

文章编号:1005-6122(2003)04-0050-04

# 电抗加载圆形定向天线阵的理论与实验研究\*

牛俊伟<sup>1</sup> 周良明<sup>2</sup> 钟顺时<sup>1</sup>

(1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071)

**摘要:** 本文基于矩量法对采用中心单元激励的电抗加载圆形定向天线阵进行了较系统的理论与实验研究。首先建立了该阵的计算与优化程序, 研究了只有~一个中心有源单元的  $N$  元加载天线阵的特性与阵列参数的关系, 并设计制作了一个 7 元阵, 对其输入阻抗、方向图及增益进行了实验测试。实验结果与计算值比较一致, 证实了本文计算程序与设计的有效性。

**关键词:** 圆形天线阵, 电抗加载, 矩量法, 优化

IN82 A

## Theoretical and Experimental Study of Reactively Loaded Directive Circular Arrays

Niu Junwei<sup>1</sup>, Zhou Liangming<sup>2</sup>, Zhong Shunshi<sup>1</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072;  
2. School of Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract:** Based on the Moment Method (MM), a systemic theoretical and experimental study on the reactively loaded directive circular array with a center element driven is presented. Its computation and optimization programs are established, and the relationship between the performance and its parameters of an  $N$ -element reactively loaded circular array is given, then the design and experimental results of a seven-element circular array is introduced. The measured results of input impedance, radiation patterns and gain of the array are in good agreement with the computational values, verifying the validity of the analysis program and design.

**Key words:** Circular arrays, Reactively loaded, Moment method, Optimization

## 1 引言

圆形定向天线阵在无线电测向、空间导航和雷达等系统中有着广泛的应用。通常同时给每个阵列单元馈电, 利用改变各馈电端口的振幅和相位来形成所需的空间波束, 但这样往往需要复杂的馈电网络。

Harrington 提出了一种电抗加载控制方向图主瓣指向的方法<sup>[1]</sup>, 假设振子上的电流近似为正弦分布, 采用  $N$  端口网络方法, 在理论上研究了方向图的主瓣指向和增益的优化。

这种形式的天线又被称为电控无源阵列天线 (ESPAR), 它只需要一个射频信号处理电路, 与传统的数字波束形成 (DBF) 阵列天线相比, 可以极大

地降低功率消耗和制作成本。近年来在自适应天线和智能天线领域有着广泛的应用<sup>[2~5]</sup>。

本文采用矩量法编制计算程序, 在程序中对广义阻抗矩阵赋值进行了有效的简化; 考虑到实际应用的需要, 研究了中心馈电的电抗加载圆阵特性与其参数的关系。根据理论计算, 设计并制作了一副  $N=7$  单元中心馈电的电抗加载圆阵, 对其输入阻抗、方向图和增益进行了实验测试。下面依次介绍主要结果。

## 2 电抗加载阵列天线的计算与优化

本文研究的对象为图 1 所示的圆阵形式, 其中圆阵单元由对称振子构成, 中心振子为馈电单元, 其余振子为无源电抗加载单元, 等间距地分布在圆周

\* 收稿日期:2003-01-03;定稿日期:2003-06-30

上,在各振子的输入端口分别加载一电抗元件。

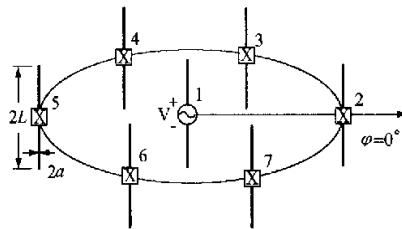


图1 中心馈电的电抗加载圆阵

用矩量法对其进行分析。以  $N = 7$  单元天线阵为例,各单元振子的编号如图 1 所示。振子全长为  $2L$ ,每根振子分为  $M + 1$  段,得到矩阵方程:<sup>[6,7]</sup>

$$\mathbf{Z}_{MN} \mathbf{I}_N = \mathbf{V}_M \quad (1)$$

其中  $\mathbf{V}_M$  是广义电压矩阵,  $\mathbf{I}_N$  是广义电流矩阵,  $\mathbf{Z}_{MN}$  是广义阻抗矩阵。

求解矩阵方程,可得到天线上的电流分布,进而计算出天线的输入阻抗、辐射方向图和增益。考虑到对称振子是直线结构,在此条件下,广义阻抗矩阵元素值  $Z_{ij}$  仅与阵列中的第  $i$  段和第  $j$  段的相对位置有关,相对位置相同的元素只需要计算一次。圆阵在结构上具有对称性,经过简化,给元素个数为  $(7M)^2$  的广义阻抗矩阵赋值,只需要计算  $5M$  个元素值,节省了计算时间。

