

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417056

太赫兹频段的柔性 OAM 阵列天线设计*

詹雨轩 成国庆 王全全 吕云鹏

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

摘要: 针对目前轨道角动量天线模式数少、难以共形等问题,本文使用石墨烯、MXene 等材料设计了一款工作在太赫兹频段的柔性阵列天线。通过调整馈电相位以产生不同模式的 OAM 涡旋波,改变石墨烯的外置电压改变了电导率,从而使工作频率可调谐。研究了弯折对天线性能的影响,并相应地进行了相位补偿和频率补偿。仿真实验结果表明,该天线仅需调整馈电相位差即可产生模式数为 0~3 整数阶,0.5、1.5、2.5 分数阶的 OAM 涡旋波,天线增益可达 11.7 dBi,天线的工作频率在 1.1~1.9 THz 范围内可调谐。对于明显的柱面弯折,本文的相位补偿和频率补偿方法能较好地维持涡旋波形态和工作频率。由实验结果可知,该柔性 OAM 天线在人机接口、软体机器人、航天部件等天线形变弯曲的场景应用潜力大。

关键词: OAM; 柔性天线; 太赫兹; 石墨烯; MXene; 补偿

中图分类号: TN827.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1015

Design of flexible OAM array antenna in terahertz band

Zan Yuxuan Cheng Guoqing Wang Quanquan Lyu Yunpeng

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aiming at the problems of the current OAM antenna, such as fewer modes, and difficulty to conform, this paper designs a terahertz-frequency array antenna using graphene and MXene. By adjusting the feeding phase, different OAM vortex wave modes can be generated. Changing the external voltage, the conductivity of graphene is modified, thus, the operating frequency can be tunable. The impact of bending on antenna performance is also studied, and phase and frequency compensation methods are proposed accordingly. The simulation results show that the antenna can generate numerous OAM vortex waves with integer mode of 0~3 and fractional mode of 0.5, 1.5, 2.5 by simply adjusting the feeding phase difference. The antenna gain can reach 11.7 dBi, and the operating frequency can be tuned within the range of 1.1~1.9 THz. For significant cylindrical bending, the proposed phase and frequency compensation methods can effectively maintain the vortex wave form and operating frequency. According to the experimental results, the proposed flexible OAM antenna is very promising in applications of antenna deformation and bending scenarios, such as human-machine interfaces, soft robots, and aerospace components, etc.

Keywords: OAM; flexible antenna; terahertz; graphene; MXene; compensation

0 引言

电磁波携带自旋角动量 (spin angular momentum, SAM) 和轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM)。SAM 与电磁波的极化方式有关, OAM 则与电磁波的空间相位分布有关^[1]。近年来, OAM 的研究和应用已经取得了很大进展。相对于只有两种状态的 SAM, OAM 在理论上可以提供无限数量的模式^[2]。此外, 不同模式数的 OAM 涡旋波相互正交, 这为无线通信开辟了新的复用方式, 可以有效缓解当前的频谱资源匮乏问题, 提升系统容

量, 被认为是提升 6G 通信效率的关键技术^[3]。

如何用天线产生多个模式的 OAM 涡旋波是相关研究的重点, 目前主要采用超表面^[4]、阵列天线^[5]以及介质谐振器天线^[6]等来产生 OAM 涡旋波。一般地, 超表面、介质谐振器天线口径尺寸较大, 超表面设计复杂度高, 设计适应性差; 而阵列天线设计适应性强, 频率适应范围宽, 可产生模式较多^[3]。Yang 等^[4]使用反射型超表面天线生成了带有分数阶模式数的 OAM 涡旋波, 通过调整天线单元的位置, 可以生成 1~3 整数阶和 1.5 分数阶涡旋波。王艳妮等^[6]

收稿日期: 2024-10-09

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62371247)

提出了一种工作在毫米波频段的 OAM 介质谐振器天线,其相对带宽较宽,但除模态数为 1 时,其余模态下增益较低。

太赫兹的频率范围为 0.1~10 THz,其兼具微波和红外频段的优点,能提供更大的传输带宽,是近年来的研究热点,在许多领域都展现出广阔的应用前景^[7-10],被预测为下一代移动通信的关键技术。Meng 等^[11]基于石墨烯设计了一种超材料阵列天线,通过改变石墨烯的化学势,在 4.2~5.6 THz 可以产生模态数 l 为 0、1、2 的 OAM 涡旋波。KHAN 等人提出了一款基于微带阵列的太赫兹频段 OAM 天线^[12],可在 0.31 THz 生成 0 和 1 模态 OAM 涡旋波。

天线安装至曲面平台时,柔性天线具有诸多优势,适合多种应用^[13-15]。它们由柔性材料制成,允许弯曲、折叠和拉伸,提供了更高的设计自由度。这种灵活性有利于可穿戴设备、交互软体机器人、脑机接口等场景下柔性器件的设计。在设计柔性天线时需要考虑天线的弯曲和拉伸等对其电磁特性的影响。石墨烯材料作为新兴的二维材料,既具有较高的电导率,又具备良好的延展性,适合作为柔性天线贴片。He 等^[16]基于石墨烯设计了一种工作在 5.7~5.9 GHz 的柔性微带天线,在一定的弯曲时,能稳定地产生 2、3 模态的 OAM 涡旋波。

通过对国内外 OAM 天线设计的研究分析发现,现有的 OAM 天线设计技术仍存在很多不足,例如天线的带宽较窄、生成的 OAM 涡旋波模态数量少,研究工作多集中在微波频段,主要为平面结构,对太赫兹和柔性领域探索较少。针对上述问题,本文使用石墨烯、MXene 等柔性材料设计了一款工作在太赫兹频段,可生成包含分数阶在内的多模态 OAM 阵列天线,通过调整石墨烯的化学势使得工作频率在 1.1~1.9 THz 范围内可调谐,提出了补偿方法,使天线可适用于明显的柱面弯折。

