

文章编号:1671-637X(2008)04-0085-04

## 矩形栅格圆口径平面相控阵天线方向图计算

牛鹏飞, 王晟达, 杨 俭  
(空军工程大学工程学院, 西安 710038)

**摘 要:** 针对机载相控阵雷达天线受机头圆柱形设备舱约束的条件,研究了矩形栅格圆口径平面相控阵天线的方向图,建立数学模型并对其进行了公式推导和计算机仿真。同时将该天线与同等规模的矩形口径平面阵天线方向图特性进行了对比分析,结果表明:前者通过展宽主波束宽度和抬高旁瓣间交叉电平深度获得了优于后者的抗干扰性能的结论。

**关 键 词:** 相控阵; 雷达; 圆口径平面阵; 方向图

**中图分类号:** V243.4; TN958.92

**文献标识码:** A

## Directional pattern analysis of rectangular grid circular planar array antennas

NIU Peng-fei, WANG Sheng-da, YANG Jian  
(The Engineer Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Considering the limit of the space of the cylindrical equipment cabin to the airborne phased array radar antenna, we studied the directional patterns of the rectangular grid circular planar array antennas. We also built up mathematic models, deduced the formulas and carried out simulations. The directional pattern performance of the circular planar array was compared with that of the rectangular planar array of the same scale, and the conclusion is: the former has better anti-interference performance than the latter through broadening the main beam-width and heightening the side lobe cross electrical level.

**Key words:** phased array; radar; circular planar array; directional pattern

### 0 引言

随着雷达、通信技术的飞速发展和电磁信号环境的不断变化,信号处理系统对天线的功率增益、方向性能、旁瓣电平、扫描速率、方向图赋形能力等方面提出了越来越高的要求。相控阵天线具有较宽的频率范围、灵活的角度覆盖、高效的辐射功率以及较快的转换速等突出优点,在雷达、通信和声纳系统中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。

相控阵天线具有多种形式,如线阵、平面阵、球形阵和共形阵等。对于机载相控阵雷达,安装于机头设备舱的前视相控阵天线,受圆柱形设备舱的约束,一般需要采用圆形口径<sup>[2]</sup>。本文以矩形栅格圆

口径平面阵为例,对圆口径平面相控阵天线的功率辐射方向图进行了研究,对方向图的计算公式进行了详细推导和计算机仿真。并与同等规模矩形口径平面阵在半功率点波束宽度、旁瓣电平和旁瓣间交叉电平等性能指标进行了分析和讨论,给出了结论。

### 1 数学模型的建立

图1为一个按矩形栅格排列阵元的圆口径平面阵天线,该天线阵元全部位于 $xoy$ 平面中的圆内(即图中虚线圆内所有实心元所组成的面阵),在 $x$ 、 $y$ 轴方向阵元的间距分别为 $d_x$ 、 $d_y$ 。设圆口径平面阵直径上的阵元数目为 $N_d$ ,则该圆口径平面阵可转化为加特殊二维窗函数的 $N_d \times N_d$ 矩形口径平面阵<sup>[3]</sup>。

以阵元(0,0)为相位参考点,设远区观察点与 $z$ 轴夹角为 $\theta$ (俯仰角),在 $xoy$ 平面内投影与 $x$ 轴夹角为 $\varphi$ (方位角),对于 $N_d \times N_d$ 矩形口径平面阵,阵

收稿日期:2007-01-15

修回日期:2007-03-09

作者简介:牛鹏飞(1982-),男,山西朔州人,硕士生,研究方向为雷达信号与信息处理。

元 $(m, n)$ 相对于阵元 $(0, 0)$ 的空间相位差<sup>[4]</sup>为

$$\Delta\phi_{mn} = \frac{2\pi}{\lambda}(md_x \sin\theta \cos\varphi + nd_y \sin\theta \sin\varphi) \quad (1)$$

设波束最大值指向为 $(\theta_B, \varphi_B)$ , 则阵内相位差为

$$\Delta\phi_{Bmn} = \frac{2\pi}{\lambda}(md_x \sin\theta_B \cos\varphi_B + nd_y \sin\theta_B \sin\varphi_B) \quad (2)$$

因此,  $N_d \times N_d$  矩形口径平面阵的方向图如图 1 所示。

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{N_d-1} \sum_{n=0}^{N_d-1} a_{mn} e^{j(\Delta\phi_{mn} - \Delta\phi_{Bmn})} \quad (3)$$

