

使用石墨烯的超宽带轨道角动量螺旋天线设计<sup>\*</sup>李建晟<sup>1,2</sup> 王全全<sup>1</sup> 王国庆<sup>3</sup> 宛汀<sup>1</sup>(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003; 2. 南京邮电大学波特兰学院 南京 210023;  
3. 金篆信科有限责任公司南京分公司 南京 210012)

**摘要:** 轨道角动量涡旋波束各个模态之间相互正交,可以很好地解决频谱资源紧张的问题。针对目前轨道角动量天线普遍存在带宽较窄的问题,设计了一种太赫兹频段的超宽带轨道角动量四臂螺旋天线。研究了馈电端口之间连续相位差与生成模态之间的关系,使用了一种石墨烯双环结构并通过调整优化天线的结构尺寸来提高天线的性能。实验结果表明,通过简单调整馈电相位差,就能够产生模态数为0、1、2和3的涡旋波,并且不同模态下天线的增益均在7.5 dBi以上。同时所设计的天线绝对带宽达到了8.85 THz,在中心频率6 THz处其相对带宽可以达到147%, $S_{11}$ 为-50 dB,与传统天线相比改善较大,为太赫兹频段的模态复用提供了一定的现实意义。

**关键词:** 轨道角动量;石墨烯;超宽带;螺旋天线

**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 ultra-wideband OAM spiral antenna using graphene

Li Jiansheng<sup>1,2</sup> Wang Quanzhan<sup>1</sup> Wang Guoqing<sup>3</sup> Wan Ting<sup>1</sup>(1. School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;  
2. Portland Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;  
3. Jinzhuan Xinke Co., Ltd., Nanjing Branch, Nanjing 210012, China)

**Abstract:** Every mode of orbital angular momentum vortex beam is orthogonal to each other, which can solve the problem of spectrum shortage well. In order to solve the problem of narrow bandwidth of orbital angular momentum antenna, an ultra-wideband orbital angular momentum four-arm spiral antenna in terahertz band is designed. The relationship between the continuous phase difference of the feed ports and the generated modes is studied. A graphene double ring structure is used and the antenna performance is improved by adjusting and optimizing the antenna structure size. The experimental results show that the vortex beams with mode number 0, 1, 2 and 3 can be generated by simply adjusting the phase difference, and the gain under different mode number is above 7.5 dBi. At the same time, the absolute bandwidth of the designed antenna reaches to 8.85 THz, and the relative bandwidth at the center frequency of 6 THz can reach to 147% with the  $S_{11}$  is -50 dB. The designed antenna is greatly improved compared with the traditional antenna, and provides a certain significance for the terahertz band mode multiplexing in practical application.

**Keywords:** orbital angular momentum; graphene; ultra-wideband; spiral antenna

## 0 引言

随着无线通信技术的快速发展,对更高数据传输速率和更大网络容量的需求不断增加。电磁波在传播的过程中会携带角动量和线性动量,其中角动量包括自旋角动量(spin angular momentum, SAM)<sup>[1]</sup>和轨道角动量(orbital angular momentum, OAM)。SAM可视为电磁波的极化方式<sup>[2]</sup>,而OAM则关系到电磁波空间相位的分布。OAM

的模态数 $l$ 理论上可以取任意整数,同时各个模态之间相互正交,每个传输信道相互独立,这为电磁波的复用提供了一种新的思路与维度,可以有效缓解频谱资源匮乏的问题<sup>[3]</sup>。太赫兹的频率范围为0.1~10 THz,兼具微波和红外频段的优点,能提供更大的传输带宽,太赫兹波具有更好的方向性、保密性以及抗干扰能力,被预测为下一代移动通信的关键技术。石墨烯<sup>[4]</sup>作为一种新兴的电磁材料在光学、电学、热学和力学等方面都具有优异的性能,在太赫兹

