

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201605009

Ku 波段电磁涡旋相控阵列天线设计

周守利^{1,2}, 顾易帆¹, 赵伟琳¹, 梁显锋², 安军社^{1,2}

(1.浙江工业大学 信息学院, 杭州 310023; 2.中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 为了产生性能更好携有轨道角动量的涡旋电磁波, 采用微带天线技术, 设计了一种新型的相控微带阵列天线。以同轴馈电的圆微带天线为单元, 将 8 个、16 个相同的单元天线等间隔的分布在一个同心圆上分别组成两个单圆环和一个双圆环结构的相控阵列天线, 并采用等幅且同一环的相邻单元间相位差为常数的方式进行激励。通过电磁场全波仿真软件 Ansoft HFSS 建模并优化, 单圆环和双圆环阵列结构均在中心频率为 15 GHz 处获得了携有轨道角动量的涡旋辐射方向图。结果表明: 虽然单圆环结构的相控阵列天线可通过增加阵元数来改善电磁涡旋性能, 但不可避免的造成更大的天线体积; 而利用双圆环结构, 由于增加一个内环设计自由度, 结合内外环的协同优化仿真, 通过设置适当的天线阵列结构和相位延迟, 双圆环结构较单圆环结构产生的涡旋电磁波有更小的中心轴线开口张角, 具有更强的涡旋方向性和更高的辐射增益。

关键词: Ku 波段; 圆微带天线; 电磁涡旋; 轨道角动量; 相控阵列天线

中图分类号: TN822

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)10-0106-06

Design of phased antenna array for generating electromagnetic vortex in Ku band

ZHOU Shouli^{1, 2}, GU Yifan¹, ZHAO Weilin¹, LIANG Xianfeng², AN Junshe^{1, 2}

(1.College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2.National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Phased microstrip array antenna is an effective method to generate vortex electromagnetic beam containing orbital angular momentum (OAM), and a good design of the multi-mode OAM microstrip array antenna is crucial to improve the vortex performance. We consider circular microstrip antenna with coaxial feed as the element to compose the circular antenna array, which is excited with unit amplitude and equal phase delay from element to element. Two single-ring uniform circular array antennas are designed with the array elements number as eight and sixteen respectively, and a dual-ring uniform circular array antennas is designed with eight elements in inner ring and sixteen elements in outer ring. The OAM-carrying electromagnetic vortex can be generated at 15 GHz from both sing-ring and dual-ring uniform circular array antennas, and the vortex characteristics, such as radiation patterns and OAM modes, are analyzed in detail by using a full-wave electromagnetic field simulation code HFSS. According to the simulation and optimization, with the increase of elements number in the sing-ring structure, we get the better electromagnetic wave vortex performance at the cost of a larger size array antennas. In contrast, through using collaborative optimization simulation combined with inner and outer ring, the vortex properties of dual-ring structure is better than that of the single-ring structure at suitable array configurations and phase shifts.

Keywords: Ku band; circular microstrip antenna; electromagnetic vortex; orbital angular momentum; phased array antenna

随着无线通信技术的飞速发展, 无线数据业务需求呈现爆炸式的增长, 传统的电磁波以幅度、相位、频率等形式的调制技术在同一时间、同一码域里一个频带只能传输一路信息, 频谱的利用率和系统容量已经接近物理极限。为解决容量需求和频谱资源短缺间日益突出的矛盾, 以满足未来移动数据业务的需求, 迫切需要革命性的创新技术。由于电磁涡旋 (EM vortex)

是带有新自由度-轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的电磁波, 且不同轨道量子数的电磁涡旋本征态相互正交, 因而可以实现同一频率上互不干扰地传输多路电磁信号, 有望大幅度提高无线通信容量和效率, 近年来成为国内外的研究热点^[1-6]。

OAM 的研究起源于光学领域, 早在 1992 年 Allen 等^[7]发现拉盖尔高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 光束在近轴传播条件下携带 OAM 的属性。通过 20 多年的研究, OAM 在光学领域已得到广泛的应用, 通过引入 OAM, 光通信系统的传输能力得到很大的加强^[8]。但直到 2007 年, Thide 等^[9]才通过仿真验证了使用相控阵天线获得无线电波频段的电磁涡旋,

