

基于多模态 OAM 涡旋电磁波的 L 波段宽频阵列天线设计

李 强^{1,2}, 孙学宏^{1,2,3}, 庞丹旭^{1,2}, 刘丽萍^{1,2}

(1. 宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 宁夏银川 750021;
3. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘 要: 频谱资源紧缺已成为无线通信技术发展的瓶颈. 本文通过控制阵元间馈电相位差将轨道角动量 (orbital angular momentum) 技术应用于阵列天线中, 利用 L 型探针馈电微带贴片天线沿圆周等距排列设计出一种工作频段在 1.35GHz ~ 1.86GHz, 相对带宽达到 31.8% 的 8 阵元涡旋电磁波宽频微带天线. 仿真实验表明, 该天线可以产生具有多模态轨道角动量的涡旋电磁波, 当用于移动通信系统的发射端, 它能够实现在同一时间、同一频率下的多路信号传输, 提高了系统的容量和传输速率.

关键词: 轨道角动量; L 波段; 阵列天线; 宽频; 涡旋电磁波; 频谱效率

中图分类号: TN822 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)12-2954-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.12.020

The Design of L Band Broadband Array Antenna Based on Multi-modal OAM Vortex Electromagnetic Wave

LI Qiang^{1,2}, SUN Xue-hong^{1,2,3}, PANG Dan-xu^{1,2}, LIU Li-ping^{1,2}

(1. School of Physics and Electronic-Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

3. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The shortage of spectrum resources becomes a bottleneck in the development of wireless communication. This paper applies the technology of orbital angular momentum (OAM) to the design of array antenna and uses the microstrip patch antenna with feeding type of L probe as an element. The elements are arranged along the circumference equidistantly to present an 8-element broadband microstrip array antenna generating multi-modal OAM vortex electromagnetic waves and the adjacent elements are fed with the different phases. The operating frequency band of the antenna ranges from 1.35GHz to 1.86GHz, and meanwhile, the relative bandwidth can reach 31.8%. Experiment results show that the array antenna can generate electromagnetic waves with characteristic of multi-modal orbital angular momentum. When it is placed in the transmitting terminal of wireless communication system, the multiple signals can be transmitted on the same frequency simultaneously, which improves the transmission rate and capacity of the communication system.

Key words: orbital angular momentum; L band; array antenna; broadband; vortex electromagnetic wave; spectrum efficiency

1 引言

近年来,随着无线电技术的发展及其应用领域的扩展,频谱资源日益紧张^[1],如何充分利用有限的频谱资源并满足快速增长的频率需求成为亟需解决的关键问题^[2,3]. 目前已经涌现了若干技术用来改善频谱效率,其中最近提出的轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 技术引起了广泛研究. OAM 技术是以

OAM 的模式作为信号分割的参量,利用不同 OAM 模式之间涡旋电磁波的正交性,以不同 OAM 值的涡旋电磁波作为载波,将多路信息分别调制到不同 OAM 值的电磁波上在同一频点编码发送进行复用传输,可以作为一种提高信道容量和频谱效率的潜在方法^[4,5].

电磁波可以携带能量和角动量,其中角动量包括自旋角动量 (Spin Angular Momentum, SAM) 和轨道角动量^[6]. 当波束中含有与角向相关的位相分布,且依赖于

场空间分布的角动量称之为 OAM. 与电场极化相关的角动量定义为 SAM, 1909 年 Poynting 从理论上进行了预测^[7], 并在 1936 年由 Beth 基于圆偏振光实验得以验证^[8]. 在 1992 年之前 OAM 并没有引起太多的关注, 直到 Allen 等人研究认为 OAM 是所有螺旋相位波束的一种自然属性, 每个携带 OAM 的光子 \hbar 包含一个方位角相位项 $\exp(-il\varphi)$, 其中 l 是拓扑电荷数, φ 是方位角, \hbar 是普朗克常数^[9]. 因此, 普通电磁波的轨道角动量模式为 0, 其波前为均匀平面波. 如果电磁波的模式不为 0, 其呈现出螺旋状等相位面的特殊波前结构, 称为涡旋电磁波. 涡旋波束的相位波前绕涡旋中心旋转一周, 相位改变 2π , 称其模式为 1; 相位改变 4π , 称其模式为 2; 相位改变 6π , 称其模式为 3, 以此类推. 所以, 同一频率的电磁波拥有无穷多种模式, 频谱利用率可以大大提高.