领域应用前景广泛。

如何用天线产生多个模态的 OAM 涡旋波是相关研究的重点,目前主要采用超表面天线<sup>[5-6]</sup>、阵列天线<sup>[7-8]</sup>以及介质谐振器天线<sup>[9-10]</sup>等来生成 OAM 涡旋波。2018 年,文献[11]使用传统金属和介质材料设计了一种透射超表面,在 X 波段可以产生  $l=+1$  的 OAM 涡旋波。2019 年,文献[12]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。2020 年,美国杜克大学的 Liu 等采用单个圆形贴片,设计了一种微波频段的可重构 OAM 圆形贴片天线<sup>[13]</sup>,结构简单,通过一个 PIN 二极管便可改变涡旋波的模态数,生成了  $l=\pm 2$  的涡旋波。2022 年,文献[14]通过一组微带环形谐振器,在微波频段不同频点可以产生多个模态的 OAM 涡旋波。2023 年,文献[15]提出了一种工作在毫米波频段的 OAM 谐振器天线,其相对带宽为 74.3%,仅在  $l=+1$  时增益较高,其余模态下增益较低。

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问题,例如天线的带宽较窄、生成的 OAM 涡旋波模态数量少以及整体增益不高,且研究工作多集中在 X 波段、Ku 波段,对太赫兹领域的探索较少。未来 6G 移动通信技术对通信系统的容量和频谱利用率提出了更高的要求,针对上述问题,本文基于石墨烯的优异特性以及阿基米德螺旋天线 (archimedean spiral antenna, ASA) 宽频带、圆极化的优点<sup>[16]</sup>,优选结构参数设计了一种工作在太赫兹频段的 OAM 螺旋天线,实现了天线的超宽频带。研究了各个馈电端口之间的连续相位差与生成模态数之间的关系,在保证天线生成较多 OAM 模态的同时,各个模态都有较好的增益,在提高通信系统容量与频谱利用率方面应用潜力巨大。

## 1 设计原理

ASA 曲线方程的极坐标形式如下:

$$r = r_0 + a\phi \quad (1)$$

其中,  $r$  是极坐标的原点跟曲线上任意一点的距离,  $(r, 0)$  是曲线上的任意一点,式中的  $\phi$  是方位角,  $r_0$  是螺旋线内侧起始点到原点的距离,即内径,常数  $a$  是螺旋增长率。

螺旋的内径  $r_0$  会对天线阻抗匹配<sup>[17]</sup>和工作频率造成影响,需要对其进行合理的选取,通常有:

$$r_0 \leq \lambda_m / 8 \quad (2)$$

其中,  $\lambda_m$  是最高工作频率下的波长,对于螺旋天线的 外径  $r_1$  来说,通常有:

$$2\pi r_1 \geq 1.25\lambda_n \quad (3)$$

其中,  $\lambda_n$  是最小工作频率下的波长。

对于单臂 ASA,只有一个馈电端口,不同的频率下可以产生不同的 OAM 模态数。双臂的 ASA 产生的 OAM 涡旋波的模态数为 0、2、4、...、 $2b$  或 1、3、5、...、 $2b+1$  ( $b$  为

非负整数)<sup>[18]</sup>。

对于  $N$  臂 ASA ( $N \geq 3$ ),有  $N$  个馈电端口,当产生不同模态数  $l$  的 OAM 涡旋波时,需要对各个馈电端口施加不同连续相位差  $\Delta\phi$  的馈电,不同模态数下的相位差为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi l}{N} \quad (4)$$

其中,  $l$  为小于  $N$  的整数。例如,对于 4 臂 ASA,  $\Delta\phi = 0.5\pi l$ ,当模态数为 1 时,各个馈电端口之间的连续相位差为  $90^\circ$ 。

在进行  $N$  臂 ASA 的实际设计时,为了使天线产生携带不同 OAM 模态数的涡旋波,对天线的内径  $r_0$  和外径  $r_1$  的选择有一定的要求,即:

$$2\pi r_0 \leq (|l|+1)\lambda_m \leq 2\pi r_1 \leq (|l|+1+N)\lambda_n \quad (5)$$

