

耦合对环形相控阵生成涡旋电磁波的影响

唐 波¹, 白 剑², 盛新庆³

(1. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083; 2. 航天科工集团二院 25 所, 北京 100039;

3. 北京理工大学信息与电子学院电磁仿真中心, 北京 100081)

摘 要: 该文研究了环形天线阵列生成具有轨道角动量的微波频段涡旋电磁波的过程中, 天线阵列单元间的耦合对生成的涡旋电磁波的模式的影响. 通过理论分析, 以及基于矩量法的全波电磁数值计算, 给出了在一定的条件下, 耦合对生成的涡旋电磁波的模式数的影响. 结果表明, 当存在耦合的旋转对称性时, 耦合不会对涡旋波的生成造成影响; 而当不存在耦合的旋转对称性时, 单元间耦合会使生成的涡旋波偏离理想结果. 耦合对涡旋波的影响程度敏感于模式数、环形阵列半径、观测点方位. 基于文中的参数, 即使相邻单元间距大于两个波长, 耦合也可能使模式数改变 14% 以上.

关键词: 涡旋波; 轨道角动量; 环形阵列; 耦合

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)09-2291-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.035

Coupling Effects on the Vortex Wave Generation of the Uniform Circular Array

TANG Bo¹, BAI Jian², SHENG Xin-qing³

(1. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. The 25th Institute, Second Research Institute of the China Aerospace Science and Industry Group, Beijing 100039, China;

3. Center for Electromagnetic Simulation, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Uniform circular array (UCA) can generate vortex wave with orbital angular momentum (OAM) in microwave band, this paper studies the effects of the coupling among the units on the OAM modes. The effects are evaluated by analysis and numerical computation based on momentum method (MoM). The results show that, if the coupling among units is rotational symmetry, then the coupling will not affect the generation of the OAM-carrying vortex wave. But if the coupling among units is not rotational symmetry, then the coupling will affect it. The effects is influenced by the mode number, the radius of the UCA, and the azimuth location of the field. Based on the characteristics used in the paper, even if the distance between the neighboring units is larger than two wavelengths, the mode number can be changed by more than 14%. It is significant for UCA design for vortex wave generation.

Key words: vortex wave; orbital angular momentum (OAM); uniform circular array (UCA); coupling

1 引言

近几年来, 具有轨道角动量的涡旋电磁波获得了越来越多的研究者的关注, 成为一个热点问题. 这主要得益于涡旋电磁波在无线通信领域和雷达探测领域潜在的应用能力. 由相关研究可知, 由于涡旋电磁波具有的在绕轴方向的时变量, 使其在用于无线通信时具有更多的调制信息的维度, 有利于系统的优化设计和性能提升, 究其本质仍然是使用空间资源换取频率资源; 而在雷达探测领域, 涡旋电磁波的独特特性有可能获

得目标更为丰富的信息.

涡旋波的研究最早是从光学领域开始的^[1]. 并且在光学领域也开展了涡旋波在光通信中的应用, 包括在自由空间光通信中利用涡旋模式的正交性进行复用^[2,3]. 2007 年, 圆环形天线阵列 (Uniform Circular Array, UCA) 被提出用来进行微波频段涡旋电磁波的产生^[4]. UCA 中的各单元, 沿圆周方向具有线性递增或递减的初始相位. 2011 年, 通过实验证实了微波频段涡旋电磁波可以携带轨道角动量^[5]. 2012 年, 在无线通信中, 也通过实验验证了涡旋电磁波的模式复用^[6]. 在微

