

# 均匀圆阵列天线仿真系统设计

李颖<sup>1</sup>, 邢向飞<sup>2</sup>, 黄晓涛<sup>1</sup>, 周智敏<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 郑州商品交易所计算机工程部, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 均匀圆阵列天线以其优越的系统性能在通信、雷达探测、导航制导等许多领域得到了广泛的应用。该文建立了均匀圆阵列天线的系统模型, 在此模型基础上对天线的系统性能和各种误差的影响进行了仿真分析, 并针对接收信号的不同类型选择了合适的算法, 进而完成了波达角估计(DOA) 和输出特性的仿真分析。文章中还介绍了用 MATLAB 实现均匀圆阵列天线(UCA) 仿真系统的思路、方法及实现方案, 并建立了对均匀圆阵列天线进行全面分析的模拟仿真平台, 为实验室研究提供了方便的工具。

**关键词:** 均匀圆阵列天线; 系统性能; 仿真系统

中图分类号: TN957 文献标识码: A

## Design of Simulation System for Uniform Circular Array

LI Ying<sup>1</sup>, XING Xiang - fei<sup>2</sup>, HUANG Xiao - tao<sup>1</sup>, ZHOU Zhi - min<sup>1</sup>

(1. School of Electronic science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha Hunan 410073, China;

2. Zhengzhou commodity Exchange, Department of Computer Engineering, Zhengzhou Henan 450000, China)

**ABSTRACT:** Uniform circular array has found broad applications in communication, radar, navigation, control and guide, etc. because of its good performance. The system model is built in this paper, based on which the systematic performance and the effect of errors are simulated. Then, the optimal algorithm is chosen according to different types of signals. Furthermore, the estimation of direction of arrival (DOA) and the analysis of the output character are carried out. The idea, method and realization of the uniform circular array simulation system based on MATLAB are introduced in this paper, which provide a convenient tool for the study of uniform circular array in laboratory.

**KEYWORDS:** Uniform circular array; Systematic performance; Simulation system

## 1 引言

近年来, 各种先进的飞行器, 例如飞机、导弹、卫星以及舰船等, 为了获得更高的武器性能, 对它们所携带的雷达天线提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。机载圆阵列天线由于其优越的结构特点和良好的探测性能, 引起了大家的重视。

与均匀线阵(ULA) 和传统的平面相控阵相比, 圆阵列有着自身独特的优越性能<sup>[2][3]</sup>: 它能提供 360° 的方位角覆盖; 能通过循环移动阵列激励, 简单而灵活地操纵波束方位; 可以在方位上形成无方向性方向图, 而在俯仰方向上也有较理想的方向特性; 相对于二维平面阵, 圆阵列形成的波束赋形不如二维平面阵, 但圆阵列所需要的天线单元少, 数据量

相应也少, 处理方法也比较简单。这些优越的性能使得圆阵列天线有着广阔的应用前景。

但是圆阵列也存在着一定的局限性, 如具有较高的旁瓣电平, 零点深度相对较浅; 在进行 DOA 估计时, 需进行二维谱搜索, 运算量大; 而且, 许多基于 ULA 的 DOA 估计算法不能直接用于 UCA 测向。这些问题均是在设计和使用过程中需要重点考虑的。

本文建立了均匀圆阵列天线的系统模型, 并对其全方面特性进行了仿真, 其中包括: 阵列系统性能、各种误差的影响、接收信号类型、算法设置与选择、DOA 估计及输出特性分析。在仿真分析的基础上, 用 MATLAB 建立了对均匀圆阵列天线进行全面分析的模拟仿真系统。

## 2 均匀圆阵列天线建模

设半径为  $R$  的均匀圆阵列天线有  $N$  个阵元,且阵元为等间隔排列的对称振子。如图 1 所示建立坐标系。圆心位置位于坐标系的原点,第  $n$  个阵元与圆心之间的连线与  $x$  轴的夹角为  $\gamma_n = 2\pi n/N$ ,其位置向量为  $\vec{p}_n = (\cos\phi_n, \sin\phi_n, 0)$ 。设阵元振子长度为  $L$ ,半径为  $a$ ,轴向与  $z$  轴平行,并沿着圆周等间隔排列,所有振子的中心是馈电点并且均处于  $x \sim y$  平面内。