2007 年, Thidé 等人证明了利用矢量天线阵可以产生 OAM 涡旋电磁波, 首次提出在较低频率下将 OAM 应用于无线电通信^[10]. 2012 年, Tamburini 等人利用两种不同 OAM 模态对电磁波进行编码, 同一频率下实现 442m 距离的信息传递, 第一次用实验证明了 OAM 无线通信传输应用在实际中的可行性^[11,12]. 根据上述研究成果, OAM 波束可通过几种方法生成, 如阶梯状螺旋相位板^[13]、螺旋抛物面天线^[14]、圆形相控阵天线^[15-17]和时变阵列天线^[18,19]. 相比其他 OAM 波束生成方法, 微带阵列天线具有重量轻、低剖面、易于制造等优点, 适用于无线通信传输^[20]. 与此同时, 微带天线也是一种谐振式天线^[21], 其高 Q 值的谐振特性会使输入阻抗对频率的变化极度敏感, 导致其工作频带较窄, 大约仅为 0.6% ~ 3%, 这成为微带天线广泛应用于无线通信的主要障碍^[22].

针对微带天线带宽窄的缺点, 本文深入研究了宽频微带阵列天线的设计方法, 利用 L 型探针馈电微带贴片天线作为阵元, 并通过改变阵元之间的馈电相位差将 OAM 技术应用于阵列天线中, 基于 HFSS 电磁仿真软件设计出一款工作在 L 波段的 8 阵元多模态 OAM 涡旋电磁波微带阵列天线, 其工作频段在 1.35GHz ~ 1.86GHz, 相对带宽达到 31.8%, 可以在同一频点产生具有多种 OAM 模态 ($l=0, l=\pm 1, l=\pm 2, l=\pm 3$) 特性的涡旋电磁波. 由仿真结果可以看出, 该阵列天线能够在仿真实验的条件下产生不同 OAM 模态值的涡旋电磁波. 最后, 给出阵列天线所产生的不同 OAM 模态值涡旋电磁波的增益、三维辐射图及电场幅度图等特性参数, 为下一步将实际的 OAM 涡旋电磁波阵列天线设计应用于 OAM 无线电通信系统提供了理论与实验依据.

2 阵列天线结构设计

为了解决微带阵列天线带宽较窄的应用限制问题, 越来越多拓展带宽的方法被研究学者提出, 其中采

用 L 型探针馈电的方式引起学术界的关注. 基于这种技术, 本文从传统的微带贴片天线出发, 针对微带天线窄带宽的这种特点, 设计出宽频带特性 L 型探针馈电微带天线作为阵元组成宽频微带阵列天线, 其结构如图 1 所示. 利用 L 型探针馈电技术能够有效解决阻抗带宽较窄的问题, 实现微带阵列天线的宽频功能.

