

基于反射超表面的偏馈式涡旋波产生装置*

孙胜^{1)†} 阳根均¹⁾ 沙威²⁾

1) (电子科技大学电子科学与工程学院, 成都 611731)

2) (浙江大学信息与电子工程学院, 杭州 310027)

(2021 年 4 月 12 日收到; 2021 年 5 月 17 日收到修改稿)

由于具有拓宽信道的能力, 携带轨道角动量的涡旋电磁波已经受到越来越多学者的研究. 目前, 基于反射式涡旋波发生装置仍然存在两个问题需要解决: 1) 馈源的遮挡; 2) 由馈源和反射表面所引起的交叉极化分量. 本文提出了一种基于超表面的偏馈式涡旋波产生装置, 该装置包括超表面反射阵和非正对区域放置的天线馈源. 本文主要贡献为以下三方面: 1) 设计了一种几何相位的超表面单元; 2) 主、交叉极化的转化过程被详细分析; 3) 具体的偏馈式涡旋波产生装置被设计. 通过合理设计超表面单元, 实现了仅对馈源主极化场的相位补偿与汇聚调控, 最终在期望的观测位置形成具有场增强效果的低交叉极化涡旋波. 仿真与实验分别验证了极化选择特性与汇聚涡旋波的形成. 该装置结构简单, 具有极化选择性和区域场增强效果, 对涡旋波通信及相关应用具有潜在价值.

关键词: 超表面, 涡旋波, 偏馈, Pancharatnam-Berry 相位**PACS:** 84.40.Ba, 89.70.Hj, 42.50.Tx, 42.79.Fm**DOI:** 10.7498/aps.70.20210681

1 引言

轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 作为电磁波的一个基础物理量, 自 1992 年发现以来已受到国内外学者的广泛研究^[1]. 携带轨道角动量的涡旋波束具有螺旋的空间相位分布 $\exp(il\varphi)$, φ 是空间方位角, l 为 OAM 模式数一般取整数. 由于具有不同模式的涡旋波相互正交, 因此被广泛应用于光子^[2]、微波^[3]、和声学领域^[4,5], 并成功应用于超分辨率成像^[6]、微纳操控^[7]和高速率信息传输^[8,9]等相关应用. 在微波频段, 常见的涡旋波生成方法有螺旋相位板^[10]、天线阵^[11]、行波天线^[12]、准连续光栅和人工超表面等^[13,14]. 其中超表面由于避免了复杂的馈电设计, 具有体积小、重量轻的特点. 通过合理的设计和排列超表面单元, 能够实现

对电磁波的幅度、极化和相位的自由调控. 近年来, 随着现代微波射频系统的小型化、集成化和低成本等应用需求的提高, 基于超表面的高效涡旋波产生装置越来越得到研究人员的青睐.

谐振单元超表面是通过改变谐振单元的几何尺寸来实现线极化波的相位调控, 例如“V”形结构^[15]、条带结构^[16]和十字架结构^[17]的超表面单元. 但是基于谐振结构单元难以实现宽的带宽与高的模式纯度. 对于透射型超表面往往需要多层结构来构造宽带性能, 例如通过设计四层透射超表面, 实现了 33% 的相对带宽和接近百分之 60% 的转化效率^[18]. 而一种基于 PEC-PMC 结构的反射式超表面被证明能够实现接近 100% 的转化效率^[19]. 近几年, 几何相位又名 Pancharatnam-Berry (P-B) 相位, 其受益于频率无关和仅与取向角度相关的相位调控特性, 被广泛应用于宽带反射式几何相位超

* 国家自然科学基金 (批准号: 61971115, 61975177, 61721001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sunsheng@uestc.edu.cn

表面中. 例如平行放置的双层偶极子结构^[20]、双箭头结构^[21]、单层十字结构^[22]和变形方形环结构等^[23,24]. 通过对阵列中单元取向角的设计来引入涡旋相位, 在宽带范围内实现了涡旋波的高效产生. 同时, 通过引入汇聚相位面概念, 实现了对涡旋波束的非衍射^[25]和场增强效果^[26,27].