其中,  $a_{mn}$  为阵元 $(m, n)$ 的幅度加权值。

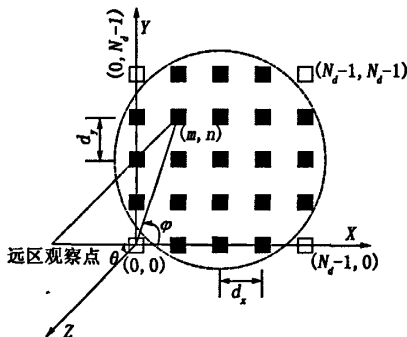


图 1 矩形栅格圆口径平面阵

取  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $u = \sin\theta \cos\varphi$ ,  $v = \sin\theta \sin\varphi$ ,

$$\Delta\phi_{Bx} = \frac{2\pi}{\lambda}d_x \sin\theta_B \cos\varphi_B \quad (4)$$

$$\Delta\phi_{By} = \frac{2\pi}{\lambda}d_y \sin\theta_B \sin\varphi_B \quad (5)$$

式(3)可转化为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{N_d-1} \sum_{n=0}^{N_d-1} a_{mn} e^{j[m(kd_x u - \Delta\phi_{Bx}) + n(kd_y v - \Delta\phi_{By})]} \quad (6)$$

以  $N_d \times N_d$  矩形口径平面阵阵列对称中心为圆心, 以  $r_d = (N_d - 1)/2 + \Delta$  为半径画圆 ( $\Delta \leq d_x/4$ )。定义一个二维窗函数为

$$w_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{如果阵元}(m, n)\text{到圆心的距离小于 } r_d \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

这里, 加权为  $w_{mn} = 1$  的阵元为图 1 中的实心阵元,  $w_{mn} = 0$  的阵元为图 1 中的空心方框, 求远场点的辐射场时要屏蔽掉  $w_{mn} = 0$  的阵元, 只留下圆口径平面阵。

因此, 图 1 所示的圆口径平面阵天线方向图为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{N_d-1} \sum_{n=0}^{N_d-1} w_{mn} a_{mn} e^{j[m(kd_x u - \Delta\phi_{Bx}) + n(kd_y v - \Delta\phi_{By})]} \quad (8)$$

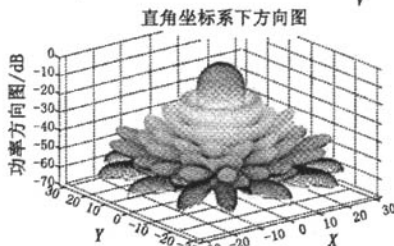
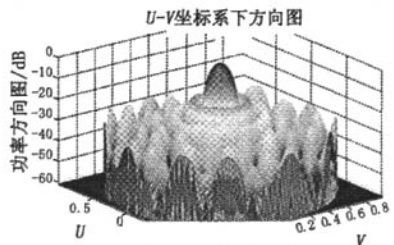
因此, 按照式(4)、式(5)改变阵内相位差  $\Delta\phi_{Bx}$ 、 $\Delta\phi_{By}$ , 即可实现阵列波束的空间扫描。当阵面上各

阵元的激励电流为等幅分布时, 即  $a_{mn} \equiv 1$ , 这时  $F(\theta, \varphi)$  可表示为

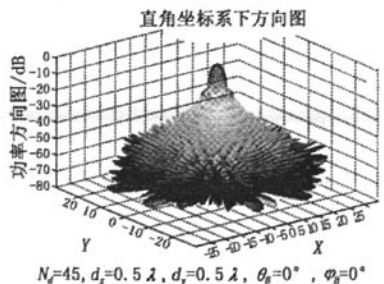
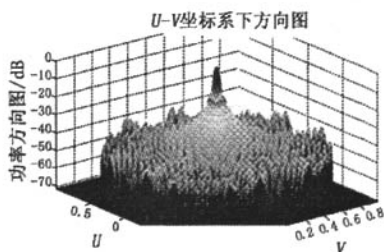
$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{N_d-1} \sum_{n=0}^{N_d-1} w_{mn} e^{j[m(kd_x u - \Delta\phi_{Bx}) + n(kd_y v - \Delta\phi_{By})]} \quad (9)$$

## 2 方向图的仿真

当天线口径为均匀分布(等幅分布)时, 即  $a_{mn} \equiv 1$  时, 圆口径面阵分别在  $N_d = 15$ 、 $45$ ,  $d_x = 0.5\lambda$ ,  $d_y = 0.5\lambda$ ,  $\theta_B = 0^\circ$ ,  $\varphi_B = 0^\circ$  时  $U-V$  坐标系和直角坐标系下的方向图<sup>[5]</sup>如图 2 所示。