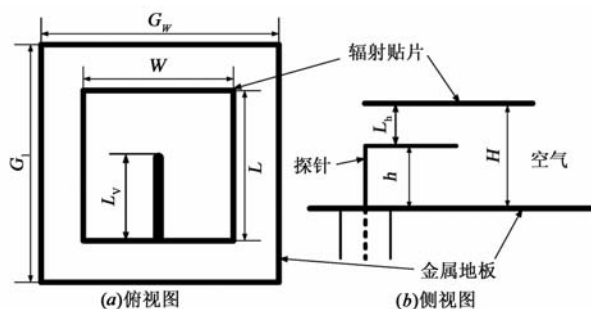


图1 天线阵元基本模型

L 型探针馈电微带天线的辐射机理为: L 型探针水平部分和贴片之间可以产生容抗, 垂直部分和贴片之间会产生感抗, 两者相互作用将会发生谐振, 能够使天线呈现多频带或者宽频带特性. 当 L 型探针连接同轴馈线时, 在探针上将会产生交变的电场, 电场方向为沿探针水平所指方向, 同时交变电场将会产生变化的磁场, 磁场方向与电场方向相互垂直. 当磁感线垂直透过微带贴片时, 磁场又将会产生变化的电场. 最后, 经过接地板反射出去, 变化的电磁场就以这种方式辐射到外部空间.

对于一个介质基板的厚度为 h , 工作频率为 f 的微带天线, 其贴片的宽度和长度为:

$$W = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta l \quad (2)$$

其中, c 为光速, ϵ_e 是等效介电常数, 且有

$$\frac{\Delta l}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_r + 1)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_e - 0.258)(W/h + 0.8)} \quad (3)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

在本文中 L 型探针馈电微带贴片天线阵元采用同轴馈电方式, 以便产生良好的阻抗匹配, 如图 2 阵列天线设计模型所示, 根据式 (1) ~ (4), 其贴片的大小为 $W \times L = 70\text{mm} \times 70\text{mm}$, 探针半径 $r = 0.5\text{mm}$, 高度 $h = 13.8\text{mm}$, 探针水平臂长度 $L_v = 33\text{mm}$, 8 个阵元以半径 $\lambda = 187.5\text{mm}$, 沿圆周等间隔均匀分布排列组成一个圆形阵列, 相邻两个阵元间的夹角 $\theta = 45^\circ$, 各阵元制作在同一基板上, 基板半径比阵列的半径大 $\lambda/4$, 基板的厚度 $h = 20\text{mm}$, 介质材料为真空, 阵列设计参数如表 1 所示.

本文所提出的 8 阵元圆形阵列天线,通过圆形阵列的阵元间具有固定的相位差 $\Delta\varphi = 2\pi l/N$ 来生成 OAM 模态,其中 l 为需要产生的 OAM 模态值, N 为阵元数^[23]. 为了实现同一阵列在不同的拓扑荷之间自由切换,我们通过射频开关控制阵列中的 8 个阵元被依次通电,阵元间馈电相位依次递增或递减 $\Delta\varphi$, 馈电相位差 $\Delta\varphi$ 不同,产生的 OAM 模态随之不同.

表 1 阵列天线设计参数

参数	数值(单位: mm)
G_i	80
G_w	80
L	70
W	70
L_v	33
L_h	6.2
H	20
R_0	234.375
r_0	187.5
D_1	2.0
d_1	1.0
h	13.8

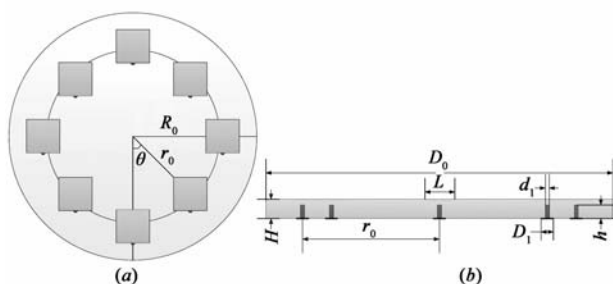


图 2 阵列天线设计模型

3 仿真结果及分析

对于一个 N 元 OAM 圆形阵列天线,所有的辐射阵元都是馈送相同相移增量的信号,电磁波围绕阵列轴线旋转一周,相位将递增 $2\pi l$ 的几何弧度,由此可以生成“扭曲”的 OAM 电磁波.