设一波数为  $k_0 = 2\pi/\lambda$  的窄带平面波(中心频率为  $f_0$ ),以  $-\hat{r}$  的方向入射到阵列,其中  $\lambda = c/f_0$  为入射波的波长,  $\hat{r} = (\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta)$  为一单位矢量。则信号的俯仰角  $\theta \in [0, \pi/2]$  为  $z$  轴与信号入射方向的夹角;而方位角  $\phi \in [0, 2\pi]$  是从  $x$  轴沿逆时针方向到信号入射方向在阵列平面上投影的夹角。

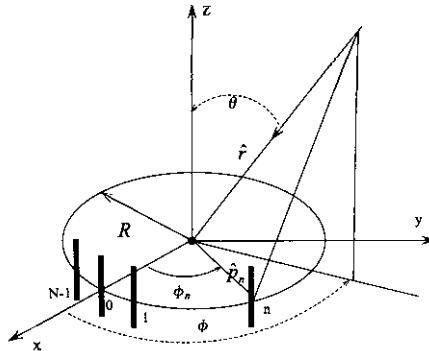


图 1 均匀圆阵列天线模型

则信号在第  $n$  个阵元和圆心之间的延时为:  $\tau_n = \hat{r} \cdot \vec{p}_n / c = R \sin(\theta) \cos(\phi - \gamma_n)$ ,因此, UCA 的阵列流形为:  $\underline{a}(\zeta; \phi) = [e^{j\zeta \cos(\phi - \gamma_0)} \quad e^{j\zeta \cos(\phi - \gamma_1)} \quad \dots \quad e^{j\zeta \cos(\phi - \gamma_{N-1})}]^T$ ,其中  $\zeta = k_0 R \sin \theta$ 。此时均匀圆阵列的场方向图函数可以直接用阵列因子表示为:

$$F(\theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j k_0 R \sin \theta \cos(\phi - \gamma_n)} \quad (1)$$

## 3 均匀圆阵列天线系统仿真分析

根据以上所建立的系统模型,就可以对其各种特性进行分析和仿真。而从 UCA 的阵列流形和方向图函数的表达式可以看出:由于 UCA 的阵列流形不符合范德蒙结构,这使得许多 ULA 测向方法不能直接使用;而且 UCA 的方向图函数也比较复杂。再加上各种误差的影响,那么对均匀圆阵列天线系统进行全面分析将变的十分复杂。为了使分析过程做到条理清晰,简单明了,这里采用模块化设计的思想。

### 3.1 系统性能分析模块

系统性能分析是为了验证选择的天线是否满足试验需要而进行的,其基本参数包括:天线方向图,主瓣宽度,旁瓣电平,方向性系数,波束指向等。

通过阵列模型的建立过程以及(1)式可知,在定义了均

匀圆阵列的各种系统参数(包括天线振子特性、阵元数目和阵列半径等)后,他的系统性能就已经被确定。

而当忽略所有的误差及互耦的影响时,由(1)式给出了 UCA 的方向图函数。将(1)式中各项用 Bessel 级数展开,得到:

$$F(\theta, \phi) = N \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} j_{mN} (k_0 R \sin \theta) e^{jmN\phi} \quad (2)$$

当阵元数目  $N \gg 1$  时,(2)式可用零阶 Bessel 函数近似,归一化后可得到归一化场方向图函数为:

$$F_0(\theta, \phi) \approx J_0(k_0 R \sin \theta) \quad (3)$$

从(3)式中可以看出,当  $\phi$  固定后,方向图的值随着半径  $R$  值的改变而改变;当阵元数目固定后,  $R$  是均匀圆阵列方向图函数的唯一一个可变参量。当然,这里所讲的  $R$  值均是相对于波长  $\lambda$  的。

