

文章编号:1671-0576(2011)02-0043-07

# 一种微带相控阵天线的设计与仿真

张学斌<sup>1</sup>, 徐 琰<sup>2</sup>, 汪霆雷<sup>2</sup>

(1. 海军驻上海地区航天系统军事代表室; 2. 上海无线电设备所, 上海 200090)

**摘要:**介绍了几种不同类型相控阵天线的特点,通过阵列方向图的理论计算来分析不同单元数阵列性能和不同排列方式阵列性能的比较,设计了一种微带相控阵天线,采用 HFSS 软件对阵面进行仿真,仿真结果与理论计算结果较吻合。

**关键词:**相控阵天线; 矩形排列; 三角形排列; 微带天线

中图分类号: TN821.8

文献标识码: A

## Analysis and Simulation of The Microstrip Phased Array Antenna

ZHANG Xue-bing<sup>1</sup>, XU Yan<sup>2</sup>, WANG Ting-lei<sup>2</sup>

(1. The Navy of Military Representative Office in SAST;  
2. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Presents the vantages of some kinds of the phased array antenna. The array patterns of different elements with Rectangular Lattice and Triangular Lattice are calculated. A kind of microstrip phased array antenna is designed, and the radiation planar array is simulated with HFSS. The reasonable agreement between theoretical evaluation and simulation is acquired.

**Key words:** phased array antenna; rectangular lattice; triangular lattice; microstrip antenna

## 0 引言

相控阵天线是以阵元群体的贡献来实现对波束形成、分合、指向的控制,与其它天线相比,具有非常突出的优势:波束可控性极强,系统反应速度快,具有同时多波束能力,干扰模式灵活,有效辐射功率大,工作可靠性提高,有故障弱化的优

势<sup>[1]</sup>。目前,国内相控阵技术已经逐渐应用于各种战术雷达,随着固态微波组件的成本逐渐降低,相控阵天线技术的应用将得到更快的发展。

## 1 相控阵天线类型与特点

相控阵天线有多种类型,频率扫描天线阵、光控相控阵、多波束有限相扫相控阵、电扫相控阵等。频扫阵列天线应用改变发射机频率而达到波束扫描的目的,当频率改变时,相位差改变,天线阵的波瓣指向改变,即波瓣进行扫描;光控相控阵

收稿日期:2011-04-01

作者简介:张学斌(1978—),男,工程师,主要从事无线电技术的研究。

采用光学技术控制阵元相位,实现波束扫描;多波束相控阵即“准相控阵”,采用固定波束形成网络和简单开关网络(在固定波束位置之间选择)构成典型的同时多波束天线(MBA),透镜馈电与矩阵馈电是无源波束形成网络的两种馈电形式<sup>[2]</sup>。

电扫相控阵天线是利用波束控制系统控制阵列中各个辐射单元之间的相位差,使得天线波束在空间有规律扫描。典型的电扫相控阵的基本组成大致有三部分:辐射阵列、移相单元、馈电网络。电扫相控阵天线体制分类及特点,如表1所示。

表1 电扫相控阵天线体制与特点

类型	非分布阵 (无源)	半分布阵 (半有源)	全分布阵 (有源)
发射源数	1	子阵列数( $m$ )	阵元数( $n$ )
发射功率	大(kW级)	中(数十瓦级)	小(W级)
移相器形式	铁氧体	铁氧体/二极管	二极管
复杂程度	低	中	高
故障弱化程度	差	中	好

在某些场合为了降低天线的成本,综合考虑天线成本与性能,可以采用混合技术相控阵。比如,天线阵用带有移相器的裂缝波导阵实现波束的方位面扫描,通过配置在裂缝阵前面的透镜进行波束的俯仰面扫描。混合技术相控阵不需要在每个辐射单元后面使用移相器或T/R组件,而是利用行一列相位控制简化对波束的控制,降低天线阵的成本<sup>[3]</sup>。相控阵天线的性能在很大程度上决定了雷达、EW(电子战)和通讯系统的性能。在过去的几年里,由于固态微波组件成本的快速下降和性能的不断提高,固态有源相控阵天线已成为相控阵雷达天线的发展方向。