由图 3 阵列天线主要性能参数中 (a) 回波损耗 S_{11} , 可以看出各阵元的谐振频率具有良好的一致性,阵元间的互耦效应相对较小,这表明阵列天线的 10dB 带宽覆盖 1.35GHz 到 1.86GHz,同时由图 3 (b) 阵列天线

的电压驻波比可以看出,在天线的工作频带 1.35GHz ~ 1.86GHz 之间,阵列天线的电压驻波比均小于 2,性能符合要求.

当阵元分别被馈送功率大小相等、连续相位变化分别为 $0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ$ 和 $\pm 135^\circ$ 的信号时, OAM 模态值分别对应为 $l=0, l=\pm 1, l=\pm 2, l=\pm 3$. 图 4 所示为阵列半径为 λ 时,七种不同 OAM 模态下阵列天线的三维辐射模式图. 当 OAM 模态值 $l=0$ 时,主瓣方向几乎与天线阵面垂直,电磁波能量主要沿阵列的轴线方向辐射;当 OAM 模态数 $l=\pm 1$ 时,在轴线方向上将会出现波束中空现象,这是由于每相邻的一对贴片阵元都不同相造成的,波束也因此携带轨道角动量形成空间螺旋相位波前结构. 随着 OAM 模态值的增加,波束中空部分的面积也变大,旁瓣增大并发展成主瓣,阵列的方向性随之减弱. 结果进一步表明,较大的 OAM 模式数可以减小阵列天线的增益,并增加轴线方向上中空区域的面积,这是我们将来在通信系统接收端选择 OAM 检测区域时必须考虑的.

如图 5 所示为 OAM 模态值分别为 $l=0, l=\pm 1, l=\pm 2$ 和 $l=\pm 3$ 的不同数值下,在谐振频率点附近 OAM 涡旋电磁波微带阵列天线在方向角分别为 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 时的增益变化示意图. 由该阵列天线的仿真增益曲线可知,在工作频带内该阵列天线增益与 S_{11} 、三维辐射图吻合较好,较大的 OAM 模式数可以减小阵列天线的增益,并增加轴线方向上中空区域的面积,方向性也随之变得发散,这也是我们下一步将 OAM 阵列天线应用于实际通信系统中,在接收端选择 OAM 检测区域时必须应对的. 根据经典电磁理论,随着信号传输距离的增加,波束的相位结构不会发生改变. 因此,涡旋电磁波在理论上具有旋转性和完全对称性,即在 $\theta=0^\circ$ 两侧附近的曲线应该完全对称. 然而由图 5 不同 OAM 模态增益图可以发现,由于本文采用的是 L 型探针馈电微带贴片天线作为阵元,曲线并不能完全满足严格对称. 微带贴片天线是一种非理想意义的天线,其具有一定的几何结构以及所选用的材料并非理想材料,阵元与阵元之间难免会产生耦合干扰,从而导致电磁波曲线并不具备完全旋转对称性.

