

# 相控阵天线设计

曹祥玉 高军 姚旭

(空军工程大学电讯工程学院，西安 710077)

xiangyucaokdy@163.com

**摘要：**本文设计了一种  $42 \times 26$  单元平面相控阵天线，采用四位数字移相器实现往返  $\pm 40$  度扫描，扫描步进  $0.2^\circ$ 。扫描波束宽度不大于 3 度，动态副瓣低于 -18dB。俯仰面波束赋形，在零度附近锐截至大于  $-5\text{dB}/\text{度}$ ，副瓣低于 -20dB，该天线具有体积小、结构紧凑，插入损耗低的特点。

**关键词：**相控阵天线，扫描，方向图，波束宽度，副瓣

## Design of Phased Array Antennas

CAO xiangyu, GAO jun, Yao Xu

( Telecommunication Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xian, 710077)

**Abstract:** A phased array antennas with  $42 \times 26$  elements has been designed and evaluated in this paper. The current distribution of discrete aperture (element antenna) in azimuth plane is adopted Taylor amplitude illumination function in order to obtain low sidelobe levels. The azimuth scanning over  $\pm 40$  deg scanning coverage, with the smallest steering increment  $0.2$  deg, has been implemented by controlled 4-bit digital phase shifter per element. The half power beamwidth in the scan coverage is less than  $3.0$  deg, sidelobe is lower than  $-18\text{dB}$ . The shaped elevation beam wide with sharp fall off  $>-5\text{dB}/\text{deg}$  (at horizon) to prevent ground reflections, and sidelobe  $< -20\text{dB}$ , has been implemented. The phased array antenna has the characters of small size, compact structure, low insertion loss.

**Key words:** phased array antennas, scan, pattern, beamwidth, sidelobe

## 1 引言

早期的雷达多采用机械扫描的抛物面天线探测目标，这类天线主要优点在于技术成熟且结构简单，易于加工制造。但其主要缺点在于体积和重量大，扫描速度慢，跟踪目标效率低，而且精度无法进一步提高，此外机械扫描部件易出故障，可靠性较低，可维护性差。随着相控阵天线技术的发展，目前在很多应用领域已逐渐采用相控阵天线。相控阵天线具有扫描速度快，跟踪精度高，可靠性高等特点，可提高雷达扫描速度和灵活性，获得高数据率，提高测量精度。可抗地杂波干扰和有源电子干扰，具有系统可靠性高、维修方便等特点，可大大降低雷达维护费用。目前，相控阵技术已逐渐应用于各种战术雷达，如搜索、引导、火控及制导雷达。基于这一应用现状，本文根据应用要求设计了一种相控阵天线，并获得了很好的应用。

---

基金项目：国家自然科学基金(60671001)；

780

## 2 相控阵天线设计理论

假设平面阵共有  $M$  列， $N$  行，行间距为  $D_z$ ，列间距为  $D_y$ ，平面阵结构及建立的坐标系如图1所示。

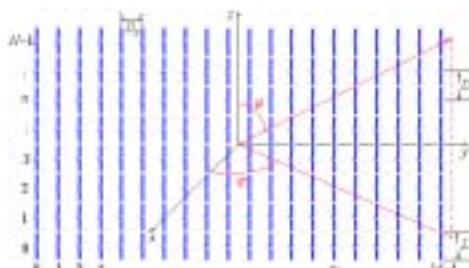


图 1 平面阵结构及建立的坐标系

为了使阵列天线只向正前方辐射，阵列的后面可加反射板，为简化分析，这个反射板可看作是一无限大导体反射面，反射面与阵列表面之间的距离为  $D_x$ ，它约为中心频率对应波长  $\lambda_0$  的四分之一，即  $D_x \approx \lambda_0 / 4$ 。阵列单元为半波振子，其全长约为

$L = \lambda_0 / 2$ 。由于有反射板，因此在计算阵列方向图时要考虑阵列单元的镜像作用。根据阵列天线理论，远场总的方向图函数

$$F(\theta, \varphi) = f_0(\theta) f_x(\theta, \varphi) f_y(\theta, \varphi) f_z(\theta) \quad (2.1)$$

其中， $\theta$  称为俯仰角， $\varphi$  称为方位角；

$$f_0(\theta) = \frac{\cos(kL \cos \theta / 2) - \cos(kL / 2)}{\sin \theta} \quad \text{——单元振}$$

子的方向图函数；

$f_x(\theta, \varphi) = 2 \sin(kD_x \sin \theta \cos \varphi)$  ——镜像的方向图函数；

$$f_y(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} I_m e^{j k y_m \sin \theta \sin \varphi} \quad \text{——y 方向线阵的阵因子} ; f_z(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{j k z_n \cos \theta} \quad \text{——z 方向线阵的阵因子。}$$

