

# 宽带可折叠轨道角动量反射阵天线

倪涛, 陈官韬

西安导航技术研究所, 陕西 西安

收稿日期: 2023年2月23日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

## 摘要

本文介绍了一款新型宽带可折叠轨道角动量反射阵天线。该天线主要包含三部分: 第一部分是上层线极化栅格, 它可以透过一种线极化波同时传输另一种与之正交的线极化波; 第二部分是下层双极化轨道角动量反射阵面, 它可以产生高增益轨道角动量涡旋电磁波, 同时对馈源发出的线极化波起到极化扭转的作用, 实现反射阵的折叠性能, 降低反射阵天线的纵向剖面高度; 第三部分是宽带馈源天线。为了验证本文设计的折叠轨道角动量反射阵性能, 在HFSS中自动化建模仿真, 通过仿真结果可以看出, 该天线在54~66 GHz宽带范围内可辐射轨道角动量电磁波并获得20%的3-dB增益带宽, 同时该天线相比于传统反射阵天线, 其纵向高度缩减为原来的一半, 实现了低剖面性能。本文设计的轨道角动量反射阵天线具有宽带、高增益以及低剖面性能, 在通信、成像等平台具有潜在的应用价值。

## 关键词

宽带, 可折叠, 反射阵, 轨道角动量, 线极化栅格

# Wideband Folded Orbital Angular Momentum Reflectarray Antenna

Tao Ni, Guantao Chen

Xi'an Research Institute of Navigation Technology, Xi'an Shaanxi

Received: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Mar. 24<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

This paper presents a new wideband foldable orbital angular momentum (OAM) reflectarray antenna. The antenna consists of three parts: The first part is the upper linearly polarized grid (LPG), which can transmit one linearly polarized wave through its orthogonal linearly polarized wave at the same time. The second part is the lower dual-polarized OAM reflectarray, which can generate high gain OAM vortex electromagnetic wave. It plays the role of polarization torsion on the linearly polarized wave emitted by the feed-source at the same time, so as to realize the folding performance of the reflectarray, which reduces the longitudinal profile of the reflectarray antenna. The third part is the wi-

deband feed antenna. In order to verify the proposed folded OAM reflectarray performance in this paper, modeling and simulation were conducted in the ANSYS HFSS software. The simulation results show that the proposed antenna achieves OAM performance in the wide band range of 54~66 GHz and obtains 20% 3-dB gain bandwidth. Meanwhile, compared with the traditional reflectarray, the longitudinal height of the proposed antenna was reduced to half of the original, achieving low profile performance. Moreover, the proposed antenna in this paper has wideband, high gain and low-profile performance, and has potential application value in communication, imaging and other platforms.

## Keywords

Wideband, Folded, Reflectarray, Orbital Angular Momentum (OAM), Linearly Polarized Grid (LPG)

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

OAM 技术作为一种复用技术在无线通信中逐渐成为研究的热点之一。由于 OAM 各个模态之间存在天然的正交特性, 通过在正交模式上加载多路信号, 可以得到多个相互独立的 OAM 信道, 在提升系统容量和频谱利用率方面具有潜在的应用价值。传统的天线实现 OAM 的方式有螺旋相位板、抛物面、圆环阵列等, 但是这些天线都有各自的缺点, 比如螺旋相位板介质损耗大, 抛物面天线难加工, 圆环阵列增益低等[1] [2]。其中应用最多的是圆环阵列[3], 其设计方法简单, 加工成本低廉, 微带贴片呈圆周分布, 对每个微带贴片加载特定的幅度和相位, 可实现多个模式的 OAM 涡旋电磁波。作为一种新型的高增益天线, 反射阵天线结合了反射面天线和阵列天线的优势, 具有设计简单、成本低、损耗小、波束灵活可控等优点, 逐渐成为国内外学者关注的热点之一[4] [5]。但由于其采用空馈形式, 这一固有结构导致其剖面过高, 严重限制了其在某些领域的应用。为了解决这一问题, 国外学者 Pilz 和 Menzel 提出了折叠反射阵天线[6] [7]。与传统空馈反射阵天线相比, 折叠反射阵天线采用线极化栅使得传统反射阵天线的纵向高度降低为原来的一半, 同时降低了天线的交叉极化电平。因此, 结合 OAM 技术和折叠反射阵二者的优点, 设计一款宽带折叠 OAM 反射阵天线具有重要的理论意义和潜在的应用价值。

不同于以前传统的反射阵天线, 本文提出的一种宽带可折叠 OAM 反射阵天线设计, 其纵向高度缩减为原来的一半, 实现了低剖面性能。此外其具有宽带、高增益性能, 在未来通信、成像等平台具有潜在的应用价值。

## 2. 天线设计

### 2.1. 工作原理

如图 1 所示, 折叠 OAM 反射阵天线主要包含一个上层线极化栅格, 一个下层的 OAM 反射阵以及一个位于下层中心位置的线极化馈源。其中线极化栅格可以反射一种线极化波, 同时传输与之正交的另一种线极化波。馈源发出的一种线极化球面波(红色虚线)到达上层线极化栅格, 被反射到下层 OAM 反射阵, 通过相移补偿被转化为 OAM 高增益平面波(绿色实线), 同时把极化方向扭转了  $90^\circ$  (与之正交的另一种线极化波)再次反射出去, 这种 OAM 线极化波将透过上层线极化栅格并辐射到自由空间。天线的等效馈源位置 and 传统天线的馈源位置重合, 基于射线追踪原则, 此时天线的纵向高度仅为原来的  $1/2$ 。

