

# 基于涡旋电磁波的大容量通信系统设计

田震<sup>1</sup>, 张德智<sup>1</sup>, 李金龙<sup>1</sup>, 冯强<sup>2</sup>

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076; 2. 西安电子科技大学, 西安 710100)

**摘要:** 鉴于涡旋电磁波所体现出的独特空间电磁场分布特征, 以及其携带的轨道角动量在理论上所具有的无穷维度模式正交特性, 涡旋电磁波在无线通信领域和雷达探测与成像领域均表现出重要的研究价值和应用潜力; 通过涡旋电磁波空间电磁场的分布和原理入手, 采用在 C 波段设计阵元交替排布的双圆环均分天线阵列, 并基于带状线屏蔽性能强的优势设计 4 路 1 分 8 的叠层馈电网络, 从而产生 4 种混合模式 (+1, -1, +2, -2) 的涡旋天馈系统; 通过搭建混合模式涡旋电磁波大容量通信系统测试收发天馈之间模式隔离度大于 15 dB, 在此基础上加入软件无线电平验证通信系统多路涡旋波信号传输特性, 测试验证 4 个端口均可正确接收、解调电磁信号, 实现频谱效率 4 倍的提升。

**关键词:** 混合模式; 涡旋电磁波; 带状线; 大容量通信; OAM 射频收发链路

## Design of Large Capacity Communication System Based on Vortex Electromagnetic Waves

TIAN Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Dezhi<sup>1</sup>, LI Jinlong<sup>1</sup>, FENG Qiang<sup>2</sup>

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China; 2. Xidian University, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Vortex electromagnetic waves have the characteristics of unique spatial electromagnetic field distribution and theoretical orthogonality of infinite dimensional modes in orbital angular momentum, the vortex electromagnetic waves show the important research value and application potential in wireless communication field and radar detection and imaging field. Starting from the distribution and principle of the spatial electromagnetic field of the vortex electromagnetic waves, a double ring equalization antenna array with the alternating array elements in the C-band is designed, and a stacked feed network of 4-channel and 1 to 8 is designed based on the advantages of strong stripline shielding performance, so as to produce a vortex antenna feeder system with four mixed modes (+1, -1, +2, -2). the hybrid modal vortex electromagnetic wave large capacity communication system is built to test the modal isolation, the isolation of the sending and receiving antenna feeders is greater than 15 dB, on this basis, the software defined radio platform is added to verify the transmission characteristics of the multi-channel vortex wave signal of the communication system, and the test verifies that all four ports can correctly receive and demodulate electromagnetic signals, which improves 4 times in spectral efficiency.

**Keywords:** hybrid modality; vortex electromagnetic wave; stripline; large-capacity communication; OAM RF transceiver link

## 0 引言

无线通信技术已成为现代社会发展中必不可少的技术, 在民用、军用领域都具有不可替代的作用<sup>[1-5]</sup>。随着无线电技术的飞速发展, 有限且不可再生的电磁频谱已变得拥挤不堪, 新的无线复用技术面临迫切需求, 从物理层面上进行深入研究是解决这一问题的合理手段。近些年来, 携带轨道角动量信息的涡旋电磁波被引入微波频段, 因为涡旋电磁波在物理层具有全新的维度, 即在理论上, 轨道角动量模式具有无限多个相互正交的模式, 因此携带有轨道角动量的涡旋电磁波具有巨大的应用潜力和应用前景。在军用领域, 现代战场中导弹集群通信系统同样面临着频谱资源受限且易受敌方电磁压制、干扰、欺骗的问题, 迫切需要提升频谱利用率, 并能够增强数据传输量、模式隔离度的新型通信技术, 基于带状线的混合模式涡旋电磁波大容

量通信系统显示出其在解决上述问题的可能性。

在经典的电磁理论中对于轨道角动量就有一定的描述和研究, 但只限于概念上的研究, 大多数处于理论阶段, 没有实际的实验和工程样机的验证<sup>[9-10]</sup>。直到 1992 年, Allen 等人<sup>[11-12]</sup>通过实验进一步研究显示拉盖尔-高斯波束具有完整的轨道角动量特性, 并确定了轨道角动量和相位因子项  $e^{j\ell\varphi}$  之间的对应关系, 这个研究发现对于轨道角动量的工程化的飞速发展做出巨大贡献。追根溯源, 轨道角动量的研究一开始主要集中于光学领域<sup>[13]</sup>, 而在 2007 年瑞典物理学家 Thidé 等人<sup>[14]</sup>通过均匀圆形阵列天线实现了射频轨道角动量的产生, 产生了对应的涡旋电磁波束。从此, 关于射频轨道角动量涡旋电磁波束的研究也进入了繁荣发展时期<sup>[10-15]</sup>, 涡旋电磁波束的生成模式越来越多样化, 尤其是在无线通信和雷达探测与成像领域<sup>[16]</sup>, 以及涉及涡旋电磁波产生与接收的关键天线技术<sup>[17-18]</sup>, 呈现百花齐放的场景。

收稿日期: 2022-10-30; 修回日期: 2022-12-08。

作者简介: 田震 (1995-) 男, 甘肃天水人, 硕士, 工程师, 主要从事测控通信系统设计方向的研究。

引用格式: 田震, 张德智, 李金龙, 等. 基于涡旋电磁波的大容量通信系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 156-162, 221.