其中,  $\lambda_m$  与  $\lambda_n$  分别为最小工作频率  $f_{\min}$  与最大工作频率  $f_{\max}$  对应的波长。最大带宽比  $f_r$  为:

$$f_r = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{\lambda_m}{\lambda_n} \leq \frac{|l|+1+N}{|l|+1} \quad (6)$$

从式(6)中可以看出,天线的工作频率范围取决于 OAM 的模态数  $l$  与螺旋天线的旋臂数量  $N$ ,当模态数  $l$  越小,  $N$  越大时,天线的工作频段越宽。

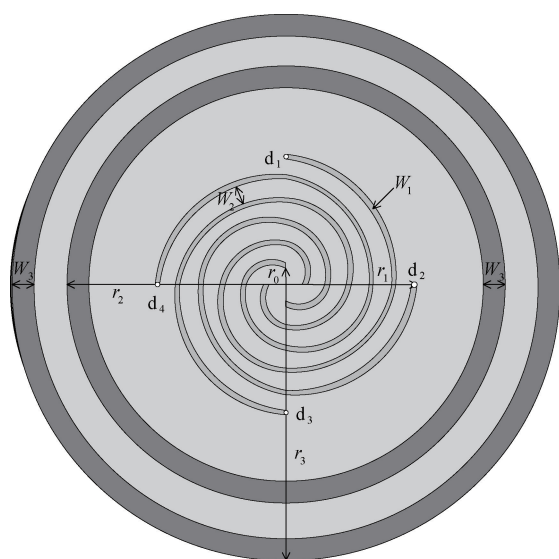
## 2 OAM 天线设计与优化

### 2.1 天线结构设计

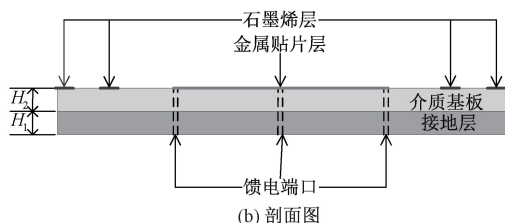
本设计选用四臂 ASA 来生成 OAM 涡旋波。所设计的天线结构如图 1 所示,其中图 1(a)为天线的俯视图,图 1(b)为剖面图。天线结构由接地层、介质基板、金属贴片层、石墨烯层和馈电端口组成。接地层和介质基板层均采用圆形设计,其中接地层所使用的材料为理想电导体 (perfect electric conductor, PEC),厚度和半径分别为  $H_1 = 1 \mu\text{m}$ 、 $r_3 = 120 \mu\text{m}$ ;介质基板所使用的材料为 Rogers RT5880,相对介电常数为 2.2,厚度  $H_2 = 1.1 \mu\text{m}$ ,半径同样是  $120 \mu\text{m}$ 。本次所设计的 ASA 天线工作频率为 2~11 THz,根据设计原理可知,螺旋线的内径  $r_0 \leq 3.413 \mu\text{m}$ ,螺旋线的外径  $r_1 \geq 29.84 \mu\text{m}$ 。金属贴片为 PEC 四臂 ASA 结构,螺旋线的内径  $r_0 = 1.5 \mu\text{m}$ ,外径  $r_1 = 59.5 \mu\text{m}$ ,宽度  $W_1 = 2.8 \mu\text{m}$ ,两条螺旋线之间的间隔  $W_2 = 1.8 \mu\text{m}$ 。石墨烯双环与螺旋线在同一平面,温度为 300 K,化学势为 0.9 eV。内环石墨烯的半径  $r_2 = 80 \mu\text{m}$ ,外环石墨烯的半径  $r_3 = 120 \mu\text{m}$ ,双环宽度均为  $W_3 = 10 \mu\text{m}$ 。天线的 4 个馈电端口  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  和  $d_4$  分别位于四条悬臂外侧,通过采用同轴馈电的方式对馈电端口进行不同相位的馈电,可以产生模态数不同的 OAM 涡旋波。