其中几何相位单元相较于谐振单元更容易实现自由的相位调控和宽带涡旋波产生. 基于几何相位的超表面单元也能设计出接近 100% 的转化效率. 在微波频段, 金属和介质损耗较低, 附有金属地的反射型超表面几乎能够实现无损耗的反射电磁波. 但目前反射型超表面仍然存在如下问题值得深入研究: 1) 反射形成的涡旋波容易受到馈源的遮挡; 2) 由于受到单元旋转排列的影响, 在实际设计中, 超表面仍然会产生交叉极化, 如何进一步避免超表面的交叉极化影响依然值得深入研究. 本文对反射式超表面引入偏馈设计, 避免了由馈源引起的遮挡. 设计了工作在微波段的几何相位单元, 并组成具有汇聚和极化选择的 OAM 超表面. 通过对主极化和交叉极化场的详细分析, 给出了具体的传播分析图. 最终通过仿真和实验验证, 在预定的观测面上探测了由该装置所产生的高质量涡旋波束 (见图 1).

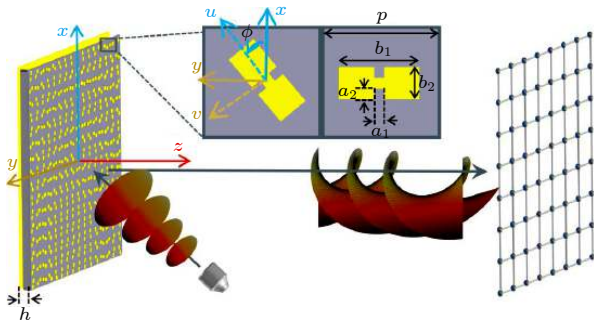


图 1 偏馈式涡旋波产生装置工作示意图, 其中超表面单元的具体结构被放大显示

Fig. 1. The work schematic diagram of the offset-fed vortex wave generator, where the specific structure of the metasurface unit is also displayed.

2 理论分析

2.1 P-B 相位单元

为了实现具有波前调控能力的超表面, 需要设计出具有自由相位调控能力的超表面单元. 而用

Jones 矩阵去分析单元的入射场及散射场关系是非常方便的, 其关系可用反射系数联系起来并表示成如下形式^[23]:

$$r_{ll} = 0.5 [(r_{xx} - r_{yy}) + j(r_{xy} + r_{yx})] e^{-2j\phi}, \quad (1a)$$

$$r_{rr} = 0.5 [(r_{xx} - r_{yy}) - j(r_{xy} + r_{yx})] e^{2j\phi}, \quad (1b)$$

$$r_{rl} = 0.5 [(r_{xx} + r_{yy}) - j(r_{yx} - r_{xy})], \quad (1c)$$

$$r_{lr} = 0.5 [(r_{xx} + r_{yy}) + j(r_{yx} - r_{xy})], \quad (1d)$$

其中 r_{xx} , r_{yy} , r_{ll} 和 r_{rr} 分别是在 x -, y -, 左圆和右圆的同极化反射系数; r_{xy} , r_{yx} , r_{lr} 和 r_{rl} 是对应的交叉极化反射系数; ϕ 为超表面单元的取向角也描述为相对 x 轴的旋转角 (见图 1). 从 (1a) 式—(1d) 式中的圆极化反射系数可以看出, 同极化转化项携带有具有与旋转角度相关的相位项 $e^{-j2\phi}$ ($e^{j2\phi}$). 通过旋转单元来构造出想要的超表面补偿相位面, 就能实现预期的波前控制. 因此首要任务是构造高效的同极化转化单元 ($|r_{ll}| \approx |r_{rr}| = 1$). 如图 1 中未旋转的单元图, 对于具有 y - z 平面或 x - z 平面对称的超表面单元其 Jones 矩阵中的 r_{xy} 和 r_{yx} 是恒定为零的. 因此想要实现高效转化只需实现如下条件:

$$|r_{xx}(\omega)| \approx |r_{yy}(\omega)| \approx 1, \quad (2a)$$

$$\arg(r_{xx}(\omega)) - \arg(r_{yy}(\omega)) \approx \pm\pi. \quad (2b)$$

基于参考论文中的等效电路模型设计方法^[23], 设计了一挖槽矩形片结构的超表面单元 (见图 1). 该单元由三层结构组成, 下层金属地, 中间介质层材料为 F4B ($\epsilon_r = 2.65$), 上层为挖槽的矩形金属. 矩形长宽主要控制单元间耦合电容, 中间对称挖槽主要影响串联电感. 通过在仿真中对单元加载周期性边界条件, 并结合等效电路理论对单元参数进行参数优化^[23], 最终得到满足 (2) 式条件的超表面单元. 其具体参数结果如下: 周期 $p = 10$ mm, $b_1 = 8$ mm, $a_1 = 1$ mm, $b_2 = 3$ mm, $a_2 = 1.2$ mm, $h = 3$ mm. 通过仿真具有不同取向角的单元, 可以得到在 8.5 GHz 时单元反射系数随取向角的变化关系. 对于同极化转化以 r_{ll} 为例从图 2(a) 中可以看出, 其幅度值 $|r_{ll}|$ 在不同取向角下都高于 0.9, 而相位能够随取向角变化且覆盖 360° . 对于交叉极化转化以 r_{lr} 为例从图 2(b) 中可以看出, 其幅度值 $|r_{lr}|$ 在不同取向角下都高于 0.4, 而相位不随取向角变化. 该结果与 (1) 式描述相符, 能够用于构造高效的涡旋波超表面.

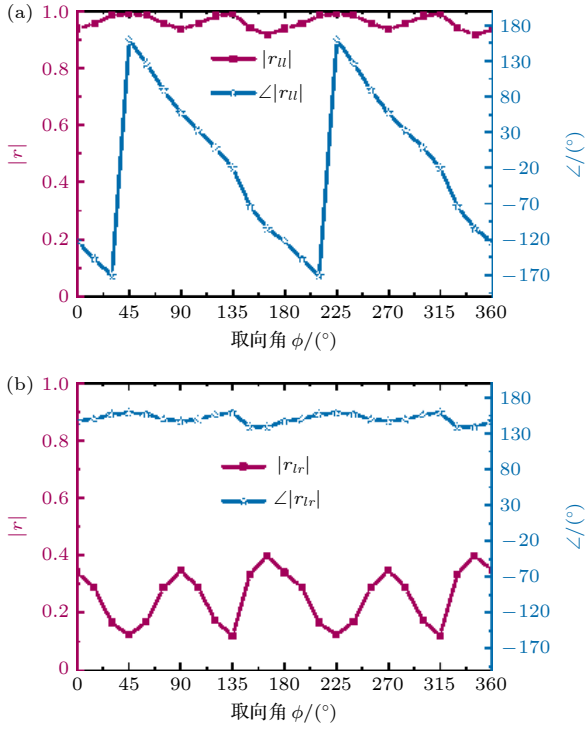


图2 在圆极化下激励下, 超表面单元在不同取向角下的反射谱 (a) 同极化; (b) 交叉极

Fig. 2. The reflection spectra for the meta-atom with different orientation angles under CP wave excitations: (a) Co-polarization; (b) cross-polarization.

2.2 超表面设计与场分析

考虑到如图所示反射式超表面由 $M \times N$ 个单元构成, 这里 $M = N = 16$. 那么每个单元需要补偿的相位可以用下式表示:

$$\Phi_{mn}^c = l\varphi_{mn} + k_0 |\mathbf{r}_{mn} - \mathbf{r}_f| + k_0 |\mathbf{r}_{mn} - \mathbf{r}_o|. \quad (3)$$

这里 $\mathbf{r}_{mn}$ 是单元的位置矢量; $\mathbf{r}_f$ 是馈电天线的位置矢量; $\mathbf{r}_o$ 是观测面中心的位置矢量; φ_{mn} 是单元方位角; k_0 是自由空间中的传播常数; l 是期望产生的轨道角动量模式数取值. (3) 式中每项都有对应的物理意义: 第一项为涡旋波项, 能够使得散射波

携带任意期望的涡旋波模式; 第二项为馈源的空间相位补偿, 实现天线馈源的自由放置, 避免了对散射波干扰; 第三项为聚焦项, 能够在焦点附近对涡旋波进行汇聚作用实现场的增强. 在本例中 $l = 1$, $\mathbf{r}_f = [-8p, 0, 8p]$, $\mathbf{r}_o = [0, 0, 24p]$, 将参数代入 (3) 式, 等式中各项所对应的相位面在图3中被给出. 将对各个位置单元取向角分别设置为 $\phi = \Phi_{mn}^c/2$, 即可构造出满足相位补偿的超表面 (见图1). 基于该方法设计的超表面, 可以对右旋圆极化波进行有效补偿. 而在实际情况中, 由于存在非理想馈源的激励情况, 入射场中包含交叉极化分量. 此外, 超表面构造过程中, 单元的旋转也会导致其周期性的破坏, 进而导致其单元的反射系数 ($|r_{ll}|$, $|r_{rr}|$, $|r_{rl}|$, $|r_{lr}|$) 并不直接代表所构造超表面的反射系数 (这里用 $|T_{ll}|$, $|T_{rr}|$, $|T_{rl}|$, $|T_{lr}|$ 表示超表面对电磁波的转化). 其中有四个具体的转化过程, 将变换过程描述如下:

$$\langle L | T_{ll} | L \rangle, \quad (4a)$$

$$\langle R | T_{rr} | R \rangle, \quad (4b)$$

$$\langle R | T_{rl} | L \rangle, \quad (4c)$$

$$\langle L | T_{lr} | R \rangle, \quad (4d)$$

其中 $| \rangle$ 代表场的初始入射状态; $\langle |$ 代表场的散射状态; L, R 分别代表对应左、右旋圆极化场. 结合本文提出的偏馈设计, 这四种状态的传播示意图被分别给出了 (见图4). 对于同极化转化, 由 (1a) 式和 (1b) 式看出同极化转化项对不同圆极化波会赋予等值反向的相位. 在本例中, 考虑对右旋波进行相位补偿, 这将使得右旋波能够有效被汇聚在观测平面, 而对应的左旋分量 (交叉极化) 则会被发射掉 (见图4(a) 和图4(b)). 由 (1c) 式和 (1d) 式看出交叉极化转化项是不会受单元旋转角度影响的, 因此

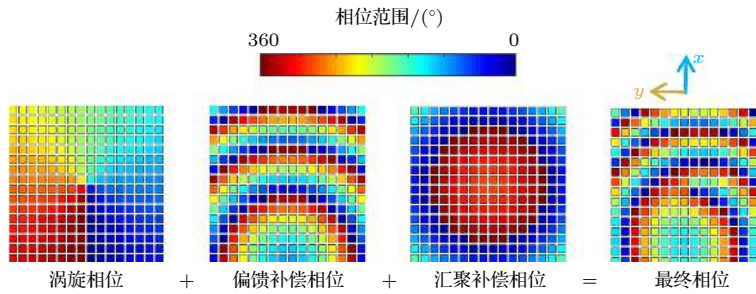


图3 超表面相位实现过程, 包括涡旋相位, 偏馈补偿相位, 汇聚补偿相位和最终的超表面相位

Fig. 3. The design process of metasurface phase including the vortex phase, the offset feed compensation phase, the convergence compensation phase, and the final metasurface phase.

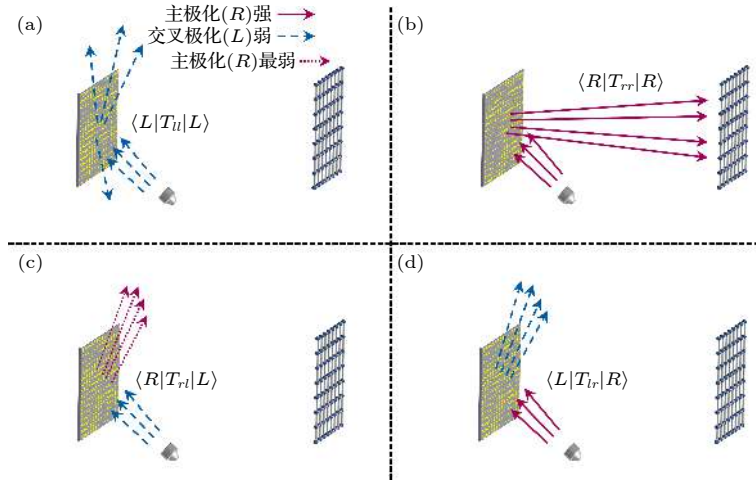


图 4 四种转化过程的场路径描述 (a) 激励的交叉极化到交叉极化; (b) 激励的主极化到主极化; (c) 激励的交叉极化到主极化; (d) 激励的主极化到交叉极化

Fig. 4. Path description of field for the four transformation processes: (a) Excited cross polarization to cross polarization; (b) excited main polarization to main polarization; (c) excited cross polarization to main polarization; (d) excited main polarization to cross polarization.