目前来说, 涡旋电磁波最初是通过圆形阵列引入<sup>[14]</sup>, 后续又经历一些发展<sup>[15-18-21]</sup>, 但是现在对于多种模式的涡旋电磁波都是采用设计独立的多种模式的涡旋电磁波天线阵列, 结合微带线馈电网络, 单独生成特定模式的涡旋电磁波, 最后将各个模式的天线阵列进行物理上的拼接来实现空间中存在不同模式的涡旋波。这种方式的问题在于空间利用率低、馈电网络难设计、模式隔离度和小型化程度差、安装和设计上工作量大难实现的问题, 因此设计一款小型化, 空间利用率和模式隔离度高, 在同一天线阵面上的混合模式涡旋电磁波生成结构对于涡旋波大容量通信具有重要的意义和良好的发展潜力。

本论文从涡旋电磁波和涡旋电磁场的角度切入, 对混合模式涡旋波束的产生和传输进行研究和分析。本文的主要研究内容如下: 首先通过研究涡旋电磁波理论, 结合平面相控阵列天线和基于带状线的抗干扰、多输入馈电网络技术, 设计双圆环阵元构型排布、多层结构的混合模式 (+1, -1, +2, -2) C 频段涡旋电磁波天馈系统; 进一步构建起完整的轨道角动量 (OAM, orbital angular momentum) 涡旋电磁波束收发射频大容量通信链路模型; 最后对所设计的混合模式涡旋电磁波束产生与接收天线阵列进行加工, 并进行 OAM 涡旋波束的隔离度测试和该通信系统大容量数据传输分析。

## 1 涡旋电磁波理论

### 1.1 涡旋电磁波生成原理

在经典力学体系中, 角动量通常被分为自旋角动量和轨道角动量, 因此对于电磁角动量, 也可以考虑分为自旋角动量  $S$  和轨道角动量  $L$ 。根据麦克斯韦方程和角动量守恒定律, 就可以将电磁场的角动量表示为:

$$\vec{J} = \int \epsilon_0 \vec{r} \times \text{Re} \{ \vec{E} \times \vec{B}^* \} dV \quad (1)$$

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad (2)$$

其中:  $\vec{J}$  表示角动量,  $\vec{L}$  表示轨道角动量,  $\vec{S}$  表示自旋角动量,  $\vec{E}$  是电场强度,  $\vec{B}$  是磁感应强度,  $\epsilon_0$  表示介电常数, \* 表示共轭。

涡旋电磁波是由平面波加一个旋转相位因子  $\exp(jl\varphi)$  产生, 其具体表现形式为相位波前从平面波转化为螺旋旋转相位结构。因此, 涡旋电磁波可以表达为:

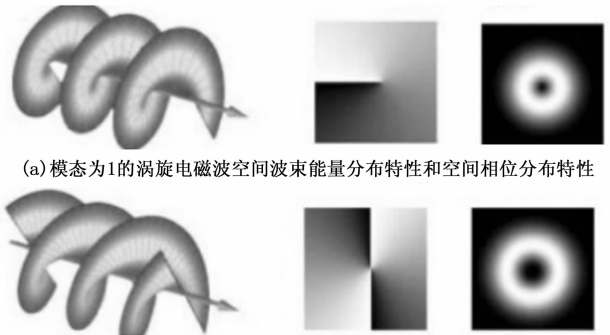
$$U(r, \varphi) = A(r) \cdot \exp(il\varphi) \quad (3)$$

其中:  $A(r)$  表示电磁波的幅度值,  $r$  为球坐标系中的矢径,  $l$  为涡旋电磁波的模态值,  $\varphi$  为方位角。因此根据涡旋电磁波的表达式可知, 涡旋电磁波的产生需要形成随方位角变化的相位分布。若设置阵元坐标为  $(x_i, y_i)$ , 则对于阵列天线的各个阵元的相位值为:

$$\varphi = l \cdot \arctan(x_i/y_i) \quad (4)$$

因此, 涡旋波相位波前绕涡旋中心旋转一周, 相位改变  $2\pi$ , 称其涡旋电磁波模态为 1, 如图 1 (a) 所示, 涡旋波束的相位波前绕涡旋中心旋转一周, 相位改变  $4\pi$  称其涡旋波模态为 2, 如图 1 (b) 所示, 因此可以利用阵列天线, 通

过调控阵元馈电相位来产生不同模式的涡旋电磁波。



(a) 模态为 1 的涡旋电磁波空间波束能量分布特性和空间相位分布特性

(b) 模态为 2 的涡旋电磁波空间波束能量分布特性和空间相位分布特性

图 1 不同 OAM 模式涡旋波束相位波前图

涡旋电磁波是一种携带轨道角动量的, 且具有螺旋状等相位面的电磁波, 与人们所熟知的平面波、球面波等常规电磁波在物理层面上具有较大区别, 因此也具有众多新颖的特性。涡旋电磁波在解析表达式上一个显著的特点是其表达式具有  $e^{jl\varphi}$  的相位因子, 其中的  $l$  为涡旋波的模态值,  $\varphi$  为空间方位角, 因此, 若在垂直于波束传播方向上设置观察面, 便可看到涡旋波的相位分布呈现随方位角逐渐变化的特点, 并在观察面中心点形成相位奇点; 与之对应, 涡旋波波束中心场强为零, 在观察面上形成“圆环状”幅度分布; 同时, 当涡旋电磁波的轨道角动量模态不同时, 各个携带不同轨道角动量模态的涡旋电磁波满足相互正交的特点。