1 OAM 阵列天线设计

1.1 设计原理

设天线的阵列单元数为 N ,各阵列单元以环形均匀分布,所构成的环形半径为 a ,以坐标轴原点为参考点,第 n 个阵列单元的方位角为 ϕ_n ,天线的辐射方向为 z 方向。取任一观察点 $P(r, \theta, \phi)$, r 表示到原点的距离, θ 为该点的倾斜角, ϕ 为方位角,该点处的电场强度为:

$$E(r) = \frac{\exp(-jkr)}{r} \sum_{n=1}^N A_n \exp[jka \sin\theta \cos(\phi - \phi_n)] \quad (1)$$

式中: $A_n = I_n \exp(j\beta_n)$ 表示激励系数, I_n 为第 n 个阵列单元的馈电信号幅度值, β_n 表示馈电相位, $\phi_n = 2\pi(n-1)N$, $n=1,2,3,\dots,N$ 。令

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N A_n \exp[jka \sin\theta \cos(\phi - \phi_n)] \quad (2)$$

对于 l 阶模态数的 OAM,其相位需要满足以下公式:

$$\beta_n = l\phi_n = \frac{2\pi l(n-1)}{N} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中,并化简可得:

$$AF(\theta, \phi) \approx \frac{NI_n}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[jl\phi_n + jka \sin\theta \cos(\phi - \phi_n)] d\phi = NI_n \exp(jl\phi) j^l J_l(ka \sin\theta) \quad (4)$$

式中: $J_l(x) = \frac{j^{-l}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[j(x \cos\varphi - l\phi)] d\varphi$ 为第一类 l 阶的贝塞尔函数。将式(4)代入式(1)中可得:

$$E(r) \approx \frac{\exp(-jkr)}{r} NI_n j^l \exp(jl\phi) J_l(ka \sin\theta) \quad (5)$$

式中: $E(r)$ 为 P 点的电场强度, $\exp(jl\phi)$ 即为 OAM 相位因子。所以,通过控制阵列单元的相位差即可产生对应模态的 OAM。

1.2 天线结构

如图 1 所示,本文所设计的天线阵列结构为双层 8 圆形单元阵列。天线自底而上可分为接地金属层、下层 PI 介质基板、石墨烯贴片层、上层 PI 介质基板和 MXene 贴片层。接地层形状为圆柱形,半径为 $R_1=250 \mu\text{m}$,厚度为 $h_3=20 \mu\text{m}$,材料为金。下层介质基板材料为 PI,介电常数为 3.5,损耗正切角 0.008,具有优异的介电性能和出色的柔韧性,适宜于柔性器件的制作,其形状亦为圆柱形,半径为 $250 \mu\text{m}$,厚度 $h_2=15 \mu\text{m}$ 。石墨烯贴片层由 8 个单层石墨烯圆形贴片构成,贴片半径 $R_5=40 \mu\text{m}$,8 个贴片围绕结构中心线呈均匀环形阵列分布,贴片圆心到结构中心线的距离 R_3 为 $120 \mu\text{m}$ 。其中石墨烯的化学势为 1 eV,温度为 300 K,弛豫时间为 1 ps。上层介质基板材料与下层介质基板相同,同样为圆柱形,半径为 $R_2=160 \mu\text{m}$,厚度为 $h_1=15 \mu\text{m}$ 。MXene 贴片层位于上层 PI 介质基板之上,材料为单层 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ ^[17],MXene 作为一类新颖的二维材料,具有高电导率、优异的亲水性、稳定性、柔韧性和生物相容性好。该层结构与石墨烯层类似,同样使用 8 个圆形贴片,贴片半径为 $R_4=36 \mu\text{m}$,厚度为 4 nm,并且位于石墨烯贴片正上方。8 个 L 型探针馈电端口位于接地金属层背面。馈电端口到圆心距离 $R_6=121.66 \mu\text{m}$ 。

图 2 为该天线的阵列单元结构示意图,L 型馈电探针设在接地金属层与下层 PI 介质基板之中,探针顶部与石墨烯层间隔 $2 \mu\text{m}$ 。L 型探针底面直径为 $2 \mu\text{m}$ 、高为 $L_1=33 \mu\text{m}$ 、长为 $L_2=40 \mu\text{m}$ 。