也就是说:当  $N$  满足一定的条件时,均匀圆阵列的方向图函数可由(3)式代替,由于(3)式比较简单明了,所以这种变换对于分析其系统性能是十分有益的。

### 3.2 误差对系统性能的影响分析模块

在系统分析中,系统的稳定性是一个十分重要的指标,所以研究各种误差(随机的和可预测的)对系统的影响便成为了非常重要的问题。在本文的研究中,对于幅相误差,阵元位置误差,阵元间的互耦三方面误差对均匀圆阵列系统性能的影响进行了分析,总结了各种误差对系统的影响,并通过数值列表和图形显示清晰的看到所选系统的稳定性。

在这三种误差中,由于位置误差的影响较小,故把幅相误差和互耦的分析作为重点。

均匀圆阵列的系统性能受到一系列误差、干扰的影响,虽然这些误差的形式多种多样,但最终都可以把其归结为系统的幅相误差。所以对于幅相误差的分析可以从全局来了解误差对阵列系统性能的影响。

互耦是阵列天线固有的重要特性之一,是设计阵列天线时必须考虑的重要因素,特别当阵列间距较小时,互耦对阵列系统性能的影响就更为明显。在本文中,选取等效网络法和矩量法两种不同的方法进行分析比较。

### 4 最优算法选择和 DOA 估计模块

接收信号的类型根据实际需要由计算机模拟产生,由给定的信号类型选择几种适宜的算法分别进行 DOA 估计,通过输出特性决定其最优算法。

对于均匀圆阵列,许多基于 ULA 的 DOA 估计算法不能直接用于其测向。为解决这个问题,需简化 UCA 的阵列流形。模式空间变换法是针对圆阵列提出的一种有效变换方法:通过相位模式激励,把 UCA 变换为虚拟线阵,使其方向矢量具有类似于 ULA 的范德蒙(vandermonde)结构,并结合 ULA 的高分辨算法,实现 UCA 对信号方位角和俯仰角的高分辨估计<sup>[4]</sup>。

根据均匀圆阵列本身的特点,对于独立单频信号源模型

我们选择波束域 MUSIC 算法<sup>[5]</sup> 和 Root—MUSIC 算法<sup>[6]</sup> 算法进行分析处理;对于相干信号源的方向估计采用基于数据重构的 MMUSIC 算法<sup>[7]</sup> 和基于数据阵 SVD 的 MMUSIC 算法<sup>[7]</sup> 两种修正的 MUSIC 算法进行分析处理。

对于接收信号具有循环平稳特性的一类特殊信号可以充分利用其循环平稳特性,选择基于 UCA 的波束域 Cyclic—MUSIC 算法<sup>[8]</sup> 和基于循环相关函数的 SC—SSF 算法<sup>[9][10]</sup> 两种算法进行处理。

这些算法对于其各自对应的信号模型来讲估计性能是比较优秀的。当然我们也可以选择更多的算法进行 DOA 估计,在通过输出特性分析后决定最优的算法。

## 5 输出特性分析模块

输出特性是对算法的性能进行分析和验证,在这个过程中分别给出方位角和俯仰角估计的方差和标准差。

综上所述,给出用 MATLAB 建立均匀圆阵列天线仿真系统的原理框图如图 2。

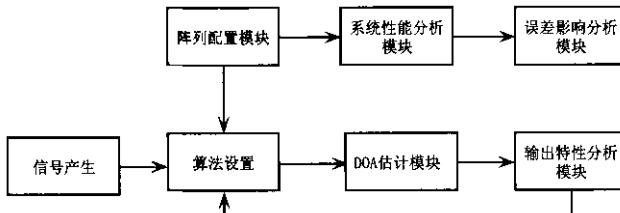


图 2 均匀圆阵列天线仿真系统的原理框图

## 6 均匀圆阵列天线仿真系统的设计与实现

本文利用 MATLAB 开发工具实现了均匀圆阵列天线的仿真系统,该系统对均匀圆阵列天线的各个方面情况进行了全面的模拟。在该仿真系统编程实现上,对天线阵配置模块、系统分析模块、误差分析模块、算法设置模块以及输出特性分析模块编制了自己模型库和算法库,实现了较好的封装和友好的图形用户界面。同时也能够动态的改变仿真系统的各种参数,便于系统的修改维护和不断升级。该仿真系统的主界面如图 3 所示。