## 2 相控阵天线阵列间距的选择及方向图理论计算

### 2.1 相控阵天线单元间距的选择

在相控阵天线辐射阵面设计中,抑制栅瓣是一项主要要求,在扫描过程中,为了使栅瓣不进入可见空间必须适当选择单元间距。天线单元排列方式有矩形排列和三角形排列,不同排列方式决定不同的单元间距<sup>[4]</sup>。

#### (1) 天线单元按矩形排列

设 $d_x, d_y$ 分别为 $x, y$ 方向的单元间距, $d_x, d_y$ 应满足式(1):

$$d_x = d_y < \frac{\lambda_0}{1 + |\sin \theta_m|} \quad (1)$$

式中: $\theta_m$ 为最大扫描角; $\lambda_0$ 为中心频率点波长。

#### (2) 天线单元按三角形排列

三角形排列可看成是两个矩形排列之和。假定两个矩形排列的辐射单元间距为 $2d_x, 2d_y$ ,其中 $d_x, d_y$ 分别为两子阵列的垂直和水平间距,则 $d_x, d_y$ 满足式(2):

$$\sqrt{\left(\frac{\lambda_0}{2d_x}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{2d_y}\right)^2} = 1 + \sin \theta_m \quad (2)$$

与矩形排列的天线相比,在同样不产生栅瓣的扫描角度范围内,天线单元数目可减小约10%。

### 2.2 不同单元数线阵天线的方向图计算

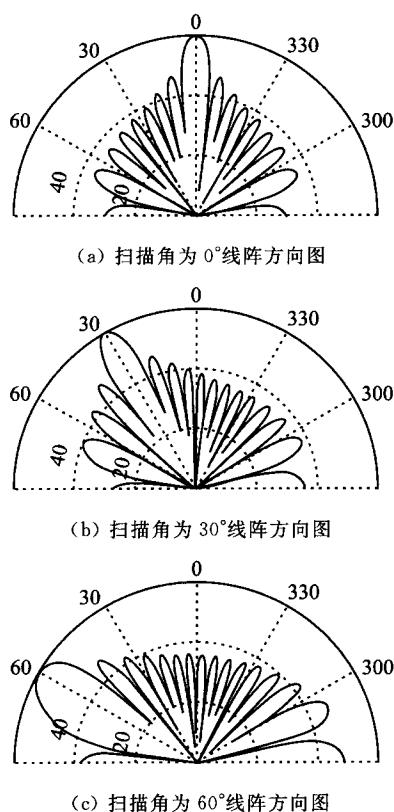
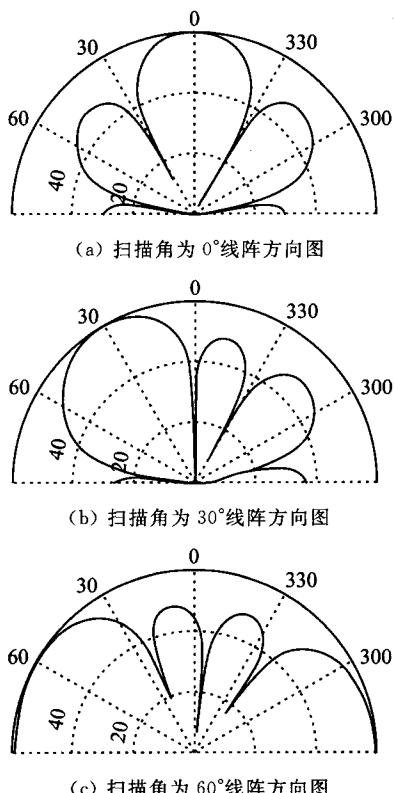
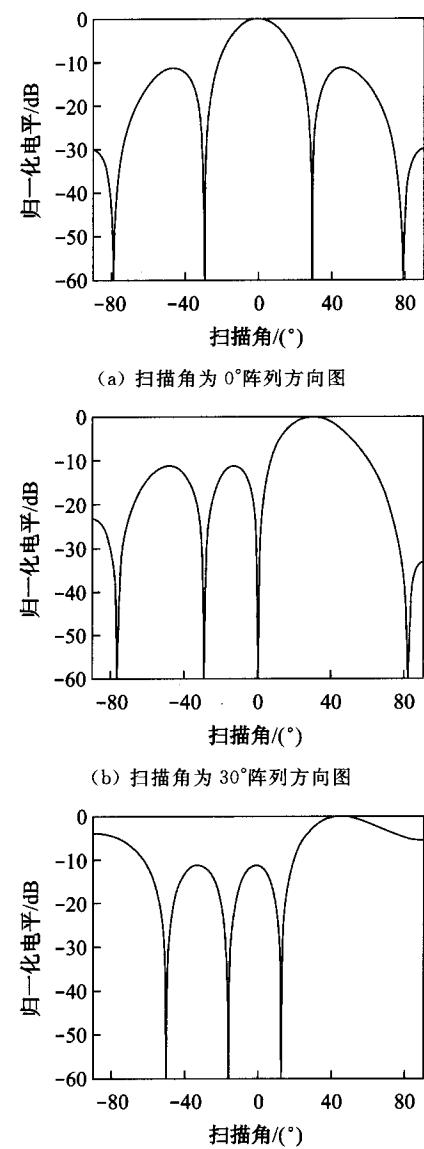
分析14元线阵在 $\pm 60^\circ$ 范围内不出现栅瓣,选择 $d=0.51\lambda_0$ ,计算14元均匀激励等间距线阵的扫描方向图如图1所示,图1(a)、图1(b)、图1(c)分别是扫描角为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 的方向图。为了比较不同单元数线阵的扫描性能,计算了相同间距的四元线阵的扫描方向图,如图2所示。

