



基于平面相控阵的轨道角动量涡旋电磁波扫描特性

蒋基恒 余世星 寇娜 丁召 张正平

Beam steering of orbital angular momentum vortex wave based on planar phased array

Jiang Ji-Heng Yu Shi-Xing Kou Na Ding Zhao Zhang Zheng-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 238401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211119

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211119>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于平面相控阵的轨道角动量 涡旋电磁波扫描特性*

蒋基恒¹⁾²⁾³⁾ 余世星^{1)2)3)†} 寇娜^{1)2)3)‡} 丁召¹⁾²⁾³⁾ 张正平¹⁾²⁾³⁾

1) (贵州大学大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

2) (贵州大学, 贵州省微纳电子与软件技术重点实验室, 贵阳 550025)

3) (贵州大学, 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心, 贵阳 550025)

(2021年6月13日收到; 2021年7月12日收到修改稿)

轨道角动量涡旋电磁波可以在物理层面为信息的调制提供新的维度, 这在无线通信和雷达成像领域中拥有很大的应用前景. 将相控阵波束扫描技术应用于涡旋电磁波, 可用于增加涡旋电磁通信的覆盖范围, 也可用于扩大涡旋雷达的探测空域. 首先, 本文讨论了涡旋电磁波束偏转的实现原理, 并给出了实现波束扫描时平面相控阵口径上所需的相位分布公式. 其次, 考虑到相控阵天线在波束扫描以及轨道角动量模式可重构方面的独特优势, 设计并制作了一款阵面规模为 8×8 的平面相控阵, 并在 10 GHz 频率下实验验证了轨道角动量涡旋电磁波的波束扫描和模式可重构效果. 最后, 本文讨论并分析了涡旋电磁波束偏转后的性能变化. 仿真和实验结果显示, 平面相控阵在大角度波束扫描时会发生方向畸变的问题. 同时, 本文还研究了涡旋电磁波的模式纯度关于波束偏转角度和模式数的变化情况. 本文的研究结果表明, 使用平面相控阵天线在一定空域内可以有效地实现涡旋电磁波束扫描, 并可为涡旋电磁波通信和涡旋雷达提供参考借鉴.

关键词: 轨道角动量, 涡旋电磁波, 波束扫描, 平面相控阵

PACS: 84.40.Ba, 07.57.-c, 32.30.Bv, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.70.20211119

1 引言

随着无线通信技术的飞速发展, 大数据和云计算等领域的数据传输速率呈指数级增长, 如何提高无线通信系统容量和无线频谱利用效率已成为当务之急. 携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的涡旋电磁波的提出被认为有望解决这一问题, 它可以在不增加频带带宽的前提下, 在同一频率、同一信道中同时传输多个互不干扰的正交模式, 这为信息的调制提供了新的维度^[1]. OAM 涡旋电磁波的特征在于有一个形如 $\exp(il\varphi)$ 的波前相位因子, 其中 φ 是极坐标下的方位角, l 是 OAM

模式数^[2]. 与传统电磁波不同的是, OAM 模式数 l 可以任意取值, 且不同模式具有相互正交的特性, 因此利用 OAM 模式数进行编码和复用, 相比于传统通信技术, 能极大提高频谱利用率^[3]. 与此同时, 有研究显示 OAM 涡旋电磁波可以提高雷达成像的分辨率, 因而 OAM 在雷达领域也具有重要的应用前景^[4-6]. 近年来, 关于 OAM 涡旋电磁波的相关研究发展十分迅速, 特别是在微波频段方面的研究已成为热点话题. 如何才能高效地产生 OAM 涡旋电磁波是研究者们广泛关注的一个关键问题. 目前, 研究者们已提出了多种天线用于产生 OAM 波束, 如螺旋相位板^[7]、螺旋反射面^[8]、环形天线阵^[9,10]、行波天线^[11,12]、介质谐振天线^[13]、平面透

* 国家自然科学基金 (批准号: 61961006) 和贵州省科学技术基金 (批准号: 黔科合基础 [2020]1Y257) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sxyu1@gzu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: nkou@gzu.edu.cn