1.3 天线结构优化

在天线设计中,采用 CST 软件进行仿真,输入阻抗设为 50Ω ,由于天线结构对称,所以各个单元的回波损耗相同,本节仅对端口 1 进行仿真。

本文所设计的天线为 5 层结构,为了研究多层结构对天线性能的影响,对不同情况进行分析。

图 3(a)、(b)对比了使用不同贴片材料的天线 S_{11} 参数。在不使用石墨烯贴片时,天线 S_{11} 参数均高于 -10 dB ,

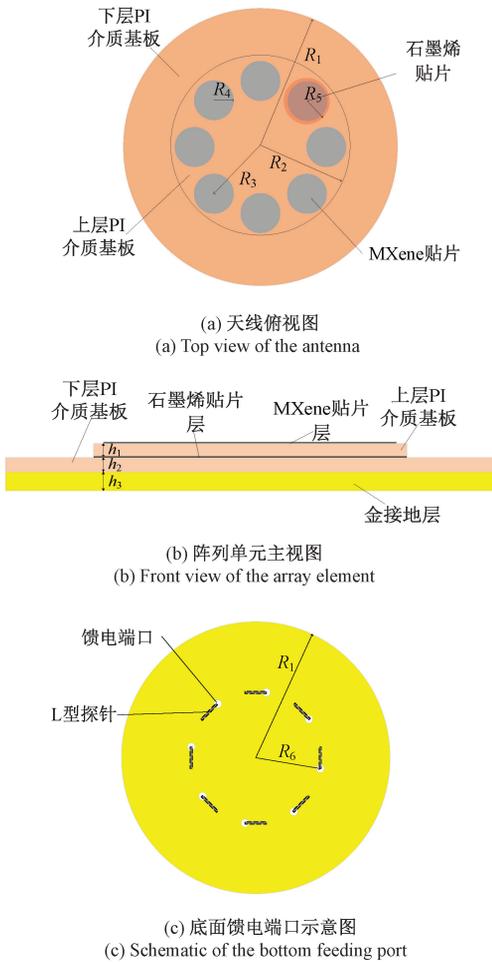


图 1 天线结构
Fig. 1 Antenna structure

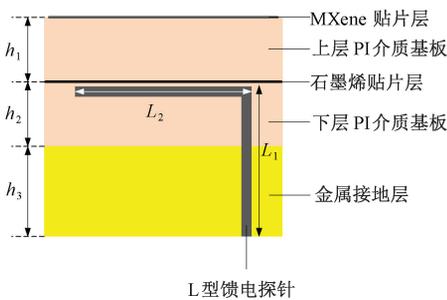


图 2 阵列单元结构示意图

Fig. 2 Schematic of the array element structure

这是因为此时 L 型馈电探针与 MXene 贴片距离较远,不能产生谐振。使用金贴片时,天线的 S_{11} 参数多在 -10 dB 以上,不能满足使用需求。而上下两层贴片均使用石墨烯材料时,天线的 -10 dB 带宽基本一致,但上层贴片使用 MXene 材料时 S_{11} 参数可取得最低值 -26 dB。

通过外加电压可以调节石墨烯的化学势,改变石墨烯电导率。石墨烯化学势 μ_c 与外加电压 E_0 的关系为:

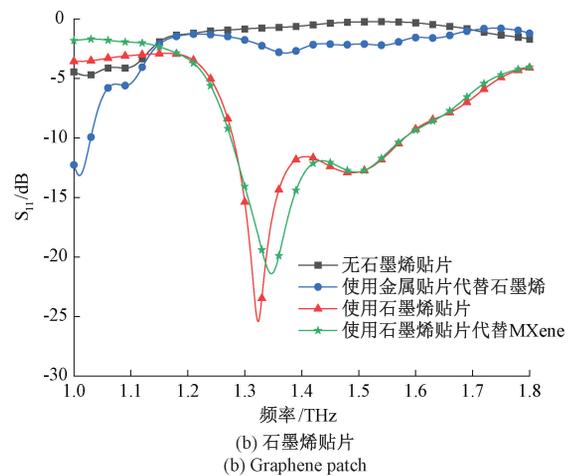
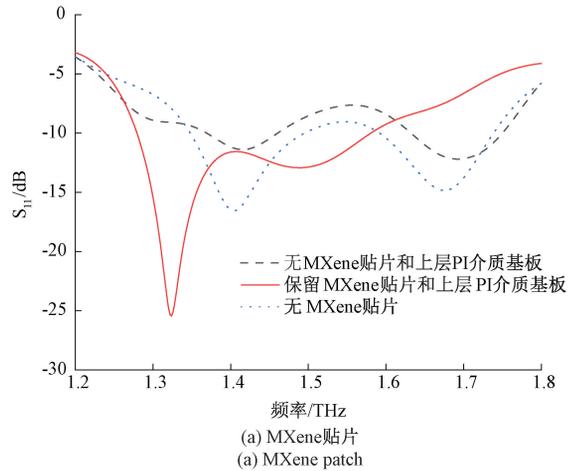


图 3 不同贴片天线 S_{11} 参数图

Fig. 3 S_{11} parameter with different antenna patches

$$E_0 = \frac{e}{\pi \hbar^2 v_F^2 \epsilon_b} \int_0^\infty \epsilon [f_d(\epsilon) - f_d(\epsilon + 2\mu_c)] d\epsilon \quad (6)$$

式中: e 是电子电荷, \hbar 是归一化普朗克常数, ϵ_b 为电位移矢量侧的均匀介质的介电常数, f_d 为费米-狄拉克分布, v_F 为费米速率, 值取为 9.5×10^5 m/s。

石墨烯化学势在 $0 \sim 1$ eV 改变时, 只需 5 V 的外置电压, 在超过 1 eV 以后所需要的外置电压开始快速增加, 石墨烯的调控能力受到限制。本文对石墨烯化学势在 $0 \sim 1$ eV 时 OAM 天线的 S_{11} 进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。随着 μ_c 的增大, 天线的工作带宽逐渐向高频处偏移, 但绝对带宽保持为 0.3 THz 左右。在石墨烯化学势为 1 eV 时, 天线的 -10 dB 带宽为 1.3~1.6 THz, 相对带宽较宽, 且此时 S_{11} 数值最小。所以本文选用的石墨烯材料化学势取 1 eV。

通过调整石墨烯化学势, 所设计的天线最低可工作在 1.1 THz, 最高可工作在 1.9 THz, 调节工作频带时, 无需调整天线结构或重新设计, 这对于多频带需求的用户和柔性天线的设计等具有重要意义。

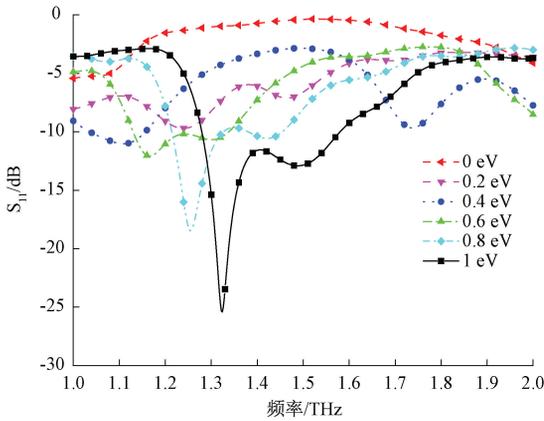


图 4 不同石墨烯化学势下的天线 S_{11} 参数图

Fig. 4 S_{11} Parameter at different graphene chemical potentials

1.4 天线性能

对于 OAM 天线来说,波前相位是最重要的一个指标, OAM 天线所能够产生的模式数量,决定了该天线提升系统传输容量的能力。假设天线的阵列单元的数量为 N ,第 n 个阵列单元的方位角为 ϕ_n , β_n 表示的是相位激励,对均匀圆形阵列上的每个阵列单元都添加幅值相等、相位等间隔增加的激励,当需要生成模式数为 l 的涡旋波时,此时应满足式(3)。由式(3)可以看出,需要在相邻阵列单元之间产生 $2\pi l/N$ 相位差,由此可以得出结论,如果能够适当地控制各个阵列单元的相位差就能够产生相应模式的 OAM 涡旋波。