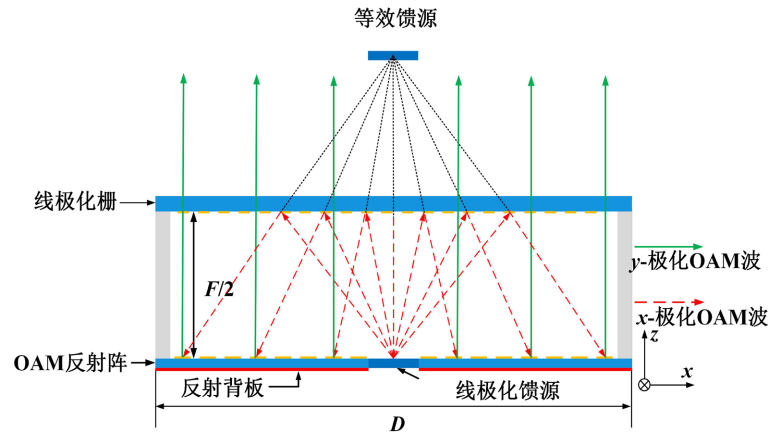


Figure 1. Diagram of the proposed OAM folded reflectarray antenna  
图 1. OAM 折叠反射阵的原理示意图

### 2.2. 天线单元结构与分析

本节所设计的折叠 OAM 反射阵单元结构是在本团队之前的研究基础上做出的改进, 设计了一款新型双层双线极化单元, 其结构示意图如图 2(a)和图 2(b)所示。该单元为双层结构, 两层菱形贴片分别印刷在两个介质板的上层, 金属地板印刷在下层介质板的底层。两层介质板采用相同的材料为 F4B( $\epsilon_r = 2.65$ ,  $\tan\delta = 0.001$ ), 厚度均为  $H = 0.25$  mm。单元的周期为  $P = 3$  mm, 参数  $a$ 、 $b$ 、 $a_1$  和  $b_1$  之间的比例关系为  $a_1 = a \times K$  和  $b_1 = b \times K$ , 其中  $K$  取值范围为  $0 < K < 1$ 。采用 Ansys HFSS 仿真软件中的周期边界对单元的电磁性能进行仿真, 通过对两个主要参数  $K$  和  $H$  进行仿真分析并优化, 使该单元获得了良好的相移特性。OAM 反射阵单元和线极化栅格 LPG 单元具体参数值详见表 1。

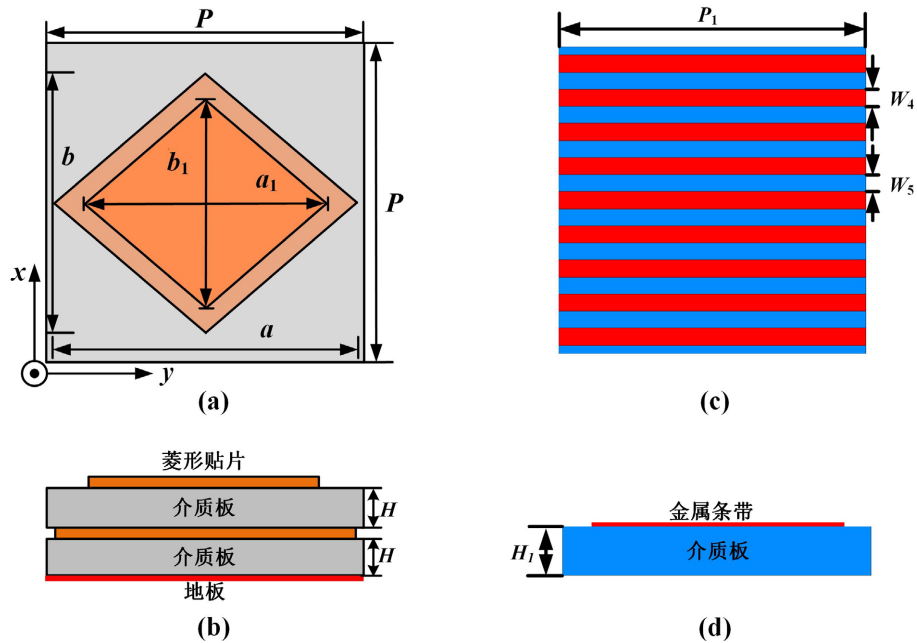
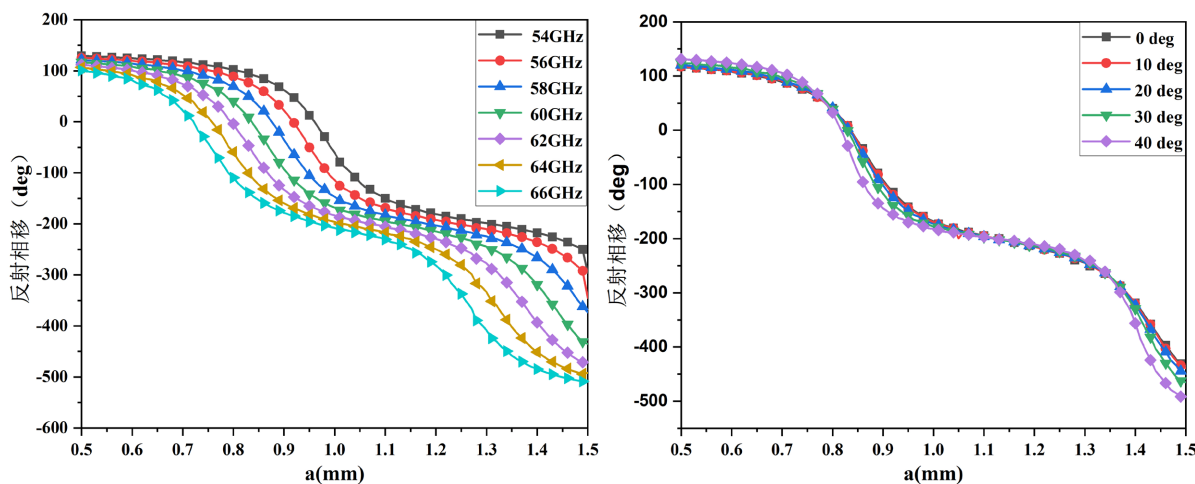