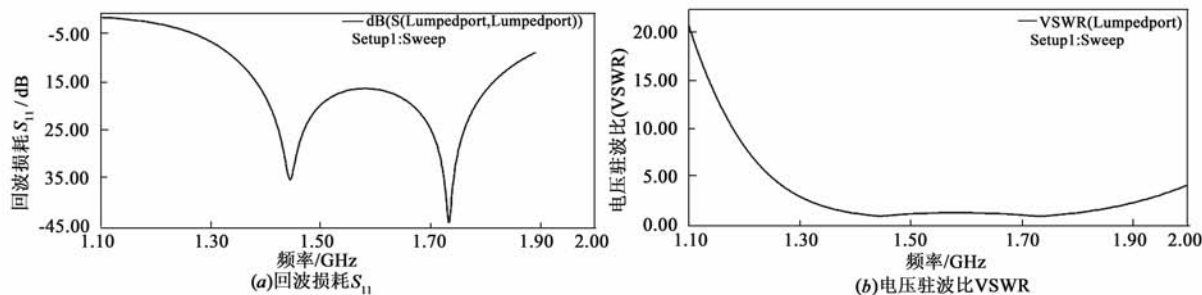


图 3 阵列天线主要性能参数

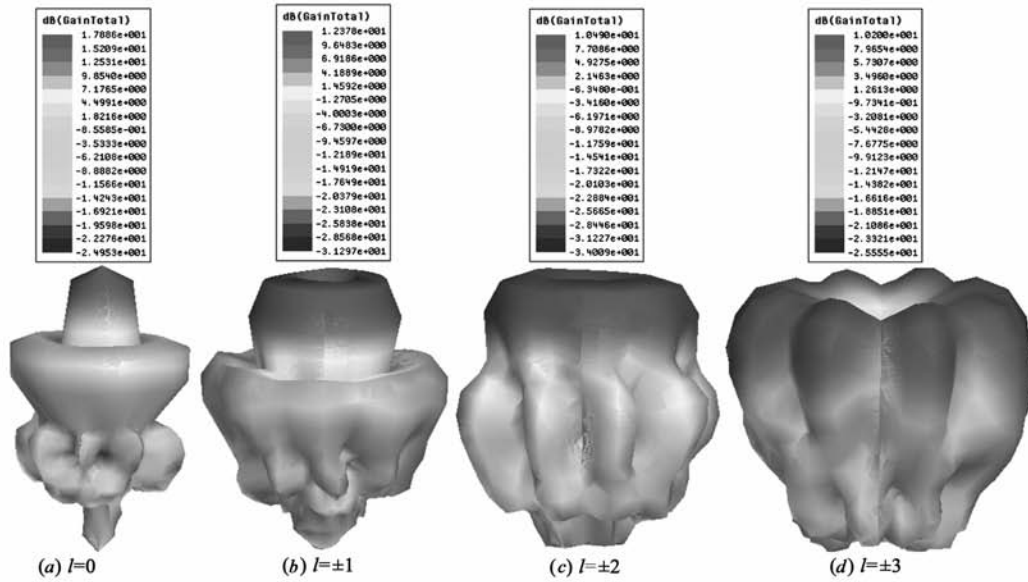


图4 阵列天线三维辐射模式图

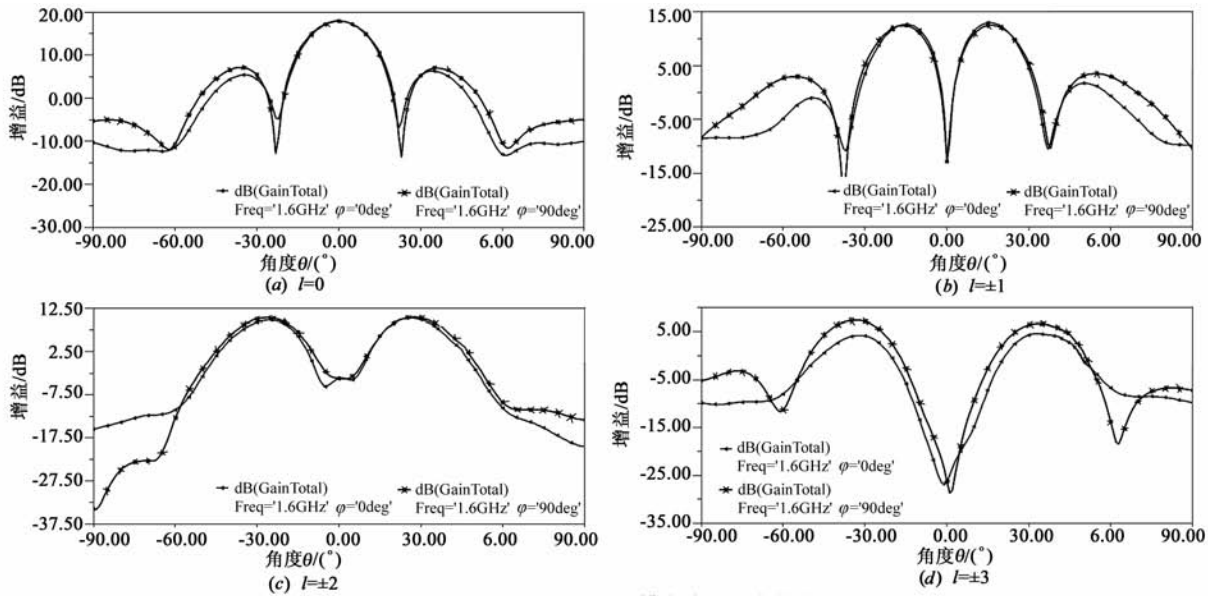


图5 不同OAM模态阵列天线增益图

根据前文所讨论的,OAM 波束最关键的特征是其电场具有螺旋相位波前结构.图 6 所示为不同 OAM 模态值的电场幅度分布情况,可以看出 OAM 模态分别为 $l = \pm 1$ 、 $l = \pm 2$ 和 $l = \pm 3$ 的空间螺旋相位波前结构清晰可见,OAM 波束具有明显的空间螺旋相位结构特征.当 OAM 模态数 $l = 0$ 时,所有阵元馈送相同的零相移信号,这时并没有螺旋相位波前,可以看作为一个均匀圆阵.当 OAM 模态数 $l = +1$ 时,意味着在两个相邻阵元间的相位差为 $+45^\circ$,可以产生逆时针的螺旋相位波前;同理当 $l = -1$ 时,两个相邻阵元间的相位差为 -45° ,可以产生顺时针的螺旋相位波前.也可以观察到,当 OAM 模态从 ± 1 提高到 ± 3 时,波束中心处的空