射阵 [14,15]、平面反射阵 [16–18]、以及人工电磁超表面 [19–22] 等。然而, 现有文献报道的涡旋电磁波天线, 产生的大多为法向波束, 以及偏转方向固定的波束 [23]。随着涡旋电磁通信和涡旋雷达技术的发展, 将实时动态的波束扫描技术引入 OAM 涡旋电磁波是发展的必然趋势 [24,25]。平面相控阵天线 [26] 作为一种较为成熟的技术, 具有结构简易、剖面低、波束相位调控灵活等特点, 已广泛应用于雷达和无线通信系统中, 因此将其用于涡旋电磁波束的扫描具有一定的可行性。本文基于 8×8 规模的平面相控阵天线, 对涡旋波束偏转进行了定性分析, 研究了平面阵列在偏转角度以及模式数变化时所产生的涡旋波束特性, 相关研究结果可为未来涡旋雷达和涡旋电磁通信提供理论支持。

2 涡旋波束扫描原理以及 OAM 模式纯度计算

2.1 涡旋波束扫描原理

如图 1 所示, 当 OAM 涡旋电磁波束的指向为任意角度 (θ, φ) 时, 可以通过坐标旋转变换设置一个相对直角坐标系 $X'Y'Z'$, 使得波矢 \mathbf{k} 的方向与 Z' 轴重合。在此条件下, 用平面阵天线生成 OAM 波束, 平面阵上各单元的相位 Φ 可表示为

$$\Phi = l \cdot \text{atan} 2(y', x') - k_0 \cdot z', \quad (1)$$

其中 $\text{atan} 2(y, x)$ 是四象限反正切函数, 值域为 $[0, 2\pi]$; l 是 OAM 模式数; (x', y', z') 为天线单元在相对坐标系中的坐标位置。 (x', y', z') 与 (x, y, z) 之间的关系可以通过坐标系旋转建立, 具体表示为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中全局坐标系 XYZ 先围绕 Z 轴旋转角 φ , 然后围绕 Y' 轴旋转角 θ 。最后, 可以得到:

$$\begin{aligned} \Phi = l \cdot \text{atan} 2\{ & (-x \sin \varphi + y \cos \varphi), \\ & (x \cos \theta \cos \varphi + y \cos \theta \sin \varphi - z \sin \theta) \} \\ & - k_0(x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi - z \cos \theta). \end{aligned} \quad (3)$$

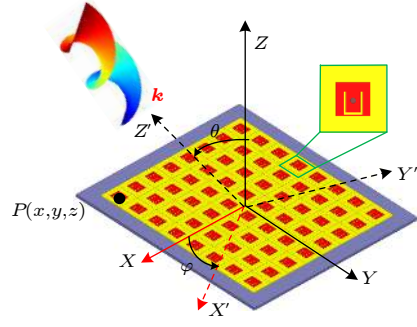


图 1 用于产生涡旋电磁波的平面阵列天线示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the planar array for generating vortex waves.

2.2 OAM 模式纯度计算

我们可以利用傅里叶变换进行模式分解, 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 [27]。其计算公式为

$$\psi(\varphi) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} A_l e^{il\varphi}, \quad (4)$$

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Psi(\varphi) e^{il\varphi} d\varphi, \quad (5)$$

其中 $\psi(\varphi)$ 是以 Z 轴为轴线的圆周上的相位, 模式 l 的模式纯度为 [28]

$$\text{Purity} = \frac{|A_l|^2}{\sum_{k=-\infty}^{+\infty} |A_k|^2}. \quad (6)$$

通过电场观测面测量出的 OAM 波前电场的幅度和相位信息, 运用以上公式计算出模式数 l 下的纯度。

3 仿真与实测分析

为了验证所提出的理论方法, 通过三维电磁场仿真软件对 8×8 平面阵列产生 OAM 涡旋电磁波的情况进行了定性分析。选定 $\varphi = 0^\circ$, θ 从 0° 扫描到 75° , 模式数为 $l = 1, 2, 3$ 。通过模拟仿真, 取出各偏转角度和各模式数下的相位分布和幅度分布, 算出轨道角动量涡旋波的模式纯度, 如图 2 所示。在扫描角度 $\theta \leq 40^\circ$ 时 $l = 1, 2, 3$ 模式均能保持较高的模式纯度, 当扫描角度大于 40° 时随着模式数的增加模式纯度的衰减速率也随之变大, 在 θ 从 0° 变化至 75° 的过程中模式纯度最低为 55% 以上,

模式 $l = 2$ 在 θ 从 0° 变化至 70° 的过程中模式纯度最低为 60% 以上, 另外模式 $l = 3$ 在 θ 从 0° 变化至 60° 的过程中模式纯度最低为 50% 以上. 图 3 显示了在固定 OAM 模数 $l = 1$ 的情况下, 当 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 和 75° 时所产生的 OAM 涡旋波束的 3D 方向图. 由图 3 可以分析出, 在 $l = 1$ 模式时, 当扫描角度大于 60° 时, 方向图会出现很明显的畸变和增益降低等问题.