### 2.2 结构尺寸优化

对四臂 ASA 进行设计的时候,为了提高天线的性能,通常会对天线的主要结构参数进行一定的分析优化。为分析天线主要的结构参数变化对天线性能的影响,以螺旋线的宽度  $W_1$  为例来观察对天线回波损耗造成的改变。当



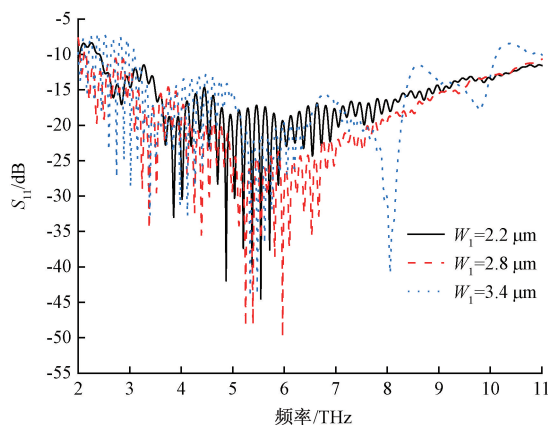
(a) 俯视图



(b) 剖面图

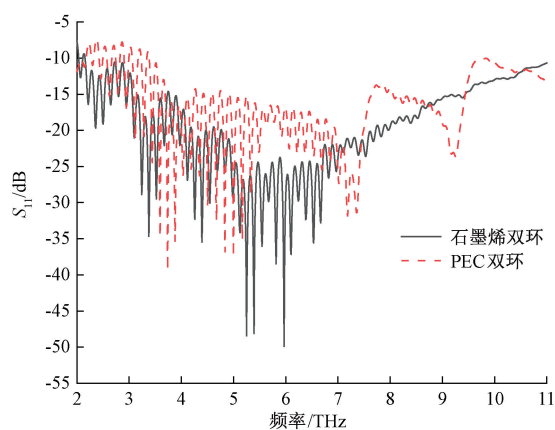
图1 天线结构图

$W_1 = 2.2 \mu\text{m}$  时,此时螺旋线的外径为  $54.3 \mu\text{m}$ ;当  $W_1 = 3.4 \mu\text{m}$  时,此时螺旋线的外径为  $64.7 \mu\text{m}$ ,以上两种情况下的外径均满足约束条件。仿真结果图如图2所示,当  $W_1 = 2.2 \mu\text{m}$  时,螺旋线整体半径变小,此时天线在工作频段内的  $S_{11}$  数值很大,回波损耗较差,带宽基本维持不变。当  $W_1 = 3.4 \mu\text{m}$  时,天线的带宽以及回波损耗均不及  $W_1 = 2.8 \mu\text{m}$  时,并且随着螺旋线外径的增大,天线的传输损耗也会增大,通过对比可以看出本次设计中所选取的  $W_1 = 2.8 \mu\text{m}$  的合理性。


 图2 不同  $W_1$  时天线的  $S_{11}$  参数图

### 3 仿真分析

仿真实验使用的软件是 CST Studio Suite。为了提高天线的带宽以及其他性能,本文设计了一种使用石墨烯双环的 ASA 来生成 OAM 涡旋波。天线的  $S_{11}$  参数如图3所示,在工作频率  $2 \sim 11 \text{ THz}$  之间,  $S_{11}$  均处于  $-10 \text{ dB}$  以下。从该  $S_{11}$  参数图中可以看出,本次设计的 OAM 天线的具有很大的带宽。在谐振点  $5.2 \text{ THz}$  左右,天线的相对带宽高达  $170\%$ ,与其他能够生成 OAM 涡旋波的天线相比得到了巨大的提升,能够更好地满足无线通信领域在未来的发展需求。在中心频率  $6 \text{ THz}$  附近,天线的  $S_{11}$  达到了  $-50 \text{ dB}$ ,此时天线的回波损耗效果很好,只有少部分的能量被反射回去,天线端口阻抗匹配效果很好,反射损失很小。