在偏馈情况下只会受到镜面反射. 由于本例中幅度值 ($|r_{rl}|$, $|r_{lr}|$) 被设计的尽可能小, 这些由超表面引起的交叉极化转化也是较弱的 (见图 4(c) 和图 4(d)). 结合上述分析, 该偏馈式涡旋波产生装置通过合理设计有效控制电磁波的转化和选择性传播, 避免了由天线和超表面性能引起的交叉极化的影响, 最终在观测平面处形成场增强、低交叉极化的涡旋波.

3 仿真验证和实验测量结果

3.1 仿真验证

按照上述参数和超表面单元构造出超表面, 馈源使用右旋圆极化平面阿基米德螺旋天线, 在工作频率 8.5 GHz 的轴比为 1.9 dB. 观测平面设置在 $z = 150$ mm, 大小为 100 mm $\times$ 100 mm. 为突出该设计装置优势, 三个案例被仿真并进行对比: 1) 偏馈 $\mathbf{r}_f = [-8p, 0, 8p]$, 有汇聚项 $\mathbf{r}_o = [0, 0, 24p]$; 2) 偏馈 $\mathbf{r}_f = [-8p, 0, 8p]$, 无汇聚项 $\mathbf{r}_o = [0, 0, \infty]$; 3) 正馈 $\mathbf{r}_f = [0, 0, 8p]$, 有汇聚项 $\mathbf{r}_o = [0, 0, 24p]$. 分别将三个案例中 $\mathbf{r}_f$, $\mathbf{r}_o$ 和 $l = 1$ 代入 (3) 式得到对应的相位面, 并按照节 2.2 中所述方法旋转单元的取向角得到对应的超表面, 最后整个 OAM 产生装置 (示意图见图 1), 分别生成模式数 $l = 1$ 的涡旋波束进行比较. 在观测面的到的结果如图 5 所示. 比较图 5(a) 和图 5(b) 可以看出, 虽然两种情况下都能产生期望的涡旋波模式数和低的交叉极化, 但有

无汇聚项会直接影响近场涡旋波的波束宽度和电场强度. 比较图 5(a) 和图 5(c) 可以看出, 与偏馈相比, 正馈会导致一个相对较大的交叉极化场. 该交叉极化场 (本例中为左旋 L) 的产生可以由如下原因: 1) 馈源遮挡以及馈源的背向辐射引起的反射场干扰, 产生交叉极化场; 2) 由超表面转化效率引入的交叉极化场, 该过程描述为 $\langle L|T_{lr}|R \rangle$; 3) 由馈源交叉极化引入的场, 该过程描述为 $\langle L|T_{ll}|L \rangle$. 本文提出的偏馈设计可以有效地避免上述交叉极化的产生 (交叉极化场被折射到其它方向见图 4), 最终能在期望方向更高效地产生高性能的涡旋波束.

3.2 实验结果

通过印制线路板 (printed circuit board, PCB) 工艺, 可以加工出上述单层反射式超表面, 具体参数与节 2.2 中描述一致 (即 $l = 1$, $\mathbf{r}_f = [-8p, 0, 8p]$, $\mathbf{r}_o = [0, 0, 24p]$). 具体实物图见图 6, 图 6(a) 和图 6(b) 分别是超表面的正面与反面, 介质板上下金属为厚度 0.018 mm 的铜, 介质板为厚度 3 mm 的 F4B ($\epsilon_r = 2.65 + 0.002j$). 超表面与馈源用 3D 打印定制的支架固定并对准如图 6(c) 所示, 具体空间位置和设置参数与仿真中给出的偏馈汇聚模型一致. 最后我们将整个涡旋波发生装置放置暗室中测量其方向图, 测量系统为法国 MVG 集团的 SATIMO 天线测量系统, 测量场景如图 6(d) 所示. 通过探头