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 中国科学院空间科学战略性科技先导专项基金 (XDA04060300); 中国博士后科学基金 (2013M540147)

作者简介: 周守利 (1972—), 男, 博士后, 副教授;
安军社 (1969—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 周守利, zhoushl@zjut.edu.cn

首次提出了 OAM 可应用于无线通信,并指出 OAM 可以极大地扩大无线通信容量.2011 年,Tamburini 等^[10-11]演示了他们的实验,实验采用一种螺旋抛物面天线发射携有 OAM 的涡旋电磁波,并用八木天线接收,证明了可以利用两互不相干的电磁波以不同的 OAM 编码而以同一频率在无线信道中传输的可行性.2012 年,在上述实验的基础上,在接收端使用相位干涉仪测量了涡旋波束中的电场相位差,验证了 OAM 编码的抗干扰能力.2013 年,中国科学院空间科学战略性先导专项也适时地将涡旋电磁波空间通信技术列为新一期预研项目.

OAM 量子数的取值只受实际应用条件的限制,研究产生携有 OAM 的电磁涡旋波束的方法是前提.就目前文献来看,涡旋电磁波的产生方法主要有:透射螺旋结构、透射光栅结构、螺旋反射面和阵列天线.阵列天线可通过数字移相器进行相位配置,各阵子之间能得到相继连续的相位延迟,具有产生多种 OAM 模式以及模式切换速度快的特点,得到了国内外学者^[12-14]深入系统的研究.本文采用电磁场全波仿真软件 HFSS,设计了能辐射涡旋电磁波的单圆环和双圆环相控阵列天线结构,并对两种结构辐射的涡旋电磁波的特性做了分析和比较.

1 轨道角动量(OAM)模式分析

OAM 实质上是描述电磁涡旋能量横向旋转特性的空间维度,OAM 的方向垂直于电磁波的传播方向^[15].OAM 是电磁场总角动量扣除自旋角动量后的一部分,其对应的模式数 l 为^[1]

$$l = j - s,$$

式中对应于总角动量 \mathbf{J} 的模式数 j 为

$$j = \frac{\omega J_z}{\frac{1}{2} \int (\varepsilon_0 |\mathbf{E}|^2 + \mu_0 |\mathbf{H}|^2) dV}.$$

式中: ω 为角频率; J_z 为电磁场总角动量 \mathbf{J} 的 Z 方向的分量,某区域的 \mathbf{J} 可表示为

$$\mathbf{J} = \varepsilon_0 \mu_0 \int \mathbf{r} \times \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) dV.$$

式中: ε_0 、 μ_0 分别为真空的介电常数和磁导率; \mathbf{r} 为场径; \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 分别为电场强度和磁场强度.

而对应于自旋角动量的模式数为

$$s = \frac{\int V_z dV}{\frac{1}{2} \int (\varepsilon_0 |\mathbf{E}|^2 + \mu_0 |\mathbf{H}|^2) dV},$$

其中, V_z 为 Stokes 矢量的 Z 方向的分量,其值为

$$V_z = -\text{Im} \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{E}^* + \frac{1}{2} \mu_0 \mathbf{H} \times \mathbf{H}^* \right)_z.$$

由量子理论得出 OAM 本征态具有相位因子 $\exp(i l \varphi)$,轨道模式数 l 表示电磁涡旋的相位波前绕闭合环路一周相位改变 2π 整数倍的个数. $l=0$ 即为传统的电磁波,而 $l \neq 0$ 使得电磁波束具有涡旋状的波前结构.模式 $l=1$ 表示传播过程中相位波前绕着涡旋中心旋转一周相位改变 2π , $l=2$ 表示改变 4π ,如此等等,负的 l 值表示反方向旋转.如图 1 所示分别给出了模式数为 +2、+1、0、-1、-2 的 5 束电磁涡旋的相位结构分布,显而易见, $l=0$ 即表示传统电磁波^[15], $l \neq 0$ 时,电磁波相位波前绕着波束中心轴线旋转.可以看出,若电磁涡旋模式数不同,则相应的涡旋辐射方式也不同.