为了进一步验证所提出的理论分析方法, 制作尺寸大小为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的平面天线阵列. 天线单元印刷在旺灵的 F4B 基板上 ($\epsilon_r = 2.65, \tan\delta = 0.001$), 并组装在 3D 打印的聚乳酸 (PLA) 材质支撑结构上. 天线单元连接至馈电网络, 所需的相位通过馈电网络中的数字移相器芯片 (Qorvo TGP2109-SM) 控制. 利用近场平面扫描技术测量了 OAM 涡旋波束的波前相位, 测量系统的工作频率为 10 GHz. 实验装置如图 4 所示.

首先, 固定天线, 将矢量网络分析仪 (VNA) 的端口 1 通过射频同轴线连接至天线阵的射频总

输入端 (RF-in), 采样平面距天线 1 m, 采样面的尺寸为 $0.8 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ (56×56 个采样点), 在测量装置的采样面上使用开口波导探头 (WR90) 通过射频同轴线连接至矢量网络分析仪的端口 2 采集待测天线的的数据, 其数据包括电场幅度和相位数据. 通过测试系统中内置的近远场变换算法, 还可得到待测天线远场辐射特性.

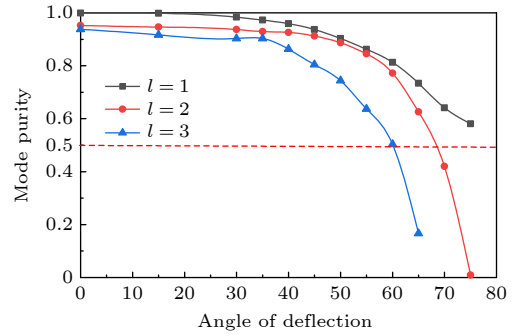


图 2 模式数为 $l = 1, 2, 3$ 时各 OAM 模式的纯度随偏转角度变化的情况

Fig. 2. OAM purity vary with angle of deflection with $l = 1, 2, 3$.

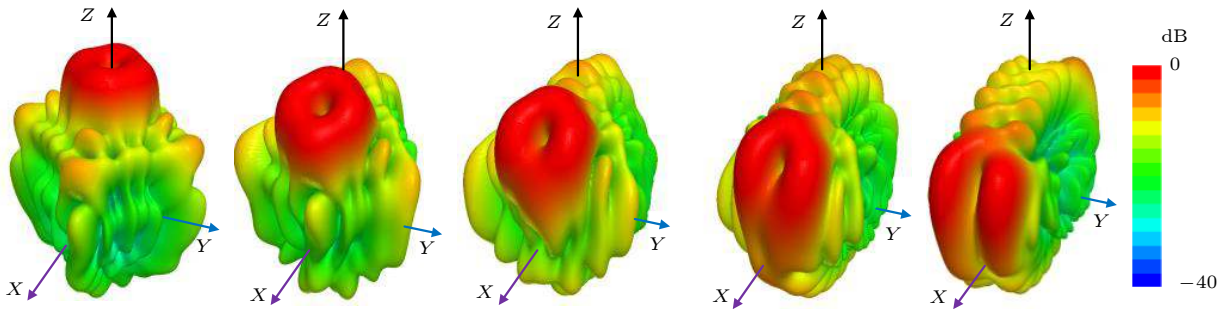


图 3 仿真三维远场方向图 ($l = 1$), $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ), (30^\circ, 0^\circ), (45^\circ, 0^\circ), (60^\circ, 0^\circ), (75^\circ, 0^\circ)$

Fig. 3. Simulated 3-D far-field radiation patterns, ($l = 1$), $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ), (30^\circ, 0^\circ), (45^\circ, 0^\circ), (60^\circ, 0^\circ), (75^\circ, 0^\circ)$.

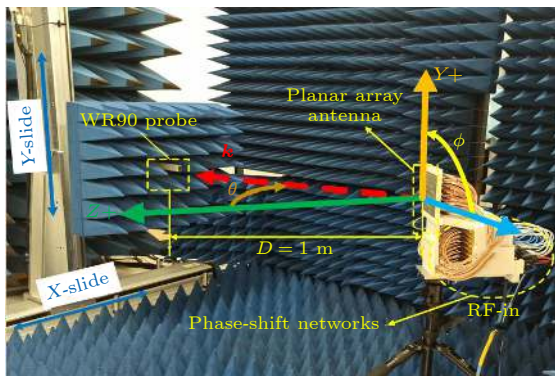


图 4 利用近场扫描技术测量 OAM 涡旋电磁波的实验装置

Fig. 4. Experimental setup for OAM wave measurement with near-field scanning technique.