由于单元天线方向图是以宽波束，所以设计过程中，可以不考虑单元因子和镜像作用，只需根据相控阵天线水平面扫描，俯仰面波束赋形的要求，分别对水平面（y方向）和俯仰面（z方向阵列），即E面和H面方向图进行设计。

## 2.1 水平面方向图设计

设有一个单元数为N，等间距为d的直线阵，如图2所示。若以阵列的中点为坐标原点，则各单元的位置为

$$\zeta_n = (n - \frac{N+1}{2})d, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2.1)$$

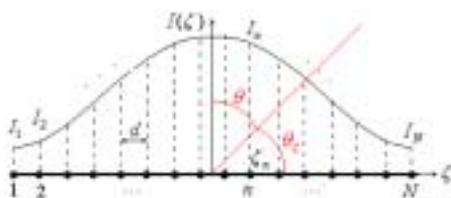


图 2 泰勒直线阵列及各单元激励幅度示意

根据阵列天线理论，若口径电流分布采用泰勒分布，则阵列各单元的激励幅度可表示为

$$I_n(p) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\bar{n}-1} S_n(m) \cos(mp) \quad (2.2)$$

式中

$$p = \frac{2\pi}{L} \zeta_n, \quad L = Nd \quad (2.3)$$

$$S_n(m) = \begin{cases} 1, & m=0 \\ \frac{[(\bar{n}-1)!]^2}{(\bar{n}+m-1)! (\bar{n}-m-1)!} \prod_{n=1}^{\bar{n}-1} \left\{ 1 - \frac{m^2}{\sigma^2 [A^2 + (n-1/2)^2]} \right\}, & 1 \leq m \leq \bar{n}-1 \\ 0, & m \geq \bar{n} \end{cases}$$

(2.4)

泰勒方向图的波瓣展宽因子为：

$$\sigma = \frac{\bar{n}}{\sqrt{A^2 + (\bar{n} - 1/2)^2}} \quad (2.5)$$

$$\bar{n} \geq 2A^2 + 1/2 \quad (2.6)$$

$$A = \frac{1}{\pi} \cosh^{-1} R_0 = \frac{1}{\pi} \ln(R_0 + \sqrt{R_0^2 - 1}) \quad (2.7)$$

主、副瓣幅度比为：

$$R_0 = 10^{R_{0dB}/20} \quad (2.8)$$

$R_{0dB}$  ——副瓣电平值。

由式(2.2)求得泰勒阵列各单元的馈电幅度  $I_n$  之后，阵列方向图函数可由图2.3所示的直线阵列因子表示如下

$$S(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n e^{jnu} \quad (2.9)$$

式中， $u = kd \sin \theta - \alpha$ ， $\theta$  为阵轴法线与射线之间的夹角， $k = 2\pi/\lambda$ ， $\alpha$  为相邻单元之间的相位差， $N$  为单元数， $d$  为单元间距。归一化方向图函数为

$$F(\theta) = 20 \lg \left| \frac{S(\theta)}{S_{\max}} \right| \quad (2.10)$$

泰勒方向图的半功率波瓣宽度可用下式近似表示

$$2\theta_{0.5} = 51 \frac{\lambda}{Nd} \cdot f_B \cdot \sigma(^{\circ}) \quad (2.11)$$

式

$$f_B = 1 + 0.636 \left\{ \frac{2}{R_0} \cosh[\sqrt{(\cosh^{-1} R_0)^2 - \pi^2}] \right\}^2$$

根据波瓣宽度  $3 \pm 0.2^{\circ}$ ，水平扫描  $\pm 42^{\circ}$ ，副瓣-25dB要求，水平面采用42单元Taylor阵列，单元间距  $d=0.566\lambda$ 。

将  $N = 42$ ,  $SLL = -35dB$  带入上式，可得泰勒分布阵列天线各单元口径电流分布如图3所示。

将口径电流分布  $I_n$  代入式(2.10)，可得泰勒阵列不扫描时的归一化阵因子方向图如图4所示，半功率波瓣宽度  $2\theta_{0.5} = 2.91^{\circ}$ 。