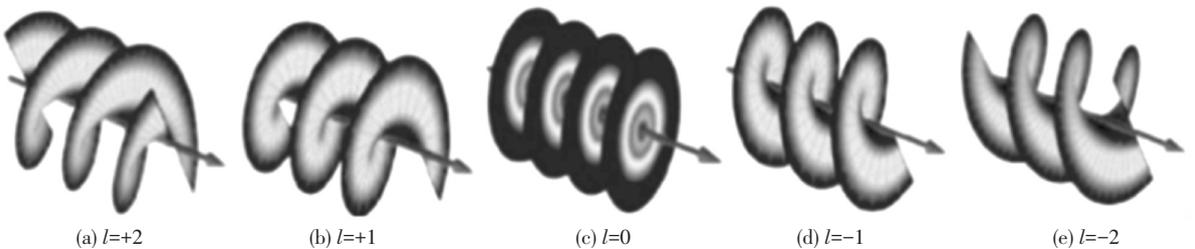


图 1 5 种不同 OAM 模式的相位波前分布

Fig.1 Phase wavefront distribution of five different OAM modes

2 天线结构

2.1 圆微带天线阵元设计

阵单元选圆微带天线,具有易调整,可以获得高度的对称性的特点,能有效减少阵元间的相互影响.以同轴线馈电,亦可减小阵列中阵元间相互耦合等不利因素影响.因此,本文设计同轴馈电的圆微带天线作为阵单元,具体结构如图 2 所示.

通过对基于圆微带天线理论计算公式得到的结构参数进行优化,最终得到了工作频率为 15 GHz 满足设计要求的圆微带天线的具体参数,见表 1.表 1 中: a 为圆形贴片的半径; w 为正方形接地板边长; h 为介质板基片厚度,材质采用 FR4,介电常数为 4.4; r_1 、 r_2 分别为同轴馈电线与导体贴片和接地板的接触半径; r 为同轴馈电线圆心到导体贴片圆心的距离,同轴馈线采用 pec 材质.

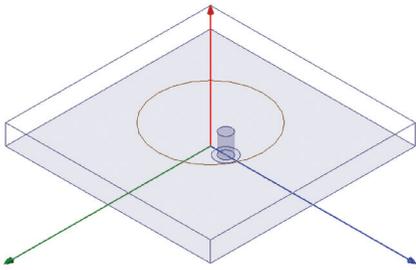


图 2 单元天线结构

Fig.2 Structure of antenna element

表 1 工作在 15 GHz 的微带天线尺寸

Tab.1 Microstrip antenna size at 15 GHz mm

a	w	h	r	r_1	r_2
2.55	10.00	1.00	0.75	0.30	0.50

图 3 给出了该圆微带天线回波损耗的仿真结果,可以看出,在中心频率 15 GHz 处,微带天线回波损耗 S11 为 -22.9 dB,达到了阻抗匹配的要求,能量几乎全部以电磁波的形式向外辐射,带宽占比大于 5%。从图 4 的仿真结果可以看出该圆微带天线在 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 两个 E 平面上的电场辐射图能量在 Z 轴正方向最大,天线的最大增益为 5.98 dB,微带天线工作性能良好。

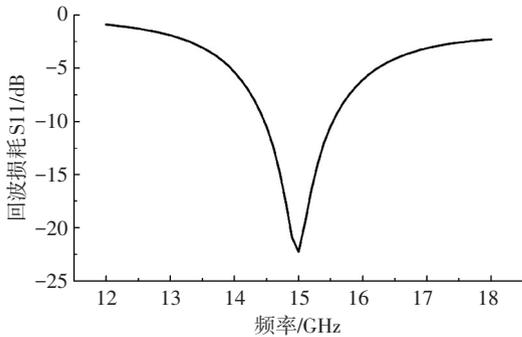


图 3 微带天线回波损耗

Fig.3 Reflection coefficient of microstrip antenna

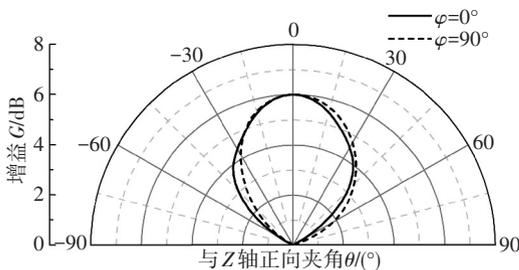


图 4 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 的 E 面图

Fig.4 E -plane pattern for $\varphi=0^\circ$ and $\varphi=90^\circ$

2.2 圆环天线阵列设计

利用上述的阵元组建了单圆环和双圆环两种结构的阵列。单圆环结构如图 5 所示,8 个阵元等间隔分布在同心圆面上,各阵元中心距坐标原点距离为半径 D ;双圆环结构如图 6 所示,内环同单圆环结构分布,内环各单元中心距坐标原点距离为半径 D_{in} ,外

