

# 相控阵天线的原理及基本设计方法

沈喜明

(中国电子科技集团公司第 36 所)

**摘 要** 本文介绍了相控阵天线的特点、基本工作原理和一般设计方法,并结合实例介绍了一种相控阵天线的设计过程,分别从提高单元天线辐射效率、阵列增益、方向图优化、降低副瓣等方面进行了分析、模拟仿真和实测数据的比较,并较好地实现了空间功率的合成。

**关键词** 相控阵天线 等效辐射功率 栅瓣 扫描 合成效率

## 1. 概 述

随着空间电子战的发展,相控阵系统的应用越来越广泛,其技术水平也不断地在提高,而相控阵天线是相控阵系统中实现空间功率合成的关键单元之一,空间功率合成技术已将传统的固态功率技术发展到空间功率合成技术,目前已能够在通信对抗频段实现几百千瓦甚至兆瓦级以上的功率,使基于陆基平台的电子装备实现了超大功率、超远距离的干扰和侦收,其中相控阵天线起到了重要作用。

## 2. 相控阵天线的工作原理

### 2.1 相控阵天线的特点

相控阵天线是在阵列天线的基础上发展起来的一种新的天线体制和技术,它以一些离散的天线在空间以某种形式排列成一定的形状,每付天线的幅度和相位激励能独立地控制,以使其能在空间形成一定要求形状的波束,波束在空间的位置可以通过调整每付天线激励信号的相位来控制,扫描过程不需要机械移动,整个天线口径始终保持固定,同时波束又能随意地扫描,所以相控阵天线具有无惯性扫描的特点。

相控阵天线的突出优点是辐射功率大,能迅速、灵敏而又准确地控制波束方向,并能在指定的空域同时搜索和跟踪多个目标,且稳定性、可靠性高,对目标的捕获概率大。

### 2.2 相控阵天线的工作原理

相控阵天线是根据口径场相位作线性渐变时波束产生偏移的原理,用电子控制的方法改变阵列天线中各个单元的辐射场相位,使波束进行扫描的。由于阵列单元之间有互耦,在波束扫描时,阵中单元的输入阻抗将随扫描角的改变而改变,因此在相控阵天线的设计中,除了要解决一般阵列天线的宽带匹配问题外,还要解决宽角扫描问题。

为了简单,这里讨论沿直线等间距排列的点源组成的阵,而其它复杂的阵可看成是由线阵叠合而成。考虑图 1 所示的  $N$  元等间距  $d$  组成的阵,当接收从与阵法线成  $\theta$  角方向入射到阵

面的平面波时,第  $n$  个阵元中的电流可写为:

$$I_n = Ae^{jnk d \sin \theta} \quad (1)$$

式中:  $A$  是与平面波瞬时振幅和相位相关的常数。

式(1)表明,第  $n$  号阵元中的电流超前  $(n+1)$  号阵元中电流的相位,其超前相移量  $\Delta\varphi = k d \sin \theta$ ,它相应于平面波前到达该两阵元的时间差。若每个阵元后面放入一个控制元件,使第  $n$  号阵元激励电流为

$$I_n = I_n a_n e^{j\varphi_n} \quad (2)$$

式中:  $\varphi_n$  和  $a_n$  分别是控制元件的相移和实际电流增益。

于是,阵的输出则为

$$F_a(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{j(\varphi_n + nk d \sin \theta)} \quad (3)$$