Figure 2. Configurations of the OAM reflectarray element and the LPG unit. (a) Top view of the OAM reflectarray element, (b) Side view of the OAM reflectarray element, (c) Top view of the LPG unit, (d) Side view of the LPG unit

图 2. OAM 反射阵单元和线极化栅格 LPG 单元结构示意图(a) OAM 反射阵单元顶视图(b) OAM 反射阵单元侧视图(c) LPG 单元顶视图(d) LPG 单元侧视图

**Table 1.** Parameter values of the OAM reflectarray element and the LPG unit (Units: mm)**表 1.** 单元的主要结构参数取值(单位: mm)

$P$	$a$	$b$	$W_4$	$W_5$	$P_1$	$H$	$H_1$
3	1.5	1	0.2	0.3	2.5	0.25	2

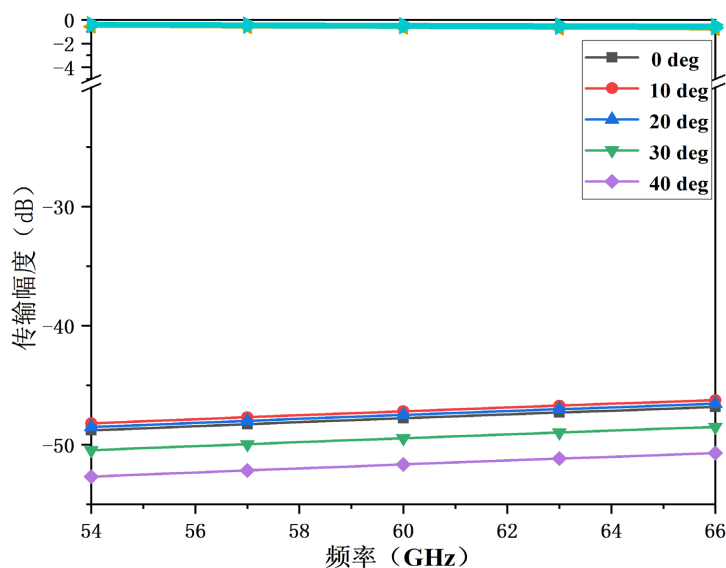


(a) 单元在不同频率处的反射相位

(b) 单元在中心频点 60 GHz 处不同入射角情况下的反射相位

**Figure 3.** Reflective phases of the OAM reflectarray element versus  $a$  at different frequencies and different incident angles**图 3.** OAM 反射阵单元在不同频点和不同入射角度下随尺寸  $a$  变化的反射相移曲线

图 3 给出了 OAM 反射阵单元的反射相移曲线。图 3(a)给出了单元在不同频点处的反射相移随参数  $a$  的变化曲线。从图中可以看出, 在中心频点 60 GHz 处, 反射相移超过了  $360^\circ$ , 且相移曲线在不同频点处几乎平行, 满足宽带需求。图 3(b)给出了单元在 60 GHz 频点处的反射相移随斜入射角度的变化曲线。显然, 单元在斜入射情况下的反射相移曲线几乎没有明显变化, 有利于整体阵列设计。因此, 在阵列设计中, 利用单元在正入射时的反射相移曲线来确定阵列中各个单元的尺寸。

**Figure 4.** Transmission amplitudes  $|T_{xx}|$  and  $|T_{yy}|$  of the LPG unit versus frequency with different incident angles**图 4.** LPG 单元在不同入射角情况下  $|T_{xx}|$  和  $|T_{yy}|$  随频率变化的传输幅度曲线