环由 16 个阵元等间隔分布在与内环相同的同心圆面上,外环各单元中心距坐标原点距离为半径 D_{out} 。图 5、6 中各个阵元均采用朝 Y 轴正方向同轴馈电。

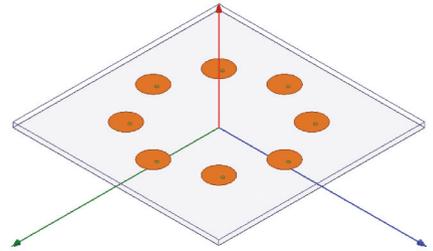


图 5 单圆环结构

Fig.5 Single-ring circular array

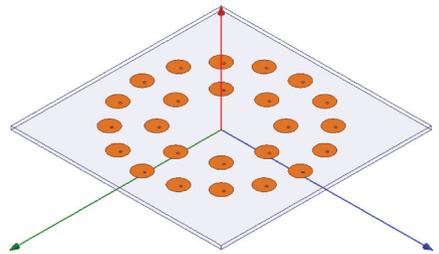


图 6 双圆环结构

Fig.6 Dual-ring circular array

为得到明显的涡旋效果,经多次仿真优化得到单圆环结构环半径 $D=0.6\lambda$;双圆环结构 $D_{in}=0.5\lambda$, $D_{out}=0.9\lambda$;在优化过程中发现,圆环的半径大小直接影响到所得的电磁波束的涡旋性能。阵列单元以等幅信号馈电,沿顺时针(或逆时针)第 m 个单元的相位为 $\varphi_m = \frac{2\pi lm}{N}$, N 为该单元所在的某一圆环天线阵元数。单圆环结构下, N 为 8, m 依次取 1~8 的整数,对于 $l=0,1,2,3,4$,8 个单元分别按 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 相位延时依次绕 Z 轴成同心圆分布。在双圆环结构中,设置内环的 $\varphi_{m_1} = \frac{2\pi lm_1}{N_1}$,内环阵元数 $N_1=8$,内环某一单元数 m_1 依次取 1~8 的整数,对于 $l=0,1,2,3,4$,同样内环的 8 个单元分别按 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 相位延时依次绕 Z 轴成同心圆分布;设置外环的 $\varphi_{m_2} = \frac{2\pi lm_2}{N_2}$,外环阵元数 $N_2=16$,外环某一单元数 m_2 依次取 1~16 的整数,对于 $l=0,1,2,3,4$,外环的 16 个单元分别按 $0^\circ, 22.5^\circ, 45.0^\circ, 67.5^\circ, 90.0^\circ$ 相位延时依次绕 Z 轴成同心圆分布。

3 结果与分析

利用 HFSS 对图 5、6 的两种结构的阵列进行了仿真分析,图 7 为两种圆环结构下的回波损耗曲线,中心频率均为 15 GHz,与阵元的中心频率相同。图 8、9 的仿真结果为单圆环阵列结构的电场辐

射图和增益方向图。 $l=0$ 时,产生的电磁波不具有涡旋特性,为传统电磁波; $l=1,2,3,4$ 时,天线辐射的主方向与 Z 轴正方向呈一定夹角,并随着 l 的增大而增大;相比于 $l<4$ 的情况, $l=4$ 时,阵列天线获得的电磁波并没有呈现出螺旋状,表明获得的电磁波失去良好的涡旋特性。

图 10、11 分别为双圆环结构下的电场辐射图和增益方向图。在 $l=0$ 时,产生的电磁波不具有涡旋特性;在 $l=1,2,3,4$ 时均产生了涡旋电磁波,且辐射夹角越来越大;相比于单圆环结构,双圆环结构的阵列天线在 $l=4$ 时,仍能产生涡旋电磁波,这是由于外