如图 5 所示,本文设计的柔性阵列天线产生了 OAM 涡旋波可以清晰地看到相位波前呈现螺旋分布,每条曲线形态均匀,并且存在中心相位奇点,表明产生的涡旋波束形态显著。

当天线工作在 1.5 THz 时,天线各个模式下的远场辐射图如图 6 所示,可以发现,设计的天线在各个模式状态下的增益都较高,并且远场辐射图在中间有一定的凹陷,符合涡旋波的波束特征。对于太赫兹天线而言,由于工作频段高,波长短,所以电磁波的衰减较快,这就对天线的增益提出了较高的要求,而所设计的 OAM 天线在 1 模式取得了较高的增益 11.7 dBi。

2 天线弯折性能分析

自由形态电子产品的快速发展,迫切需要开发出轻、薄、柔的天线组件。柱面弯折在柔性电子领域非常常见,本部分重点研究柱面弯折明显时柔性 OAM 天线的性能。

图 7 为天线柱面弯折时的模型图,图 7(a)中 8 个 MXene 贴片在天线弯折后仍对称,故仅需研究 1、2 和 3 号端口的 S 参数变化情况即可。图 7(b)中天线的弯曲半径为 $200 \mu\text{m}$,已经小于天线半径 $250 \mu\text{m}$,此时弯折明显。

图 8 给出了弯折后 1~3 号端口的 S 参数图。综合考虑 3 个端口的 S 参数。弯曲半径为 $200 \mu\text{m}$ 时,天线的 S 参

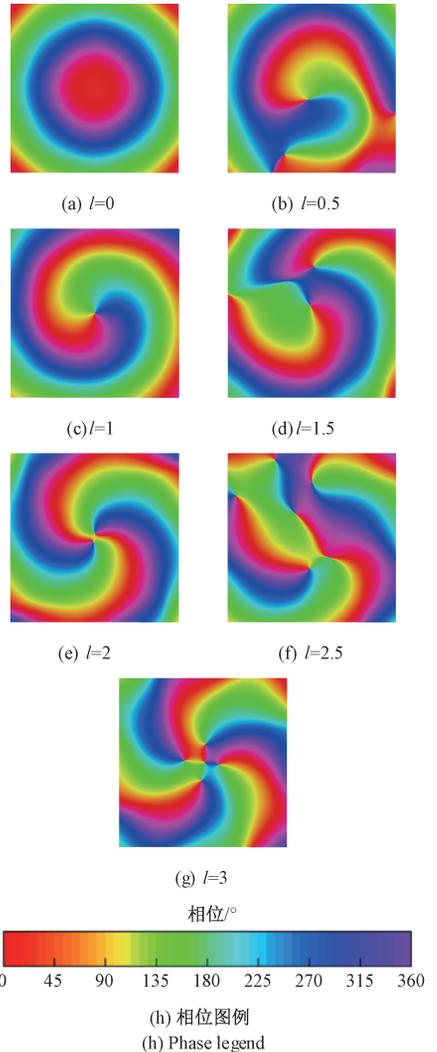


图 5 1.5 THz 时不同模式数 OAM 涡旋波波前相位
Fig. 5 Wavefront phase diagram at 1.5 THz of OAM vortex of different modes

数变化较为明显。导致各条 S 参数的工作带宽的覆盖范围不一致,天线的总体工作频率为 $1.34 \sim 1.55 \text{ THz}$,绝对带宽仅为 0.21 THz ,与平面天线相比下降了 30%。

如图 9 所示,当天线弯曲半径为 $200 \mu\text{m}$ 时天线的性能受影响较为严重, OAM 不同模式波前相位畸变严重。这是由于天线的形变较为严重,贴片辐射的电磁波在到达同一平面时的相位差不能保持与输入相位差一致。

3 弯折后天线性能补偿方法

3.1 相位补偿

1) 垂直相位补偿

之所以天线所生产的 OAM 畸变严重,是因为天线在平面构建的具有相同连续相位差的贴片阵列,在弯折后各个贴片的相对高度发生了变化, OAM 的螺旋相位传递特性受到了贴片不对称性的严重影响。因此,基于贴片相对

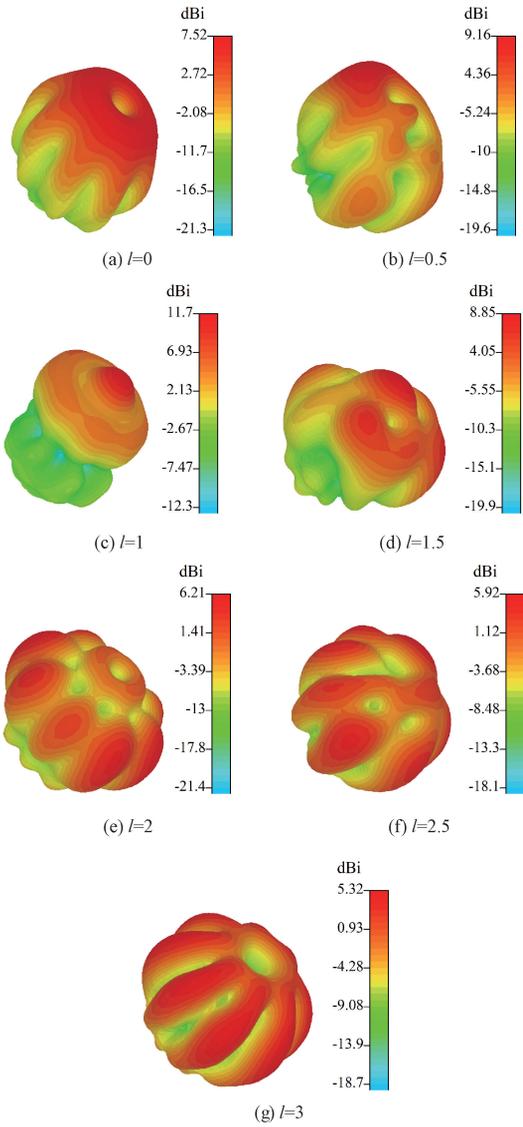


图 6 1.5 THz 时不同模式远场辐射方向图

Fig. 6 Far-field radiation pattern at 1.5 THz of different modes

高度的问题,考虑了垂直相位补偿方法。建模如下:

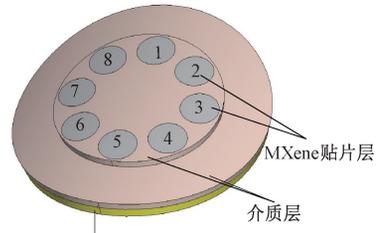
图 10 中 R 为天线的弯曲半径, θ 为天线弯曲角度的一半, h 为贴片间的相对高度,由于天线结构对称,故 1 号和 2 号, 2 号和 3 号贴片的相对高度相同。等效模型的天线直径即为图中红色部分的弧长 $L=2R_3$, 图中角度 $\theta=R_3/R$ 。

可以得到贴片的相对高度 $h=(R+50)(1-\cos\theta)/2$, 贴片间的相位差 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = 2\pi h f / c = \pi(R+50)(1-\cos\theta) f / c = \pi(R+50)[1-\cos(R_3/R)] f / c \quad (7)$$

式中: c 为真空中光速, R 为弯曲半径, f 为工作频率, R_3 为贴片圆心到结构中心的距离。

在弯曲半径 $200 \mu\text{m}$ 的情况下,以天线工作在 1.5 THz 时为例,将相关参数带入公式中得到 $\Delta\varphi=39.3^\circ$, 那么 0 模式时 1~8 号端口的馈电相位应分别为 39.3° 、 0° 、 -39.3° 、



接地金属层

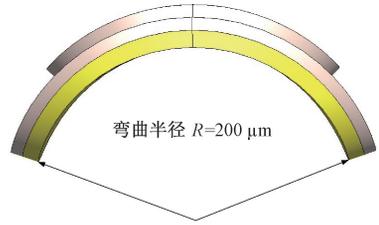
 (a) 弯折模型
(a) Bended model

 (b) 弯曲半径 $R=200 \mu\text{m}$
(b) Bending radius $R=200 \mu\text{m}$

图 7 柱面弯折模型图

Fig. 7 Cylindrical bending model

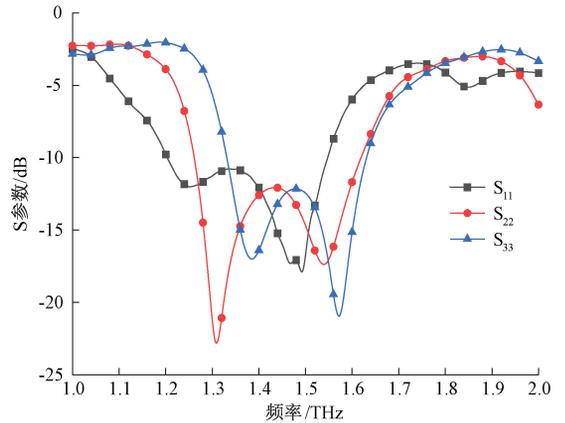


图 8 柱面弯折后天线 S 参数图

Fig. 8 S parameters of the antenna of cylindrical bending

0° 、 39.3° 、 0° 、 -39.3° 、 0° 。

2) 水平相位补偿

天线弯折后还会被拉伸,使得原本的均匀环形变为椭圆形,因此建立了相应的水平相位补偿模型如图 11。图 11 中红色部分为天线的等效模型,黑色虚线为原始平面天线所在位置,①~⑧为 8 个贴片, a 为拉伸后椭圆的短轴,其数值大小与天线的半径 R_3 相同, b 为拉伸后椭圆的长轴, s_2 为 2 号贴片相对于原始贴片的水平位移距离, s_3 为 3 号贴片相对于原始贴片的水平位移距离。

从模型中发现 1 和 5 号贴片的位置没有移动,将这两个贴片作为相位参考点,而 2、4、6 和 8 号贴片位置对称,水平移动的距离均为 s_2 , 3 和 7 号贴片也对称,位移距离相同为 $s_3=b-a$ 。其中 b 取决于天线的弯曲半径 R ,通过分析

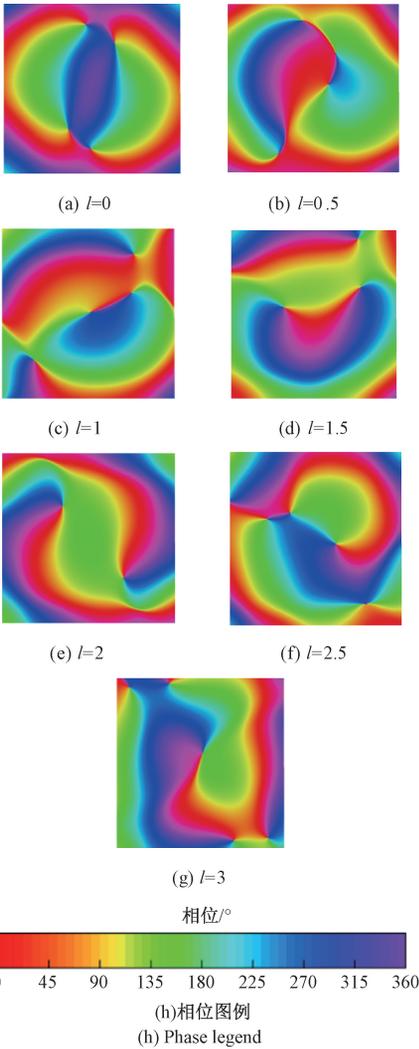


图 9 1.5 THz 时不同模式波前相位图
Fig. 9 Wavefront phase diagram at 1.5 THz of different modes