### 1.2 涡旋电磁波接收原理

由于涡旋波的发散特性, 传播一定距离后, 如果使用传统的完整孔径接收技术, 为了获取良好的接收效率, 将需要增加接收端孔径的尺寸。然而, 由于射频接收天线大小具有一定的局限性, 因此不能满足对扩散波束的有效接收。因此, 可通过在完整孔径上均匀采样的方式, 将完整孔径接收衍生到完整孔径取样接收, 其中接收端孔径为与涡旋电磁波传播主轴同心且垂直于主轴的圆。假设在接收圆上均匀布有  $M$  个取样天线, 天线角向间隔为  $2\pi/M$ , 自由空间中传输  $N$  个信道的涡旋电磁波信号, 它们的模式符合  $l_1 - l_2 = n$ 。其中  $l_i$  是任意的 OAM 模式,  $n$  是整数。若将连续的积分进行离散化, 再结合采样定理, 便可以通过离散傅里叶变换 (DFT) 计算出涡旋电磁波对的模态谱, 由此也构成了完整孔径采样接收的基础。

## 2 天线阵列和馈电网络设计和测试

本节首先设计了中心频率在 4.25 GHz 的圆极化微带天线并进行加工和方向图测试, 其次以该微带天线为阵元设计了阵元交替排布的双环阵列天线, 用于生成 4 种模式的涡旋波 ( $l=+1, l=-1, l=+2, l=-2$ ), 并结合带状线的特点以及采取叠层分布的思路设计了具有降低电磁干扰的 4 种模式的馈电网络, 最后对整个天馈进行整合仿真验证, 观测相应的各个模式方向图。

### 2.1 阵元设计和测试

本文设计一种中心馈电的右旋圆极化 (RHCP, right-

handed circularly polarized) 微带天线。一方面, 圆极化天线在某些领域具有独特的优势, 比如卫星通信层面, 圆极化天线可以避免电磁波极化特性随着天线平台姿态改变导致的极化损失过大; 另一方面, 因为军事领域以及涡旋电磁波阵列天线的馈电相位要求较高, 为了简化馈电网络设计, 采取中心馈电的圆极化天线作为阵列天线阵元, 通过旋转圆极化天线一定角度来补偿涡旋波束所产生需要的相位<sup>[22]</sup>。一般的圆极化天线的馈电不在贴片中心位置, 这就会导致旋转操作后的馈电网络不是对称分布, 使得功率分配变复杂。为了解决这个问题, 本论文设计微带天线的设计, 并且采用在贴片上蚀刻 U 型槽的方式, 一方面改变电流路径, 使得阵元尺寸变小且形成圆极化的特性, 其次通过调整开槽的尺寸使得该阵元的馈点在其几何中心上, 方便后续通过对阵元的旋转改变相位而不影响阵元的馈电位置, 因此就有图 2 所示的点频在 4.25 GHz 的中心馈电结构的右旋圆极化微带天线阵元结构。

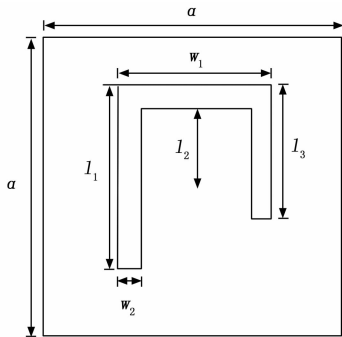


图 2 中心频率 4.25 GHz 的中心馈电圆极化阵元天线结构图

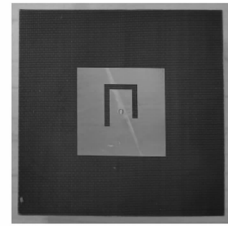
整个阵元天线由开 U 型槽方形贴片, 衬底结构和接地板组成, 衬底材料选择相对介电常数为 2.65 的 F4B 材料, 厚度为 2 mm, 该圆极化微带天线的参数见表 1 所示。

表 1 阵元天线参数表

参数	值(mm)
$a$	18
$l_1$	9
$l_2$	4.5
$l_3$	7.2
$w_1$	7
$w_2$	1.1

根据设计方案, 该微带天线阵元通过同轴线馈电, 馈电位置处于贴片中心, 通过仿真结果进行优化参数, 然后对该天线阵元进行加工和测试, 如图 3 所示。

将阵元在 HFSS (high frequency structure simulator) 中进行全波仿真, 仿真结果表明在 4.2~4.3 GHz 之间  $S_{11}$  系数低于 -15 dB, 轴比在 4.23~4.27 GHz 之间低于 3 dB, 满足圆极化的要求。在仿真结果基础上对该阵元进行加工, 由于实际加工过程中存在一定的误差, 在根据板材特性和加工误差的基础上进行误差修正后进行性能测试, 根据图 4 所示的