本节设计的 LPG 单元结构如图 2(c)和图 2(d)所示, 金属条带周期性排布, 印刷在介质板上层, 介质板材料为罗杰斯 5880 ( $\epsilon_r = 2.2, \tan\delta = 0.001$ ), 厚度为  $H_1 = 2 \text{ mm}$ , 条带宽  $W_4 = 0.2 \text{ mm}$ , 相邻两条金属条带之间的间隔为  $W_5 = 0.3 \text{ mm}$ 。在 HFSS 软件中采用周期边界对其进行仿真, 通过仿真优化所有的结构参数, 使线极化栅达到最佳的电磁性能。图 4 给出了线极化栅对于两种极化波在不同入射角情况下的传输幅度曲线。从图中可以看出, 该单元能完美地透过一种线极化波, 反射与之正交的另一种线极化波, 且在斜入射情况下单元仍具有良好的极化选择特性。

### 2.3. 馈源设计

喇叭天线因为其工作频带宽、方向图稳定且两个面在特定的波束宽度范围内比较等化, 非常适合做反射阵天线的馈源。为了获得更好的反射阵性能, 本文设计的馈源天线采用标准喇叭天线, 如图 5 所示。通过对馈源天线的仿真, 仿真结果如图 6(a)所示, 该馈源的  $-10 \text{ dB}$  反射系数带宽为  $54\sim 66 \text{ GHz}$ , 覆盖了 OAM 反射阵天线的工作频带。此外, 图 6(b)给出了馈源在中心频点  $60 \text{ GHz}$  处两个面的仿真方向图, 两个面的  $-10 \text{ dB}$  波束宽度分别为  $\pm 42^\circ$  和  $\pm 41^\circ$ , 可用  $\cos^9(\theta_e)$  函数来近似, 且两个面的方向图基本等化, 满足馈源的设计要求。

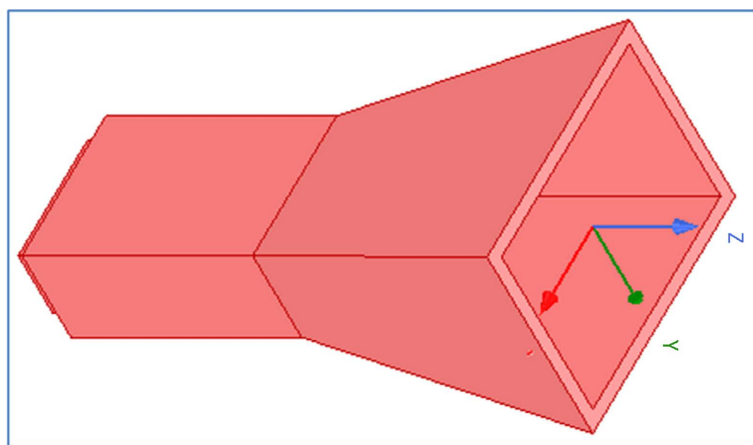


Figure 5. Structure of the feed antenna  
图 5. 馈源天线结构示意图

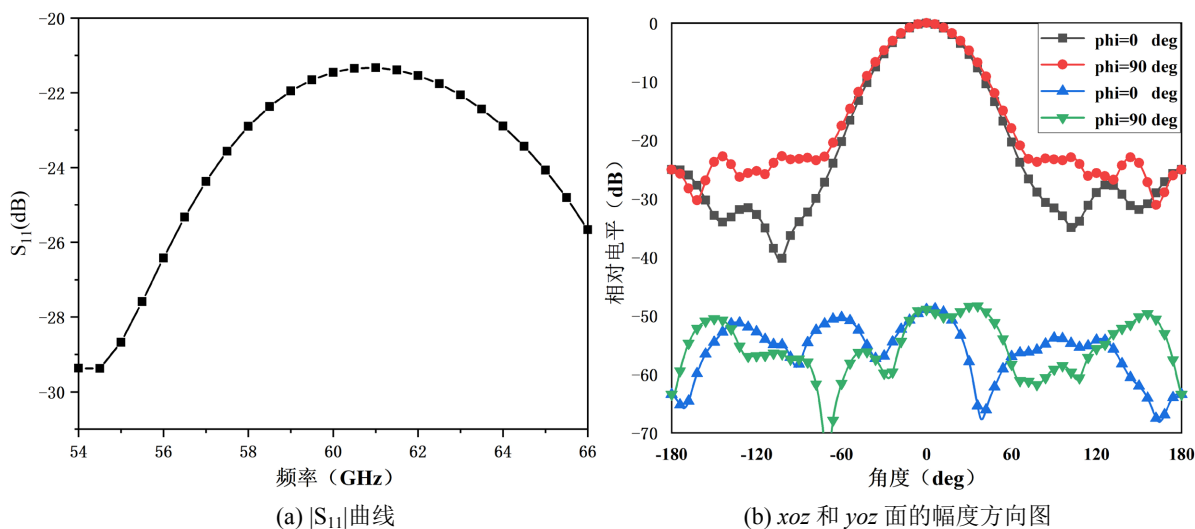


Figure 6. Simulated results of the feed antenna. (a)  $|S_{11}|$ , and (b) E-plane and H-plane radiation patterns at  $60 \text{ GHz}$   
图 6. 馈源天线的  $|S_{11}|$  和  $60 \text{ GHz}$  频点处的 E 面和 H 面的方向图仿真结果