$N_d=15$ ,  $d_x=0.5\lambda$ ,  $d_y=0.5\lambda$ ,  $\theta_B=0^\circ$ ,  $\varphi_B=0^\circ$



$N_d=45$ ,  $d_x=0.5\lambda$ ,  $d_y=0.5\lambda$ ,  $\theta_B=0^\circ$ ,  $\varphi_B=0^\circ$

图 2  $N_d = 15$  与  $N_d = 45$  时功率方向图对比

从图2可以看出,在其他参数不变的情况下,随着 $N_d$ 的增大,即天线口径的增大,波束宽度将逐渐减小。主波束指向为阵面法向方向,即波束不扫描时,半功率点波束宽度随 $N_d$ 变化规律如表1所示。

表1 半功率点波束宽度  $BW_{3dB}$  随  $N_d$  变化规律 ( $U=0$  平面)

$N_d$	$BW_{3dB}/(^{\circ})$	$N_d$	$BW_{3dB}/(^{\circ})$
5	29.132 1	31	3.910 8
11	12.443 3	35	3.462 4
15	8.539 8	41	2.917 6
21	5.831 2	61	1.956 3
25	4.948 5	101	1.174 2

当阵元间间距不变,而仅使 $N_d$ 变化时,第一旁瓣电平与主瓣的相对高度不变,第一旁瓣电平与主瓣电平差大约17.5 dB,如图3所示。

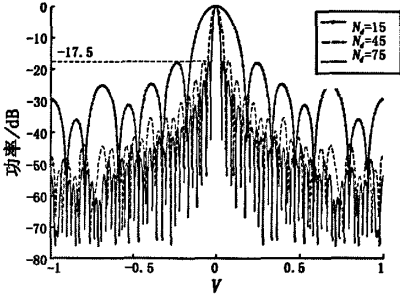


图3  $N_d=15,45,75$  时  $U=0$  平面功率方向图对比

3 圆口径平面阵与矩形口径平面阵方向图特性对比分析

在其他条件相同时,做出同等规模(对称轴上阵元数相同)的圆口径平面阵与矩形口径平面阵的方向图,如图4所示。可以看出,圆口径平面阵的旁瓣电平平均低于矩形口径平面阵,其中第一旁瓣电平与矩形口径平面阵相比要低4.2 dB左右,即圆口径平面阵的旁瓣性能要略优于矩形口径平面阵。

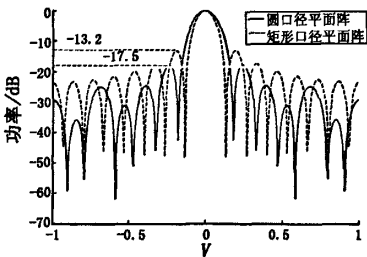


图4 圆口径平面阵与矩形口径平面阵  $U=0$  平面方向图对比  
同等规模圆口径平面阵的半功率点波束宽度

$BW_{3dB}$ 略大于矩形口径平面阵,图5所示为两种口径面阵的半功率点波束宽度随 $N_d$ 变化曲线。

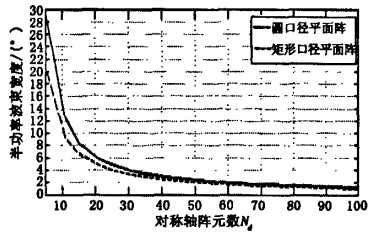


图5 半功率点波束宽度与  $N_d$  的曲线

图6所示为直角坐标系下两种口径天线波束方向图,从图6中可以看出,矩形口径面阵的第一旁瓣间交叉电平深度要明显低于圆口径面阵。

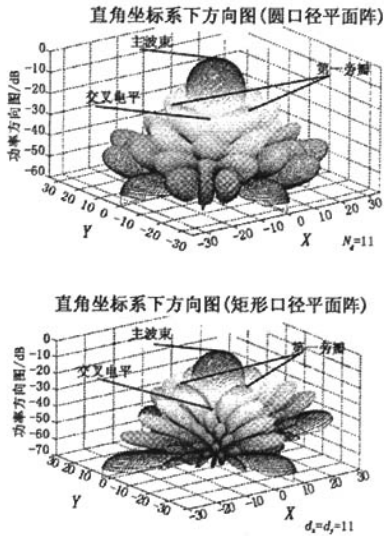


图6 圆口径平面阵与矩形口径平面阵旁瓣交叉电平对比

由以上分析可知,圆口径面阵天线通过展宽主波束宽度和抬高旁瓣间交叉电平深度获得了低于矩形口径面阵的旁瓣电平,即圆口径面阵的抗干扰及杂波抑制性能将优于同等规模的矩形口径平面阵天线。