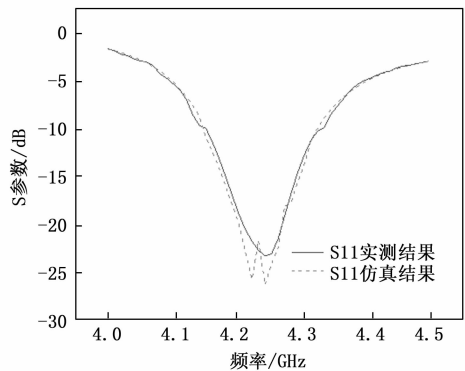
(a) 天线阵元俯视图



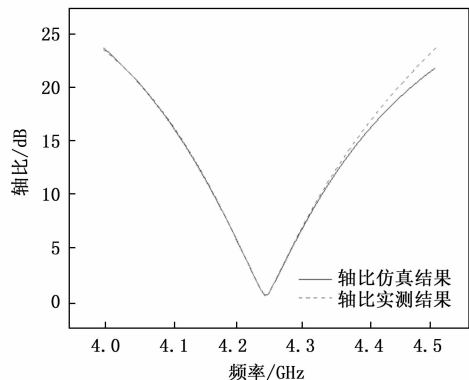
(b) 暗室多探头近场扫描场景

图 3 天线单元实物图及微波暗室测量环境

实测结果, 该微带天线阵元工作在中心频率 4.25 GHz 时, 天线单元辐射方向性良好, 天线  $S_{11}$  系数低于 -15 dB, 带宽范围为 4.14~4.35 GHz, 轴比低于 3 dB 带宽范围为 4.23~4.27 GHz, 与仿真计算的结果基本吻合, 各项指标符合预期设计要求, 可用该天线单元进行阵列的设计。



(a) 阵元天线实测S11结果和仿真S11结果对比图



(b) 阵元天线实测轴比结果和仿真轴比结果对比图

图 4 天线单元实测结果和仿真结果图

## 2.2 涡旋天线阵列设计和测试

对于涡旋电磁波的生成, 为了改善传统多圆环均匀圆形阵列中一个圆环生成一个模态时造成尺寸过大的问题,

本文采用相邻阵元交替排布的双圆环均匀天线阵列,实现了同圆环可生成两种模态涡旋波。本设计中每种涡旋波的生成阵元相邻排布,且相邻阵元之间的相位差为 $\delta\varphi = \frac{2\pi l}{N}$ ,

其中 $N$ 为天线元的数量, $l$ 为任意正整数,因此就可以根据具体天线阵元数目得到不同的相位差,在本设计中,内外环天线阵元数目皆为16个,其中每个模态占据的阵元数目为8个,为了简便天线阵列馈电网络设计,并且同模态的阵元需要通过旋转特定的角度保证其模态生成的正确性,因此根据涡旋电磁波的特性,可以得到各个模态的相位差分别为: +1 模态为 $45^\circ$ , -1 模态为 $-45^\circ$ , +2 模态为 $90^\circ$ , -2 模态为 $-90^\circ$ ,图5中黑色框标注的阵元为各个模态的初始阵元,设定其初始相位为 $0^\circ$ ,其余同模态的阵元按照相位差进行计算,并且通过旋转阵元来实现这部分相位的补偿,故同模态相邻阵元之间的旋转角度差值也应该为+1 模态为 $45^\circ$ , -1 模态为 $-45^\circ$ , +2 模态为 $90^\circ$ , -2 模态为 $-90^\circ$ 。

对于本设计采用的双圆环阵列天线,优势在于通过采用内环产生+1和-1模态,外环产生+2和-2模态的双圆环均匀阵列,每个圆环均为16个阵元,每种模态占用8个阵元,两种模态所对应的阵元交叉排列,并在此基础上确定内外环半径分别为 $R_1 = 1.55\lambda$ ,  $R_2 = 2.25\lambda$ ,在此圆环半径下,对于4种模态涡旋电磁波的电磁波束发散角就可以尽量保持一致。整个双圆环天线阵列的尺寸为 $450\text{ mm} \times 450\text{ mm}$ ,介质基板材料选择介电常数为2.65的F4B,阵列及下层介质板厚度为2 mm,阵列中的阵元为前文所述的中心馈电的开U型槽的右旋圆极化微带天线,阵元均采用同轴线馈电方式,综上所述,整个双圆环阵列和每种模态对应的阵元位置排布见图5所示。

