射的涡旋波和对应谱分析

Fig. 11 Near-field observation and corresponding spectral analyses of vortex wave at different frequencies reflected by rectangular metasurface

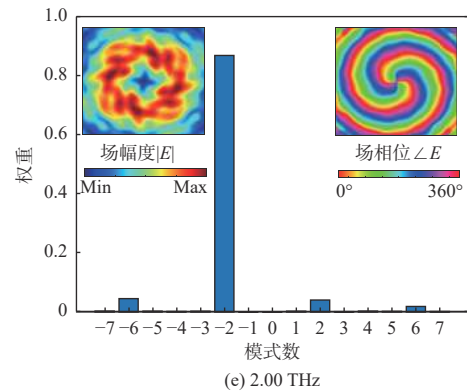
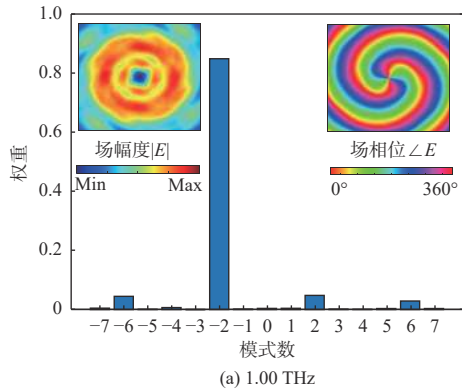


图 12 圆形超表面在不同频率下反射的涡旋波和对应谱分析

Fig. 12 Near-field observation and corresponding spectral analyses of vortex wave at different frequencies reflected by circular metasurface

果。从图12可以看出,圆形超表面反射的涡旋波主模式 $l=2$ 的强度在各频率下均提升到了0.88左右,验证了圆形超表面设计能够有效地提升主模式强度。

仿真计算的意义是为实践提供参考,超表面在实际加工中不可避免地存在误差,因此本文将可能产生的误差考虑进仿真,以研究其对反射涡旋波模场分布的影响。随机选取尺寸误差为 $\pm 2\ \mu\text{m}$,旋转角度误差分布如图13(a)所示。构造圆形超表面并以中心频率进行仿真,仿真结果如图13(b)所示。从图13可以看出,在误差影响下,主模式强度明显降低,其他串扰模式强度有所增大,但就整体而言,在一定范围内误差对反射涡旋波的模场分布影响不大,主模式强度仍然占据主要部分。

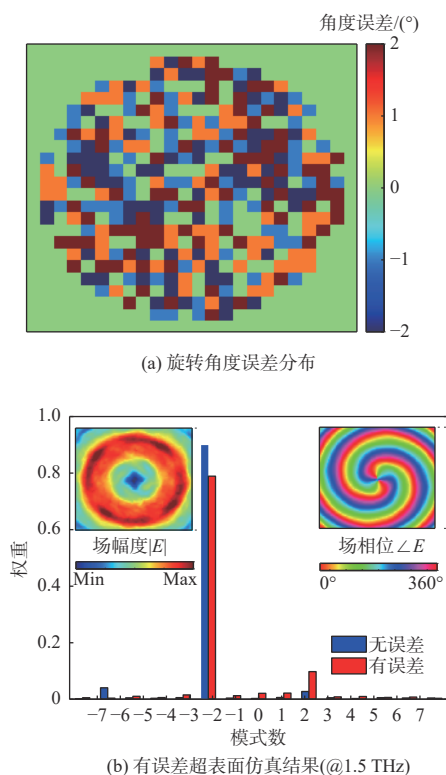


图13 旋转角度误差分布及有误差超表面在中心频率下反射的涡旋波和对应谱

Fig. 13 Rotation angle error distribution, near-field observation and corresponding spectral analyses of vortex wave at center frequencies

4 结论

本文提出了一种高性能的几何相位单元,能够对电磁波的相位进行自由调控。结合几何相位原理和相位叠加原理设计了 $l=\pm 2$ 的宽带太赫兹涡旋

波超表面。对超表面的近场和远场性能进行了仿真验证。仿真结果表明,设计的超表面可以在0.82 THz~2.09 THz频率范围内产生携带OAM的涡旋波束,转换效率高于94.7%,辐射增益大于10 dB, OAM主模式能量占比最高。对设计的超表面进行了优化仿真,通过增加单元数量以及将超表面设计为圆形均能够有效地提升主模式强度占比,仿真分析了误差对反射涡旋波模场分布的影响。本文设计的超表面具有结构简单、转换效率高、工作带宽大、主模式强度高优势,对宽带太赫兹涡旋波的产生有一定参考价值,在太赫兹通信、成像等方面具有潜在的应用前景。