通过计算机控制移相网络, 调节每个单元的所需的相位. 依次给天线单元馈电, 生成 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 方向的 OAM 涡旋波束. 这里选择了 OAM 的三种模式 $l = 1, 2, 3$ 来验证设计. 仿真和实测下的电场强度和相位分布如图 5 所示.

值得注意的是, 考虑到近场扫描测试系统是固定的, 这里通过旋转天线来匹配波束切换. 在图 5 展示的仿真和实测的电场强度和相位分布中, 整体上可以看出所激励的 OAM 模式的电场的幅度只能在一定的 θ 角上保持较高幅度值. 从测量和仿真的结果可以看出, 在 $\theta = 0^\circ, 30^\circ$ 时, 所测模式数的 OAM 波束的电场相位和幅度分布是完整的环形.

当扫描角 θ 大于 30° 时, 测出 OAM 波束的电场分布逐渐出现波纹, 尤其是当偏转角 θ 变大时. 而随着偏转角度增加和模式数增加波前相位和幅度分布出现畸变. 从图 5(a)—(d) 可以清晰地识别模式数为 $l = 1, l = 2$ 仿真与实测符合较好. 在模式数 $l = 2$ 时, 从相位分布也看出中心处也出现相位混乱, 随着偏转角度的增加混乱情况越来越明显. 在模式数 $l = 3$ 时的相位分布来看, 其有多个相位奇点, 但是 OAM 波束的中心区域为零深区域, 也就是说其电场分布很弱, 对通信系统来说并不会产生影响. 其实 OAM 波束的辐射作用主要集中在电场幅度很强的区域. 因此在提取 OAM 涡旋电磁波的模式纯度时, 是根据幅度大的区域为整个 OAM 涡旋电磁波主导作用的原则提取. 如下文图 7 中当模式数 $l = 3$ 时, 在提取出的模式纯度中占比最高的模式恰好是 $l = 3$. 随着偏转角度的增加, 相位图的中心区域变得越来越混乱, 另外从电场幅度变化情况看出, 随着模数的增加, OAM 束的散射更大; 随着偏转角度的增加, OAM 波束的散射也更大. 确切说, 零深

区域的面积随着模式数和偏转角度的增加而增大.

为了更好地探索主波束畸变的情况, 仿真与测量各模式数下的远场辐射方向图对比如图 6 所示. 测量的方向图是通过平面近远场反演变换得到的, 从仿真与实测结果看出低模式数时实测与仿真的方向图比较吻合. 在 OAM 波束的远场方向图中, 中心场点处的场强为零, 出现零深现象. 随着模式数增加和偏转角度增大方向图的零深区域逐渐变大, 零深深度逐渐减小, 其原因是采用平面阵列天线在偏转角度变大时产生 OAM 波束, 其有效口径也会逐渐变小, 相当于用于产生 OAM 波束的天线单元数也会变少. 由于一定天线单元数量的阵列可以产生的最大 OAM 模式数是有限的, 所以随着扫描角度的增大, 有效口径的减小, 其所能产生的最大 OAM 模式数越来越小. 因此, 随着偏转角度的增加, 当产生的一定模式数的 OAM 波束均突破有效口径所能产生的最大模式数, 就会造成模式纯度下降和波束畸变等问题. 另外实测出现较明显的波纹是由于安装误差和环境噪声影响造成的.