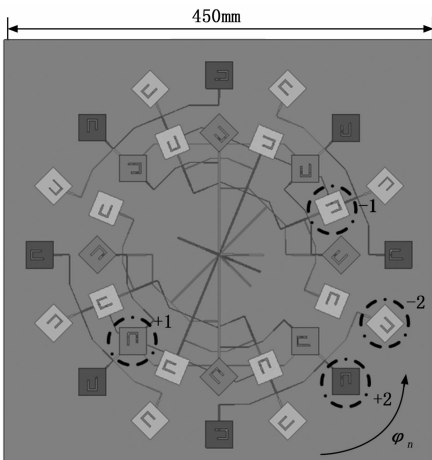


图5 相邻阵元交替排布的双圆环均匀天线阵列示意图

这种双圆环均匀圆形涡旋阵列天线构型使得4种模态涡旋波都可以在同一平面上生成,大大提高空间利用率和降低了加工、安装的误差。

### 2.3 多输入抗干扰叠层馈电网络设计

由于本论文设计的圆极化阵元天线,可以通过物理旋

转来补偿涡旋波束需要的梯度相位分布,因此对于馈电网络就可以简化为1分8的功分器,对于4个模态的功分器设计,可以选择通过改变功分器的结构形状构型来实现,但4个1分8的功分器处于同一层面,功分器的微带线之间会存在不可忽视的电磁干扰,对功分器效果产生明显影响,进而使得功分器输出端口相位偏移,从而导致涡旋波束模态纯度变差,故本设计采用基于带状线的抗干扰、多输入的叠层结构的功分器设计,通过将4种模态对应的功分器分别排布在不同层,加上整个馈电网络基于带状线结构设计,其优势在于很大程度上避免了功分网络之间的电磁干扰,从而增加天馈系统涡旋波不同模态之间的隔离度,并且对于各个馈电网络从输入端口(Port1~Port4)到各个输出端口的幅度分布均匀且传输相位保持一致保证天线阵列生成涡旋波束模态的正确性,该多输入抗干扰叠层馈电网络结构见图6所示。

根据天线阵列和馈电网络设计,整个系统为叠层结构,顶层为双圆环微带天线阵列,共32个阵列单元(内环16个,外环16个,内环为模态+1,-1阵列,外环为模态+2,-2阵列),第2层是介质基板为F4B,相对介电常数2.65,厚度为2 mm,第3层是GND层,第4层是衬底材料F4B,厚度为0.8 mm,第5、6、7、8层分别是 $l=+1$ 、 $l=-1$ 、 $l=+2$ 、 $l=-2$ 模态的馈电网络,馈电网络的输入端口置于底板上,一共有4个输入端口,分别对应单独的涡旋电磁波模态;对于每层功分馈电网络均采用带状线结构设计,且带状线上下层介质板厚度均为0.8 mm,介质板材料仍为F4B,该带状线的设计结构抑制了馈电网络之间的电磁干扰,间接提升涡旋电磁波模态纯度,4组功分器的各输出端口与天线阵元通过同轴线相连接,并在金属底板(GND)上做开口设计使其与同轴线隔离。该馈电网络侧视图见图6所示。