上式中忽略了式(1)中的常数  $A$ 。

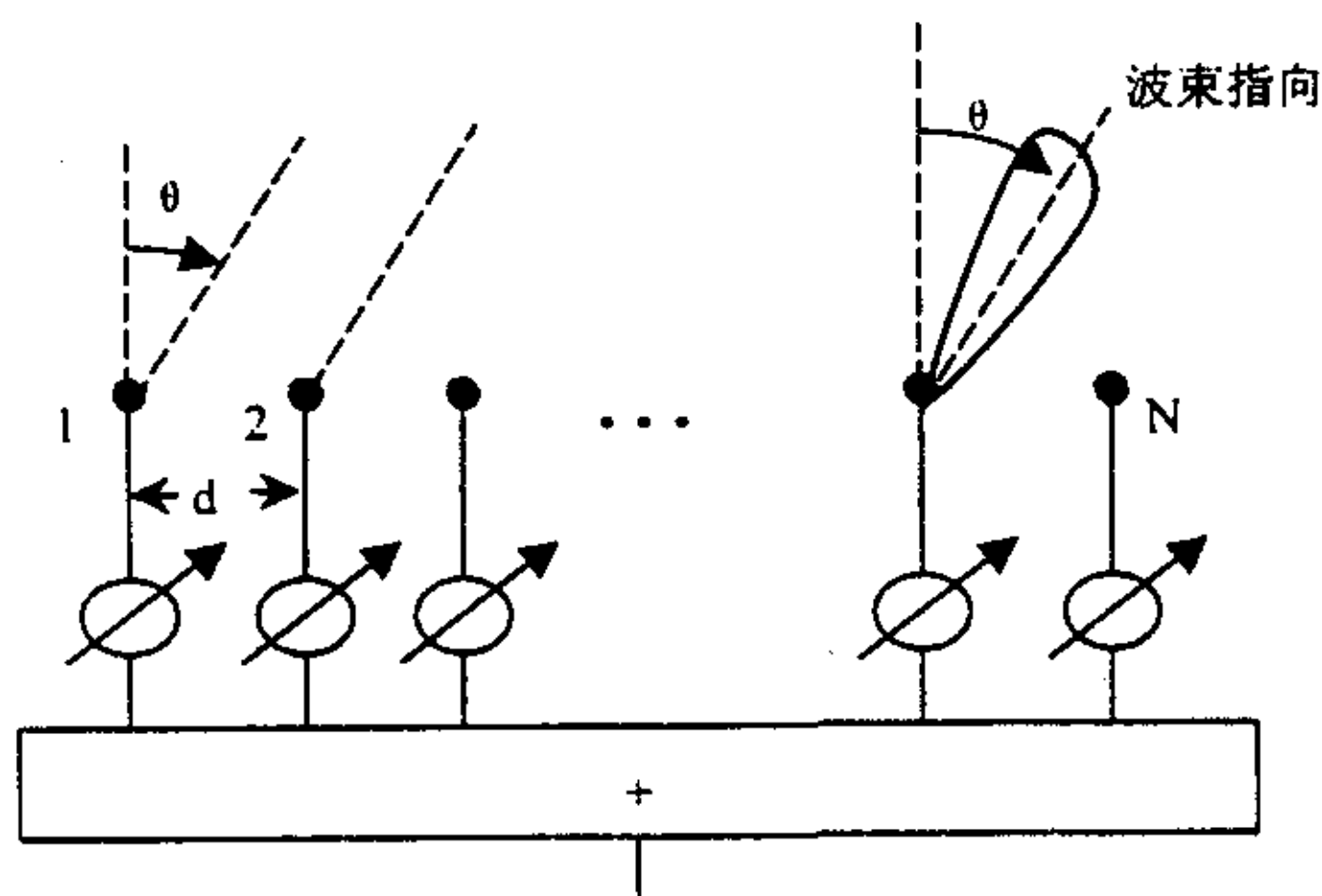


图1 相控阵天线波束控制原理图

式(3)给出了图1所示阵列对由  $\theta$  方向到达信号的响应,它与  $a_n$  和  $\varphi_n$  密切相关。系数  $a_n$  称为阵振幅渐变,  $\varphi_n$  则称为阵相位渐变,式(3)为阵因子。为了使阵的接收信号对  $\theta_0$  方向有最大响应,  $\varphi_n$  必须满足

$$\varphi_n = -nk d \sin \theta_0 \quad (4)$$

上式表明:所要求的阵孔径相位渐变应是线性的,即相邻阵元间有恒定的相位差。同样,由于互易原理的存在,当天线阵作发射时,若移相器能按照式(4)的相位渐变,则由所有阵元辐射的信号将在  $\theta_0$  方向同相叠加而形成主波束。因此式(3)阵因子对发射和接收是相同的,将式(4)代入式(3)得

$$F_a(\theta) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jnk d (\sin \theta - \sin \theta_0)} \quad (5)$$

在均匀照射孔径(即无振幅渐变)的情况下,  $a_n = 1$ ,  $N$  元阵的阵因子则变为

$$F_a(\theta) = \frac{\sin \left[ N\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]}{N \sin \left[ \pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_0) \right]} \quad (6)$$

### 2.3 抑制栅瓣的条件

相控阵天线的最大特点是波束扫描,在进行波束扫描时,如果天线阵元间距选择不合适,可能会造成出现多个栅瓣,这些栅瓣减少了主波束的功率,从而减小了天线阵的增益。

设  $v = \sin\theta$ , 式(5)可表示为

$$E_a(v) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jnk d(v-v_0)} \quad (7)$$

