

文章编号:1000-1972(2000)02-0032-03

## 二维相控阵天线二可能值法的波束指向分析

沈文辉<sup>1</sup>, 曹伟<sup>1</sup>, 郭燕昌<sup>2</sup>

(1. 南京邮电学院 通信工程系, 江苏 南京 210003  
2. 信息产业部 电子第14研究所, 江苏 南京 210013)

**摘要:**研究了二可能值法对二维相控阵天线波束指向的影响,并推导出有效实用的理论公式。若干模拟计算结果表明,所给出的理论公式是正确和有效的。

**关键词:**相控阵天线;二可能值法;量化相位;波束指向;数字移相器

**中图分类号:** TN821<sup>+</sup>.8 **文献标识码:** A

### 1 引言

近年来,随着空间技术的发展,对天线跟踪能力和搜索能力的要求越来越高。相控阵天线正是迎合着这种要求应运而生的高性能、多用途天线。

由于可控电子移相器在相控阵天线中的使用,使相控阵天线可以在若干毫秒的时间内,把阵列天线的波束指向由一个方向转移至另一方向。目前得到实际应用的可控电子移相器以数字移相器居多。数字移相器有结构简单,移相值比较稳定的优点。但是它最大的问题在于不能连续移相。这就存在相位量化的问题,所谓量化相位是指数字移相器的可移相的最小相位。它一方面影响天线波束的副瓣电平,产生寄生副瓣,降低天线的抗干扰能力;另一方面影响天线波束指向,使其偏离预定方向。目前,解决这类问题的办法是采用随机量化方法处理量化相位对天线性能产生的影响。随机量化方法包括:预加相位法、相位误差均值为零法、二可能值法、适当预加相位法、适当相位误差均值为零法、适当二可能值法等。应用随机量化方法解决前一方面影响的研究见文献[1~3];对后一方面影响的研究目前尚较少见到。本文研究二可能值法对改善相控阵天线跟踪精度的机理,并推导出它的理论公式。最后采用模拟手段进行验证,得到了理想的结果。

二可能值法是随机相位量化方法的一种。它对相控阵每个阵单元的量化相位,按一定的概率决定

是进位还是舍去,以获得较高的天线性能的一种方法。计算机模拟演算和理论分析表明,它在降低天线副瓣电平的同时,可有效地提高相控阵天线的跟踪精度。

### 2 基本方法

设有一由单位点源组成的矩形平面阵列,按矩形栅格状排列在XY平面上,见图1。此阵在X轴方向上有M行单元,其行间距为 $dx$ ;在Y轴上有N列单元,其列间距为 $dy$ ;第 $(m, n)$ 个单元的位置用 $(\zeta_m, \zeta_n)$ 表示,  $\zeta_m = m dx$ ,  $\zeta_n = n dy$ 。

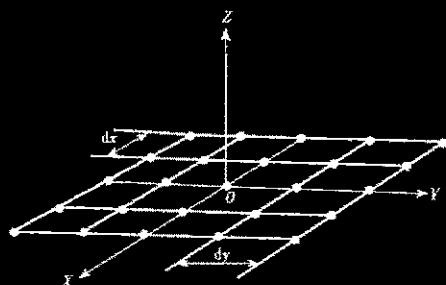


图1 矩形天线阵

若第 $(m, n)$ 个单元的电流用 $I_{mn}$ 表示,则上述矩形栅格阵的阵因子可以表示为<sup>[4,5]</sup>:

$$E(u, v) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} \exp j(X_m u + Y_n v) \quad (1)$$