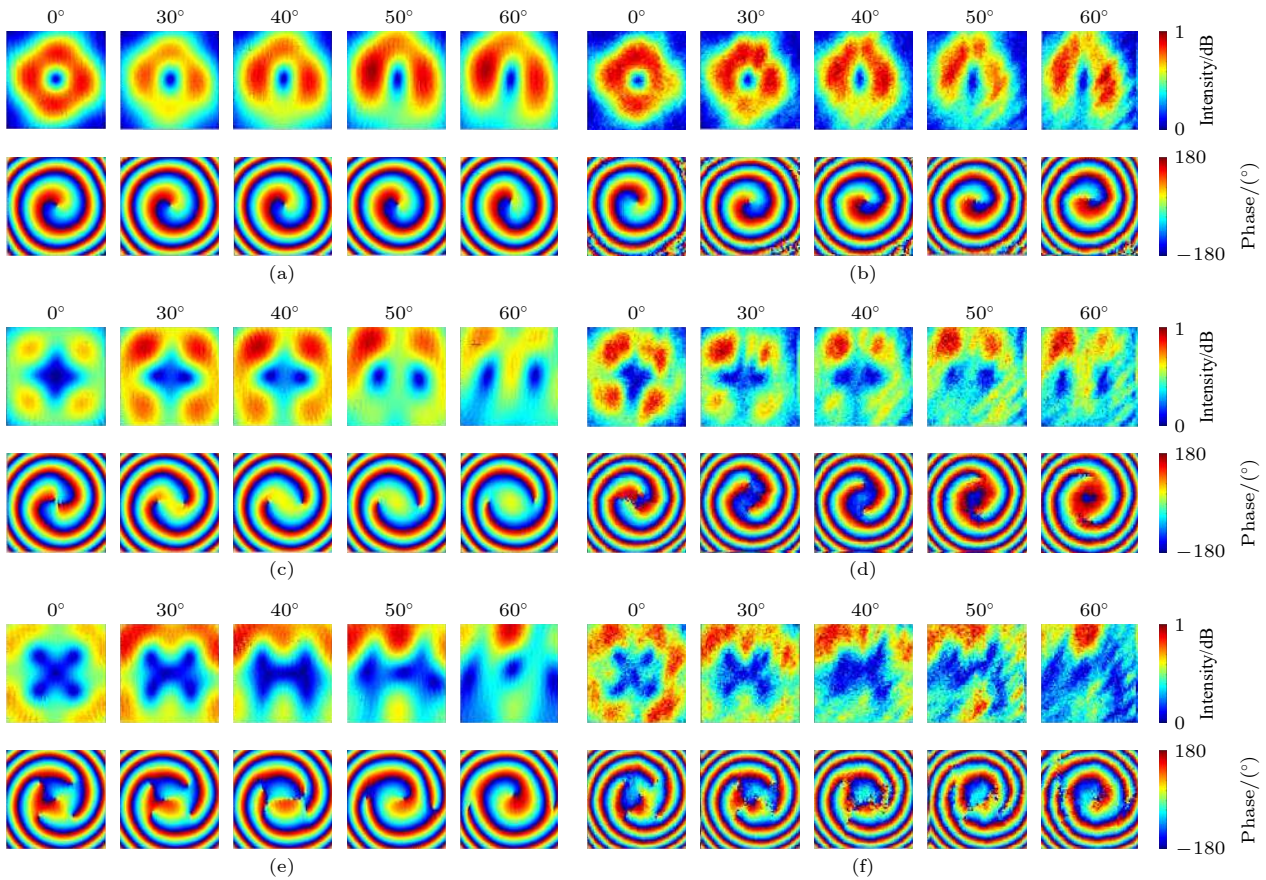


图 5 幅度和相位分布 (a) 仿真 $l = 1$; (b) 实测 $l = 1$; (c) 仿真 $l = 2$; (d) 实测 $l = 2$; (e) 仿真 $l = 3$; (f) 实测 $l = 3$

Fig. 5. Phase and amplitude distributions: (a) Simulated $l = 1$; (b) measured $l = 1$; (c) simulated $l = 2$; (d) measured $l = 2$; (e) simulated $l = 3$; (f) measured $l = 3$.