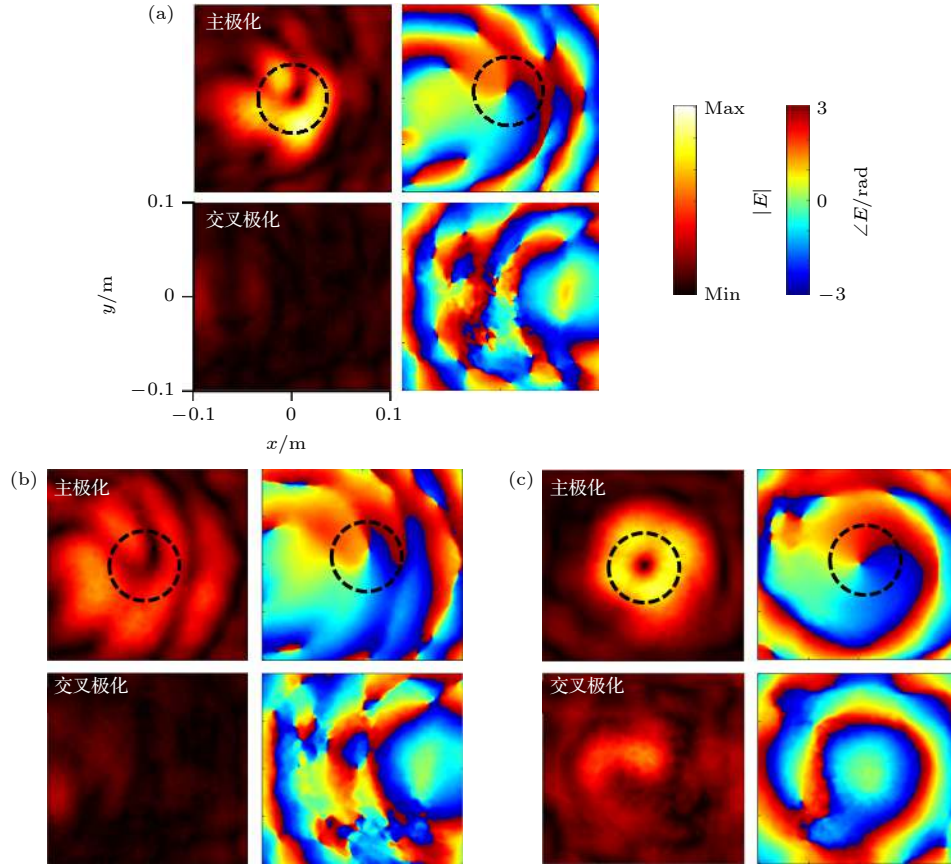


图 5 三个具体案例被仿真并进行场采样对比 (观测平面设置在 $z = 150$ mm, 大小为 100 mm $\times$ 100 mm) (a) 偏馈 $\mathbf{r}_f = [-8p, 0, 8p]$, 有汇聚项 $\mathbf{r}_o = [0, 0, 24p]$; (b) 偏馈 $\mathbf{r}_f = [-8p, 0, 8p]$, 无汇聚项 $\mathbf{r}_o = [0, 0, \infty]$; (c) 正馈 $\mathbf{r}_f = [0, 0, 8p]$, 有汇聚项 $\mathbf{r}_o = [0, 0, 24p]$
 Fig. 5. The sampling field for three specific cases (the observation plane at $z = 150$ mm, and the size 100 mm $\times$ 100 mm): (a) Off-set reflector with convergence term; (b) offset reflector without convergence term; (c) forward reflector with convergence term.