 图3 使用不同材料时天线的  $S_{11}$  参数图

同样地,为验证石墨烯材料对天线性能带来的改善,将原有结构中的石墨烯双环替换为 PEC 双环,二者之间的对比如图3所示。从图中可以看出,PEC 双环天线的整体损耗相较于石墨烯双环天线有明显升高,在  $4 \sim 7 \text{ THz}$  内,PEC 天线的  $S_{11}$  数值整体升高尤为明显,在中心频率  $3.7 \text{ THz}$  的  $S_{11} = -40 \text{ dB}$ ,相较于石墨烯双环天线增加了  $10 \text{ dB}$ 。同时在天线带宽方面,石墨烯双环天线和 PEC 双环天线的  $-10 \text{ dB}$  带宽分别为  $8.85 \text{ THz}$ 、 $7.80 \text{ THz}$ ,增加了  $13\%$ 。

通过分别对天线的各个馈电端口进行连续相位差为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  的馈电,可以得到  $l=0,1,2,3$  的 OAM 涡旋波。涡旋相位图是衡量 OAM 天线的重要指标之一,各个模式下的涡旋相位图如图4(a)~(d)所示,从图中可以看出,产生的涡旋形态清晰规整,符合 OAM 涡旋波的螺旋相位特征,并且相位没有发生畸变,说明该天线可以稳定地产生 OAM 波。

隔离度是衡量天线各个端口相互干扰的一个重要指标。由于天线结构及四个馈电端口对称分布,因此选取端口1,对其进行单独激励,通过仿真实验给出端口1与其他端口之间的反射系数  $S_{21}$ 、 $S_{31}$ 、 $S_{41}$  如图5所示,用来考察天



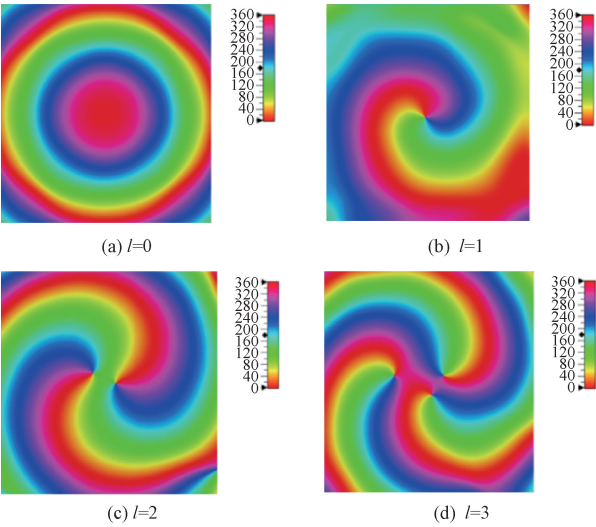


图 4 各模式下的 OAM 涡旋相位图

线各个端口之间的隔离度。由图可知在工作频段 2 ~ 11 THz 的绝大部分,端口间的隔离度在 20 dB 以上,其中  $S_{21}$  与  $S_{31}$  在 4 THz 处最小,分别为 -44.5 dB 和 -52.6 dB。由于天线结构对称,  $S_{21}$  与  $S_{41}$  为同一条曲线。得益于两个端口之间有更远的距离,天线端口 1 与端口 3 之间具有更好的隔离度。