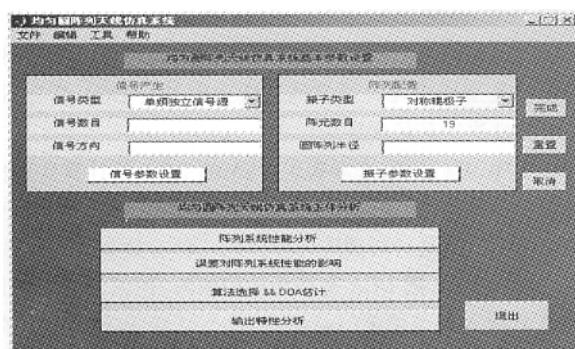


图 3 仿真系统的主界面

## 7 仿真实例

均匀圆阵列的阵元数目  $N = 19$ ;半径  $R = 0.65\lambda$ ,最大模式数  $M = 6$ 。选取半波振子天线作为阵元天线,即  $L = 0.5\lambda$ 。半波振子半径为  $a = 0.001\lambda$ 。

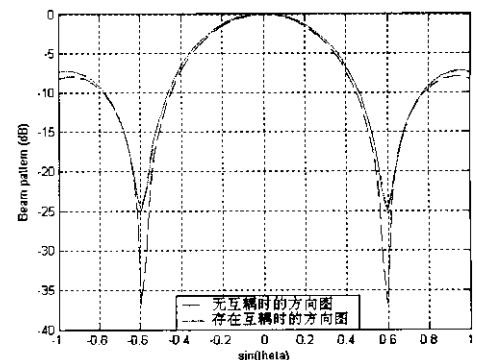


图 4 利用等效网络法分析的互耦影响

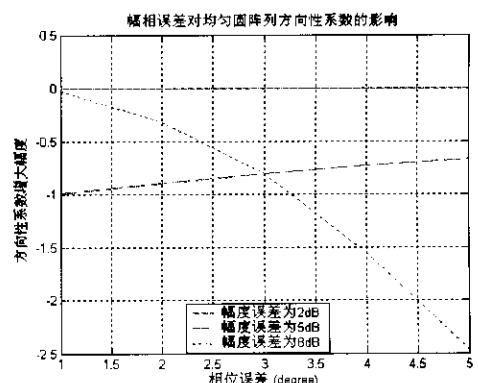


图 5 幅相误差对方向性系数的影响

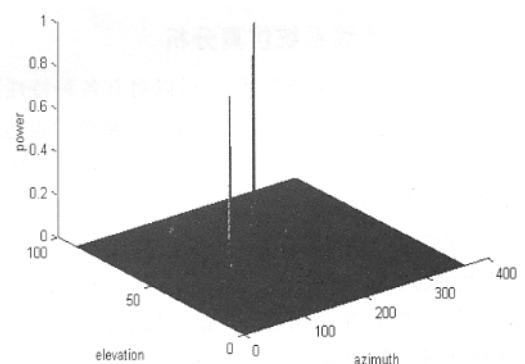


图 6 UCA 波束域 DOA 估计

两个等功率的独立单频信号源的入射角分别为  $(40^\circ, 100^\circ)$  和  $(60^\circ, 200^\circ)$ ,快拍数  $K = 200$ ,蒙特卡罗为 50 次,信噪比

(SNR) 为 15dB。由于篇幅所限,只给出部分仿真分析结果。

图 4 为利用等效网络法分析的互耦对阵列方向图的影响;图 5 给出了幅相误差对阵列天线方向性系数的影响结果;利用均匀圆阵列波束域 MUSIC 处理得到的 DOA 估计如图 6 所示;信源( $40^\circ, 100^\circ$ )的波达角估计标准差如图 7 所示。

由图 4 可以知道,互耦使得天线方向图主瓣展宽、旁瓣电平抬高;而图 5 显示:当存在幅相误差时,阵列的方向性系数呈减小的趋势;由图 6 和图 7 可以看出,UCA 波束域 MUSIC 算法可以正确的估计信号源的 DOA,且是一致估计。