波束指向  $v_0$  与差相移  $\Delta\varphi$  相关,  $\Delta\varphi = -kdv_0$ , 在区域  $|v| \leq 1$  内, 相应于  $\theta$  角的可见空间,  $E_a(v)$  和  $E_a(\theta)$  有一一对应的图示关系。 $E_a(v)$  的最大值产生在式(7)的宗量为  $2\pi$  的倍数时, 即

$$kd(v_i - v_0) = 2i\pi, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \text{或者}$$

$$v_i - v_0 = \frac{i}{d/\lambda} = i \frac{\lambda}{d} \quad (8)$$

在  $v_i = v_0$  (即  $i=0$ ) 时的最大值是主瓣或主波束, 其他最大值是栅瓣, 进行相控阵设计时, 应使可见区中不出现栅瓣。如图 2 所示, 当主波束扫描到  $v_0$  时, 可见空间中栅瓣位于  $v_i = v_0 - \lambda/d$ , 即该栅瓣刚好在可见空间内出现。

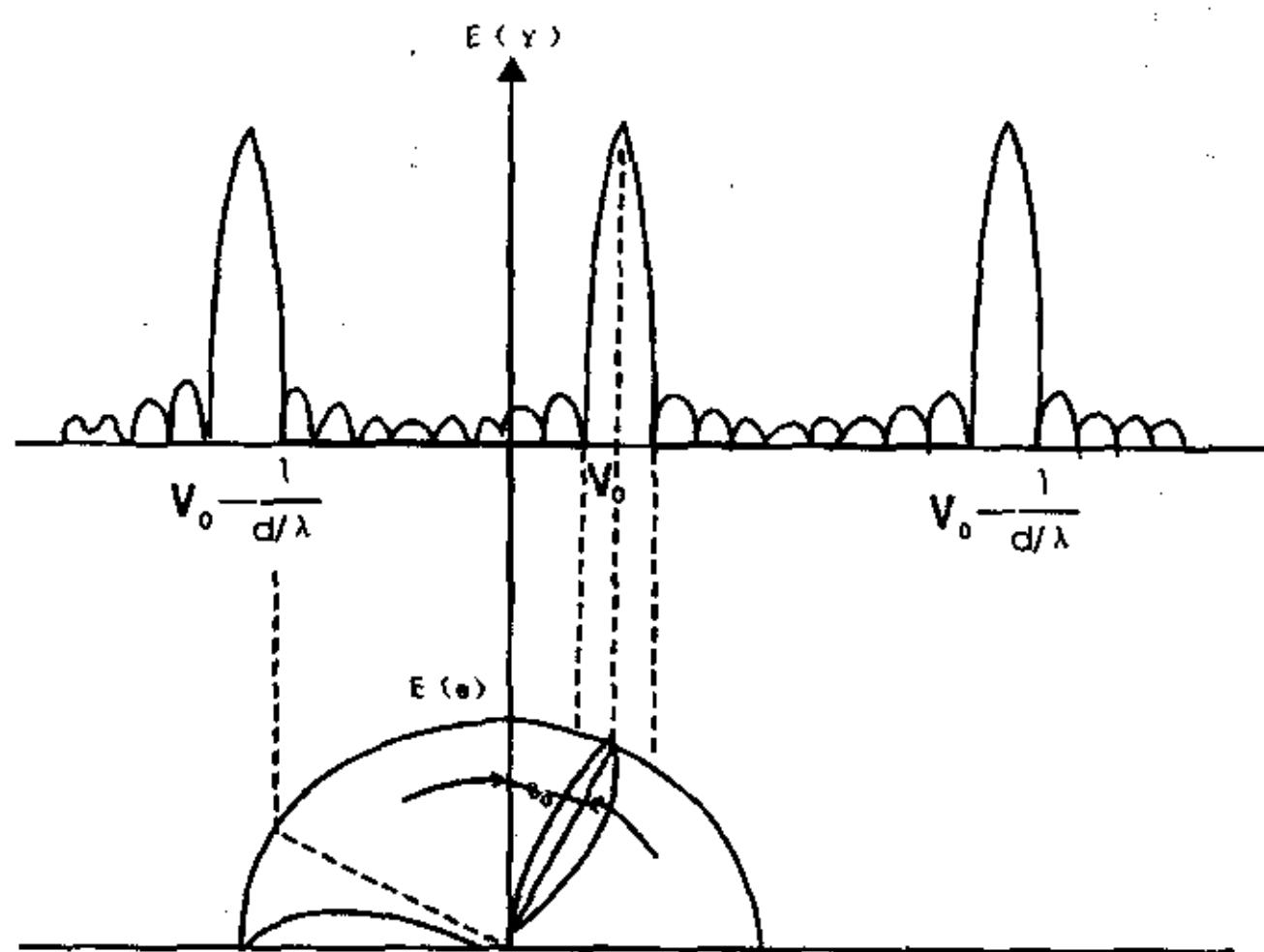


图 2 栅瓣位置与波束扫描和阵元间距的关系

从图 2 可以看出, 刚好出现栅瓣的位置为  $v_0 - \lambda/d = -1$ , 又可写为以下表达式

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{1 + \sin |\theta_0|} \quad (9)$$