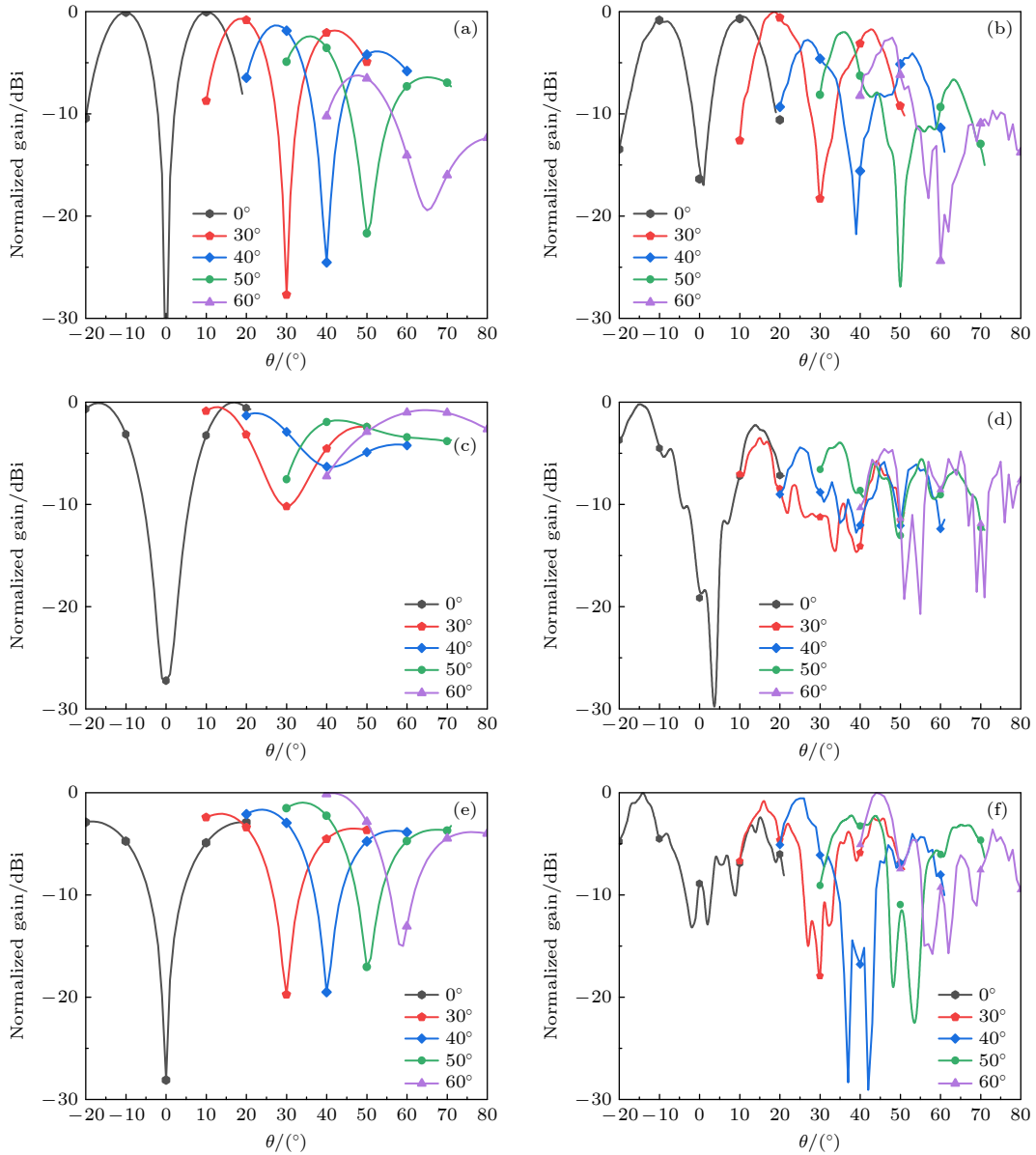


图 6 XOZ -平面上的远场仿真与实测结果 (a) 仿真 $l = 1$; (b) 实测 $l = 1$; (c) 仿真 $l = 2$; (d) 实测 $l = 2$; (e) 仿真 $l = 3$; (f) 实测 $l = 3$

Fig. 6. The simulated and measured radiation patterns of the array in XOZ -plane: (a) Simulated $l = 1$; (b) measured $l = 1$; (c) simulated $l = 2$; (d) measured $l = 2$; (e) simulated $l = 3$; (f) measured $l = 3$.

最后, 从仿真和实测出的场数据中提取相位和幅度数据, 运用 (6) 式计算出各模式的纯度大小, 将 OAM 涡旋电磁波仿真与实测的模式纯度进行对比如图 7 所示. 在 $l = 1, 2, 3$ 时波束偏转从 0° 到 60° 模式纯度仿真与实测趋势基本一致, 实测的模式纯度略低于仿真. 其中模式 $l = 1, 2$ 偏转到 60° 时纯度接近 50%, 模式 3 偏转到 50° 时纯度接近 50%. 仿真与实测结果表明随着模式数增加 OAM 波束逐渐发散, 随着扫描角度增加进一步促使 OAM 波束加速发散.

4 结 论

本文讨论了使用平面相控阵天线进行 OAM 涡旋电磁波束扫描的实现方法, 通过仿真和实验研究了 10 GHz 频率 8×8 规模的平面相控阵天线, 在不同 OAM 模式在不同角度偏转时的性能变化问题. OAM 涡旋电磁波在偏转时, 随着模式数的增加其电场能量会发生一定的横向扩散, 电场中心的空洞会逐渐扩张, 导致模式纯度逐渐降低, 同时随着扫描角度增加进一步促使涡旋波束加速