环作用加强了涡旋特性。

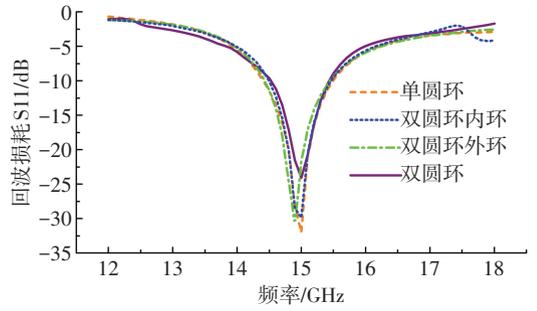


图 7 单圆环结构与双圆环结构下的回波损耗

Fig.7 Reflection coefficient of microstrip antenna under single-ring and dual-ring structures

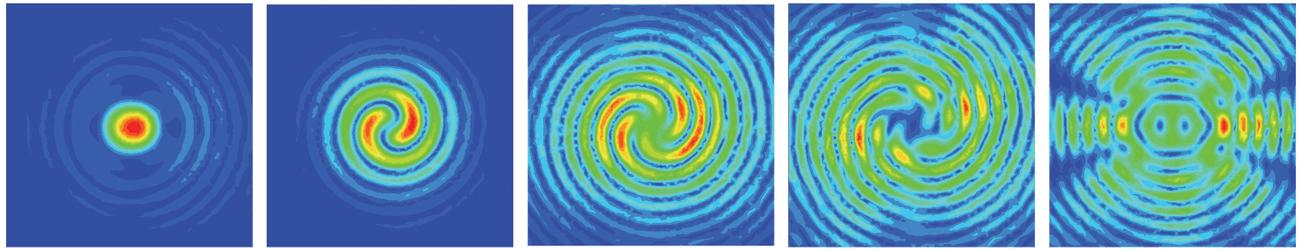


图 8 单圆环结构不同模式数 OAM 波束电场辐射

Fig.8 Electric field pattern in different modes of the OAM beam in the single-ring array

从图 8~图 11 仿真结果的比较中可以看到,在两种天线阵列结构下,天线辐射相对能量都将随着 OAM 模式数 l 的增大下降;不同的 OAM 模式下,双圆环阵列结构的主辐射方向角 θ (与 Z 轴正方向的夹角) 都相比单圆环要小,因此双圆环结构的阵列天线可以改变电磁涡旋沿着轴线开口张角 θ 的大小,选择合适的相位延迟和双圆环阵列天线的半径,可以减少电磁涡旋开口张角 θ 。电磁涡旋张角的减少能有效地增大辐射增益,同时增强了电磁涡旋的方向性。

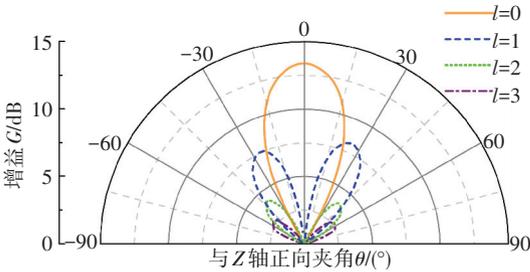


图 9 单圆环结构不同模式数 OAM 波束增益方向

Fig.9 Radiation pattern in different modes of the OAM beam in the single-ring array

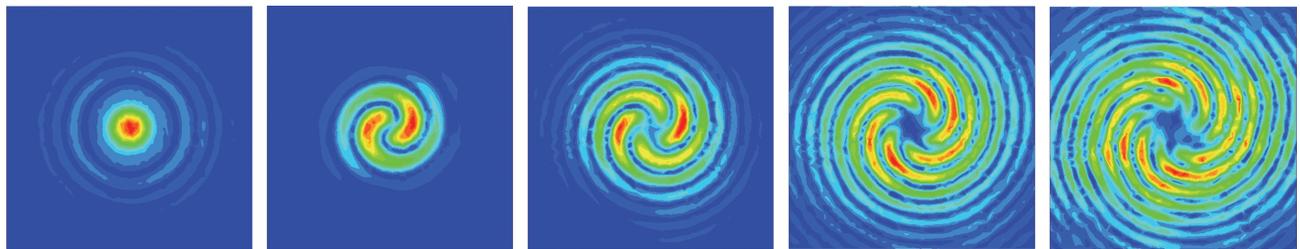


图 10 双圆环结构不同模式数 OAM 波束电场辐射

Fig.10 Electric field pattern in different modes of the OAM beam in the dual-ring array