因此当相控阵天线有最大扫描角  $\theta_{0\max}$ , 抑制栅瓣的条件为

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + \sin |\theta_{0\max}|} \quad (10)$$

所以我们在设计相控阵天线时按照系统最大扫描角的要求, 通过阵元间距的合理设计, 就可避免在可见区中出现栅瓣, 图 3 为按式(10)计算得到的最大扫描角与阵元间距之间的关系曲线。

### 2.4 相控阵天线的等效合成功率

相控阵天线的等效合成功率在工程上可以按照下式进行估算:

$$ERP = N^2 P_0 G_0 \eta \quad (11)$$

式中： $N$  是阵列中天线的单元数； $P_0$  是单元天线的输入功率； $G_0$  是单元天线的增益。

由上式可以看出，等效合成功率与天线单元数的平方成正比，这正是相控阵系统能够获得大功率的原因。

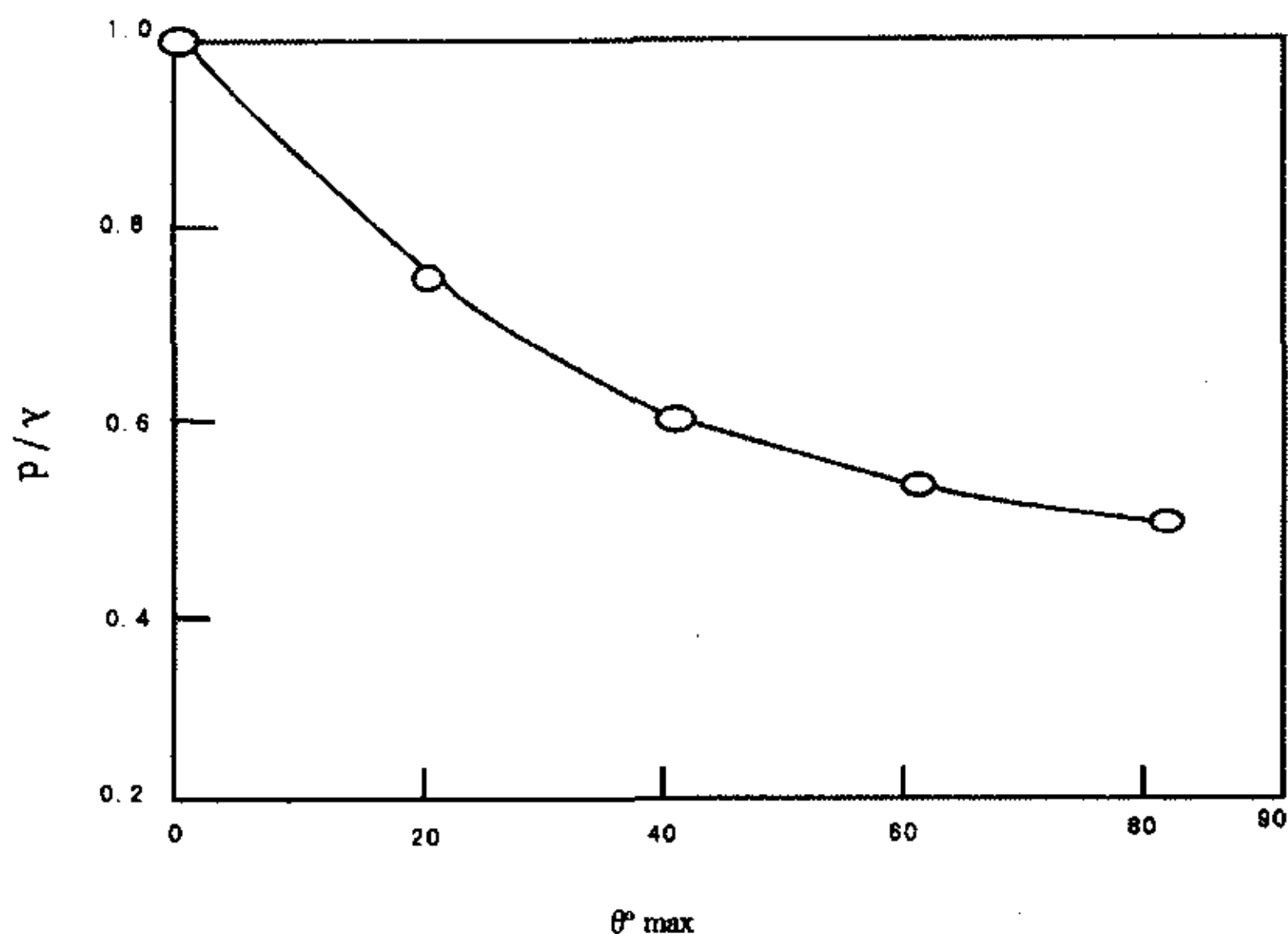


图3 最大扫描角与最大允许阵元间距的关系

### 3. 应用实例

我们以某一套相控阵天线为例来说明其基本设计方法。

#### 3.1 相控阵天线主要技术指标

- a. 工作频段: 0.9 ~ 1.3GHz
- b. 天线驻波比: < 2
- c. 阵列形式: 3 × 10 元阵
- d. 波束宽度: 水平 ≥ 30°, 垂直 ≥ 5°
- e. 合成效率: ≥ 0.8
- f. 波束电控扫描范围: ± 30°
- g. 等效辐射功率: 225KW