当仅有一个中心振子馈电时,天线上的电流分布  $\mathbf{I}$  由下式确定:

$$\mathbf{I} = (\mathbf{Z}_{MN} + \mathbf{Z}_L)^{-1} \mathbf{V} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{Z}_{MN}$  是天线的广义阻抗矩阵,它由天线的结构尺寸决定;  $\mathbf{Z}_L$  为加载电抗矩阵。由(2)式可知,当馈电方式和天线的结构尺寸一定时,天线上的电流由电抗加载矩阵确定。电抗加载值不同,天线上的电流分布也不同,因而将改变天线方向图及其增益值。通过选择适当的加载值,可以使天线在给定  $\varphi_0$  方向上的增益最大。

以增益为目标函数进行优化计算,以获得所需的电抗加载值,使天线阵在  $\varphi_0$  方向上获得最大增益。增益  $G$  是  $\mathbf{Z}_L$  的复杂函数,采用坐标轮换法<sup>[8]</sup>进行优化计算,其中线性搜索采用二次插值法。所得优化值是局部最优解,尚需通过多次计算以选取最优的结果。根据圆阵结构对称性,方向图主瓣指向的优化计算只需要在一定角度范围内进行,其它主瓣指向角度可以进行换算。

### 3 数值结果

利用前面介绍的分析方法,编制了计算程序,为

了检验程序,先对文献[1]中给出的实例( $N = 7$ )进行了计算。其中天线单元为半波振子( $2L = \lambda/2$ ),振子圆周半径  $R = \lambda/4$ 。

图 2 给出了不同主瓣指向时天线的增益值。由本文程序计算的结果和文献给出的数据相比较可知,二者十分接近。[1]中假设振子上的电流为正弦分布,本文利用矩量法计算线天线的电流分布,一般而言它比假设正弦电流分布要更为准确一些。

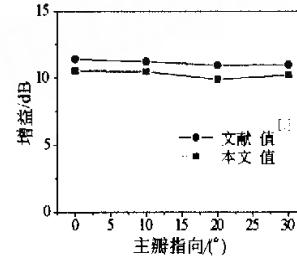


图2 天线增益

图 3 和图 4 是在天线主瓣指向为  $10^\circ$  时,在不同的阵列参数条件下得到的阵列增益优化结果,图 5 给出对应的方向图。天线的基本参数是  $N = 7$ ,  $R = \lambda/4$ ,  $2L = \lambda/2$ ,  $a = 10^{-6}\lambda$ 。当改变其中的某一参数时,其它参数保持上述值不变。