波频段涡旋电磁波的研究中,其产生方式无疑是首要的问题.微波频段涡旋电磁波的产生方式包括UCA、螺旋反射器以及螺旋相位板等.在文献[5,6]中微波频段涡旋电磁波的产生使用了改进的抛物面天线和螺旋反射器.螺旋相位板也可以用来产生所希望的涡旋电磁波^[7-9].本文主要关注UCA的涡旋波产生方式.在文献[10]中,研究了UCA的参数配置与生成的模式之间的关系等问题,例如模式数目与天线单元的数量之间的关系等.在文献[11]中,提出对于UCA可以使用选时辐射的方法来实现涡旋电磁波.在文献[12]中,基于UCA方法,通过实验产生了10GHz频段的涡旋电磁波.相较于传统UCA中的初始相位的设置通常是通过延时线或射频设计来实现,文献[13]提出通过使UCA中的各单元在空间上沿轴向产生一个线性递增的距离偏移,利用空间位置的偏移来代替延时线,从而实现涡旋电磁波的产生.在涡旋电磁波的应用方面,除了前述提到的在通信中的模式复用之外,在雷达探测领域也有相关的研究.文献[14]基于UCA的涡旋波产生方法研究了使用涡旋波的多个正交模式进行成像的问题,获得了一些有意义的成像结果.

本文主要针对UCA的产生方式中的单元天线间的耦合问题进行研究.由于耦合的影响,当各单元激励电压的初始相位为线性时,各单元天线上激励起的电流的初始相位并不是线性的,从而使UCA产生的模式不纯.需要对此进行深入研究.

2 UCA 原理

天线单元以相同取向在圆环上等距排列,各单元激励电压的初始相位呈线性递增^[5,6].本文主要针对相位可调的圆环形相控阵.

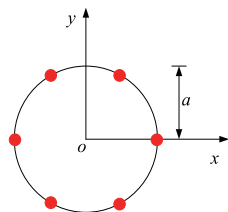


图1 六单元UCA示意图

在图1中,以六个辐射单元为例.圆环形阵列位于 xy 平面内,圆心处于坐标原点.圆环半径为 a .一般情况下,单元总数记作 N 时,假设单元天线的方向图为全向,则空间中的辐射场当 N 很大时可以记作^[14-16]

$$E(R, \theta, \varphi | l) = j^l A \exp(jl\varphi) J_l(ka \sin\theta) \mathbf{e}_p \quad (1)$$

其中, $\mathbf{e}_p$ 为观察点处的电场极化方向, J_l 为 l 阶第一类Bessel函数, k 为波数, (R, θ, φ) 为观察点坐标, A 仅为传播距离 R 的函数,与 θ, φ, l 以及时间无关.其中 l 取值为整数, $0 \leq l \leq N-1$ 称之为OAM的拓扑荷或模式

数.文献[5]指出,UCA产生的模式数量等于天线单元的数量.

3 耦合效应

在UCA的涡旋波产生方式中,在涡旋波的产生要求下沿圆周线性变化的是各单元上激发起的电流的相位,而电路中直接可控的是各单元的馈电电压的相位,当不存在耦合时,这两个物理量的相位变化规律是一致的.然而,当UCA的单元间存在耦合时,虽然馈电电压的相位沿圆周线性变化,但是此时各单元上激发起的电流的相位却可能不是沿圆周线性变化的,进而影响涡旋波的产生.

记天线阵的馈电电压向量为 $\mathbf{V}$,激发起的电流向量为 $\mathbf{I}$,导纳矩阵为 $\mathbf{G}$.则

$$\mathbf{I} = \mathbf{G}\mathbf{V} \quad (2)$$

其中,馈电电压向量 $\mathbf{V}$ 具有如下表达式:

$$\mathbf{V} = V_0 [1, e^{j\frac{2\pi}{N}}, \dots, e^{j(n-1)\frac{2\pi}{N}}, \dots, e^{j(N-1)\frac{2\pi}{N}}]^T \quad (3)$$

其中 V_0 为复常量.

(1)若单元间无耦合,则 $\mathbf{G}$ 正比于单位矩阵,因此

$$\mathbf{I} = I_0 [1, e^{j\frac{2\pi}{N}}, \dots, e^{j(n-1)\frac{2\pi}{N}}, \dots, e^{j(N-1)\frac{2\pi}{N}}]^T \quad (4)$$

其中 I_0 为复常量.这表明,各单元电流的相位均匀递增(减).符合产生涡旋波的要求.