#### 3.2 单元天线的优化设计

单元天线采用对数周期天线形式，按照系统要求的方向图和增益，通过计算机优化设计和实际天线的测试，最终确定天线的参数选取为  $\tau = 0.93$ ,  $\sigma = 0.12$ ；设计电压驻波比小于 1.5，利用 Ansoft 软件的 HFSS 进行仿真计算和实测结果基本吻合。

实验中对数周期天线分别用聚四氟乙烯、环氧板和铝板线切割等做成，实际测试发现在选取同样参数的情况下，聚四氟乙烯做成的天线比环氧板做成的天线增益高，而利用铝板线切割做成的天线其增益最高，这是由于介质高频损耗影响的关系，计算机仿真也验证了这一点，因

此,在这个频段用铝板采用线切割方法做成的天线具有最好的辐射效率。

### 3.3 阵列天线的优化设计

根据要求相控阵天线最大扫描角为  $30^\circ$ ,按照公式(10)抑制栅瓣出现的条件,可以计算得相邻单元天线的最大间距为  $0.67\lambda$ 。确定了间距,下面进行天线排列方式的优化,因为根据对数周期天线组阵的普遍规律,一般都认为对数周期天线应该排列成圆形阵,以保持各单元天线间的距离和频率的无关性,否则会失去非频变特性,因此在组阵时,首先将三列天线按圆弧形排列,如图4(a)所示,最终实际测试发现组阵后天线的副瓣过高,而且在外场试验中发现相控阵天线的合成效率偏低。

所以我们又对相控阵天线的组阵方式进行了探讨,将天线排列成图4(b)和(c)的形式,进行了比较测试,而最后发现4(b)所示的组阵情况,相控阵天线的方向图、主副比、增益等指标比另外两种情况都有较大的改善。