不过从阵列天线结构的环半径来看,采用双圆环结构,虽然可以利用阵元数同为 8 的比单环 (0.6λ) 时更小半径 (0.5λ) 的内环联合外环来优化,从而达到更好的涡旋性能;但相比阵元数为 8 个的单圆环,采用双圆环时具有更多阵元数目的外环不可避免的增大了外环半径 (0.9λ),这使阵列天线的体积增大。为了充分体现内环存在的重要性,进一步分析了 16 个阵元数目的外环单独存在时的电磁涡旋特性,优化过程中发现,达到最佳的涡旋性能的半径为 1.2λ 。因而没

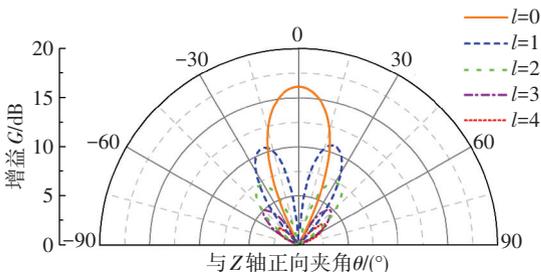


图 11 双圆环结构不同模式数 OAM 波束增益方向

Fig.11 Radiation pattern in different modes of the OAM beam in the dual-ring array

有内环的优化,采用 16 个阵元数的单圆环阵列天线体积更大,且电磁涡旋开口张角比双圆环阵列天线大而具有更低的增益,环半径为 1.2λ 优化结构的 16 个阵元的单圆环阵列天线电场辐射图仿真结果如图 12

所示.由于多了一个内环的设计自由度而使双圆环阵列天线有更多的优化参数,因此相比较而言,电磁涡旋性能通过采用双圆环结构优化好于采用单纯的增加阵元数目的单圆环结构优化.

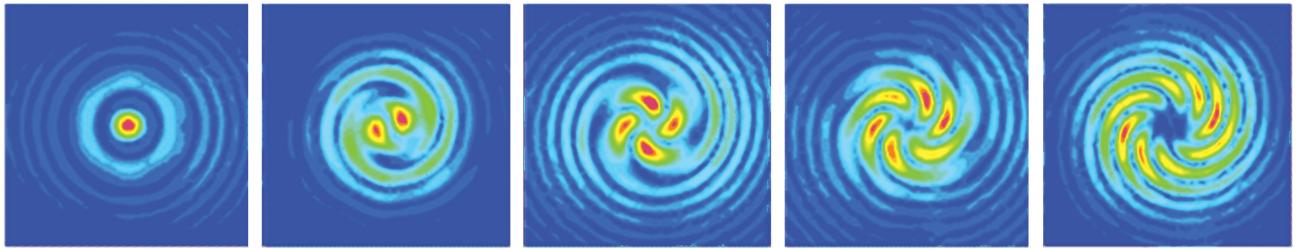


图 12 单圆环结构 16 个阵元数的不同模式数 OAM 波束电场辐射图

Fig.12 Electric field pattern in different modes of the OAM beam in the sixteen elements of the single-ring array

因此,在适当的阵列几何结构和相位延时下,双圆环结构的阵列天线的电磁波的涡旋性要优于单圆环结构产生的电磁波束.

法牵涉到较多的优化参数对服务器性能要求高,因而目前并没有得到有价值的计算结果.为了能看出同轴馈电方向对电磁涡旋的影响,转而分析了各阵元馈电点方向均朝向圆心和均背向圆心的其他两种同轴馈电排列方式下的电磁涡旋辐射的特点,以与图 5、6 中的均朝 Y 轴正方向的同轴馈电排列方式的结果作对比,如图 13 所示.