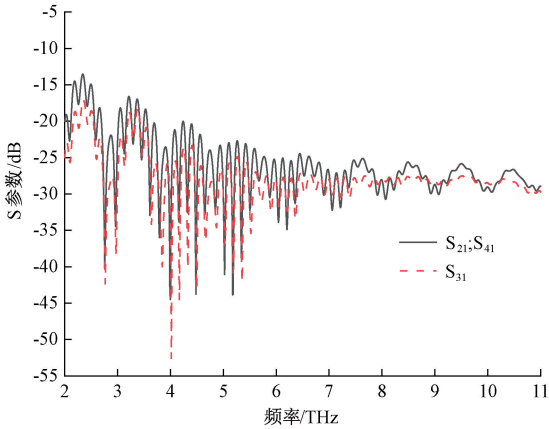


图 5 天线端口 1 的 S 参数曲线

当天线工作在中心频率 6 THz 时,各个模式下的 3D 远场辐射图如图 6 左侧部分所示。 $l=0,1,2,3$  时天线的增益分别为 8.16、8.06、7.60、7.63 dBi。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。作为对比,当采用 PEC 双环时天线在各个模式下的最大增益为 7.11 dBi。图 6 右侧部分为天线在各个模式下的 E 面辐射方向图( $\phi=0^\circ$ ),可以看出天线增益效果较好,且因为天线的馈电端口对称分布,天线的 E 面辐射方向图也表现为对称分布。同时从图 6 可以观察到,随着模式的增加,天线的增益略有下降,能量也相应发散,这是 OAM 天线的一种普遍现象,也是以后 OAM 天线需要解决的难点之一。

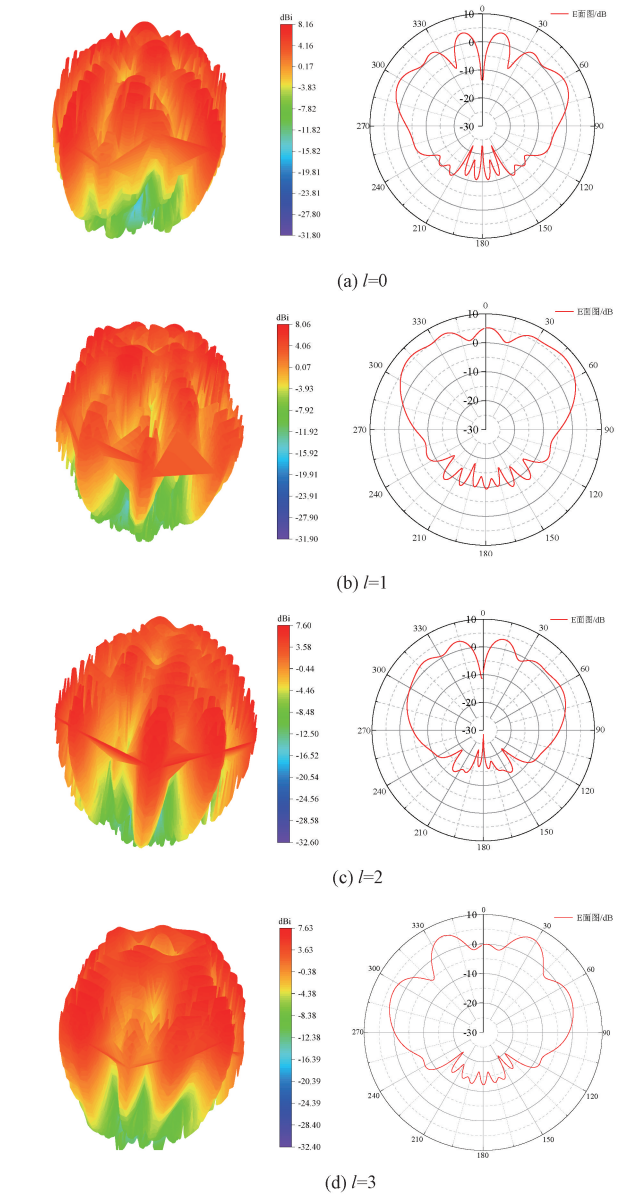


图 6 天线工作在 6 THz 时各个模式下的 3D 远场辐射图(左侧)和 E 面辐射方向图(右侧)

表 1 是本文设计的天线与文献中现有 OAM 天线的对比,包括天线的工作频率、相对带宽以及生成的模式。本文提出的 OAM 天线工作在太赫兹频段,可以产生 4 种形态清晰稳定的 OAM 涡旋波束,并且相较于其他的天线结构,采用 ASA 可以产生更大的带宽和较多的模式。

表 1 不同 OAM 天线性能对比

文献	工作频率	相对带宽/%	模式
[11]	8~12 GHz	40	1
[12]	4.2~5.6 THz	28.5	0,1,2
[13]	13.2~14 GHz	5.8	1
[14]	2,4,6,8 GHz	—	1,2,3,4
本文	2~11 THz	147	0,1,2,3