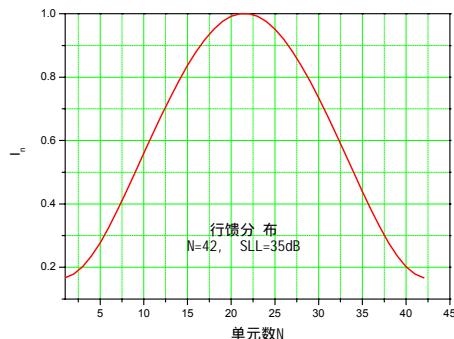


图3 42单元泰勒阵列的口径分布

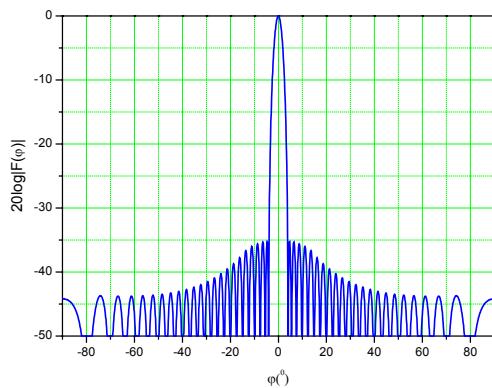


图4 42单元泰勒阵列的归一化方向图

由式(2.14)  $\theta_m = \sin^{-1}(\alpha/kd)$ , 可以看出, 在  $kd$  一定的情况下改变均匀递变相位  $\alpha$ , 阵列方向图的最大波束指向角  $\theta_m$  将发生改变, 这就是相控阵扫描原理。其中  $\alpha$  的值由受控移相器决定, 实际中通常采用数字移相器。数字式移相器的移相量是离散的, 其移相量只能是  $\Delta\alpha$  的整数倍。由式(2.13)可见, 由于  $\alpha$  不是连续变化, 将导致波束指向发生跳跃式变化 (称为波束跃度), 同时也将导致相控阵天线副瓣抬高。

## 2.2 移相器量化误差分析

将相邻两个波束指向之间的相位差称为波束跃度, 波束跃度越小, 探测精度越高, 则需要的移相器位数越高。

根据指标最小波束跃度为  $0.2^\circ$  的要求, 则需要移相器的位数  $K=9$ 。为了节省成本, 采用4位移相器, 虚5位的虚位技术。

由于虚位引入将导致波束指向误差, 副瓣抬高, 因此需要实际仿真计算。图2.4给出不采用虚位技术水平方向泰勒阵在不同角度时的扫描波束方向图, 可以看出, 在  $0-40^\circ$  扫描范围内, 副瓣都在  $-35\text{dB}$  以下。图2.5给出采用虚位技术后不同角度时的

扫描波束方向图, 比较图5、6可以看出, 采用了虚位技术后的副瓣电平增加了许多。这是因为在扫描时口径相位分布理论上为线性分布, 采用虚位技术后就变为台阶分布, 使得口径相位分布产生量化误差, 从而使得阵列扫描波束的副瓣电平增高。

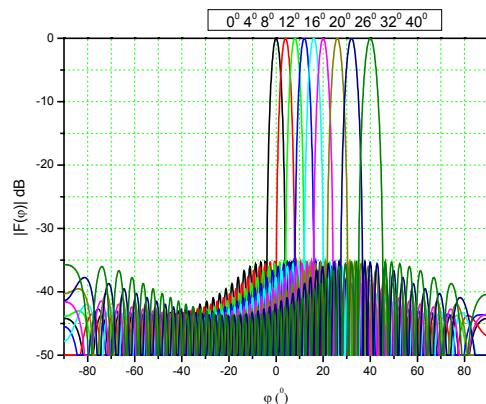


图5 水平扫描归一化方向图

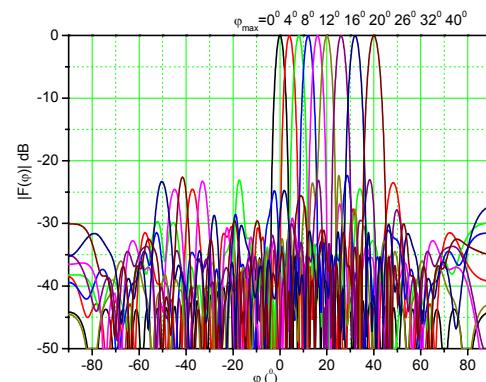
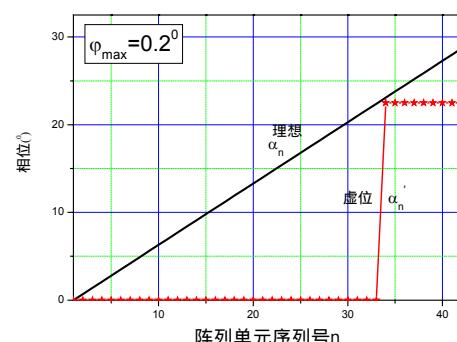


图6 采用虚位技术后方位台扫描方向图

采用虚位技术用  $m=4$  的数字式移相器来实现  $K=9$  位移相器产生波束跃度为  $0.2^\circ$  的扫描波束, 每一扫描波束对应的相位分布不再是线性率, 而是台阶形式。图7给出了扫描角度为  $0.2^\circ$ ,  $0.8^\circ$ ,  $1.2^\circ$  时的理想相位分布和采用虚位技术后实际相位分布。