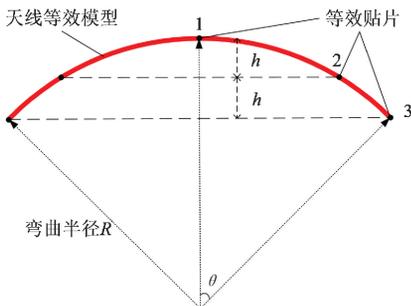


图 10 垂直相位补偿模型
Fig. 10 Vertical phase compensation model

得到 $b = (R + 35) \sin(R_3/R)$, 则 $s_3 = (R + 35) \sin(R_3/R) - R_3$, 那么 3 号端口所需补偿的相位差 $\Delta\varphi_3$ 即为:

$$\Delta\varphi_3 = 2\pi s_3 f/c = 2\pi[(R + 35) \sin(R_3/R) - R_3] f/c \quad (8)$$

同理, 2 号端口的相位差 $\Delta\varphi_2$ 可表示为:

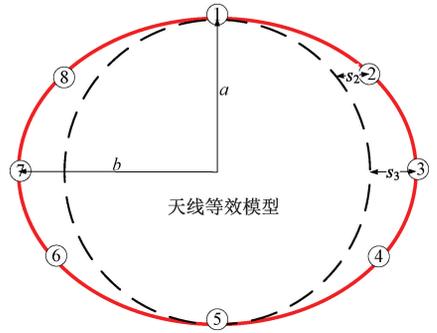


图 11 水平相位补偿模型
Fig. 11 Horizontal phase compensation model

$$\Delta\varphi_2 = 2\pi s_2 f/c = 2\pi \left[\sqrt{(R + 35)^2 - (R + 35 - h)^2} - 120 \cos 45^\circ \right] f/c \quad (9)$$

式中: R 为弯曲半径, 单位为 μm , h 为垂直相位补偿模型中贴片间的相对高度, f 为天线的的工作频率, c 为真空中光速。将参数代入得到 $\Delta\varphi_2 = 25.2^\circ$, $\Delta\varphi_3 = 22.9^\circ$ 。在垂直补偿的基础上, 再叠加水平补偿那么此时 1~8 号馈电端口的相位应分别为 $0^\circ + 39.3^\circ, 45^\circ \sim 22.9^\circ, 90^\circ \sim 39.3^\circ \sim 25.2^\circ, 135^\circ \sim 22.9^\circ, 180^\circ + 39.3^\circ, 225^\circ \sim 22.9^\circ, 270^\circ \sim 39.3^\circ \sim 25.2^\circ, 315^\circ \sim 22.9^\circ$ 。

图 12 为垂直相位补偿叠加水平补偿所得到的波前相位图, 将其与图 9 对比, 可以发现补偿可以一定程度上弥补弯折带来的性能损失, 有效改善了所生成的 OAM 波束。

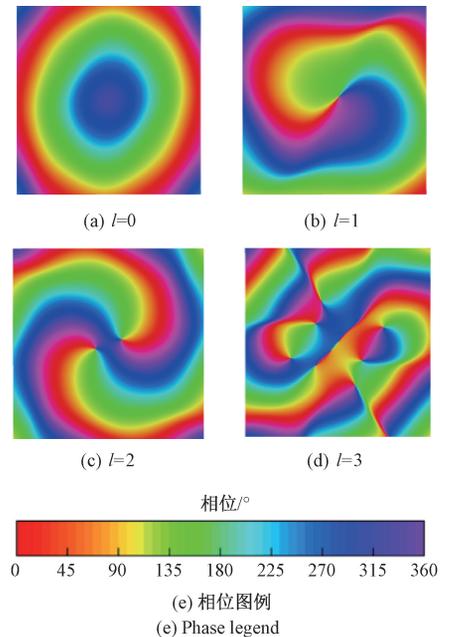


图 12 相位补偿后波前相位图
Fig. 12 Wavefront phase diagram with phase compensation

天线弯曲半径为 $200 \mu\text{m}$ 时, 0 模式相位图补偿后相位图呈现椭圆形分布, 更接近未弯折天线的圆环形相位分布。1 模式通过补偿后, 螺旋线的形态有了一定的改善, 并且仅

存在一个清晰的中心相位奇点。2 模态在经过补偿后就已经具有了清晰,易于区分的两条相位螺旋线。3 模态由于相位畸变严重,即使同时使用水平与垂直补偿也没有取得较好的效果,但从图 12 中可以看出,原本无序的相位图逐渐出现连续相位变化曲线,并且有形成相位螺旋线的趋势。

3.2 频率补偿

弯折程度较大时(如 $R = 200 \mu\text{m}$),由于各端口的形变不一,因此各端口的 S 参数区别较大,使得天线的总体工作带宽下降。针对该问题,通过调节石墨烯的化学势,可以重构天线的工作频率,从而补偿因贴片形变造成的工作带宽衰减的问题。

分别调节 1 号贴片和 3 号贴片的石墨烯化学势,并对其参数化扫描,结果如图 13 所示。

较好地保持原有工作频率。

由图 13(b)知当天线工作在 1.3 THz 时,3 号端口的阻抗匹配特性较差, S_{33} 仅为 -5 dB ,也就是说与其他端口相比,该端口较多的能量被反射回来。以 1.3 THz 时天线所生成的 1 模态涡旋波为例,仿真分析了补偿前后 OAM 的波前相位与增益如图 14 所示。图 14 中(a)为天线弯折后未做任何补偿措施的仿真结果,可以看到此时波前相位图出现严重畸变,天线增益下降明显。