## 2.4. 天线阵列设计

如图 7(a)所示, 为了产生 OAM 波束, 需要在反射阵阵面上形成具有  $\exp(-jl\varphi)$  的螺旋相位分布, 其中  $l$  代表 OAM 的模式数,  $\varphi$  是方位角。馈源发出的球面波照射到反射阵阵面, 独立调控阵列单元的反射相位, 可以把反射波束调制成螺旋相位波前, 形成特定模式数的 OAM 涡旋电磁波。为了实现模式数为 1 的 OAM 涡旋电磁波, 阵列中第  $(i,j)$  个单元的相位应为

$$\varphi_1(x_i, y_j) = l \arctan\left(\frac{x_i}{y_j}\right) \quad (2-1)$$

其中  $(x_i, y_j)$  表示阵列第  $(i,j)$  个单元的位置坐标, 入射波的相位为

$$\varphi_2(x_i, y_j) = -2\pi \frac{d_{i,j}}{\lambda} \quad (2-2)$$

则每个单元的补偿相位为

$$\varphi_{\text{unit}}(x_i, y_j) = \varphi_1(x_i, y_j) - \varphi_2(x_i, y_j) \quad (2-3)$$

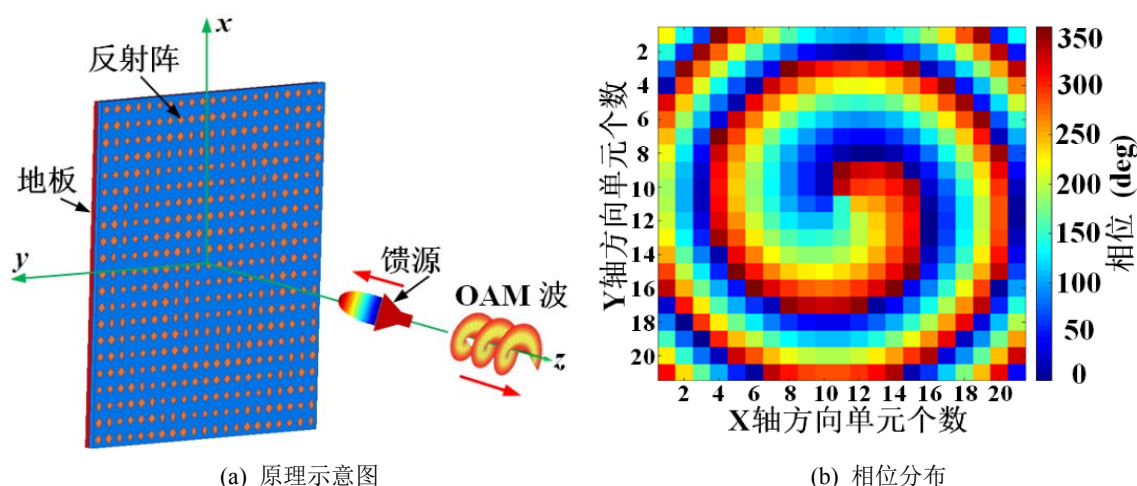


Figure 7. (a) Principle diagram of the phase compensation for the reflectarray and (b) the array phase distribution  
图 7. OAM 反射阵天线的相位补偿原理示意图(a)和阵列相位分布(b)

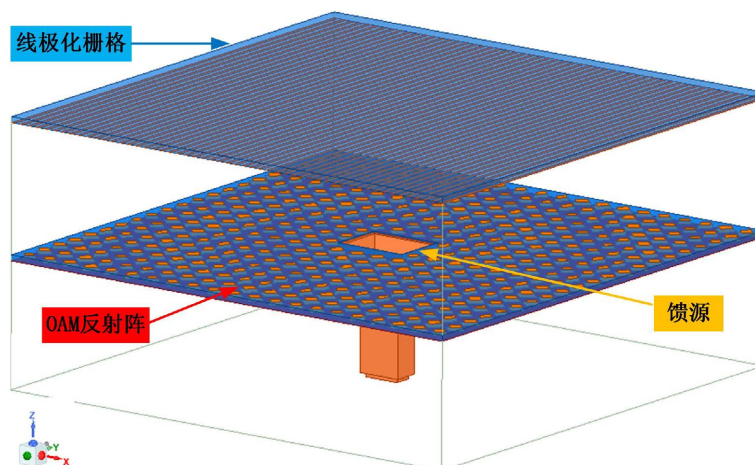
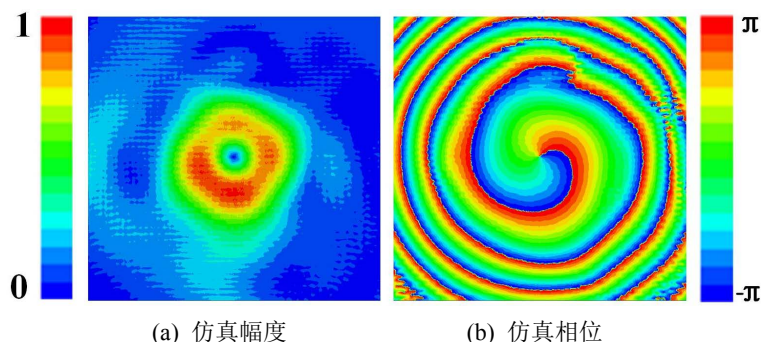