式中:  $u = \sin\theta \cos\varphi - \sin\theta_0 \cos\varphi_0$

$v = \sin\theta \sin\varphi - \sin\theta_0 \sin\varphi_0$

$X_m = kx_m dx$ ,  $x_m$  为第  $(m, n)$  个单元的横坐标

$Y_n = ky_n dy$ ,  $y_n$  为第  $(m, n)$  个单元的纵坐标

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数,  $\lambda$  是工作电磁波的波长

$(\theta_0, \varphi_0)$  为预定的波瓣指向

$(\theta, \varphi)$  为观察角

利用随机馈相法对第 1 阵单元进行馈相时,假设第  $(m, n)$  个单元的电流相位误差为  $\Psi_{mn}^\delta$ , 则上述矩形栅格阵的阵因子可以表示为:

$$E(u, v) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} \exp j(X_m u + Y_n v + \Psi_{mn}^\delta) \quad (2)$$

$\Psi_{mn}^\delta$  的取值有如下两种情况:

$$\Psi_{mn}^\delta = \begin{cases} a_{mn} = \varphi'_{mn} - \varphi_{mn} \\ -b_{mn} = -(\varphi'_{mn} - \varphi_{mn}) \end{cases} \quad (3)$$

$\Psi_{mn}^\delta = a_{mn}$ , 是二可能值法中进位时的量化相位, 其概率为  $p_{mn}$ ;  $\Psi_{mn}^\delta = -b_{mn}$ , 是二可能值法中舍尾时的量化相位, 其概率为  $q_{mn} = 1 - p_{mn}$ 。考虑到使用随机馈相法后, 天线阵波瓣指向的均值与预定波瓣指向  $(\theta_0, \varphi_0)$  一致, 即式(2)的相位部分为零。经推导、整理, 得:

$$\begin{cases} p_{mn} = \frac{\sin b_{mn}}{\sin a_{mn} + \sin b_{mn}} \\ q_{mn} = \frac{\sin a_{mn}}{\sin a_{mn} + \sin b_{mn}} \end{cases} \quad (4)$$

据此, 相控阵天线的波瓣指向即可完全确定。但对应于许许多多组概率, 就有许许多多组波瓣指向, 我们只能也只需要把它们的一些基本特性, 如均值、方差等加以分析就可以了。

由于无误差时的波瓣指向在  $(u, v) = (0, 0)$  处, 有误差时, 波瓣指向改变为  $(u, v) = (u_0, v_0)$ , 显然, 波瓣在此处有极值。使用二元函数求极值公式, 并整理得:

$$\begin{cases} -u_0 = -\frac{\overline{E_u^0} - \overline{E_v^0} - \overline{E_v^0} \overline{E_u^0}}{\overline{E_{uv}^0} \overline{E_{vv}^0} - (\overline{E_{uv}^0})^2} \\ -v_0 = -\frac{\overline{E_v^0} - \overline{E_{uv}^0} - \overline{E_u^0} \overline{E_{uv}^0}}{\overline{E_{uv}^0} \overline{E_{vv}^0} - (\overline{E_{uv}^0})^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, 上标“—”表示求均值。记号  $E_u^0$  表示在点  $(0, 0)$  处函数  $E$  对  $u$  求偏导; 记号  $E_{uv}^0$  表示在点  $(0, 0)$  处函数  $E$  先对  $u$  求偏导, 再对  $v$  求偏导。

由概率公式  $\sigma_x^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2$ , (符号  $\sigma_x^2$  表示求  $x$  的方差, 易得  $\sigma_u^2, \sigma_v^2$ )。如此得到的期望和方差公式是随机馈相方法的通用公式。对不同的具体方法, 如

相位均值为零法、预加相位法<sup>[6]</sup>等, 可进一步简化。本文对采用二可能值法时, 天线波瓣指向的期望和方差加以推导。

不失一般性, 假设  $dx = dy = d$ ,  $M = N$ 。对于差波瓣, 经推导, 得:

$$\begin{cases} \bar{u}_\delta = 0 \\ \bar{v}_\delta = 0 \end{cases} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \sigma_u^2 = \sigma_v^2 \\ &= w \frac{1 - \cos \Delta \frac{\ln(\sec \Delta + \tan \Delta)}{\Delta}}{2 \left( \cos \delta \frac{\ln(\sec \delta + \tan \delta)}{\delta} \right)} \end{aligned} \quad (6b)$$