区域将会扩大,其方向性也会随 OAM 模态数目产生变化.同时,当 OAM 模态数增大到 $l = \pm 3$ 时,涡旋波束相位分布出现了不规则的变形,由于阵元的数目决定所能产生的 OAM 模态的最大值,即存在阵元数目的有限性,阵元数目一定,阵列能够产生的 OAM 模态值也限制在一定范围内, N 个阵元的阵列天线理论上可生成 OAM 模式最大值 L_{max} ,可以通过公式 $-N/2 < L_{max} < +N/2$ 得到.因此,产生的模态值越接近 L_{max} ,涡旋电磁波束相位分布变形越明显.

多模态 OAM 微带阵列天线的增益、带宽、方向图等多项技术指标是相互联系、相互影响的,会存在顾此失彼的情况,基于本文的仿真实验结果,在下一步实际

设计应用中要按工程需要找出一个平衡点. 值得注意的是, 依靠特定的天线技术产生涡旋电磁波是实现 OAM 复用的基础, 采用 OAM 复用技术后, 无线通信系统的容量可以显著增大. 由于 OAM 电磁波自身的属性因素, 将 OAM 用于无线通信时, 最大的问题是其辐射

主轴上能量为零, 在经过一段距离传播后, 需要用超大口径 (或分布式) 天线才能检测、分辨不同模式的 OAM, 这为阵列天线的设计和应用增加了相当大的难度. 此外, 如果将 OAM 电磁波用于卫星通信和短波通信, 还需要考虑大气的非均匀性和电离层的影响.