(2)当单元间存在耦合,此时若耦合存在旋转对称性,即

$$\mathbf{G} = \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{W}^T \quad (5)$$

其中,

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ e & 0 \end{bmatrix} = (\mathbf{W}^T)^{-1} \quad (6)$$

上式中, $\mathbf{e}$ 为单位矩阵, $\mathbf{o}$ 为零向量.则此时,

$$\mathbf{I} = \mathbf{W}\mathbf{G}\mathbf{W}^T \mathbf{V} \quad (7)$$

由式(3)、(6)可得

$$\mathbf{W}^T \mathbf{V} = e^{j\frac{2\pi}{N}} \mathbf{V}, \mathbf{W}\mathbf{V} = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \mathbf{V} \quad (8)$$

将式(8)带入式(7),可得

$$\mathbf{I} = e^{j\frac{2\pi}{N}} \mathbf{W}\mathbf{R}\mathbf{V} = e^{j\frac{2\pi}{N}} \mathbf{W}\mathbf{I} \quad (9)$$

因此, $\mathbf{I}$ 中的元素以 $e^{j\frac{2\pi}{N}}$ 为等比系数.此时, $\mathbf{I}$ 具有与无耦合情况下的式(4)相同的表达式.即耦合存在旋转对称性时,其对涡旋波的影响可以忽略,各单元的电流相位仍然沿圆周具有与电压相同的线性变化.图2给出了一种单元间耦合具有旋转对称性的情况.如图2所示,六个半波偶极天线在 xy 平面内沿圆环布置,天线的极化方向为沿 z 轴方向的垂直极化.此时,由于整体结构的旋转对称性,天线间的耦合也是旋转对称的.从而使天线间的耦合不影响涡旋特性.这表明,在此情况下,在进行涡旋波的生成而进行UCA布阵时,可以进行比

较密集的排列以避免离散效应.

(3) 当单元间存在耦合,且耦合不存在旋转对称性时, $\mathbf{I}$ 不再具有与无耦合情况下的式(4)相同的表达形式.理由如下.

若 $\mathbf{I}$ 具有与无耦合情况下的式(4)相同的表达形式,则此时 $\mathbf{I}$ 满足

$$\mathbf{W}^T \mathbf{I} = e^{j\frac{2\pi}{N}} \mathbf{I}, \mathbf{W} \mathbf{I} = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \mathbf{I} \quad (10)$$

由式(2)、(8)、(10),得

$$\mathbf{W}^T \mathbf{I} = \mathbf{G} \mathbf{W}^T \mathbf{V} \quad (11)$$

用 $\mathbf{W}$ 同时乘以两边,由于 $\mathbf{W}$ 与 $\mathbf{W}^T$ 互逆,得

$$\mathbf{I} = \mathbf{W} \mathbf{G} \mathbf{W}^T \mathbf{V} \quad (12)$$

对照式(2)、(12),可得式(5)成立,即耦合是旋转对称的.因此,若耦合不是旋转对称,则 $\mathbf{I}$ 不再具有与无耦合情况下的式(4)相同的表达形式,即电流不再具有均匀分布的幅度和线性变化的相位.

由以上(2)、(3)的分析过程可知,在电压表达式(3)的前提下,耦合旋转对称是 $\mathbf{I}$ 具有与无耦合情况下的式(4)相同的表达形式的充分必要条件.

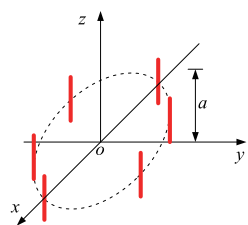


图2 垂直极化六单元半波振子UCA示意图

4 数值结果

此处对下图3中所示的水平极化六单元半波振子UCA的耦合情况进行数值计算分析.主要计算当馈电电压具有式(3)所示的均匀的幅度和线性变化的相位时,电流对式(4)的偏移.在图3中,六根半波振子在 xy 面内形成环形阵列,同时阵子沿 y 轴取向.此时,图3中的整体结构不具有圆周对称性,例如,将阵列逆时针旋转60度后,单元1将到达单元2的位置,但是其取向不再是 y 轴方向,与原来此处单元2的取向不同.其导纳矩阵不满足式(5)的要求.下面以矩量法做具体的电磁数值计算分析.

