

# 子阵模块不同排列对相控阵天线辐射特性的影响分析

郑慕昭 赵交成

(西安电子工程研究所 西安 710100)

**【摘要】**辐射单元矩形栅格排列是相控阵天线中最简单的排列方式,也是最常用的一种排列方式。它是把整个阵面划分成许多矩形栅格,每个辐射元占据一个自然格或栅格的交点。而本文对子阵模块间采用三角形栅格而子阵模块内采用矩形栅格的排列方式进行了分析,通过理论分析验证这种排列方式比普通矩形栅格排列有较大优势。

**关键词:**相控阵;阵列天线;子阵模块<sup>[1]</sup>

中图分类号:TN821+.8

文献标志码:A

文章编号:1008-8652(2010)01-087-03

## Analysis of Impact of Different Subarray Module Arrangements on Radiation Characteristic of Phased Array Antenna

Zheng Muzhao, Zhao Jiaocheng

(Xi'an Electronics Engineering Research Institute, Xi'an 710100)

**Abstract:** Radiation elements arranged in rectangular grids is the simplest and commonly used arrangement of phased array antennas; in this way, the antenna surface is divided into many rectangular grids, and each radiation element is located in a grid or at an intersection of grids. A new subarray arrangement method, that is, the radiation elements belong to a same subarray module are arranged in a rectangular grid, while subarray modules are further arranged in triangular grids, is analyzed. Theoretical analysis to this arrangement method verified that this method has many advantages compared to rectangular grids used commonly.

**Keywords:** phased array; array antenna; subarray module<sup>[1]</sup>

## 1 引言

相控阵天线通过电扫描代替机械扫描,能够迅速而准确的控制波束方向,在近几十年来得到迅速发展。同时,先进工艺支撑的T/R组件的批量生产能力和成本的不断降低,给相控阵的发展提供了有力的技术推动。

矩形栅格的排列方式使阵列的结构简单,便于馈电、配相,但需要的辐射元较多。在大型相控阵中为了节省辐射元、移相器和有源器件的数量,常采用三角形栅格排列<sup>[2]</sup>。对有限扫描阵列,本文所述子阵模块间采用三角形排列和子阵模块内单元采用矩

形栅格排列振子的方式,兼备了两者的优势。为了叙述方便起见,下文把这种排列称为子阵模块三角形栅格排列。

## 2 矩形平面阵列的基本理论<sup>[3]</sup>

设有一矩形平面阵列,其单元按矩形栅格排列在xy平面上,如图1所示。此阵在沿x轴方向上有 $2N_x + 1$ 行单元,其行间距为 $d_x$ ;在沿y轴方向有 $2N_y + 1$ 列单元,其列间距为 $d_y$ 。第 $(m, n)$ 单元的位置可以用 $(md_x, nd_y)$ 表示,其中 $-N_x \leq m \leq N_x$ ,  $-N_y \leq n \leq N_y$ 。如第 $(m, n)$ 单元的电流用 $I_{mn}$ 表示,则上述矩

形栅格阵的阵因子可写为:

$$s(\theta, \varphi) = \sum_{m=-N_x}^{N_x} \sum_{n=-N_y}^{N_y} \left( \frac{I_{mn}}{I_{00}} \right) \cdot \exp[jk \sin \theta (md_x \cos \varphi + nd_y \sin \varphi)] \quad (1)$$

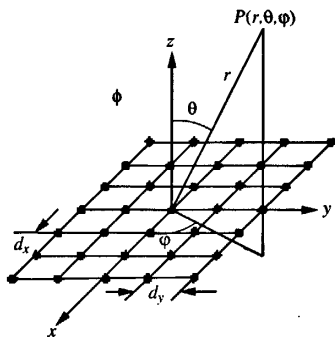


图1 矩形栅格阵

### 3 两种布阵方式的比较

#### 3.1 子阵模块三角形栅格排列辐射特性分析

本文所验证的天线工作在x波段,波束扫描范围为 $90^\circ \times 6^\circ$ 。整个阵面含有68个子阵模块,按9行,8列错开成三角形排列,如图2所示。