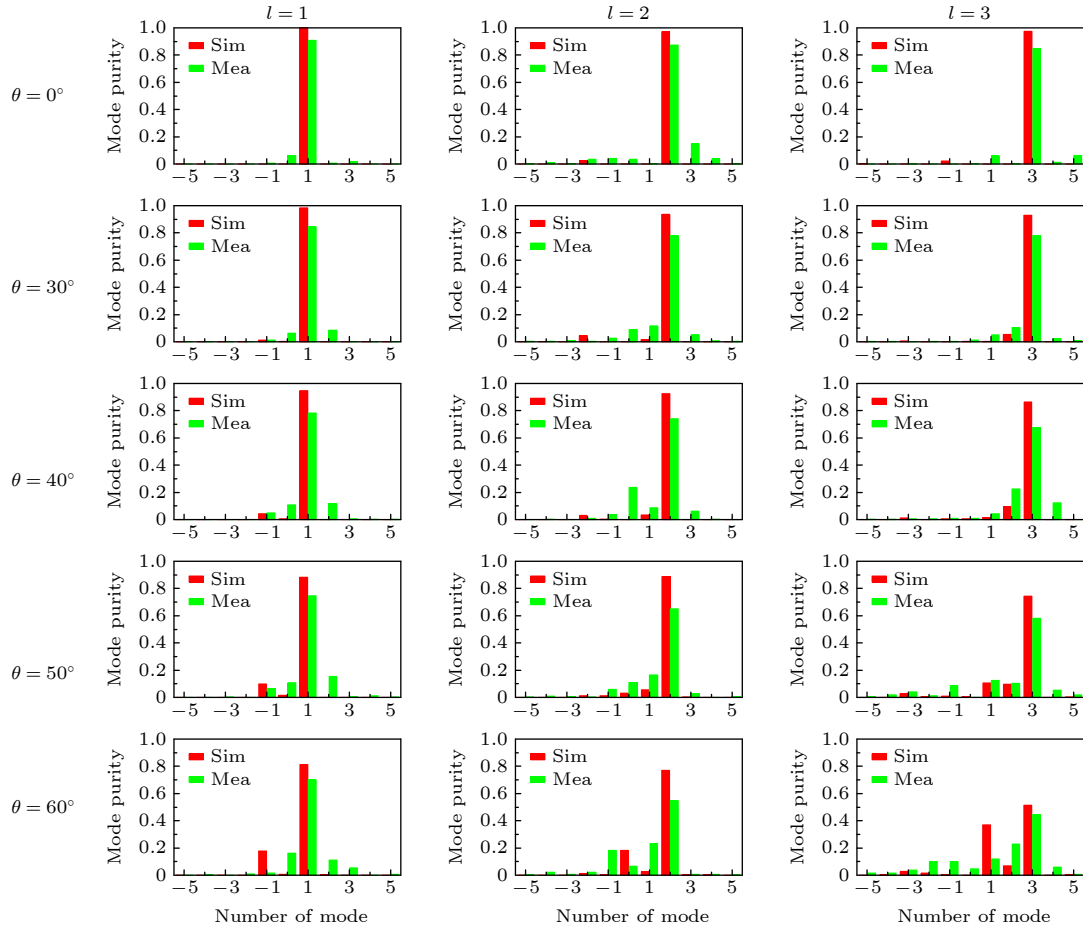


图 7 各模式数下随扫描角度变化的仿真与实测模式纯度对比
Fig. 7. OAM purities of different modes and scanning angles.

发散. 本文验证了平面相控阵天线可以在一定角域范围内产生较高 OAM 模式纯度的涡旋电磁波, 相关结果可为未来涡旋雷达和涡旋电磁通信提供参考借鉴.

参考文献

[1] Thidé B, Then H, Sjöholm J, Palmer K, Bergman J, Carozzi T D, Istomin Ya N, Ibragimov N H, Khamitova R 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 087701
 [2] Mohammadi S M, Daldorff L K, Bergman J E, Karlsson R L, Thidé B, Forozesh K, Carozzi T D, Isham B 2009 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 565
 [3] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, Thidé B, Bianchini A, Romanato F 2012 *New J. Phys.* **14** 033001
 [4] Bu X, Zhang Z, Chen L, Liang X, Tang H, Wang X 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **17** 764
 [5] Liu K, Gao Y, Li X, Cheng Y 2018 *AIP Adv.* **8** 025002
 [6] Liu K, Cheng Y, Gao Y, Li X, Qin Y, Wang H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 0164102
 [7] Wu W B, Sheng Z Q, Wu H W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 054102 (in Chinese) [吴文兵, 圣宗强, 吴宏伟 2019 物理学报 **68** 054102]
 [8] Tamburini F, Mari E, Thidé B, Barbieri C, Romanato F 2011