参考文献:

- [1] PENG Y, SHI C, ZHU Y, et al. Terahertz spectroscopy in biomedical field: a review on signal-to-noise ratio improvement[J]. *Photonix*, 2020(1): 1-18.
- [2] 杨书涛, 于森, 张孟庭, 等. 以高斯波束为探针的太赫兹叠层成像系统[J]. *应用光学*, 2021, 42(4): 571-576.
YANG Shutao, YU Miao, ZHANG Mengting, et al. Terahertz ptychography system using Gaussian beam as probe[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(4): 571-576.
- [3] WAN M, HEALY J J, SHERIDAN J T. Terahertz phase imaging and biomedical applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 122: 105859.
- [4] WAN Z, GAO Z, GAO F, et al. Terahertz massive MIMO with holographic reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(7): 4732-4750.
- [5] 杨鸿儒, 李宏光. 太赫兹波通信技术研究进展[J]. *应用光学*, 2018, 39(1): 12-21.
YANG Hongru, LI Hongguang. Research progress on terahertz communication technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 12-21.
- [6] CHEN Z, MA X, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019, 16(2): 1-35.
- [7] ALLEN 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.
- [8] HERRING R A. A new twist for electron beams[J]. *Science*, 2011, 331: 155-156.

- [9] YANG T, SHI H, GUO J, et al. Orbital-angular-momentum-based super-resolution ISAR imaging for maneuvering targets: modeling and performance analysis[J]. *Digital Signal Processing*, 2021, 117: 103197.
- [10] GONG L, ZHAO Q, ZHANG H, et al. Optical orbital-angular-momentum-multiplexed data transmission under high scattering[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 27.
- [11] WU J, HUANG Z, REN X, et al. Wideband millimeter-wave dual-mode dual circularly polarized OAM antenna using sequentially rotated feeding technique[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(8): 1296-1300.
- [12] CHEN Y, ZHENG S, LI Y, 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.
- [13] 孙胜, 阳叔均, 沙威. 基于反射超表面的偏馈式涡旋波产生装置[J]. *物理学报*, 2021, 70(19): 263-269.
SUN Sheng, YANG Lingjun, SHA Wei. Offset-fed vortex wave generator based on reflective metasurface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(19): 263-269.
- [14] 樊俊鹏, 王小召, 张建新, 等. 一种光可调的多功能太赫兹几何相位超表面[J]. *应用光学*, 2022, 43(5): 986-993.
FAN Junpeng, WANG Xiaozhao, ZHANG Jianxin, et al. Optically switchable multifunctional terahertz geometric phase metasurface[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5): 986-993.
- [15] YU N, GENEVE P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334: 333-337.
- [16] CHANG Z, YOU B, WU L S, et al. A reconfigurable graphene reflectarray for generation of vortex THz waves[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1537-1540.
- [17] SHI Y, ZHANG Y. Generation of wideband tunable orbital angular momentum vortex waves using graphene metamaterial reflectarray[J]. *IEEE Access*, 2017, 6: 5341-5347.
- [18] 李晓楠, 周璐, 赵国忠. 基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束[J]. *物理学报*, 2019, 68(23): 285-291.
LI Xiaonan, ZHOU Lu, ZHAO Guozhong. Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(23): 285-291.
- [19] 仲敏, 李九生. 频率可切换太赫兹涡旋波束产生器[J]. *物理学报*, 2022, 71(21): 340-348.
ZHONG Min, LI Jiusheng. Switchable frequency terahertz vortex beam generator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(21): 340-348.
- [20] 郭姣艳, 李文宇, 孙然, 等. 基于双箭头超表面宽带太赫兹涡旋光束的产生[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 194-200.
GUO Jiaoyan, LI Wenyu, SUN Ran, et al. Generation of broadband terahertz vortex beam based on double-arrow metasurface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 194-200.
- [21] LI J S, ZHANG L N. Simple terahertz vortex beam generator based on reflective metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36403-36412.
- [22] 冯文静, 唐皓, 吴季达, 等. 基于宽带超表面的太赫兹涡旋波束产生研究[J]. *激光杂志*, 2019, 40(7): 56-59.
FENG Wenjing, TANG Hao, WU Jida, et al. Research on vortex beam generation based on terahertz broadband metasurface[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(7): 56-59.