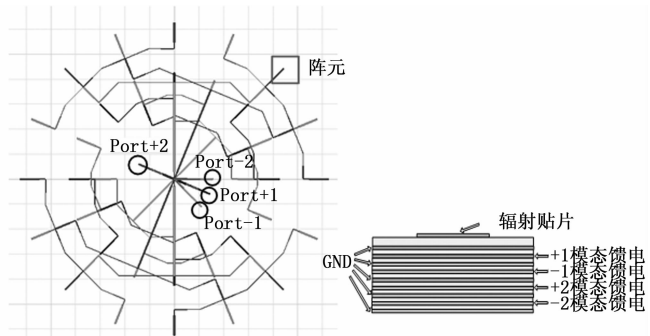


图6 双圆环均匀天线阵列馈电网络结构及阵列剖面图

### 2.4 天馈系统仿真

将2.3节设计的天馈系统在HFSS中进行全波仿真,可以分别得到的OAM模态值为+1、-1、+2、-2的涡旋电磁波束的3D方向图和2D方向图,如图7、图8所示。

根据双圆环均匀天线阵列的3D方向图仿真结果可知,对于+1和-1模态的涡旋电磁波束呈现出中心凹陷的圆环结构,主瓣辐射均匀,波束效果较好,满足涡旋波束的特

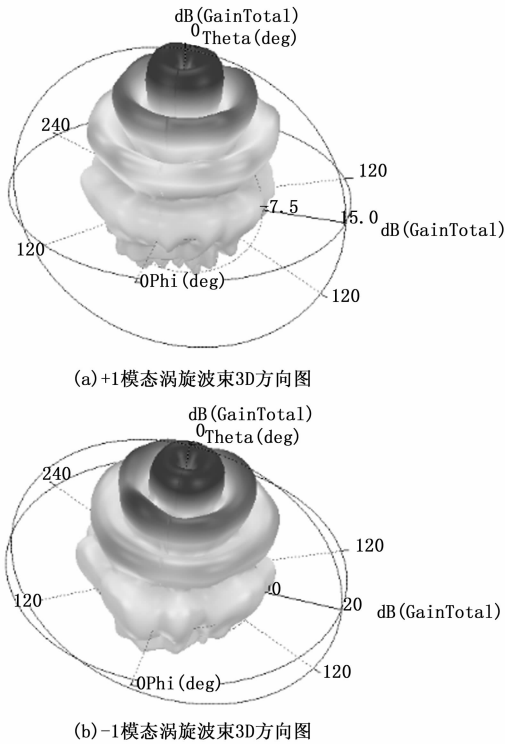


图 7 双圆环均匀天线阵列涡旋波束 3D 方向图

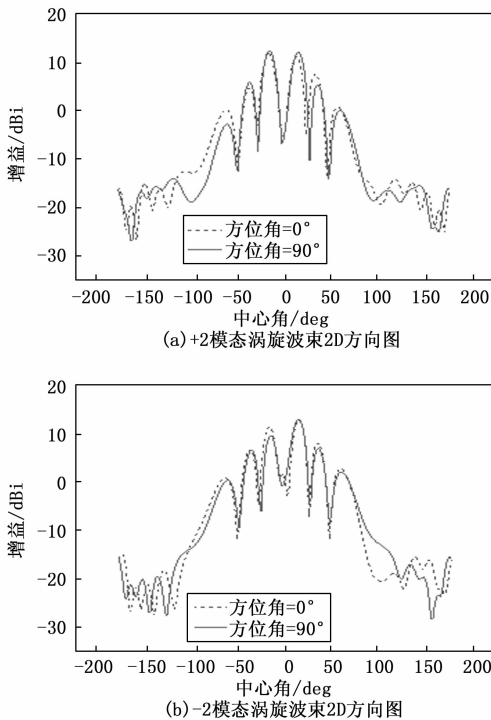


图 8 双圆环均匀天线阵列涡旋波束 2D 方向图

征，其模式+2 和-2 的涡旋电磁波束也具有相同的波束特征，此处不在赘述。

通过双圆环均匀天线阵列的 2D 方向图可以看到，OAM 模式模式+2 和-2 的波束发散角为  $28^\circ$ ，满足初始设

计要求，结合双圆环阵列半径的设计，使得 4 种模式涡旋电磁波的发散角尽量保持一致，对于模式+1 和-1 其波束发散角为  $25^\circ$  左右。总体而言，根据仿真结果可以得到该阵列相邻排布的双圆环天线阵列可以产生 OAM 模式+1、-1、+2、-2 的 4 个混合模式的涡旋电磁波，且各模式波束发散角基本一致，其之间通过 4 个端口独立馈电和进行调控，不互相干扰。

### 3 大容量通信系统设计和性能测试

本节首先对双圆环均匀天线阵列进行加工并对 4 种模式的  $S_{11}$  参数进行测试，然后对该天线阵列进行远场和近场测试，观测天线方向图和空间电场的幅度、相位分布特性，验证生成的 4 种模式涡旋波的正确性；其次在微波暗室通过两个双圆环天线阵列搭建简易的无线收发链路通信装置，通过矢量网络分析仪分别两两测试 4 种模式之间的隔离度，最后在此无线收发链路的基础上加入两台软件无线电台作为无线通信发射机或接收机，搭建基于涡旋电磁波的大容量通信系统，验证大容量数据传输可行性。

#### 3.1 天馈系统暗室测试

对章节 2 设计的双圆环均匀天线阵列进行加工，实物见图 9 所示。

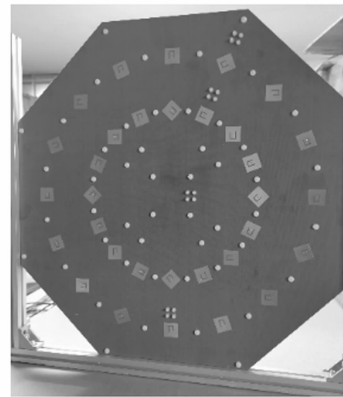


图 9 相邻阵元交替排布的双圆环均匀天线阵列实物图

借助矢量网络分析仪对该天馈系统进行  $S_{11}$  参数测试。通过测试结果可以观察到，4 种模式的  $S_{11}$  系数在 4.12~4.38 GHz 范围内匹配良好，中心频率 4.25 GHz 处的反射均低于  $-10$  dB，即阵列的馈电设计符合要求，见图 10 所示。

对天馈系统进行方向图测试，结果见图 11，其波束主瓣增益大于 10 dBi，主瓣辐射均匀，波束效果和仿真类似，符合设计要求。为了进一步观察该双圆环阵列天线的各个涡旋电磁波模式的涡旋场分布，在微波暗室中进行近场测试，近场扫描平面为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，其中近场扫描时测试和探头距离天线阵列的距离为 1.5 m，扫描点数为  $81 \times 81$  点，在场观察面内建立采样接收圆周进行涡旋模式采样接收分析，在本论文中采样点数均为 12 个采样点，然后对位于采样接收圆周上采样点位置处的采样数据进行 DFT (discrete fourier transform) 计算，并采用归一化的表示方法即可得

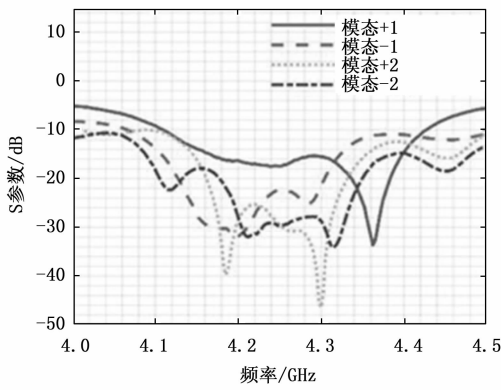


图 10 双环圆阵各输入端口  $S_{11}$  测试结果

到对应的 OAM 模式纯度, 可以看到对于模态+1 的涡旋波的电场幅度分布中对应的环状场强出现分布不均匀, 强弱相差的区域, 但是电场的相位分布良好, 呈现出逆时针的螺旋状, 此现象出现的原因可能是因为阵元之间的耦合导致, 其他 3 种模式的电场幅度和相位分布都是比较好的, 对于相位分布所对应波束的模式值表现为顺时针或者逆时针的螺旋曲线。总体而言, 可以看出该天馈系统 4 种模式的涡旋波模式纯度都较高, 且都能独立调控, 近场测试结果见图 12。