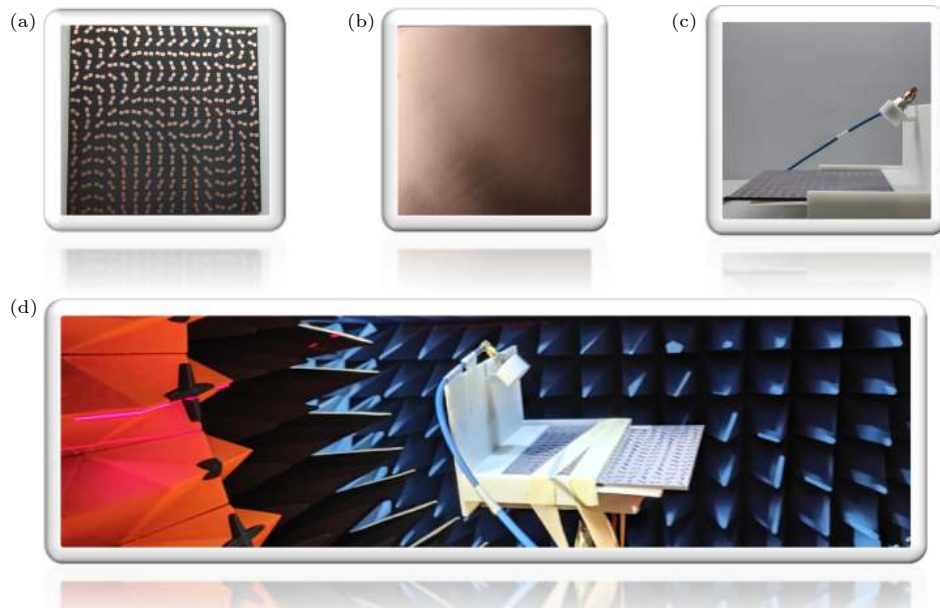


图 6 实物照片 (a) 超表面正面; (b) 超表面背面; (c) 偏馈式涡旋波发生装置; (d) 暗室测量图

Fig. 6. The photograph of the specific generator and the fabricated metasurface: (a) The front view of the metasurface; (b) the back view of the metasurface; (c) the offset-fed vortex wave generator; (d) the measurement scene in anechoic chamber.

探测近场信息后,该系统可以计算出远场方向图见图7.从图7的增益图中可以看出,其主极化辐射沿正 z 方向即 $\theta = 0^\circ$ 且增益达到14 dB.甜甜圈状的方向图和一个周期的螺旋相位证明了 $l = 1$ 涡旋波的产生.对于交叉极化场,其主瓣如图4(d)所示,从 $(\theta = 45^\circ, \varphi = 180^\circ)$ 方向入射被有效的折射到 $(\theta = 45^\circ, \varphi = 0^\circ)$ 方向.测量结果与理论设计一致,有效地验证了方法可行性.

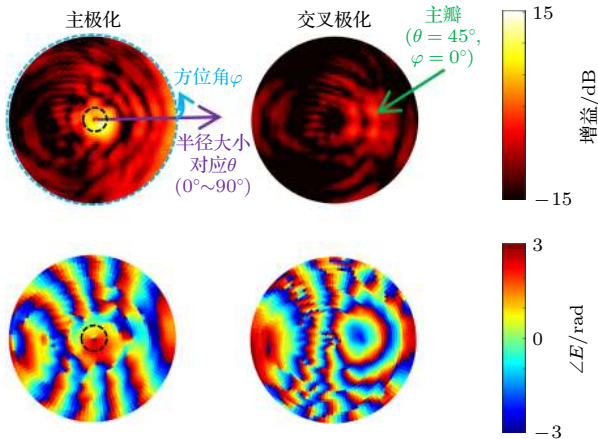


图7 上半平面的远场测量结果,包括主、交叉极化的增益和电场相位图,其中半径大小对应于 θ 范围 0° 到 90°

Fig. 7. Far-field measurement results of the upper half plane including the gain and phase pattern of the co and cross polarization.

4 结 论

本文提出了一种基于反射超表面的偏馈式涡旋波产生装置,实现了场增强低交叉极化涡旋波的产生.其主要手段是利用偏馈设置和设计具有极化选择特性的超表面.该方案解决了由馈源遮挡、超表面转化效率低和馈源交叉极化所引起的干扰.通过与传统的正馈、非汇聚超表面进行了比较,验证了该装置的汇聚与低交叉极化特性,并通过实验测量验证方案的可行性.