对于图4(a)、(b)、(c)所示的三种情况,实测的结果对应于图5(a)、(b)、(c)所示。由于考虑篇幅,只给出了1050MHz的方向图进行比较。

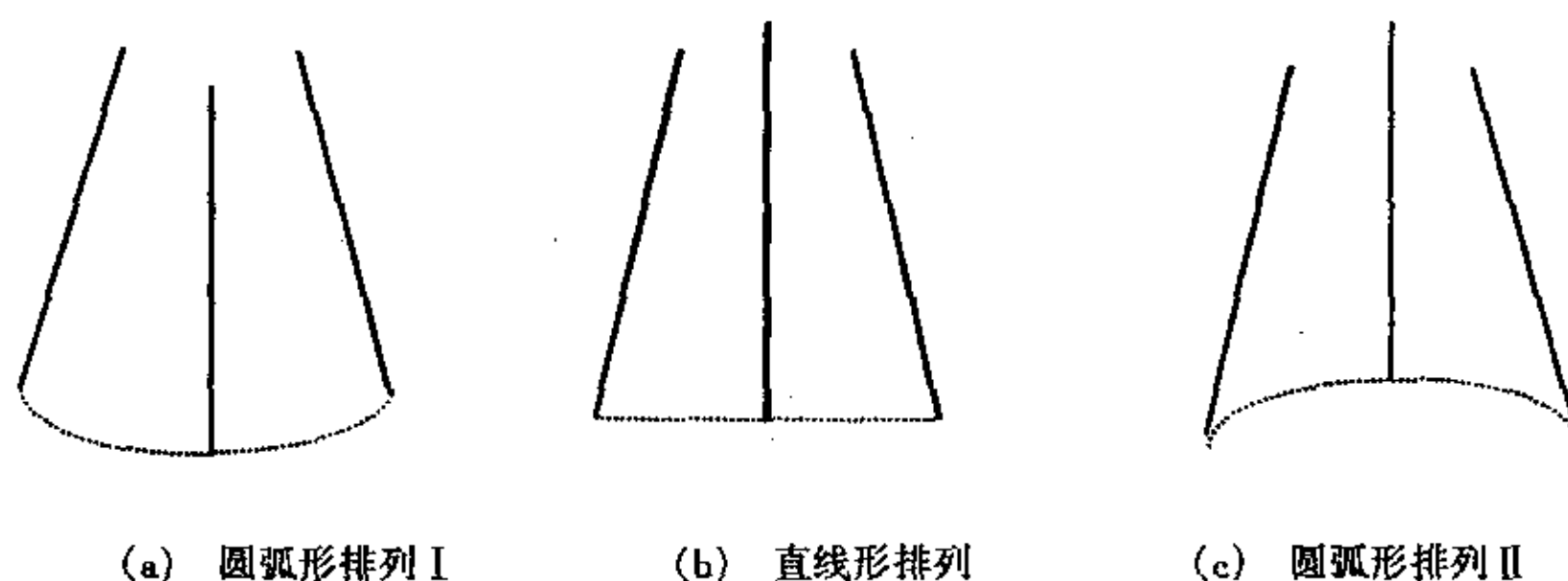