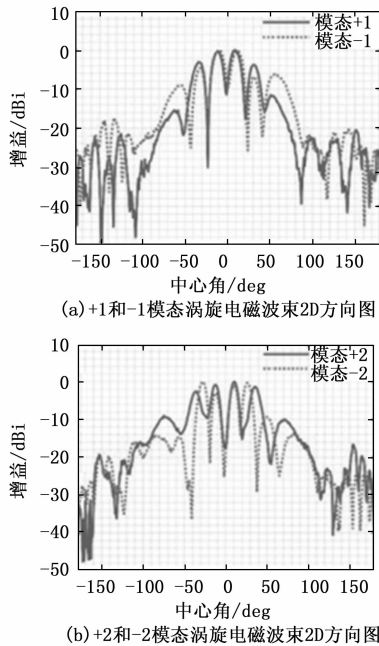


图 11 双圆环均匀天线阵列涡旋电磁波束 2D 方向图测试结果

### 3.2 不同模式收发隔离度测试

本节对于混合模式涡旋波大容量通信系统而言, 核心在于各个模式之间的隔离度, 若模式间隔离度高, 基于涡旋电磁波模式正交的特性, 在同等条件下相比 0 模式平面波数据传输量增大 4 倍, 对于大容量通信具有十分重要的

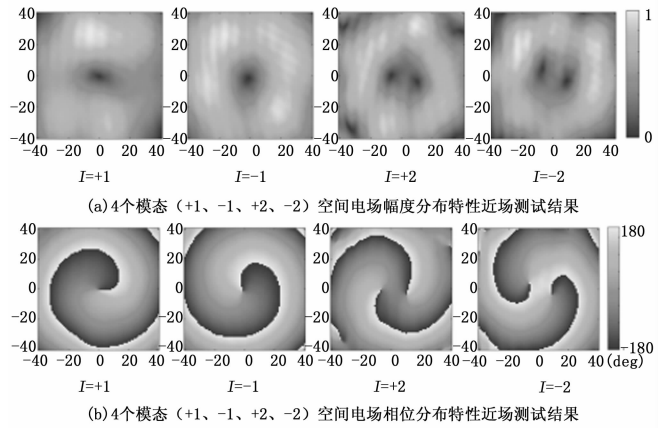


图 12 双圆环均匀天线阵列各 OAM 模式近场观察面测试结果图

意义。因此本文构建图 13 的测试环境, 收发天线都采取章节 2 设计的混合模式天馈系统, 使用矢量网络分析仪在暗室进行整个通信系统的模式收发隔离度测试, 收发天线距离 2 m, 收发隔离度测试结果见表 2。

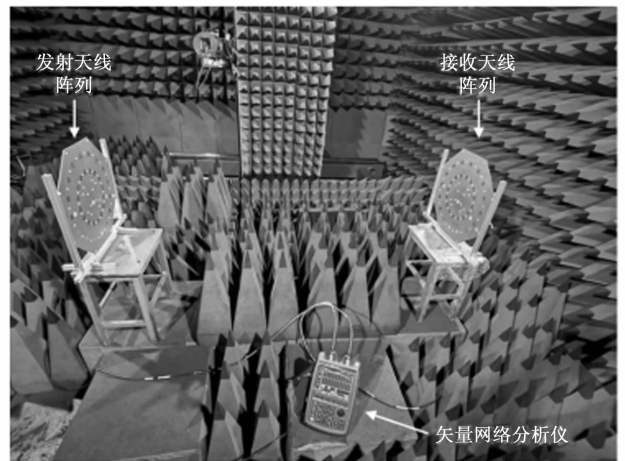


图 13 双圆环均匀天线阵列收发隔离度测试示意图

表 2 双圆环均匀天线阵列不同模式收发隔离度测试结果

		dBm			
$R \backslash T$		$l = -1$	$l = +1$	$l = -2$	$l = +2$
$l = -1$		-31.3	-55.4	-52.7	-57.3
$l = +1$		-56.2	-35.5	-61.1	-55.8
$l = -2$		-52.7	-60.1	-35.1	-51.6
$l = +2$		-57.7	-55.9	-51.6	-37.0

通过收发隔离度测试结果可以看到, 该天馈系统生成的+1 模式涡旋电磁波和其他 3 种模式之间的隔离度为 20 dB 左右, -1 模式的模式隔离度特性和+1 模式的类似, 均为 21 dB 左右; 对于+2 模式涡旋电磁波而言, 其和其他 3 种模式之间的隔离度为 15 dB 左右, -2 模式的模式隔离

度特性和+2 模态类似, 为 16 dB 左右; 总体而言, 根据模态间隔度测试结果来看, 基于双圆环均匀天线阵列的天馈系统生成的 4 种模态之间隔离度较好, 满足混合模态大容量通信演示验证系统建立的需求。