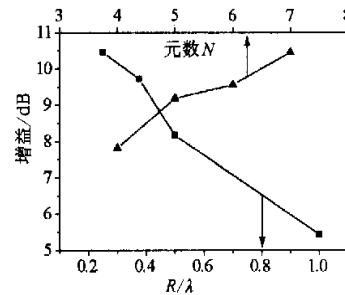


图3 阵列增益与圆阵半径  $R$ 、元数  $N$  的关系

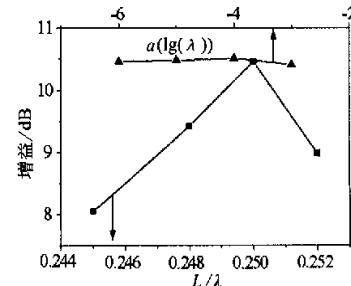


图4 阵列增益与振子臂长  $L$ 、半径  $a$  的关系

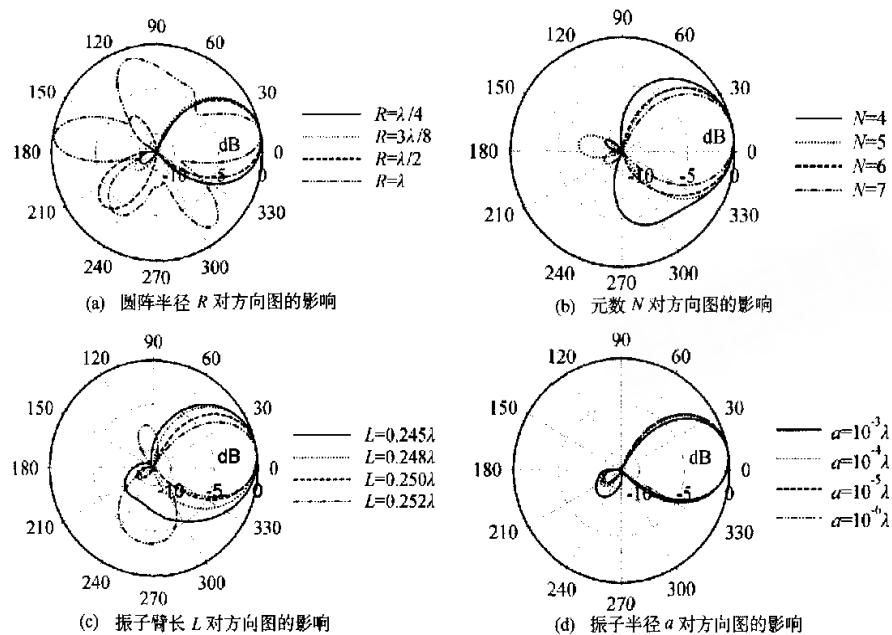


图5 天线阵方向图

随着圆阵半径  $R$  的增大,天线增益在减小。这是由于  $R$  增大,一方面电磁耦合减小使得方向图主瓣变宽,另一方面振子间距增大,使得天线的副瓣增多增大,因而使  $G$  降低。不同  $R$  时的方向图如图 5 (a) 所示,当  $R$  增至  $R = \lambda$  时,虽然还有一个给定指向的主瓣,但出现了几个与主瓣大小几乎相同的副瓣,因而增益跌至 5.4dB。当元数  $N$  减小时,方向图的主瓣变宽,天线增益下降,而且方向图的不对称性十分明显,这表明当单元少时,天线阵对方向性控制要差一些。由图 5(c) 可见,当振子臂长  $L$  由  $0.25\lambda$  降到  $0.248\lambda$  时,方向图主瓣指向发生偏移,增益值下降。而当  $L = 0.245\lambda$  时,主瓣指向虽然是  $10^\circ$ ,但方向图形状发生了显著变化,因而增益值更低。若振子臂长增长至  $L = 0.252\lambda$ ,则方向图主瓣指向发生明显偏移,且出现一个大副瓣,增益值变小。图 4 和图 5(d) 都表明,振子半径  $a$  在所取范围内对天线

方向图和增益几乎没有影响。

对应的阵列输入阻抗如表 1 所示。输入电阻随  $R$  变化很快,当  $R = \lambda$  时,振子间的互耦作用较小,天线输入阻抗接近单振子的数值。随着  $R$  的减小,振子间的互耦作用增大。当  $R$  由  $\lambda/2$  减至  $\lambda/4$  时,输入电阻由  $150\Omega$  左右减到仅 10 多  $\Omega$ 。值得说明的是,若  $R$  变得很小,天线特性将发生很大的变化。例如当  $R = \lambda/8$  时,圆阵半径  $R$  减小了一半,求得其  $G$  值仍可达 9dB 以上,与  $R = \lambda/4$  时相近;而天线的输入阻抗小于  $10\Omega$ ,  $Q \gg 1$ ,此时出现了超增益特性<sup>[9]</sup>。由于其频带很窄,公差要求高,设计时需避免出现这种超增益现象。天线的输入阻抗随着阵元数的变化也有明显的变化。当单元增多时,输入阻抗的实部变小,  $Q$  值变高,带宽变窄。这是因为  $R$  一定,天线的体积不变,单元数增加,使得增益不断增大,因而  $Q$  值增高。当振子臂长变短时,输入电阻

表1 阵列输入阻抗( $\Omega$ )

圆阵半径的影响 ( $N = 7; 2L = \lambda/2; a = 10^{-6}\lambda$ )		阵元数的影响 ( $R = \lambda/4; 2L = \lambda/2; a = 10^{-6}\lambda$ )		振子臂长的影响 ( $N = 7; R = \lambda/4; a = 10^{-6}\lambda$ )		振子半径的影响 ( $N = 7; R = \lambda/4; 2L = \lambda/2$ )	
圆阵半径	输入阻抗	阵元数	输入阻抗	振子臂长	输入阻抗	振子半径	输入阻抗
$R = \lambda/4$	$16.9 + j79.7$	$N = 4$	$38.2 + j78.2$	$L = 0.245\lambda$	$18.3 + j17.7$	$A = 10^{-6}\lambda$	$16.9 + j79.7$
$R = 3\lambda/8$	$93.9 + j146.9$	$N = 5$	$28.8 + j74.1$	$L = 0.248\lambda$	$15.4 + j52.8$	$A = 10^{-5}\lambda$	$17.4 + j80.8$
$R = \lambda/2$	$149.4 - j7.5$	$N = 6$	$20.8 + j76.7$	$L = 0.25\lambda$	$16.9 + j79.7$	$A = 10^{-4}\lambda$	$18.7 + j83.2$
$R = \lambda$	$84.9 + j32.9$	$N = 7$	$16.9 + j79.7$	$L = 0.252\lambda$	$25.8 + j94.5$	$A = 10^{-3}\lambda$	$22.9 + j88.8$