比较图1、图2的扫描方向图,可知单元数目越少,天线扫描角度越有限。

### 2.3 矩形排列和三角形排列的天线阵列方向图计算

计算矩形排列 $4 \times 4$ 阵列的扫描方向图如图3所示,图3(a)、图3(b)、图3(c)分别是扫描角为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 的方向图。三角形排列 $4 \times 4$ 阵列的扫描方向图如图4所示,图4(a)、图4(b)、图4(c)分别是扫描角为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 的方向图。

矩形排列 $4 \times 4$ 阵列扫描角为 $0^\circ$ 时波束宽度为 $26^\circ$ ,由于阵列单元数少,扫描到 $45^\circ$ 时天线的性能已经很差,扫描到 $60^\circ$ 时,天线的后瓣与主瓣一样。比较图3、图4的扫描方向图,可见同样阵元数的阵列,三角形排列的阵列扫描性能比矩形排列好。图5为160单元三角形排列组成的圆形阵列天线,扫描角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 的方向图,可见随着天线单元数目增加,阵列越大,波束扫描方向图性能越好。同时,从计算方向图可以看出,对

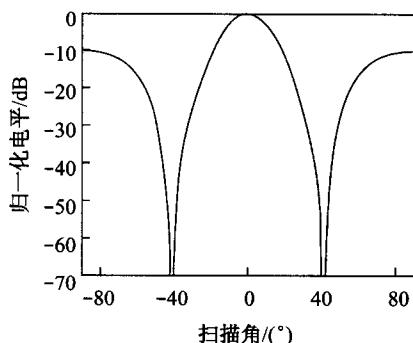
图1 扫描角分别为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 的四元线阵方向图图2 扫描角分别为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 的四元线阵方向图  
万方数据图3  $4 \times 4$  矩形排列阵列扫描角分别为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 的方向图

于不同的扫描角 $\theta_0$ ,半功率波瓣宽度会发生变化,一般规律,随着主瓣由边射向端射方向扫描,主瓣展宽,增益下降<sup>[5]</sup>。

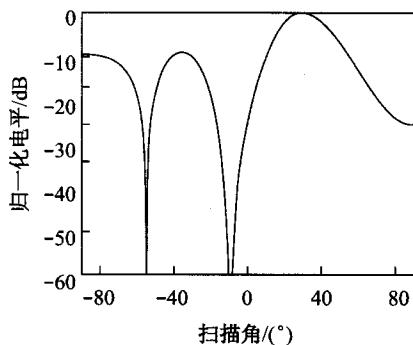
### 3 一种微带相控阵天线的设计与仿真

#### 3.1 相控阵天线辐射单元设计

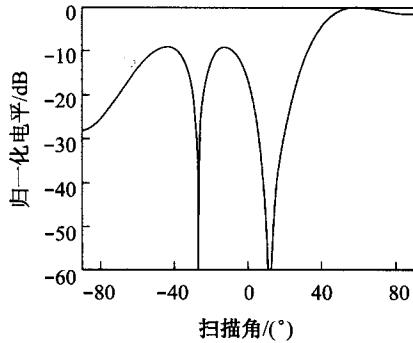
固态有源相控阵的基本组成有三部分,即:辐射阵列、移相单元、馈电网络。辐射阵列的设计决定了相控阵天线的扫描性能。阵列天线的辐射单元主要有振子型、开口波导型、介质波导型、微带