Appl. Phys. Lett. **99** 0204102
 [9] Yuan T, Cheng Y, Wang H, Qin Y 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 688
 [10] Lin M, Gao Y, Liu P, Liu J 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 3510
 [11] Zheng S, Hui X, Jin X, Chi H, Zhang X 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 1530
 [12] Zhang W, Zheng S, Hui X, Chen Y, Jin X, Chi H, Zhang X 2016 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 194
 [13] Yu Z, Guo N, Fan J 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 601
 [14] Gao X, Tang L G 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 038101 (in Chinese) [高喜, 唐李光 2021 物理学报 **70** 038101]
 [15] Lü HH, Huang Q L, Yi X J, Hou J Q, Shi X W 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 881
 [16] Li F, Chen H, Zhou Y, You J, Panoiu N C, Zhou P, Deng L 2020 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **69** 1829
 [17] Huang H, Li S 2019 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 432
 [18] Chen G T, Jiao Y. C, Zhao G 2018 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **18** 182
 [19] Wen Y, Li G Z, Tian H M, Ran S Guo J 2021 *Chin. Phys. B* **30** 58103
 [20] 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]
 [21] Tang S, Cai T, Liang J G, Xiao Y, Zhang C W, Zhang Q, Hu Z, Jiang T 2019 *Opt. Express* **27** 1816

- [22] Meng X, Chen X, Yang L, Xue W, Zhang A, Sha W E, Cheng Q 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 243503
- [23] Feng J L, Shi H Y, Wang Y, Zhang A X, Xu Z 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 135201 (in Chinese) [冯加林, 施宏宇, 王远, 张安学, 徐卓 2020 物理学报 **69** 135201]
- [24] Yuan T, Cheng Y, Wang H, Qin Y 2016 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 704
- [25] Zheng S, Chen Y, Zhang Z, Jin X, Chi H, Zhang X, Chen Z N 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 1352
- [26] Liu K, Liu H, Qin Y, Cheng Y, Wang S, Li X, Wang H 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 3850
- [27] Jack B, Leach J Frankearnold S 2009 *New J. Phys* **10** 6456
- [28] Shi Y, Wu Q W, Ming J, 2021 *IEEE Access* **9** 63122

Beam steering of orbital angular momentum vortex wave based on planar phased array*

Jiang Ji-Heng¹⁾²⁾³⁾ Yu Shi-Xing^{1)2)3)†} Kou Na^{1)2)3)‡}
 Ding Zhao¹⁾²⁾³⁾ Zhang Zheng-Ping¹⁾²⁾³⁾

1) (College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

2) (Key Laboratory of Micro-Nano-Electronics and Software Technology of Guizhou Province, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

3) (Engineering Research Center of Power Semiconductor Device Reliability, the Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(Received 13 June 2021; revised manuscript received 12 July 2021)

Abstract

Orbital angular momentum (OAM) vortex electromagnetic waves can provide a new degree of freedom for information modulation at a physical level, which has great prospects of applications in the fields of wireless communication and radar imaging. The application of beam scanning techniques of phased array to OAM vortex electromagnetic wave can increase its communication coverage and expand the detection coverage of vortex radars. Firstly, in this paper, the principle of generating the beam steering vortex electromagnetic beam is discussed and the compensated phase formula for generating beam steering OAM beams is given by planar phased array. Secondly, considering the advantages of phased array antennas in beam scanning and OAM reconfigurability, a planar phased array with 8×8 antenna elements at 10 GHz is designed and fabricated. The performances of OAM beam steering and mode reconfigurability are verified. Finally, the performance changes of the deflecting OAM vortex beam at different scanning angles are discussed and analyzed. Simulations and measurements both show that there exist pattern distortion problems when steering angle of OAM beam becomes large. In this paper, the variation of the OAM mode purity is also studied when the scanning angle and the OAM mode number change. The results show that the planar phased array antennas can effectively generate the beam steering OAM vortex beams in a certain angle range. Hence, this paper can provide a reference for the OAM vortex electromagnetic wave communication and the vortex radar in the future.

Keywords: orbital angular momentum, vortex wave, beam steering, planar phased array

PACS: 84.40.Ba, 07.57.-c, 32.30.Bv, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.70.20211119

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61961006) and the Science and Technology Foundation of Guizhou Province, China (Grant No. QKHJC [2020]1Y257).

† Corresponding author. E-mail: sxyu1@gzu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: nkou@gzu.edu.cn