4 同轴馈电方向对电磁涡旋的影响

阵列天线除了同轴馈电方法外,优化过程中也尝试了侧馈等其他馈电方法,但由于侧馈等馈电方

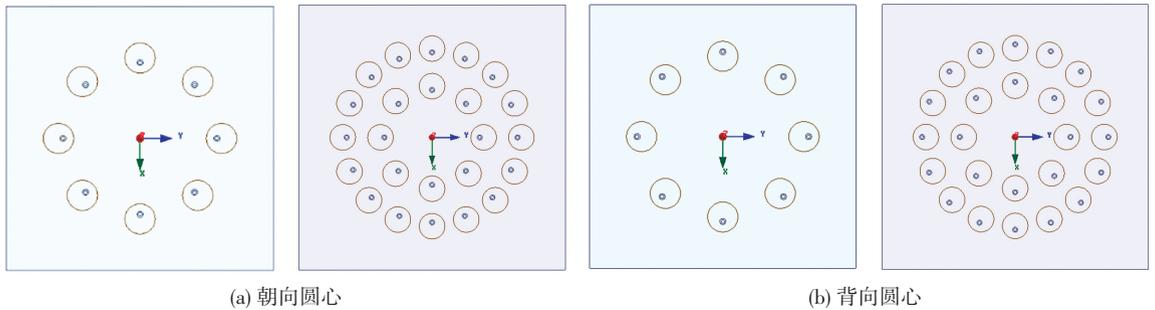


图 13 阵元馈电点方向均朝向圆心和均背向圆心两种同轴馈电方式

Fig.13 Two different coaxial feeding directions for every array element as toward and backward the center of the array antenna

图 14、15 分别给出了阵元馈电点方向均朝向圆心和均背向圆心两种情况下的 $l=0$ 和 $l=1$ 时的电场辐射图,可以看出这两种同轴馈电排列方式下无论单圆环结构还是双圆环结构,模式数 $l=0$ 时,符合传统电磁波的特点;在 $l=1$ 时,两种馈电方式由于携带轨

道角动量仍可产生涡旋电磁波.但在仿真优化过程中发现,在阵元馈电点方向均朝向圆心和均背向圆心的这两种馈电方式下,在 $l>1$ 时,可能由于能量过于分散的原因,并未得到明显的涡旋特性,因此阵列天线馈电方向也是产生涡旋电磁波的关键所在.

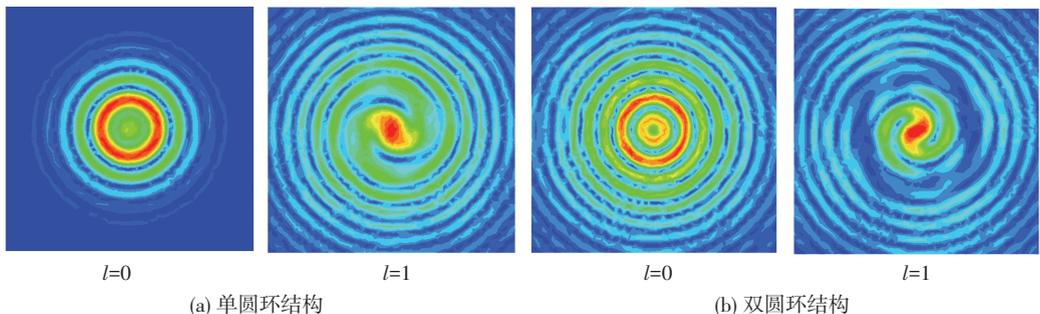


图 14 阵元馈电点方向均朝向圆心时电场辐射图

Fig.14 Electric field pattern as feeding point of array element toward the center of the array antenna

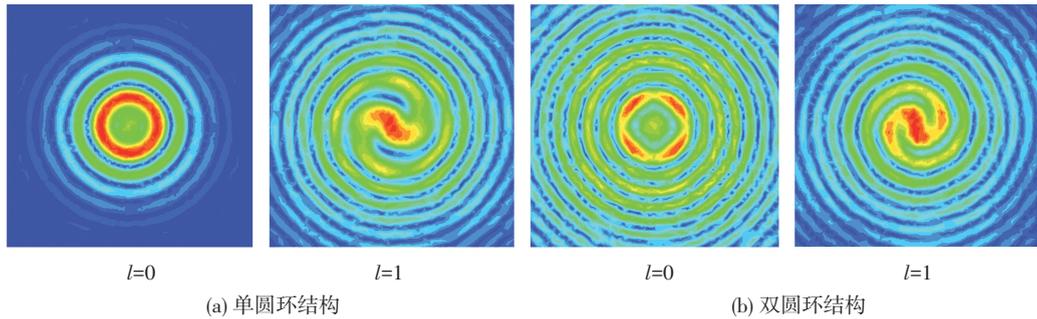


图 15 阵元馈电点方向均背向圆心时电场辐射图

Fig.15 Electric field pattern as feeding point of array element backward the center of the array antenna antenna