计算中所用参数: $\lambda = 0.1\text{m}$, $N = 6$. 圆环半径 $a =$

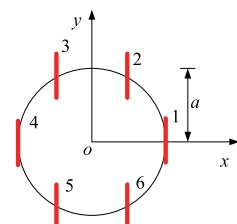


图3 水平极化六单元半波振子UCA示意图

$2\lambda, 1.5\lambda, \lambda$. 图4给出了场的相位偏差.横坐标是相应模式数的辐射主波束指向(即 θ 确定)沿圆周方向的远场观察角,每4度一次采样.耦合与非耦合情况下的电流,已令其相位在第一个单元处对齐.

图4中的曲线斜率将会对涡旋波的模式数造成影响.由图4(a)~(c)可知,总体上看,随着UCA半径的减小,由于耦合增强,相位偏差曲线的起伏变得更剧烈.

在图4(a)~(c)中, $l=2$ 的曲线平均斜率分别为大约0.28、0.1、0.42,这表明,正常的 $l=2$ 模式的模式数2

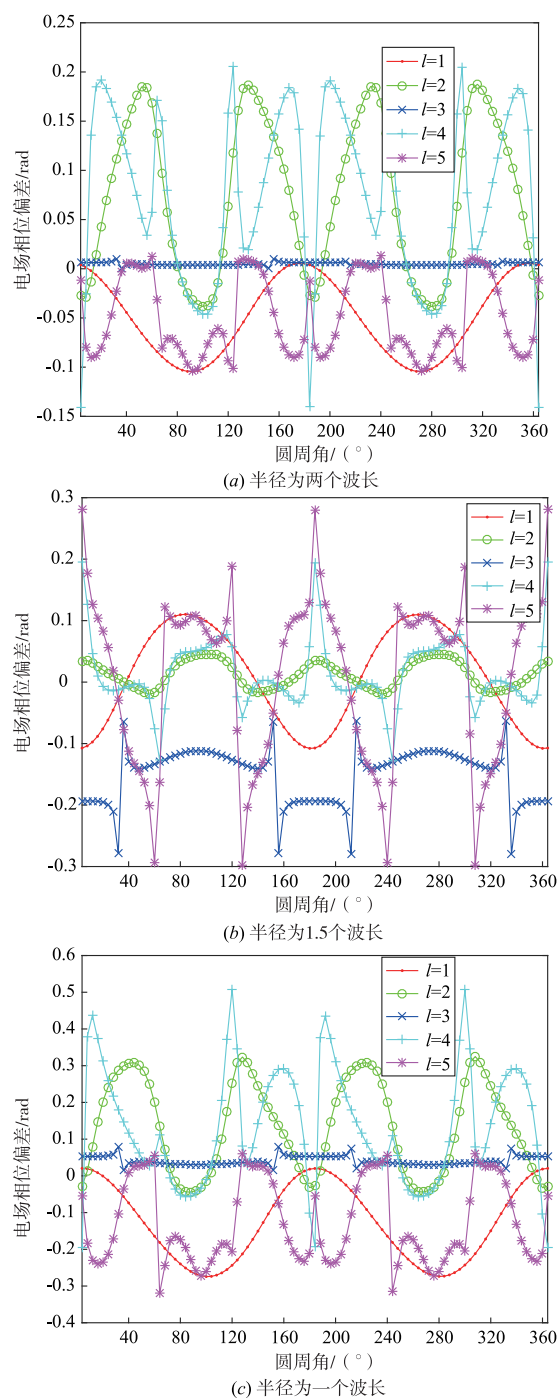


图4 电场相位偏差随观察圆周角的分布

分别被改变了 14%, 5%, 21%. 在一些变化剧烈处, 模式数的改变还要更大. 这表明, 单元间的耦合将会明显的影响模式数.