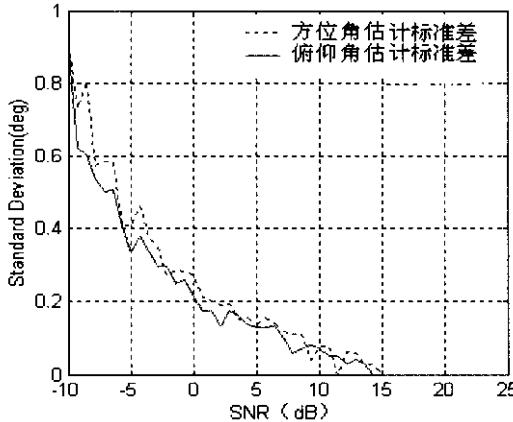


图 7 UCA 波束域 DOA 估计的标准差

## 8 结论

本文在对均匀圆阵列天线进行全面分析的基础上,建立了对其进行仿真分析的系统平台,为实验室阶段的均匀圆阵列天线研究提供了方便的开发工具。而且该系统还实现了对均匀圆阵列天线阵元间互耦等许多实际影响天线阵性能的误差因素的考虑,使得整个仿真系统更趋向于完善。

## 参考文献:

- [1] 张光义. 相控阵雷达系统 [M]. 国防工业出版社,2001—9.
- [2] K Maheswara Reddy and V U Reddy. Analysis of Spatial Smoothing with Uniform Circular Arrays [J]. IEEE TRANS ON SIGNAL PROCESSING, 1999—6. 1726—1730.

(上接第 203 页)

### [作者简介]

徐 敏(1963—),女(汉族),浙江人,副教授(南昌大学),在读博士,从事迭代学习控制、电力系统控制与运行等方面的研究。



- [3] 黄浩学,吴嗣亮. 基于均匀圆阵的信号源 DOA 和多普勒频率估计算法 [J]. 电子学报,2001—5.
- [4] C P Mathews, M D Zoltowski. Eigenstructure techniques for 2—D angle estimation with uniform circular arrays [J]. IEEE Trans, Signal Processing, Sept 1994, 42:2395—2407.
- [5] Cherian P Mathews, Michael D Zoltowski. Eigenstructure for 2—D Angle Estimation with Uniform Circular Arrays [J]. IEEE TRANS ON SIGNAL PROCESSING, 1994. 9, 42(9): 2395—2407.
- [6] M D Zoltowski and C P Mathews. Direction finding with uniform circular arrays via phase mode excitation and beampspace root—MUSIC [J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Mar 1992, 5: 245—248.
- [7] 林 敏, 龚铮权. 基于采样数据重构的信号 DOA 估计算法 [J]. 解放军理工大学学报,2000—6.
- [8] W A Gardner. Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signal [J]. IEEE SP, Magazine, April 1991. 14—36.
- [9] 金梁, 殷勤业, 汪仪林. 广义谱相关子空间拟合 DOA 估计原理 [J]. 电子学报,2000,(1).
- [10] 黄知涛, 周一宇, 姜文利. 基于循环平稳特性的源信号到达角估计方法 [J]. 电子学报,2002—3,(3).
- [11] 罗小武, 刘勤让. 用 MATLAB 实现自适应天线阵仿真系统 [J]. 系统仿真学报,2002—5,(5).
- [12] D Hanselman, B littlefield 著, 张航等译. 精通 MATLAB 6 [M]. 清华大学出版社,2002—6.

### [作者简介]



李 熹(1979—),女(汉族),吉林省舒兰市人,信息与通信工程专业在读硕士研究生,主要研究方向:阵列信号处理及其系统设计。

邢向飞(1973—),男(汉族),河南开封人,工程师,郑州易盛信息技术有限公司副总经理,主要研究方向:信号处理及计算机软件开发与研究。

黄晓涛(1972—),男(汉族),湖北武汉人,国防科技大学副教授,硕士生导师,目前研究方向:超宽带合成孔径雷达信息处理,阵列信号处理。

周智敏(1957—),男(汉族),河北易县人,博士生导师,国防科学技术大学电子科学与工程学院教授,主要研究方向:SAR 系统设计、高速实时信号处理等领域。

林 辉(1957—),男(汉族),福建人,教授,博士,从事迭代学习控制,运动控制,故障诊断等方面的研究。

刘 震(1976—),男(汉族),山东人,在读博士,从事检测技术与自动化装置等方面的研究。

## 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>