4 结束语

本文研究了矩形栅格圆口径平面阵天线的特点,对该天线方向图的计算公式进行了推导,同时利用Matlab在均匀口径分布条件下进行了仿真和分析,并在主波束宽度、旁瓣电平、旁瓣间交叉电平深度等方面对比分析了圆口径面阵与矩形口径面阵方向图的差异,并得出了圆口径面阵通过展宽主波束宽度和抬高旁瓣间交叉电平深度获得了优于矩形口径平面阵的抗干扰

性能的结论。这些工作对于深入研究机载圆口径平面相控阵天线有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 斯科尼克 M L. 雷达手册[M]. 王军, 等译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] BAKER C. An introduction to electronically scanned radar sys-

tems[C]//IEEE 2005 International Radar Conference, 2005.

- [3] MAHAFAZA B R. Radar systems analysis and using Matlab [M]. Chapman & Hall/UCRC, 2000.
- [4] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] 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, 14(5): 678-680.

(上接第 41 页)

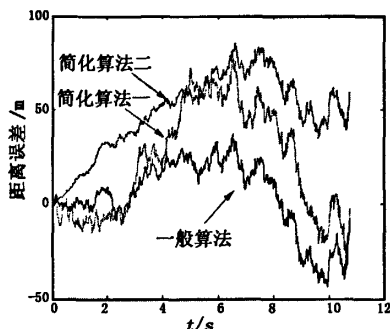


图 3 3 种算法估计结果局部放大图

计算时间的比较是基于主频为 2.66 GHz 的 Pentium 4 CPU 微机(配有 256 MB 内存), Windows XP 中文版操作系统和 Matlab 7.0.1 集成仿真环境。表 1 中所示  $T$  为滤波器递推计算 1 000 步所用的时间, 单位为 s。由于仿真系统的随机性, 表中的数据只能大概反映出 3 种算法的计算速度的改变。

表 1 3 种算法计算时间比较

	一般算法	简化算法一	简化算法二
$T$	0.332 6	0.225 6	0.203 1

## 4 结论

针对被动雷达接收的雷达信号中不含距离信息的特点, 本文应用结构随机跳变系统最优滤波理论对目标的辐射能量信号进行滤波, 推导出的距离估计算法及其简化算法都能对目标距离进行准确的估计。3 种算法具有不同的计算复杂度, 计算精度也不一样, 适用于不同的系统要求。以被动雷达制导

导弹的制导系统中, 与角坐标估计和目标识别相比, 距离估计只是一个辅助问题, 对弹目相对距离估计算法的快速性要求较高, 并且由于各种制导律对距离估计的鲁棒性都较高, 不需要对相对距离估计的特别精确。因此, 在保证一定精度的前提下, 应使用尽可能简单的算法。此外, 目前研究的大多数先进制导律<sup>[7-9]</sup>都依赖于弹目相对距离的测量, 因此本文提出的距离估算方法对先进制导率的工程实现也具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 王军, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [3] 刘世勇, 吴瑞林, 周伯昭. 大气层外拦截弹基于方位测量的被动测距[J]. 宇航学报, 2005, 26(3): 307-313.
- [4] 任波, 于雷. 光电雷达对目标参数被动测量的方法研究[J]. 电光与控制, 2006, 13(11): 12-16.
- [5] 方洋旺, 潘进. 随机系统分析及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [6] 方洋旺. 随机系统最优控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] ZHOU Di, MU Chun-di, SHEN Tie-long. Robust guidance law with L2 gain performance[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2001, 44(144): 82-88.
- [8] GURFIL P. Robust zero miss distance guidance for missile with parametric uncertainties [C]//Proceedings of the American Control Conference Arlington, Via 2001, June 25-27.
- [9] CHEN Hsin-yuan. 3D nonlinear  $H_2/H_\infty$  guidance law with dissipative theory[R]. AIAA-2002-5024, 2002.

欢迎赐稿 欢迎登广告

## 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,一直致力和专注于微波、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>