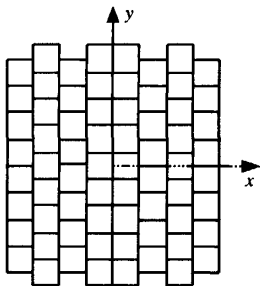


图2 天线阵列示意图

阵中每个子阵模块内有4个垂直放置的子阵,每个子阵通过不等功分网络后接4个辐射单元,这样每个模块中共有16个辐射单元。为实现电扫功能,每个子阵后接含有移相器的T/R组件,整个阵面共1088个振子单元。二维阵列中,在方位方向上,单元间距取 $d_x = 0.5\lambda$  ( $\lambda$ 为波长);在俯仰方向上,单元间距取 $d_y = 0.7\lambda$ 。

对接收状态,在俯仰方向和方位方向上,电流幅度均采用-30dB泰勒分布。考虑工程实现的简便,每个模块中的4个一分四功率分配器都经过分类优化设计,这样设计的目的是既可以使天线的电流幅

度分布逼近理论的泰勒分布,又可以简化馈电系统。

阵中各振子的相位可以表示为:

$$\alpha = \alpha_x + \alpha_y \quad (2)$$

其中 $\alpha_x$ 表示当波束指向在 $\theta, \varphi$ 方向时单元在方位上所对应的相位, $\alpha_y$ 表示振子在俯仰上对应的相位。

由图2可见,整个面阵被x轴y轴划分为四个象限。由于不同象限的对应振子电流相位( $\alpha_x, \alpha_y$ )只有正负号的差别,我们这里只讨论第一象限的相位,整个面阵的电流相位可以很容易由此求得。

第一象限有16列振子,他们方位上的电流相位为:

$$\alpha_x(n) = -\left(n - \frac{1}{2}\right)kd_x \sin \theta \cos \varphi \quad (3)$$

$$n = 1, 2, \dots, 16$$

在俯仰上我们把每个子阵模块看成一个辐射单元,如图3所示。将(0,0)辐射单元看作基准点,相位为零,则第一列辐射单元的相位为:

$$\alpha_y(m) = -4(m-1)kd_y \sin \theta \sin \varphi \quad (4)$$

$$m = 1, 2, \dots, 5$$

第二列辐射单元的相位为:

$$\alpha_y(m) = -4(m-1/2)kd_y \sin \theta \sin \varphi \quad (5)$$

$$m = 1, 2, \dots, 4$$

其他奇数列各辐射单元的相位与第一列对应单元相等,偶数列各辐射单元的相位与第二列对应单元相等。每个子阵模块里面的16个振子在俯仰上的相位均等于表示该子阵模块的辐射单元的相位。

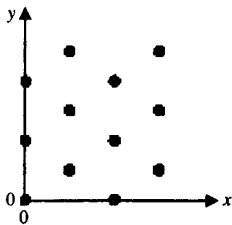


图3 子阵模块看作辐射单元示意图

到此,整个面阵的所有振子的电流幅度和相位都可以得到,如图4为阵列法线方向两个切面理论的方向图特性。方位面上半功率波束宽度为 $4.0^\circ$ ,副瓣电平为-27.0dB,俯仰面的半功率波束宽度为 $2.7^\circ$ ,副瓣电平为-26.0dB。