图4 三列天线排列方式(俯视图)

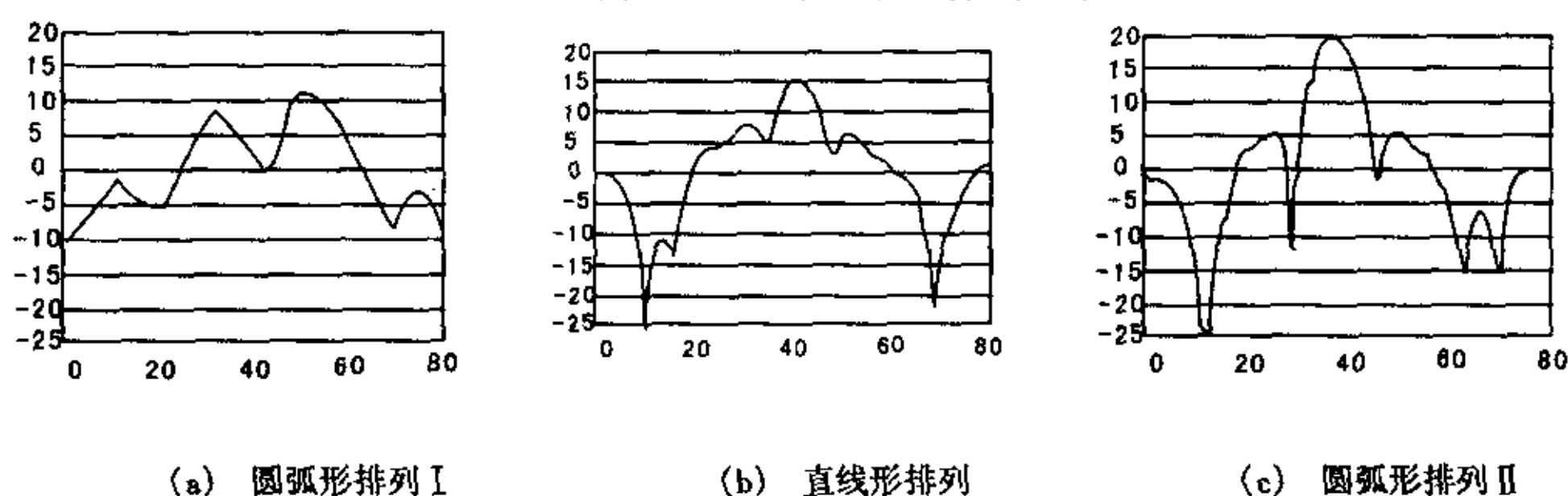
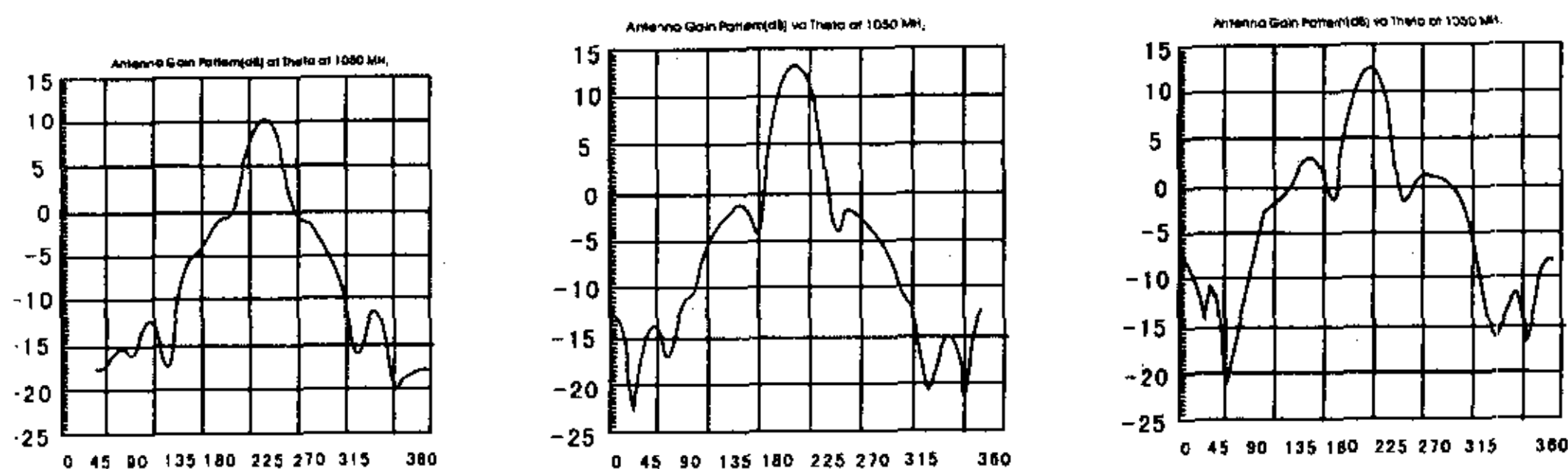