### 3.3 大容量通信系统联试

在实验室环境下, 搭建基于阵元交替排布的双圆环构型的叠层混合模态涡旋电磁波的大容量通信系统演示验证环境, 使用两台无线电软件平台, 其中一台作为发射机, 产生 4 路 PCM-BPSK 调制信号进行射频输出, 将一块双圆环构型的混合模态涡旋电磁波天线阵列作为发射天线, 让软件无线电的 4 个输出端口 (端口 1, 2, 3, 4) 分别连接天线阵列馈电网络的 4 个输入端口 (端口 1, 2, 3, 4, 分别对应模态+1, -1, +2, -2), 并且设定输出射频信号的中心频点为 4.2 GHz, 码速率设置为 2.048 Mbps, 软件无线电平台 4 路输出信号功率均为 -10 dBm; 其次选择另一块双圆环构型的混合模态涡旋电磁波天线阵列作为接收天线, 让该天线阵列的 4 个馈电网络端口 (端口 a, b, c, d) 连接另一台无线电软件平台的 4 个射频端口 (端口 a, b, c, d, 分别对应模态+1, -1, +2, -2), 并将该软件无线电平台作为接收机, 且根据发射机调制信息配置好接收机参数用于进行 4 路不同模态涡旋电磁波的接收解调和误码率测试; 其中两块混合模态涡旋波收发天线阵列之间的距离为 2 m, 且轴向正对摆放, 通过作为发射机的软件无线电平台的 4 个输出端口分别给发射天线阵列 4 个馈电网络输入一段固定数据, 进行涡旋电磁波无线收发链路通信功能和误码率测试, 测试原理结构示意图如图 14 所示, 测试结果见表 3 所示。

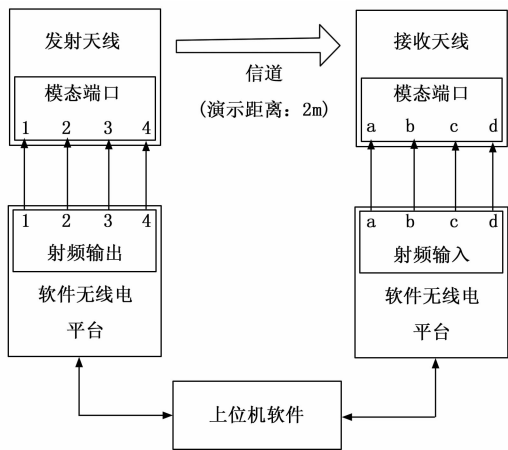


图 14 大容量通信系统原理结构图

根据测试结果表明, 当收发 OAM 模态相同的情况下, 接收误码率  $P_e$  (bit error probability) 为 0, 接收信号功率相对其他模态接收功率大于 10 dB 以上, 若采取非发射模态接收天线, 存在误码率较大, 丢帧甚至长时间失锁的情况。总体而言, 该双圆环天线阵列的 4 个端口可以正确识别对应模态并解调出原始信号, 相比模态为 0 的平面波无线传输系统, 该系统实现了频谱利用效率 4 倍的提升。

表 3 大容量通信系统无线收发接收结果

$R \backslash T$	$l = -1$	$l = +1$	$l = -2$	$l = +2$
$l = -1$	-42.8 $P_e=0$	-55.4	-62.7	-61.3
$l = +1$	-56.2	-35.5 $P_e=0$	-61.1	-58.8
$l = -2$	-52.7	-60.1	-35.1 $P_e=0$	-51.6
$l = +2$	-57.7	-55.9	-51.6	-37.0 $P_e=0$

## 4 结束语

本文基于涡旋电磁波模态正交的特性, 结合带状线结构设计了一种阵元交替排布的双圆环构型的叠层混合模态涡旋电磁波大容量通信系统。天线阵列采用的双圆环涡旋电磁波构型, 由 32 阵元均分的方式设计 4 种模态涡旋电磁波, 其次基于带状线的特性设计 4 路 1 分 8 多层、多输入、抗干扰的馈电网络, 极大提升了天馈系统模态隔离度和降低电磁泄漏和馈电网络之间干扰; 最后通过对天馈系统进行加工和近场、远场测试以及模态间隔度测试, 验证生成的 4 种模态的正确性, 最后基于该天馈系统, 加入软件无线电平台作为发射源和接收源搭建混合模态涡旋大容量通信系统, 进行模态间传输性能和误码率测试, 验证了该通信系统具有同时传输多路信号时可以正确解复用的特性, 从而实现大容量通信。

本文设计的整个大容量通信系统模型简单, 占用空间小, 避免了一定的安装和加工误差, 具有相比普通平面波数倍数据量传输的特性, 在航天、军事领域的大容量无线通信领域和成像方面都具有一定的优势和发展潜力。

### 参考文献:

- [1] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. Optics express, 2004, 12 (22): 5448 - 5456.
- [2] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. Advances in optics and photonics, 2011, 3 (2): 161 - 204.
- [3] WILLNER A E, REN Y, XIE G, et al. Recent advances in high-capacity free-space optical and radio-frequency communications using orbital angular momentum multiplexing [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2017, 375 (2087): 20150439.
- [4] TRICHILI A, PARK K H, ZGHAL M, et al. Communicating using spatial mode multiplexing: Potentials, challenges, and perspectives [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21 (4): 3175 - 3203.
- [5] GUIRONG G, HU W D, DU X Y. Electromagnetic vortex based radar target imaging [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013.

(下转第 221 页)