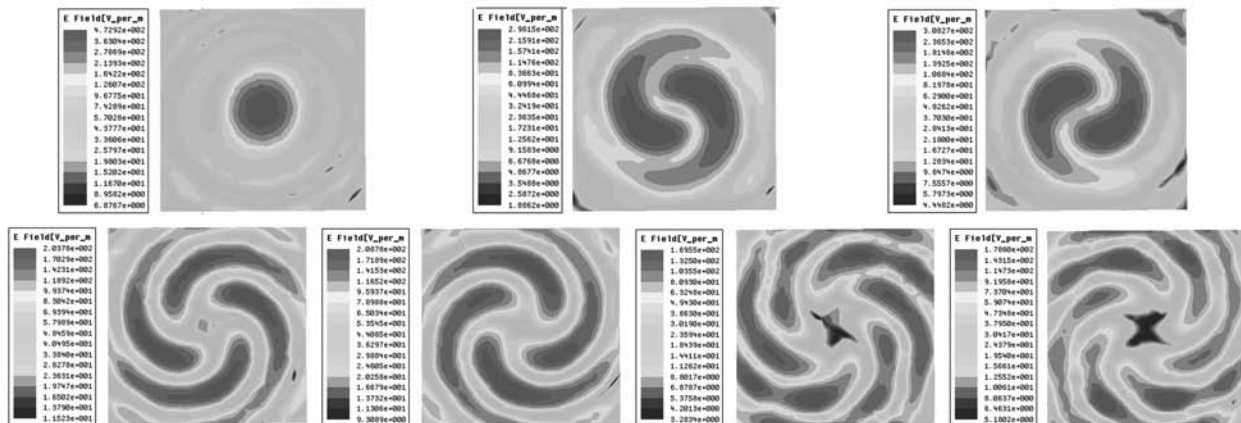


图6 不同OAM模式阵列天线电场幅度图 ($l=0, l=\pm 1, l=\pm 2, l=\pm 3$)

4 结论

本文设计了一款工作在 L 波段的多模态轨道角动量新型微带宽频阵列天线. 该阵列的突出优点是不仅可以实现高带宽, 而且还可以通过改变阵元之间的馈电相位差来产生具有多种模态轨道角动量特性的涡旋电磁波, 仿真实验结果表明多种 OAM 模态涡旋波束可以由该阵列天线生成. 但在 OAM 的产生方式中, 阵列天线的实现难度较大, 现在仅有一些仿真结果, 验证的条件尚不具备, 需要进一步的深入研究.

微带阵列天线以其独特的结构和功能优势, 具有广阔的应用前景, 如何设计出高增益、小型化、多极化、多频段的阵列天线成为无线通信领域的研究方向^[24]. 同时, 在非理想的传播环境下, 将 OAM 技术用于无线通信存在旋转率畸变的可能性, 以及如何实现轨道角动量阵列天线的全向覆盖、高增益等诸多问题, 需要我们从理论和实践上共同努力, 不断探索并寻求解决方案.

参考文献

- [1] Bai Q, Tennant A, Allen B. Generation of orbital angular momentum(OAM) radio beams with phased patch array [A]. Loughborough Antennas and Propagation Conference [C]. Loughborough, UK: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013. 410 - 413.
- [2] Yuan C, Wen Y, Xu W. Directional beamforming for high-speed railway communications with frequency offset pre-correction [J]. Chinese Journal of Electronics, 2014, 23

(1): 163 - 168.

- [3] 王从思, 王伟锋, 等. 基于机电耦合的有源相控阵天线辐射和散射特性综合优化 [J]. 电子学报, 2015, 43 (6): 1185 - 1191.
Wang Cong-si, Wang Wei-feng, et al. Integrated radiation-scattering optimization of active phased array antennas based structural electromagnetic coupling method [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43 (6): 1185 - 1191. (in Chinese)
- [4] Wang J, Yang J, Fazal I M. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488 - 496.
- [5] Yan Y, Xie G, Lavery M. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing [J]. Nature Communications, 2014, 5(4876): 48 - 76.
- [6] Cohen-Tannoudji C, Dupont-Roc J, Grynberg G. Introduction to the Covariant Formulation of Quantum Electrodynamics [M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1989, 361 - 455.
- [7] Poynting J H. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1909, 82(557): 560 - 567.
- [8] Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light [J]. Physical Review, 1936, 50 (2): 1 - 15.
- [9] Allen L, Beijersbergen M. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. Physical Review A, 1992, 45 (11): 8185 - 8189.