## 4 结 论

本文使用石墨烯材料,设计了一种工作在太赫兹频段的OAM螺旋天线。通过调整设计所用的ASA螺旋线的宽度分析了天线结构参数对天线性能的影响,并对天线结构参数进行了优化。仿真结果表明,只需简单调整馈电相位差即可生成 $l=0,1,2,3$ 的涡旋波束,同时所设计的天线具有低损耗、超宽带、高增益、易加工等优点,绝对带宽高达8.85 THz,并且相较PEC双环,性能更加优异,在未来6G移动通信、深空探测等领域有很好的应用前景。

## 参考文献

- [1] CHEN R, ZHOU H, MORETTI M, et al. Orbital angular momentum waves: Generation, detection, and emerging applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 22(2): 840-868.
- [2] 王丽黎, 王新庄, 张衡, 等. 加载极化扭转人工磁导体的双频圆极化天线[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 33-40.
- [3] 赵林军, 张海林, 刘乃安. 涡旋电磁波无线通信技术的进展[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(11): 3075-3085.
- [4] 赵程, 周佳成, 张顺毅, 等. 基于激光划刻的石墨烯发声器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 171-177.
- [5] LIN Z S, BA Z L, WANG X. Broadband high-efficiency electromagnetic orbital angular momentum beam generation based on a dielectric metasurface[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 1-11.
- [6] BAI X D, ZHANG F L, SUN L, et al. Dynamic millimeter-wave OAM beam generation through programmable metasurface[J]. Nanophotonics, 2022, 11(7): 1389-1399.
- [7] YOO J U, SON H W. Quad-mode radial uniform circular array antenna for OAM multiplexing[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2020, 14(8): 728-733.
- [8] 孙牧歌, 孙学宏, 常伟, 等. 基于环形OAM阵列天线的复用传输系统研究[J]. 微波学报, 2019, 35(1): 38-43, 48.
- [9] YU Z, GUO N, FAN J L. Water spiral dielectric resonator antenna for generating multimode OAM[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(4): 601-605.
- [10] ABD RAHMAN N A, NOOR S K, IBRAHIM I M, et al. A low-profile dielectric resonator antenna array for OAM waves generation at 5G NR bands [J].

Micromachines, 2023, 14(4): 841.

- [11] QIN F, WAN L L, LI L H, et al. A transmission metasurface for generating OAM beams [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(10): 1793-1796.
- [12] 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.
- [13] LI W W, ZHANG L, YANG S Y, et al. A reconfigurable second-order OAM patch antenna with simple structure [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(9): 1531-1535.
- [14] HE Z X, WANG Y T, WANG X L, et al. Multi-band orbital angular momentum mode-division multiplexing by a compact set of microstrip ring-shaped resonator antenna [J]. Optics Express, 2022, 30(26): 46209-46226.
- [15] 王艳妮, 孙学宏, 刘丽萍, 等. 一种毫米波UWB多模态OAM介质谐振器阵列天线[J]. 无线电工程, 2023, 53(2): 439-448.
- [16] 周嘉豪, 周勇, 庄俊杰. 宽频带的微带等角螺旋天线设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(13): 193-197.
- [17] DHARMARATHNA B, MADUSANKA H, KARUNARATHNA M. PCB base log-periodic antenna for mobile communications[J]. Instrumentation, 2021, 8(3): 46-51.
- [18] YANG Y, SHEN F, ZHANG Z, et al. A general n-arm archimedean spiral antenna synthesis method for broadband multiple orbital angular momentums generation [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2023, 17(2): 140-150.

## 作者简介

**李建晟**, 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: ljs010505@163.com

**王全全**(通信作者), 博士, 副教授, 硕士生导师, 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

**王国庆**, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电磁仿真研究。

E-mail: 1175173331@foxmail.com

**宛汀**, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为无线通信和电磁仿真。

E-mail: want@njupt.edu.cn