5 结论

UCA 的单元间耦合, 当存在耦合的旋转对称性时, 不会对涡旋波的生成造成影响; 而当不存在耦合的旋转对称性时, 单元间耦合会影响电流的相对相位关系, 进而使生成的涡旋波偏离理想结果. 单元间耦合使涡旋波偏离理想结果的程度, 由数值计算表明, 模式数的改变有可能达到 20% 以上, 即使是对于单元间隔在两个波长以上的情况, 耦合也有可能使模式数的改变达到 14%. 对于其它的变化比较剧烈的模式、或者是特定的区域, 模式数的改变有可能更大.

由此, 在进行 UCA 设计时, 一方面可以尽量使单元间的耦合具备旋转对称特性, 另一方面也可以通过改变传统的幅度分布均匀、相位线性递增的馈电电压形式, 使各单元上激励起的电流沿圆周具有理想的线性相位分布.

参考文献

- [1] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian modes [J]. *PhysRevA*, 1992, 45 (11): 8185 – 8190.
- [2] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Photon*, 2012, 6(7): 488 – 496.
- [3] WILLNER A E, WANG J, HUANG H. A different angle on light communications [J]. *Science*, 2012, 337 (6095): 655 – 656.
- [4] THIDE B, THEN H, SJOHOLM J, et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain [J]. *PhysicalReview Letters*, 2007, 99 (8): 087701-1 – 087701-4.
- [5] TAMBURINI F, MARI E, THIDE B, et al. Experimental verification of photon angular momentum and vorticity with radio techniques [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 99(20): 321.
- [6] TAMBURINI F, MARI E, SPONSELLI A, et al. Encoding many channels in the same frequency through radio vorticity: first experimental test [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(3): 033001-1 – 033001-17.
- [7] NIEMIEC R, BROUSSEAU C, MAHDJOUBI K, et al. Characterization of an OAM flat-plate antenna in the millimeter frequency band [J]. *IEEE AWPL*, 2014, 13 (1): 1011 – 1014.
- [8] CHENG L, HONG W, HAO Z. Generation of electromagnetic waves with arbitrary orbital angular momentum modes [J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 4814 – 4818.
- [9] CHEN Y, ZHENG S, LI Y, et al. A flat-Lensed spiral phase plate based on phase-shifting surface for generation of millimeter-wave OAM beam [J]. *IEEE AWPL*, 2016, 15: 1156 – 1158.
- [10] MOHAMMADI S M, DALDORFF L K S, BERGMAN J E S, et al. Orbital angular momentum in radio—a system study [J]. *IEEE Trans Ant Propag*, 2010, 58 (2): 565 – 572.
- [11] TENNANT A, ALLEN B. Generation of OAM radio waves using circular time-switched array antenna [J]. *Electron Lett*, 2012, 48(2): 1365 – 1366.
- [12] BAI Q, TENNANT A, ALLEN B. Experimental circular phased array for generating OAM radial beams [J]. *Electron Lett*, 2014, 50(20): 1414 – 1415.
- [13] YUAN T, CHENG Y, WANG H, et al. Generation of OAM radio beams with modified uniform circular array antenna [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52 (11): 896 – 898.
- [14] LIU K, CHENG Y, YANG Z, et al. Orbital-angular-momentum-based electromagnetic vortex imaging [J]. *IEEE AWPL*, 2015, 14: 711 – 714.
- [15] BAI X. Research on Antennas Generating Electromagnetic Vortex Beam [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [16] 郭桂蓉, 胡卫东, 杜小勇. 基于电磁涡旋的雷达目标成像 [J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(6): 71 – 76.
GUO G, HU W, DU X. Electromagnetic vortex based radar target imaging [J]. *Journal of NUDT*, 2013, 35(6): 71 – 76. (in Chinese)

作者简介



唐 波 男, 1978 年生于江苏. 中科院博士. 研究方向为射频仿真, 电子对抗, 无线信道.
E-mail: tangbo@ustb.edu.cn