式中, 系数  $w$  只与相控阵的口径大小、单元尺寸和馈电电流的振幅有关;  $\Delta = \frac{2\pi}{2^n}$  是量化相位,  $n$  是数字移相器的位数;  $\delta = \frac{\Delta}{2}$ 。式(6a)的结果是可以预料的<sup>[1]</sup>。

求出  $u, v$  的期望和方差后, 即可求出二元函数的联合概率分布  $f(u, v)$ , 进而求出波瓣指向在圆  $u^2 + v^2 \leq D^2$  ( $D$  表示波瓣指向位置与预定指向位置之间的距离)中的概率:

$$P = \iint_{u^2 + v^2 \leq D^2} f(u, v) du dv = 1 - \exp\left(-\frac{D^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

至此, 我们所感兴趣的结果已经得到了。以上分析同样适用于和波瓣。

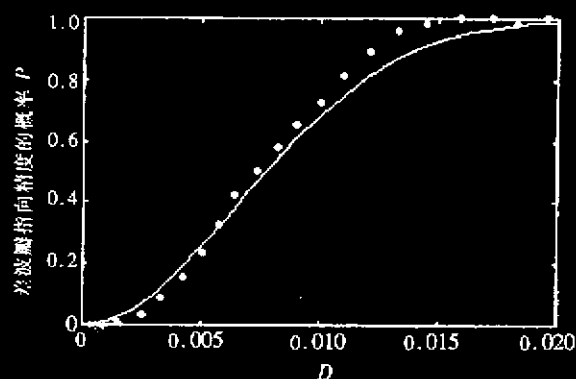
### 3 计算实例

设图 1 所示的矩形栅格阵是  $16 \times 16$  单元, 均匀分布的平面相控阵天线, 各阵单元电流的振幅均为 1,  $dx = dy = \lambda$ , 采用 3 位数字移相器。取指定指向  $u_0 = 0.2, v_0 = 0.4$  时, 差波瓣指向位置与预定指向位置距离的概率分布曲线如图 2 所示, 其中,  $D = \sqrt{u^2 + v^2}$  表示差波瓣指向位置与预定指向位置之间的距离参数。

为方便工程中查阅使用, 经计算, 图 3 给出系数  $w$  随阵单元间距  $d$  ( $16 \times 16$  单元相控阵天线, 阵的行间距与列间距相等, 即  $dx = dy = d$ , 各阵单元的馈电电流振幅相等)变化而变化的曲线。阵单元间距  $d$  的单位是  $\lambda$ 。 $w$  是式(6b)中的系数,  $d$  是阵单元之间的距离。

由于系数  $w$  越小, 方差  $\sigma^2$  越小, 概率  $P$  越接近

于1,则波瓣指向位置与预定指向位置之间的距离越接近。从图3中可看出,当阵单元间距 $d \geq 2\lambda$ 后,系数 $w$ 很小,但此时相控阵的尺寸过大,占地面积较大,不利于操纵和维护。一般来说,阵单元间距选择在 $\lambda \sim 2\lambda$ 之间比较理想。