图5 实测方向图(1050MHz)

利用计算机进行模拟仿真的结果如图6所示,其中列与列之间的距离取  $0.55\lambda$ 。实测过程中还发现图5(b)所示排列时,天线阵的第一副瓣(最高副瓣)电平为  $-15\text{dB}$  左右,而另两种情况的第一副瓣电平为  $-10\text{dB}$  左右,直线排列比曲线排列时,相控阵天线的最高副瓣电平约降低了  $5\text{dB}$ 。另外,天线阵的合成效率也是图5(b)的最高,实测的情况是图5(b)时相控阵天线接收电平比其它两种情况约高出  $1.5\text{dB}$ ,而模拟仿真的结果也验证了这一点。因此通过组阵的方式不同,我们得到了效率较高,副瓣电平相对较低的一种天线排列形式。

对于图4(b)所示的排列情况,我们对E面的方向图也进行了实测和仿真计算,结果如图7所示。

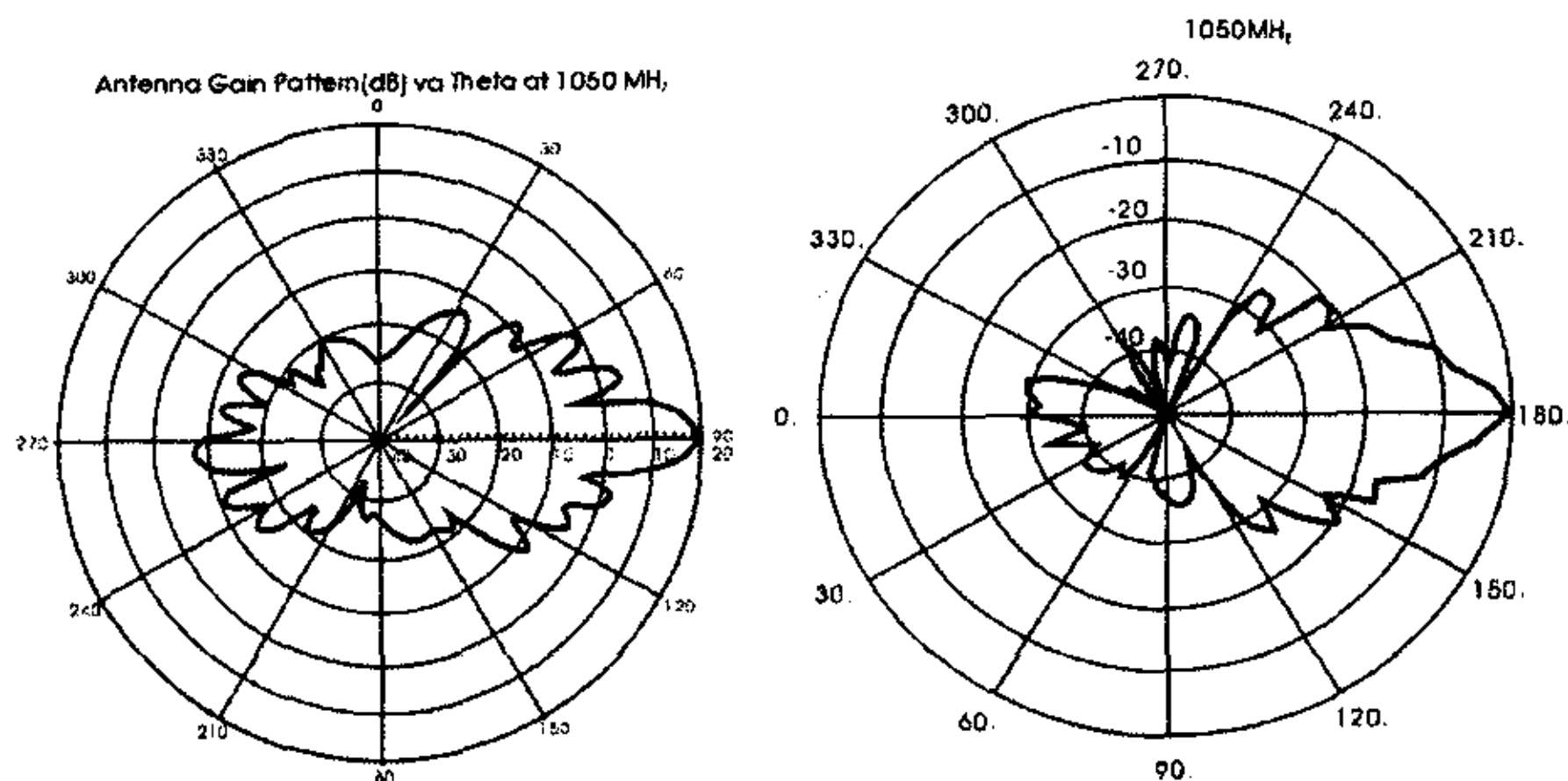


(a) 圆弧形排列 I

(b) 直线形排列

(c) 圆弧形排列 II

图6 计算机仿真对应的方向图(1050MHz)



(a) 仿真结果

(b) 实测结果

图7 垂直面方向图

### 3.4 阵列天线的仿真和实测结果比较

由以上对阵列天线的优化设计后的实测和仿真数据和曲线,可以看出,方向图的形状、波束宽度和主副瓣比等都吻合得较好。具体数据如表1、表2所示。

表1 水平面方向图实测和仿真结果的比较

比较项目	组阵形式	半功率波瓣宽度	主副瓣比(dB)	阵增益改善
实测结果	图4(a)	30~32°	-9	图4(b)组阵方式比另两种提高约1~1.5dB
	图4(b)		-15	
	图4(c)		-8	
仿真结果	图4(a)	30~32°	-10	图4(b)组阵方式比另两种提高约0.8~1dB
	图4(b)		-15	
	图4(c)		-9	

表 2 垂直面方向图仿真和实测结果比较

比较项目	半功率波瓣宽度	主副瓣比(dB)	前后辐射比(dB)
仿真结果	8°	12	22
实测结果	6.5°	10	26

在该系统进行外场试验时给每付天线(增益 8dB)输入功率 50W,合成效率为 0.8,利用式(11)可以算得等效辐射功率为:  $ERP = 50 \times 6.3 \times 30^2 \times 0.8 = 225(KW)$ ,而实测的结果与理论计算较一致,并满足了系统的设计要求,在系统实测中,在实现  $\pm 30^\circ$  电扫描时,主瓣的最大值下降约 1~1.5dB。

#### 4. 小结

通过本文的分析,提出了相控阵天线的基本工作原理和一般设计方法。从举例验证的情况不难看出可以看出空间功率合成技术的突出优点:能容易地实现大的等效辐射功率。

#### 参考资料

1. 汪茂光等编:《阵列天线分析与综合》 电子科技大学出版社
2. 《天线设计手册》 解放军出版社
3. 《相控阵和频率扫描天线原理》 国防工业出版社
4. 张光义著:《相控阵雷达系统》 国防工业出版社



## 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>