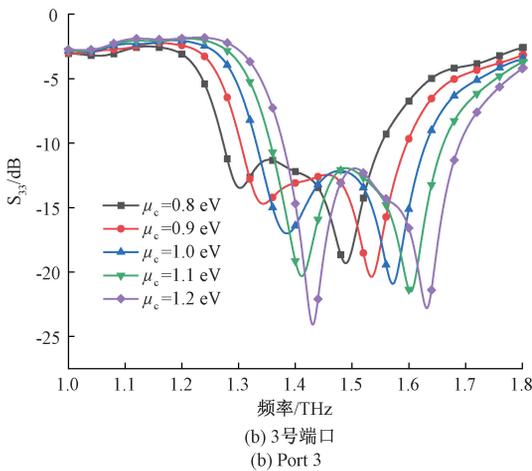
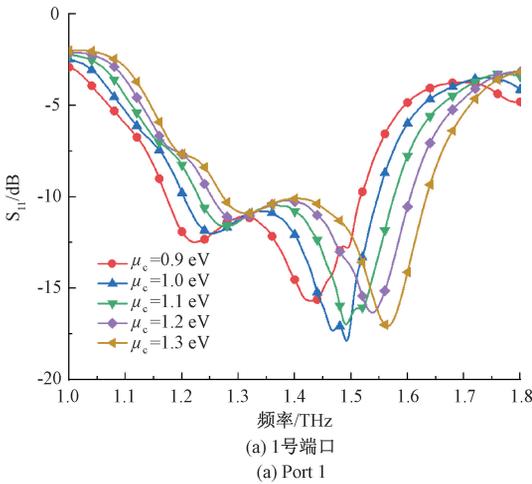


图 13 石墨烯化学势对 S 参数的影响

Fig. 13 Graphene chemical potential's effect on S parameters

从图 13 中可以明显发现,谐振频率随化学势 μ_c 的增大而增大。结合 μ_c 的参数化扫描结果,调整 1 号端口的石墨烯化学势为 1.2 eV,调整 3 号端口的石墨烯化学势为 0.9 eV,此时天线各个端口的 -10 dB 带宽均包含 1.3~1.6 THz 频率区间,所设计的天线在较为明显弯折后仍能

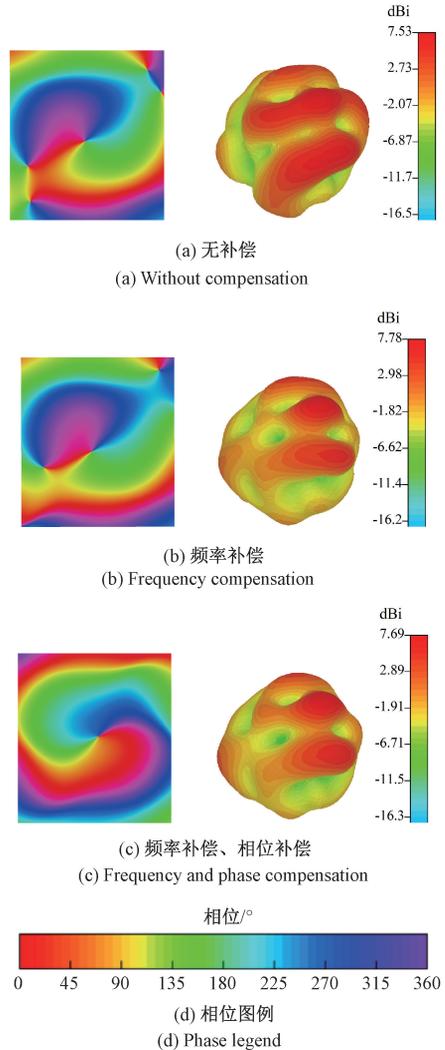


图 14 OAM 涡旋波(1 模态)的波前相位图(左侧)与远场辐射方向图(右侧)

Fig. 14 Mode 1 OAM vortex wave wavefront phase diagram (left) and far-field radiation pattern (right)

图 14(b)为调节了 3 号石墨烯贴片化学势后,进行了频率补偿的结果,图 14(c)为同时使用相位补偿与频率补偿后的实验结果,波前相位图中可以清晰看到 1 条螺旋,有且仅有一个中心相位奇点,符合 1 模态涡旋波的相位分布,并且相较于未使用补偿手段时,其增益也有一定的改善。

表 1 是本文天线与现有文献天线的性能对比,包括天

线的工作频率、生成 OAM 的模式、是否柔性、有无对弯折的补偿方法及频率能否调谐。本文提出的 OAM 天线工作在太赫兹频段,可以产生多种形态清晰稳定的 OAM 涡旋波束,包括 0~3 整数阶,0.5、1.5、2.5 分数阶。利用石墨烯贴片使天线的工作频率可在 1.1~1.9 THz 频率范围内

调谐;结合使用 MXene 贴片增加了回波损耗,改善了 S_{11} 参数。针对柱面弯折大的场景,利用相位补偿改善了涡旋波形态;同时利用频率补偿,通过调节石墨烯的化学势调整了工作频率,补偿了弯折造成的频率偏移,使天线适用于柱面弯折场景。

表 1 不同天线性能对比

Table 1 Comparison of different antenna performance

文献	工作频率	生成模式	是否柔性	有无补偿	能否调谐
[18]	2.3~2.61 GHz 5.7~5.9 GHz	无	是 平面结构	无	否
[4]	8.55~19.95 GHz	1~3,1.5	否	无	能
[11]	4.2~5.6 THz	0,1,2	否	无	否
[16]	5.7~5.9 GHz	2,3	是	无	否
[19]	9.2~10.7 GHz	0,1,2	否	相位补偿	否
本文	1.1~1.9 THz	0~3,0.5,1.5,2.5	是 明显弯折	频率补偿 相位补偿	能