变化不大,输入电抗明显减小。当臂长变长时,输入阻抗的实部和虚部都增大。振子半径  $a$  对天线输入阻抗的影响比较微小。

## 4 实验结果

为验证电抗加载天线的特性和程序的正确性,设计制作了实验天线模型,并对其输入阻抗、增益和方向图进行了测试。天线工作频率为 375MHz, 相应波长为 0.8m。天线单元采用单极振子,由半径  $a = 0.72\text{mm}$ (大约相当于  $10^{-3}\lambda$ )的铜线制成。金属地面采用一直径为 0.8m 的圆盘铝板,圆盘中心固定一电缆接头(L-16KF),用以对中心单元振子直接馈电,加载单元振子用绝缘材料固定在金属圆盘上,其底部与金属圆盘之间连接加载电抗或短路,电抗元件采用贴片电容或电感,其值根据计算结果,并考虑到实际贴片电容和电感的规格得出。考虑到金属地面的尺寸不够大,用 12 根、长度分别为 1.2m 的金属拉杆固定在金属圆盘上,作为地面的延伸,这样金属地面的直径为  $D = 3.2\text{m} \approx 4\lambda$ 。

用矢量网络分析仪对电抗加载天线的输入阻抗进行了测量。方向图和增益的测量在楼顶平台进行,被测电抗加载天线作接收,用垂直极化的对数周期天线发射,收发天线相距约 11.7m(14.6λ),两天线处于同一高度,离地面约 2.8m(3.5λ),信号源为 HP8656B,接收指示采用频谱分析仪 R4131CN。

实测值与计算值的比较见表 2,阵列方向图主瓣的实测与计算结果如图 6 所示,从中可以看出实测值与计算值相当接近。这样便证实了 Harrington 的理论方案成立,也验证了本文程序的有效性。

表 2 阵列实测值与计算值的比较

主瓣指向(°)	增益(dB)	输入阻抗(Ω)
实测值	10.8	$15.0 + j49.4$
计算值	13.4	$9.8 + j44.8$

## 5 结论

本文对电抗加载定向天线阵进行了较系统的理论与实验研究,编制了计算程序,对阵列的不同电参数进行了优化计算和分析讨论,并设计制作了实验模型天线,对其特性进行了测试,理论计算和实验结果比较接近。实测已表明:用优化计算后的电抗值对圆阵进行加载,可以形成给定的主瓣方向图,并控制其指向,可获得较高的增益。值得指出的是,电抗加载天线输入阻抗的实部较小(只有  $10\Omega$  左右),虚

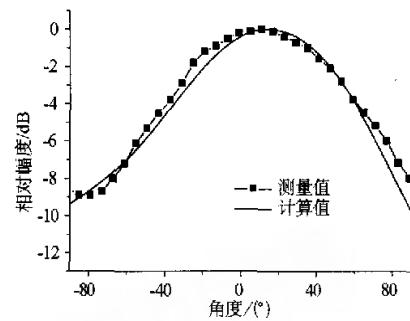


图 6 阵列方向图主瓣

部较大。为了获得匹配,可以采用阻抗变换和调谐装置,或者选用折合振子作中心单元。

## 参 考 文 献

- [1] R F Harrington. Reactively controlled directive arrays. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1978, 26(5):390~395
- [2] J Cheng, M Hashiguchi, K Ligusa, T Ohira. Sector-mode beamforming of a 2.4-GHz electronically steerable passive array radiator antenna for a wireless ad hoc network. *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, vol. 1, 2002, 122~125
- [3] T Ohira. Blind adaptive beamforming electronically-steerable parasitic array radiator antenna based on maximum moment criterion. *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, vol. 2, 2002, 652~655
- [4] C Sun, N C Karmakar. Adaptive beamforming of ESPAR antenna based on simultaneous perturbation stochastic approximation theory. *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, vol. 1, 2002, 192~195
- [5] C Sun, N C Karmakar. A DOA estimation technique based on a single-port smart antenna for position location services. *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, vol. 1, 2002, 196~199
- [6] R F Harrington. 计算电磁场的矩量法. 王尔杰, 肖良勇, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1981
- [7] 刘其中, 宫德明. 天线的计算机辅助设计. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1988
- [8] D A Pierre, *Optimization Theory with Applications*, New York: Wiley, 1969
- [9] 周朝栋, 王元坤, 周良明. 线天线理论与工程. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1988

牛俊伟 1975 年 6 月生, 上海大学博士生。主要研究兴趣为天线和微波电路分析与设计等。

周良明 西安电子科技大学教授, 主要研究领域为天线设计等。

钟顺时 上海大学教授, 博士生导师, 主要研究兴趣为微带天线设计、智能天线等。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>