- [10] Thidé B, Then H, Sjöholm J. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(8): 87–91.
- [11] Tamburini F, Mari E, Sponselli A. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(3): 1–17.
- [12] Tamburini F, Thidé B, Boaga V. Experimental demonstration of free-space information transfer using phase modulated orbital angular momentum radio [J]. *ArXiv Preprint ArXiv*, 2013, 13(02): 20–25.
- [13] Yan Y, Guodong X, et al. Demonstration of 8-mode 32-Gbit/s millimeter-wave free-space communication link using 4 orbital-angular-momentum modes on 2 polarizations [A]. 2014 IEEE International Conference on. IEEE [C]. Sydney; Communications (ICC), 2014. 4850–4855.
- [14] Singh R P, Poonacha P G. Survey of techniques for achieving topological diversity [A]. 2013 National Conference on Communications [C]. New Delhi, India: IEEE(NCC), 2013. 1–5.
- [15] Mohammadi S M, Daldorff L K S, Bergman J E S. Orbital angular momentum in radio-a system study [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 565–572.
- [16] Wu H, Yuan Y, Zhang Z, et al. UCA-based orbital angular momentum radio beam generation and reception under different array configurations [A]. 2014 Sixth International Conference [C]. Hefei: Wireless Communications and Signal Processing, 2014. 1–6.
- [17] Bai Q, Tennant A, Allen B. Experimental circular phased array for generating OAM radio beams [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(20): 1414–1415.
- [18] Tennant A, Allen B. Generation of radio frequency OAM radiation modes using circular time-switched and phased array antennas [A]. *Antennas and Propagation Conference [C]*. Loughborough, UK; IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012. 1–4.
- [19] Tennant A, Allen B. Generation of OAM radio waves using circular time-switched array antenna [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(21): 1365–1366.
- [20] Bai Q, Tennant A, Cano E, et al. An experimental phased array for OAM generation [A]. *Antennas and Propagation Conference [C]*. Loughborough, United Kingdom; IEEE, 2014. 165–168.
- [21] 段宝岩, 王猛. 微波天线多场耦合理论模型与多学科优化设计的研究 [J]. *电子学报*, 2013, 41(10): 2051–2060.
- Duan Bao-yan, Wang Meng. Research of the theoretical model of multi-field coupling and multidisciplinary optimization design on microwave antennas [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(10): 2051–2060. (in Chinese)
- [22] Bahl I J, Bhartia P. *Microstrip Antennas [M]*. Norwood, Massachusetts, USA; Artech House, 1980.
- [23] Deng C, Chen W, Zhang Z. Generation of OAM radio waves using circular vivaldi antenna array [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2013, 2013(10): 1–7.
- [24] 盛楠, 廖成, 等. 预测毫米波雾衰减的抛物方程模型研究 [J]. *电子学报*, 2014, 42(5): 958–962.
- Sheng Nan, Liao Cheng, et al. The parabolic equation model for estimation fog attenuation at millimeter wave lengths [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(5): 958–962. (in Chinese)

作者简介



李 强 男, 1989 年生于山东临沂. 现为宁夏大学物理电气信息学院硕士研究生. 研究方向为宽带无线通信技术.
E-mail: yl_lee_q@163.com



孙学宏 (通信作者) 男, 1974 年生于宁夏灵武. 现为北京邮电大学信息与通信工程学院博士研究生, 宁夏大学物理电气信息学院副教授、硕士生导师. 研究方向为新一代宽带无线通信技术与网络.
E-mail: sunxh@bupt.edu.cn



庞丹旭 男, 1992 年生于陕西咸阳. 宁夏大学物理电气信息学院硕士研究生. 研究方向为宽带无线通信技术与网络.
E-mail: pdx19920405@163.com



刘丽萍 女, 1972 年生于宁夏石嘴山. 现为宁夏大学物理电气信息学院教授、硕士生导师. 研究方向为新一代宽带无线通信技术.
E-mail: liuliping8186@126.com