4 结 论

本文使用柔性材料,设计了一种太赫兹频段的 OAM 阵列天线,并对该天线进行了仿真设计、参数分析和优化。该天线拥有较好的增益,只需简单调整馈电相位,即可产生模式数 0~3 整数阶和 0.5、1.5、2.5 分数阶的 OAM 涡旋波。通过调整石墨烯贴片的外置电压使天线的工作频率在 1.1~1.9 THz 范围内可调谐,结合使用 MXene 贴片增加了回波损耗,改善了 S_{11} 参数。深入研究了明显柱面弯折对天线性能的影响,并利用相位补偿,有效地改善了涡旋波形态;同时,通过调节石墨烯贴片的化学势控制了天线的工作频率,实现了频率补偿,使天线即使在弯折后仍能较好保持原有工作频率。在柔性电子、生物医疗等领域具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] 谢炎辰,梁静远,丁德强,等. 无线光通信系统轨道角动量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2023, 60(21):58-99.
XIE Y CH, LIANG J Y, DING D Q, et al. Research progress of orbital angular momentum in optical wireless communication system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(21):58-99.
- [2] CHEN R, ZHOU H, MORETTI M, et al. Orbital angular momentum waves: Generation, detection and emerging applications [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2020, 22(2):840-868.
- [3] 吴杰,胡俊,张忠祥,等. 具有可重构特征的轨道角动量天线技术研究进展[J]. 电子与信息学报,2024, 46(4):1173-1185.

WU J, HU J, ZHANG ZH X, et al. Research progress of orbital angular momentum antenna technologies with reconfigurable characteristics [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(4):1173-1185.

- [4] YANG L J, SUN SH, SHA W E I. Ultrawideband reflection-type metasurface for generating integer and fractional orbital angular momentum [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3):2166-2175.
- [5] 祁浩,许建春,郝亚楠,等. 一种用于产生 OAM 波束的集成圆极化天线阵列[J]. 四川大学学报(自然科学版),2020, 57(3): 513-518.
QI H, XU J CH, HAO Y N, et al. An integrated circularly polarized antenna array for generating OAM beams [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2020, 57(3): 513-518.
- [6] 王艳妮,孙学宏,刘丽萍,等. 一种毫米波 UWB 多模式 OAM 介质谐振器阵列天线[J]. 无线电工程, 2023, 53(2):439-448.
WANG Y N, SUN X H, LIU L P, et al. A millimeter wave UWB multi-mode OAM dielectric resonator array antenna[J]. Radio Engineering, 2023, 53(2):439-448.
- [7] 李建晟,王全全,王国庆,等. 使用石墨烯的超宽带轨道角动量螺旋天线设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(3):19-23.
LI J SH, WANG Q Q, WANG G Q, et al. Design of ultra-wideband OAM spiral antenna using graphene[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(3):

- 19-23.
- [8] ZHAO M Y, YAN F, LI W W, et al. Research on detection of food additives based on terahertz spectroscopy and analytic hierarchy process [J]. *Instrumentation*, 2024, 11(1): 30-37.
- [9] 周子悦, 年夫顺, 孙超, 等. 基于多频段拼接的高分辨率太赫兹成像技术[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(5): 138-146.
- ZHOU Z Y, NIAN F SH, SUN CH, et al. High-resolution terahertz imaging technology based on multi-band stitching[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(5):138-146.
- [10] CHEN Z, MA X Y, ZHANG B, et al. A survey on terahertz communications[J]. *China Communications*, 2019, 16(2):1-35.
- [11] MENG Z K, SHI Y, WEI W Y, 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.
- [12] KHAN M I W, WOO J C, YI X, et al. A 0.31-THz orbital-angular-momentum(OAM) wave transceiver in CMOS with bits-to-OAM mode mapping[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2022, 57(5): 1344-1357.
- [13] 唐滔, 张烈平, 张鑫, 等. 多层可延展柔性电路皮肤舒适性及器件延展性优化[J]. *国外电子测量技术*, 2023, 42(9):37-48.
- TANG T, ZHANG L P, ZHANG X, et al. Optimization of skin comfort and device ductility for multi-layer scalable flexible circuits [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2023, 42(9): 37-48.
- [14] CHEN J Q, LIU X M, CHEN J SH, et al. Underestimated nutrient from aquaculture ponds to Lake Eutrophication: A case study on Taihu Lake Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130749.
- [15] 张小勇, 寇海荣, 尚珍珍, 等. 基于 GO/Mxene 复合材料的柔性 LC 无线湿度传感器研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(6):154-160.
- ZHANG X Y, KOU H R, SHANG ZH ZH, et al. Research on flexible LC wireless humidity sensor based on GO/Mxene [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(6):154-160.
- [16] HE Z X, GU S D, TUZ R V, et al. Stable vortex waves generation by a flexible antenna made of highly conductive graphene film[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(23): 231103.
- [17] MA R, CHEN Z T, ZHAO D N, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene for electrode materials of supercapacitors[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 19(9): 11501-11529.
- [18] 王蒙军, 靳善美, 户天宇, 等. 形变稳定的负磁导率超材料双频柔性天线[J]. *电子元件与材料*, 2024, 43(3): 335-346.
- WANG M J, JIN SH M, HU T Y, et al. Deformation-stable dual band flexible antenna based on negative permeability metamaterials [J]. *Electronic Components and Materials*, 2024, 43(3): 335-346.
- [19] JIANG J H, YU SH X, KOU N, et al. Generation of orbital angular momentum vortex beams with cylindrical and conical conformal array antennas[J]. *International Journal of RF & Microwave Computer-Aided Engineering*, 2022, 32(1): E22914.

作者简介

管雨轩, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁仿真研究与天线设计。

E-mail: zyx04137777@163.com

成国庆, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电磁仿真研究。

E-mail: 1276424017@foxmail.com

王全全(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为电波传播与无线信道分析、石墨烯纳米材料与器件仿真。

E-mail: wangqq@njupt.edu.cn

吕云鹏, 博士, 副教授, 主要研究方向为微波毫米波器件理论与设计、宽带移相器及天线阵列理论与设计。

E-mail: yunpenglyu@njupt.edu.cn