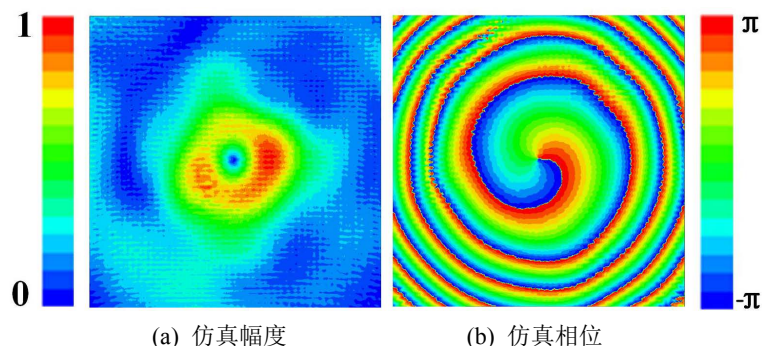
Figure 8. Schematic diagram of the OAM folded reflectarray  
图 8. OAM 折叠反射阵天线结构示意图

根据公式(2)~(3), 可计算出阵列每个单元所需要提供的补偿相位, 如图 7(b)所示。根据阵列相位分布, 确定阵列单元的结构尺寸, 完成整体阵列的设计。通过控制每个单元的相位分布, 天线辐射模式数为 1 的 OAM 涡旋电磁波。根据馈源的 $-10$  dB 波束宽度, 可确定 OAM 折叠反射阵的焦径比为 0.6。下层 OAM 反射阵包含  $21 \times 21$  个单元, 由于馈源在中心位置, 占据了  $3 \times 3$  个单元位置, 因此总阵面包含 432 个单元。采用 HFSS 软件对该天线进行全波仿真分析, 进一步验证所提出的 OAM 折叠反射阵天线的电磁性能。图 8 给出了 OAM 折叠反射阵在 HFSS 中的仿真建模, 包含上层的线极化栅格, 下层的 OAM 反射阵以及位于下层中心位置的喇叭馈源。



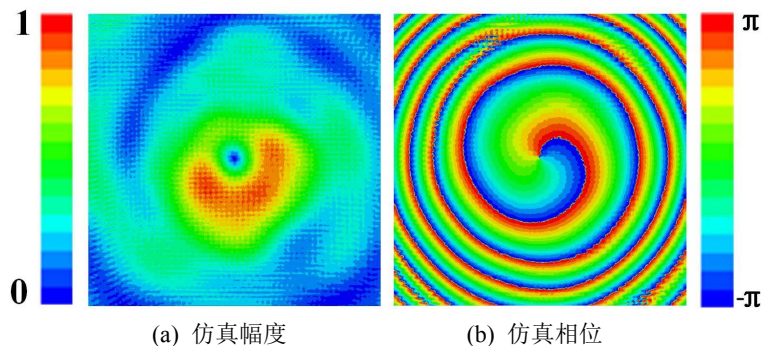
**Figure 9.** Simulated transverse electric field distributions of the proposed folded OAM reflectarray at 54 GHz

**图 9.** OAM 折叠反射阵天线在 54 GHz 处的仿真电场幅度和相位分布



**Figure 10.** Simulated transverse electric field distributions of the proposed folded OAM reflectarray at 60 GHz

**图 10.** OAM 折叠反射阵天线在 60 GHz 处的仿真电场幅度和相位分布



**Figure 11.** Simulated transverse electric field distributions of the proposed folded OAM reflectarray at 66 GHz

**图 11.** OAM 折叠反射阵天线在 66 GHz 处的仿真电场幅度和相位分布

图 9~11 分别给出了该 OAM 折叠反射阵天线在不同频点(54 GHz、60 GHz 和 66 GHz)处的电场幅度和相位分布图。从图中可以看出, 在圆周方向电场幅度较强, 在中心处是辐射零点, 符合 OAM 波束中心空洞这一物理特性, 电场相位呈螺旋状分布, 且中心存在相位奇点, 仿真结果与理论一致, 验证了设计方法的有效性。