—, 理论结果    ···, 模拟方法计算结果

图2 16×16矩形阵列差波瓣指向的概率分布曲线

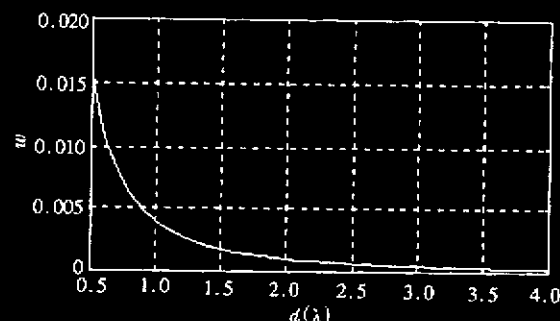


图3 系数 $w$ 与阵单元之间距 $d$ 的关系曲线

## 4 结论

利用二可能值法等随机馈相方法,在有效压制寄生副瓣电平的同时<sup>[1-3]</sup>,能提高相控阵天线的跟踪精度。其波瓣指向的均值为零,方差很小。从图2的曲线中可以看出,当波瓣指向位置与预定指向位置的距离 $D \geq 0.018$ 时的概率就非常接近于1。这就表明了二可能值法是一种提高天线性能行之有效的方法。

在实际应用中,二可能值法是经济、简单、易行的。事实将证明,二可能值法是一种较理想、适合推广的改善天线性能的方法。

## 参考文献:

[1] SMITH M S, GUO Y C. A Comparison of Methods for Randomizing Phase

Quantization Errors in Phase Arrays[J]. IEEE Trans on AP, 1983, 31 (6):

- [2] 郭燕昌. 相控阵天线和频率扫描天线原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1978.
- [3] 郭燕昌. 随机馈相的理论和实现方法[J]. 现代雷达, 1983(2):
- [4] 曹伟, 徐立勤. 电磁场与电磁波理论[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 1991.
- [5] 曹伟. Review of Antennas[M]. 南京:南京邮电学院研究生教材, 1997.
- [6] 郭燕昌, 沈文辉. 二维相控阵天线预加相位法的波束指向分析[A]. 1999年海峡两岸无线通信研讨会[C]. 杭州, 1999. 389 ~ 392.

## 作者简介:



**沈文辉** 1972年生,安徽芜湖人。南京邮电学院通信工程系97级硕士研究生。1994年7月毕业于武汉工学院机械工程系。现主要从事相控阵天线和电波传播等方面的研究工作。



**曹伟** 1939年生,湖南长沙人。1961年毕业于北京邮电学院(现为北京邮电大学)无线电通信工程系,现为南京邮电学院通信工程系教授,中国电子学会会士、IEEE会士、IEEE高级会员、全国电磁兼容学会辐射干扰专业委员会主任

委员、中国电子学会学术委员会委员、东南大学和南京理工大学兼职教授、信息产业部电子第14研究所“国防科技天线与微波国家重点实验室”客座研究员。1993年获江苏省优秀学科带头人称号,同年获江苏省优秀研究生教师称号。1981年9月至1984年1月,作为访问学者在美国Syracuse大学进修,1995年9月至1996年9月,应邀作为客座教授在日本名古屋工业大学讲学。对电磁辐射问题做过较深入的研究,在国内外各类学术刊物和学术会议上发表论文120余篇。



**郭燕昌** 1938年生,江苏兴化人。信息产业部电子第14研究所研究员。1983年获英国伦敦大学博士学位。中国电子学会会士和美国IEEE天线学会高级会员。《现代雷达》和《电子学报》编委。已撰写150余篇论文及“相控阵天线和频率扫描天线原理”和“相控阵天线基本原理”2部专著。主要从事相控阵天线和自适应天线等方面的研究工作。

(下转第50页)

## The Radiation Orientation Analysis of Two-Dimensional Phased Arrays by Employing the Method of Two-Probable Number

SHEN Wen-hui<sup>1</sup>, CAO Wei<sup>1</sup>, GUO Yan-chang<sup>2</sup>

{ 1. Department of Communication Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China }  
2. The 14-th Research Institute of the Ministry of Information Industry, Nanjing 210013, China }

**Abstract:** The radiation orientation of tow-dimensional phased arrays by using the method of two probable numbers is investigated, and an effective formulation for such an investigation is presented in this paper. Quite a few simulating resulting results show the effectiveness and correctness of this new method.

**Key words:** Phased array; Two probable method; Quantization phase; Pointing direction; Digital shifter

## 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>