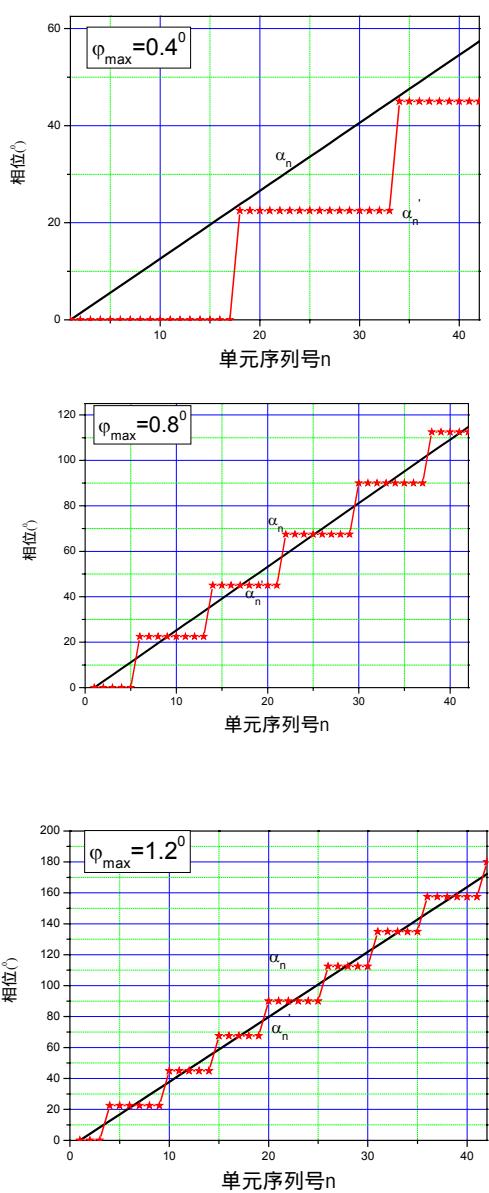


图7 理想相位分布与采用虚位技术  
扫描时水平列阵的相位分布对比

### 3 实验测试

根据上述理论，设计加工了平面相控阵天线，天线单元采用对称印刷阵子，功分网络采用分级的Wilkinson功分器，带状线结构，既减小了系统的插

入损耗，又方便实现对称振子与列馈功分器的一体化设计。实际加工相控阵天线在微波暗室测得： $2\theta_{0.5} = 2.90^\circ$ 。 $\pm 40^\circ$ 扫描范围内， $G \geq 25.98dB$ ， $SLL \leq -19.47dB$ ， $2\theta_{0.5} \leq 4^\circ$ 。暗室测得水平面方向图如图8所示。

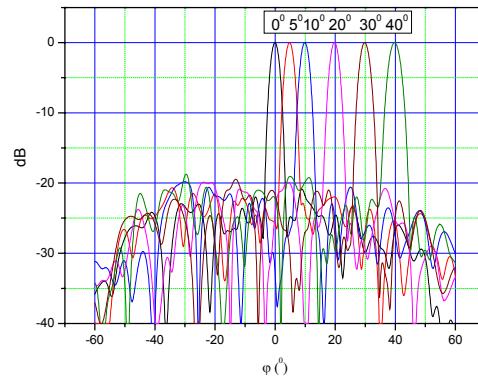


图8 测量水平面不同扫描角方向图

### 4 结论

本文研制了一种平面一维线扫相控阵天线，水平面采用Taylor口径电流分布，以获得低副瓣，利用虚位技术，采用四位数字移相器，实现九位移相器的波束跃度，通过移相器控制，实现 $\pm 40^\circ$ 的扫描要求。俯仰面采用赋形技术，实现地平面附近波束锐截止、低副瓣和半功率波瓣宽度要求。该天线测试性能良好，并已在实际工程获得应用。

### 参考文献

- [1] 吕善伟. 天线阵综合[M]. 北京航空学院出版社, 1988
- [2] J. Robinson, Y. Rahmat-Samii. Particle Swarm Optimization(PSO) in Electromagnetics[J]. IEEE Trans. AP, 2004, 52(2):397
- [3] Keen-Keong Yan, Yilong Lu. Sidelobe reduction in array-pattern synthesis using genetic algorithm[J]. IEEE Trans. AP, 1997, 45(7):1117-1122
- [4] M. Mikki. Said, A. Kishk. Ahmed Quantum Particle Swarm Optimization for Electromagnetics[J]. IEEE Trans. AP, 2006, 54(10):2764-2775

作者简介：曹祥玉，教授，博导，主要研究领域：计算电磁学、天线与电磁兼容、新型电磁材料特性等；高军，副教授，主要研究领域：雷达、电子对抗；姚旭，博士生，主要研究领域：阵列天线波束赋形。

## 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>