5 结 论

1) 本文设计了一种新颖的双圆环结构的圆微带阵列天线,由该阵列天线能产生携有 OAM 的涡旋电磁波.不同于以往单圆环结构阵列天线产生 OAM 波束,双圆环阵列结构产生的 OAM 波束涡旋效果更好,而且此结构获得的 OAM 模式数并不绝对受内环阵元数量的限制,意味着其产生 OAM 波束的方式更灵活.

2) 此外,仿真结果表明不同同轴馈电排列方向对电磁涡旋影响很大.作为一项全新的技术,虽然轨道角动量编码在无线通信领域仍面临着许多的困难和挑战,但是相信随着研究的不断深入,电磁涡旋会成为推动无线通信跨越式发展的关键技术.

参考文献

- [1] MOHAMMADI S M, DALDORFF L K S, BERGMAN J E S, et al. Orbital angular momentum in radio-A system study[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2010, 58(2): 565-572. DOI: 10.1109/TAP.2009.2037701.
- [2] BENNIS A, NIEMIEC R, BROUSSEAU C, et al. Flat plate for OAM generation in the millimeter band[C]//Proceedings of the 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Gothenburg, Sweden; IEEE, 2013: 3203-3207.
- [3] BARBUTO M, TOSCANO A, BILOTTI F. Singlepatch antenna generating electromagnetic field with orbital angular momentum[C]//IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium. Orlando, FL; IEEE, 2013: 1866-1867. DOI: 10.1109/APS.2013.6711591.
- [4] ZHENG Shilie, HUI Xiaonan, JIN Xiaofeng, et al. Transmission characteristics of a twisted radio wave based on circular traveling-wave antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(4): 1530-1536. DOI: 10.1109/TAP.2015.2393885.
- [5] GAO Xinlu, HUANG Shanguo, WEI Yongfeng, et al. An orbital angular momentum radio communication system optimized by intensity controlled masks effectively: theoretical design and experimental verification[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(24): 241109.

DOI: 10.1063/1.4904090.

- [6] 孙学宏, 李强, 庞丹旭, 等. 轨道角动量在无线通信中的研究新进展综述[J]. 电子学报, 2015, 43(11): 2305-2314. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.025.
SUN Xuehong, LI Qiang, PANG Danxu, et al. New research progress of the orbital angular momentum technology in wireless communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(11): 2305-2314. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.025.
- [7] ALLEN L, BEIJERBERGEN M W, SPREEUW R C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189. DOI: 10.1103/PhysRevA.45.8185.
- [8] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 161-204. DOI: 10.1364/AOP.3.000161.
- [9] THIDE B, THEN H, SJOHOLM J, et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(8): 087701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.087701.
- [10] TAMBURINI F, THIDE B, THEN H, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. New Journal of Physics, 2012, 14(3): 033001. DOI: 10.1088/1367-2630/14/3/033001.
- [11] TAMBURINI F, THIDE B, MARI E, et al. Reply to comment on Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. New Journal of Physics, 2012, 14(11): 118002. DOI: 10.1088/1367-2630/14/11/118002.
- [12] DENG Changjiang, CHEN Wenhua, ZHANG Zhijun, et al. Generation of OAM radio waves using circular Vivaldi antenna array[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 2013: 1-8. DOI: 10.1155/2013/847859.
- [13] BAI Q, TENNANT A, ALLEN B. Experimental circular phased array for generating OAM radio beams[J]. Electronics Letters, 2014, 50(20): 1414-1415. DOI: 10.1049/el.2014.2860.
- [14] TENNANT A, ALLEN B. Generation of OAM radio waves using circular time-switched array antenna[J]. Electronics Letters, 2012, 48(21): 1365-1366. DOI: 10.1049/el.2012.2664.
- [15] JOHAN S, KRISTOFFER P. Angular momentum of electromagnetic radiation[M]. Sweden: Uppsala University, 2007: 28-32.

(编辑 张红)