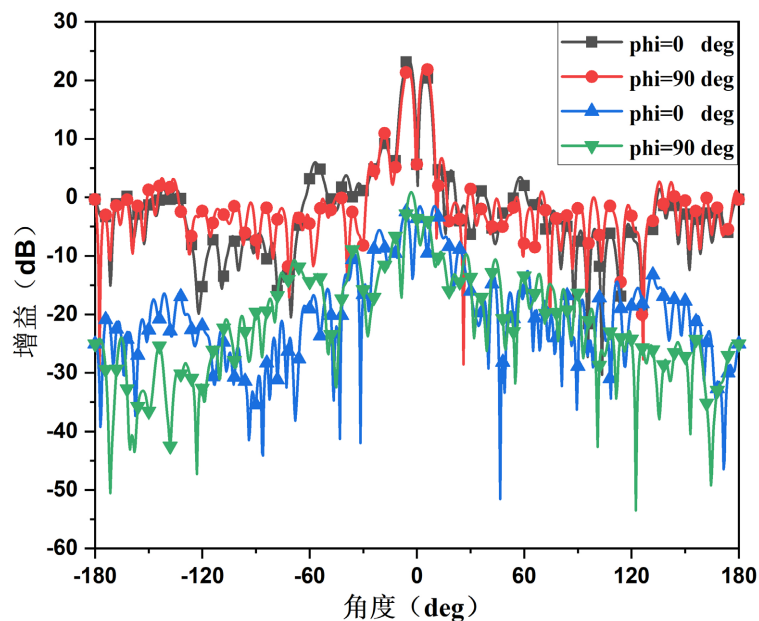


Figure 12. Simulated gain pattern of the proposed folded OAM reflectarray at 54 GHz

图 12. 该 OAM 折叠反射阵在 54 GHz 处的仿真增益方向图

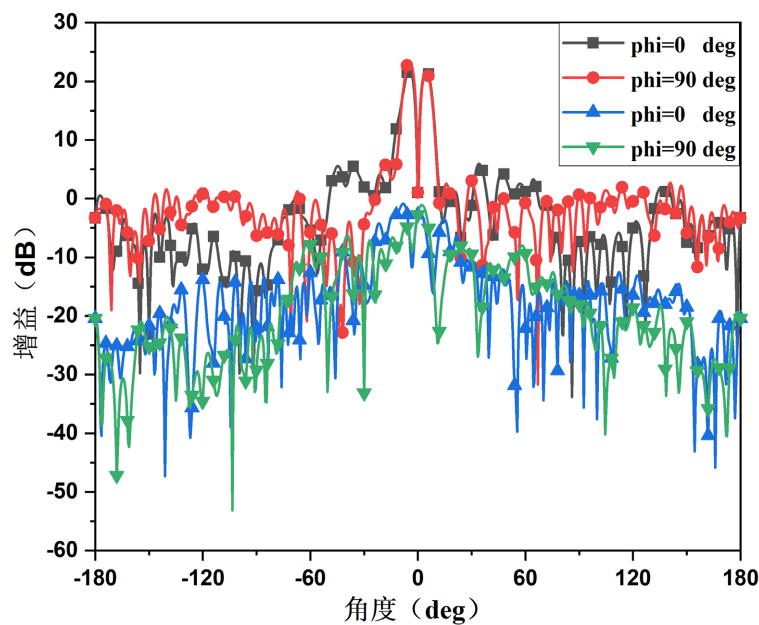


Figure 13. Simulated gain pattern of the proposed folded OAM reflectarray at 60 GHz

图 13. 该 OAM 折叠反射阵在 60 GHz 处的仿真增益方向图



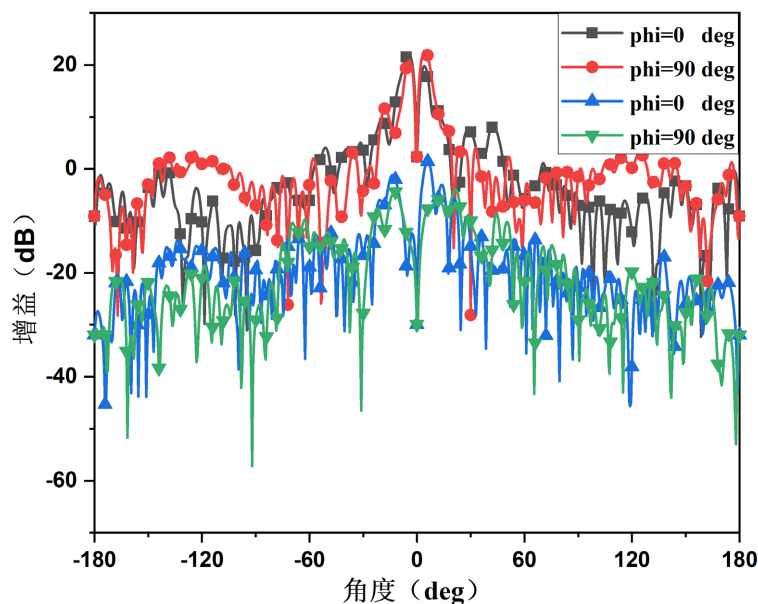


Figure 14. Simulated gain pattern of the proposed folded OAM reflectarray at 66 GHz

图 14. 该 OAM 折叠反射阵在 66 GHz 处的仿真增益方向图

此外, 图 12~14 还给出了各个频点的仿真远场方向图。在中心频点 60 GHz 处, 该天线的两个最大辐射方向大约在 $\pm 5^\circ$ , 两个波峰的高度基本一致, 在 $0^\circ$ 附近存在零深, 达到了 $-20$  dB, 副瓣电平和交叉极化电平均低于 $-15$  dB。天线在两个面的半功率波束宽度分别为 $6.8^\circ$ 和 $7.3^\circ$ , 副瓣电平低于 $-15$  dB, 交叉极化电平低于 $-25$  dB。在 54 GHz 和 66 GHz 频率处, 天线也具有稳定的方向图。