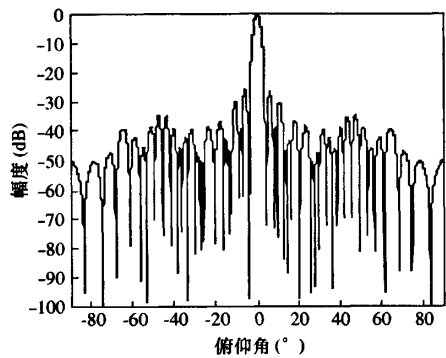


图 4(a) 俯仰面方向图

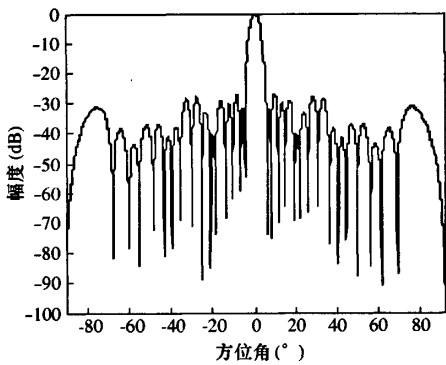


图 4(b) 方位面方向图

3.2 子阵模块矩形栅格排列辐射特性分析

如果用矩形栅格来布阵的话,子阵模块仍然按 9 行,8 列排列,共需要 72 个子阵模块,每个子阵模块中的 16 个振子的排列情况和 T/R 组件都不变,这样共需要 1152 个辐射单元。同样在俯仰和方位方向上,电流幅度均采用 -30dB 泰勒分布。

与上例类似,我们也可以得到电流的相位分布,由(1)式我们求出它的阵因子。波束为法向时,它在方位面上的半功率波瓣宽度  $4.0^{\circ}$ ,副瓣电平为  $-27.0\text{dB}$ ,俯仰面上的半功率波瓣宽度为  $2.6^{\circ}$ ,副瓣电平为  $-24.2\text{dB}$ ,可以看出它与上例相差不大;当扫描角不为 0 时,它在俯仰面上的副瓣电平随着扫描角的增大而变得越来越高,如表 1 所示。当扫描角为  $6^{\circ}$  时,如图 5 所示,点连线为子阵模块矩形栅格阵方向图(另一个是子阵模块三角形栅格阵方向图),它的副瓣电平为  $-7.2\text{dB}$ ,远高于  $-12.6\text{dB}$ ,这种副瓣电平(栅瓣)的恶化程度使我们不得不选择其他的布阵方法。这个高电平的副瓣是由  $\pm 14.5^{\circ}$  附近的栅瓣引起的,离主瓣比子阵模块三角形栅格排列的副瓣离主瓣

( $37.4^{\circ}$ ) 近得多,危害也就大得多。

表 1 俯仰面上副瓣电平的比较

扫描角( $^{\circ}$ )	矩形栅格(dB)	三角形栅格(dB)
0	-24.2	-26
1	-23.5	-25.8
2	-18.0	-21.6
3	-14.3	-18.4
4	-11.5	-16.1
5	-9.2	-14.2

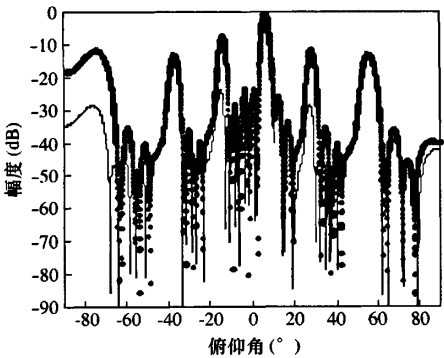


图 5 扫描  $6^{\circ}$  时方向图的对比

4 结论

通过比较这两种布阵方法我们发现:使用子阵模块三角形栅格排列的布阵方式节省了 5.5% 左右的辐射元以及相应的器件。在俯仰扫描时,子阵模块三角形栅格排列的相控阵天线可以把俯仰面上的栅瓣压得更低,同时避免了离主瓣较近的栅瓣产生,这一点是至关重要的。这种子阵模块三角形栅格排列的布阵方式结构简单,馈电系统容易实现,具有工程实用价值。

参考文献:

[1] Merrill I. skolnik 雷达系统导论[M]. 北京:电子工业出版社.  
[2] 张光义. 相控阵雷达系统[M]. 北京:国防工业出版社,1994.  
[3] 汪茂光. 阵列天线分析与综合[M]. 成都:电子科技大学出版社,1989.

## 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>