参考文献

[1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P

- 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Kim H, Park J, Cho S W, Lee S Y, Kang M, Lee B 2010 *Nano Lett.* **10** 529
- [3] Thidé B, Then H, Sjöholm J, Palmer K, Bergman J, Carozzi T D, Istomin Y N, Ibragimov N H, Khamitova R 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 087701
- [4] Jiang X, Liang B, Cheng J C, Qiu C W 2018 *Adv. Mater.* **30** 1800257
- [5] Guo Z Y, Liu H J, Li J J, Zhou H P, Guo K, Gao J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 244301 (in Chinese) [郭忠义, 刘洪郡, 李晶晶, 周红平, 郭凯, 高隽 2020 物理学报 **69** 244301]
- [6] Liu K, Cheng Y, Gao Y, Li X, Qin Y, Wang H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 164102
- [7] Herring R A 2011 *Science* **331** 155
- [8] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner A E, Ramachandran S 2013 *Science* **340** 1545
- [9] Yan Y, Xie G, Lavery M P J, Huang H, Ahmed N, Bao C, Ren Y, Cao Y, Li L, Zhao Z, Molisch A F, Tur M, Padgett M J, Willner A E 2014 *Nat. Commun.* **5** 4876
- [10] Chen Y, Zheng S, Li Y, Hui X, Jin X, Chi H, Zhang X 2016 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **15** 1156
- [11] Liu K, Liu H, Qin Y, Cheng Y, Wang S, Li X, Wang H 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 3850
- [12] Yang Y, Zhao Z, Ding X, Nie Z, Liu Q-H 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 140
- [13] Chen M L N, Jiang L J, Sha W E I 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 477
- [14] Yang L J, Sun S, Sha W E I 2020 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting Montréal, Québec, Canada, July 5–10, 2020* pp923–924
- [15] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [16] Yu S, Li L, Shi G, Zhu C, Zhou X, Shi Y 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 121903
- [17] Yu S, Li L, Shi G 2016 *Appl. Phys. Express* **9** 082202
- [18] Jiang S, Chen C, Zhang H, Chen W 2018 *Opt. Express* **26** 6466
- [19] Chen M, Li J J, Sha W 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 064506
- [20] Xu H X, Liu H, Ling X, Sun Y, Yuan F 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 7378
- [21] Ran Y, Liang J, Tong C, Li H 2018 *Opt. Commun.* **427** 101
- [22] Li X N, Zhou L, Zhao G Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 238101 (in Chinese) [李晓楠, 周璐, 赵国忠 2019 物理学报 **68** 238101]
- [23] Yang L J, Sun S, Sha W E I 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 2166
- [24] Yang L J, Sun S, Sha W E I 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2001711
- [25] Liu H, Xue H, Liu Y, Feng Q, Li L 2020 *IEEE Access* **8** 126504
- [26] Zhang K, Yuan Y, Zhang D, Ding X, Ratni B, Burokur S N, Lu M, Tang K, Wu Q 2018 *Opt. Express* **26** 1351
- [27] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Wu X, Xu Z, Zhang A X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124102 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 吴翔, 徐卓, 张安学 2015 物理学报 **64** 124102]

Offset-fed vortex wave generator based on reflective metasurface^{*}

Sun Sheng^{1)†} Yang Ling-Jun¹⁾ Sha Wei²⁾

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

2) (*College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(Received 12 April 2021; revised manuscript received 17 May 2021)

Abstract

Orbital angular momentum, as a basic physical quantity of electromagnetic waves, has been widely studied since 1992. Recently, the geometric phase metasurface, which is also known as Pancharatnam-Berry (P-B) phase metasurface, has been proposed. Because of its frequency-independent and angle-dependent phase control characteristics, it can generate high-performance and broadband vortex wave. However, the current design of reflective metasurface encounters the following problems: 1) the reflected vortex wave is partly blocked by the feeding antenna; 2) in practical applications, the cross-polarized field will inevitably be induced due to the feed antenna and the reflective metasurface. How to avoid the cross-polarization is still worth further investigating. In this work, an offset-fed vortex wave generator is proposed. It consists of a right-handed circularly polarized Archimedes spiral antenna and a reflective metasurface. Firstly, the offset feeding design is introduced to avoid generating the cross-polarized fields caused by the feeding antenna. A geometric meta-atom of the reflective metasurface is designed at a working frequency of 8.5 GHz. By regularly arranging meta-atoms with different orientation angles, the convergence and phase compensation functions are imparted only to the co-polarization field. The cross-polarized field is intentionally weakened and refracted along other directions. Subsequently, a low cross-polarized vortex wave with an enhancement effect is obtained at the desired observation position. There are three contributions made in this work: 1) a P-B meta-atom is proposed to fabricate the reflective metasurface; 2) the conversion relationship between the co-polarized and cross-polarized field is studied from the initial state to the final state, and the four transformation processes are demonstrated in detail; 3) an offset-fed vortex wave generator is established which allows one to generate high-performance vortex beam with arbitrary OAM mode. The experimental results are in good agreement with those simulation results, proving the proposed method effective and feasible. The proposed design shows its advantages including simple structure, polarization selectivity, and regional field enhancement effect, which has great potential applications in vortex wave communication and OAM-based target detection.

Keywords: metasurfaces, vortex wave, offset-fed, Pancharatnam-Berry phase

PACS: 84.40.Ba, 89.70.Hj, 42.50.Tx, 42.79.Fm

DOI: 10.7498/aps.70.20210681

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61971115, 61975177, 61721001).

[†] Corresponding author. E-mail: sunsheng@uestc.edu.cn