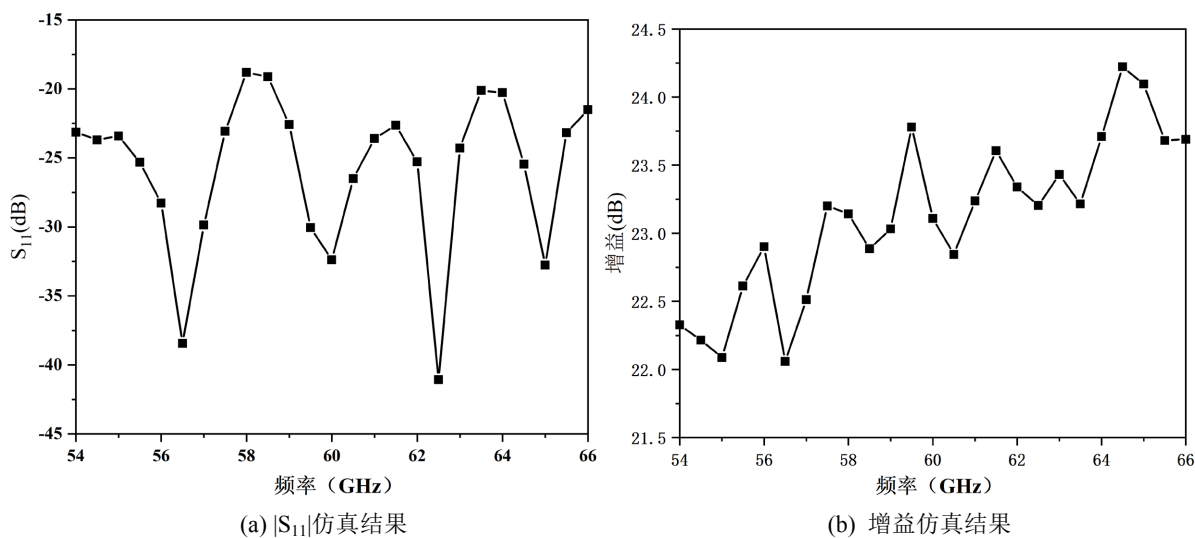


Figure 15. Simulated results of the folded OAM reflectarray (a)  $|S_{11}|$  and (b) gain

图 15. OAM 折叠反射阵的 $|S_{11}|$ 和增益的仿真结果

图 15 给出了该 OAM 折叠反射阵天线的 $|S_{11}|$ 和增益的仿真结果, 从图 15(a)可以看出, 该天线获得了 20%的 $-10$  dB 反射系数带宽。图 15(b)给出了增益的仿真结果。从图中可以看出, 天线获得了 20%的 3-dB 增益带宽。

### 3. 结论

本文介绍了一款新型宽带可折叠轨道角动量反射阵天线。该天线主要包含三部分：第一部分是上层线极化栅格，它可以透过一种线极化波同时传输另一种与之正交的线极化波；第二部分是双极化轨道角动量反射阵面，它可以产生高增益轨道角动量涡旋电磁波，同时对馈源发出的线极化波起到极化扭转的作用，实现反射阵的折叠性能，降低反射阵天线的纵向剖面高度；第三部分是宽带馈源喇叭天线。为了验证本文设计的折叠轨道角动量反射阵性能，在 HFSS 中建模仿真，通过仿真结果可以看出，该天线在 54~66 GHz 宽带范围内实现轨道角动量性能，同时该天线相比于传统反射阵，其纵向高度缩减为原来的一半，实现了低剖面性能。本文设计的轨道角动量反射阵天线具有宽带、高增益以及低剖面性能，在通信、成像等平台具有潜在的应用价值。

### 参考文献

- [1] Bouchard, F., De Leon, I., Schulz, S.A., *et al.* (2014) Optical Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in Ultra-Thin Metasurfaces with Arbitrary Topological Charges. *Applied Physics Letters*, **105**, 101905. <https://doi.org/10.1063/1.4895620>
- [2] Wei, W., Mahdjoubi, K., Brousseau, C., *et al.* (2016) Horn Antennas for Generating Radio Waves Bearing Orbital Angular Momentum by Using Spiral Phase Plate. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, **10**, 1420-1427. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0064>
- [3] Bai, Q., Tennant, A. and Allen, B. (2014) Experimental Circular Phased Array for Generating OAM Radio Beams. *Electronics Letters*, **50**, 1414-1415. <https://doi.org/10.1049/el.2014.2860>
- [4] Berry, D., Malech, R. and Kennedy, W. (1963) The Reflectarray Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **11**, 645-651. <https://doi.org/10.1109/TAP.1963.1138112>
- [5] Huang, J. (1991) Microstrip Reflectarray. 1991 *Antennas and Propagation Society Symposium Digest*.
- [6] Pilz, D.M.W. (1998) Folded Reflectarray Antenna. *Electronics Letters*, **34**, 832-833. <https://doi.org/10.1049/el:19980670>
- [7] Hu, Y., Hong, W. and Jiang, Z.H. (2018) A Multibeam Folded Reflectarray Antenna with Wide Coverage and Integrated Primary Sources for Millimeter-Wave Massive MIMO Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 6875-6882. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2871747>