(a) 扫描角为 0° 阵列方向图



(b) 扫描角为 30° 阵列方向图

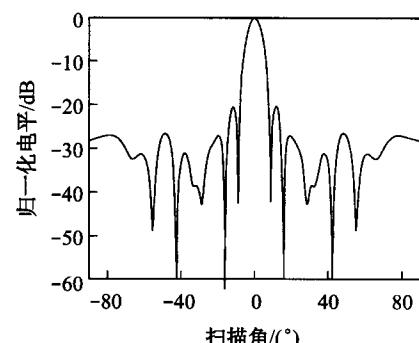


(c) 扫描角为 60° 阵列方向图

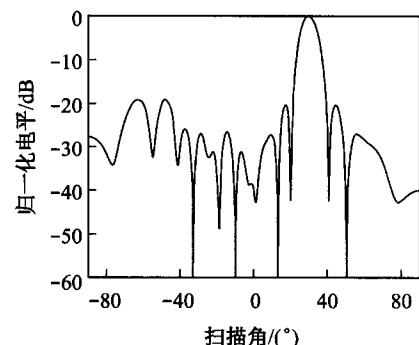
图 4 4×4 三角形排列阵列扫描角分别为 0°、30°、60° 的方向图

贴片型、波导缝隙型和印刷振子型等。各种类型的辐射单元均有其优缺点,适用范围也有所不同。微带振子型单元形式重量轻,尺寸小,便于和后续电路集成,单元波束宽度较宽,比波导形式好。微带振子型辐射单元有多种变形,如图 6 所示。

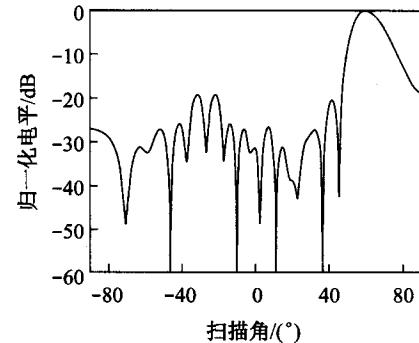
图 6(a)辐射单元为准八木型微带天线,结构简单紧凑,易于集成到微带电路中去,驻波小于 2 的带宽有 48%。主要由两部分组成:辐射部分和馈电部分。辐射部分包括印刷偶极子和引向器,馈电部分是微带线到共面带线(CPS)的转换,微带线的两个臂相差半个波长,以实现共面带线的



(a) 扫描角为 0° 阵列方向图



(b) 扫描角为 30° 阵列方向图



(c) 扫描角为 60° 阵列方向图

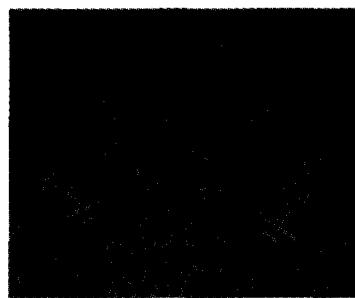
图 5 160 元三角形排列阵列扫描角分别为 0°、30°、60° 的方向图

奇模激励,因而起到宽带巴伦的作用,微带线背面截断的接地面起到反射器的作用。

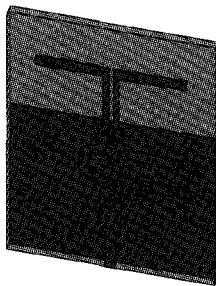
去掉引向单元,也可以构成印刷偶极子天线,如图 6(b)所示。如图 6(c)为微带蝶型天线,在同样频率下更易实现小型化。

准八木型微带天线尺寸小、增益高、波束宽度宽<sup>[6]</sup>,重点对以准八木型微带天线形式作为辐射单元的相控阵天线阵面进行设计和仿真。采用 Ansoft HFSS 软件进行仿真计算,准八木型微带天线单元的辐射方向图仿真结果如图 7 所示。

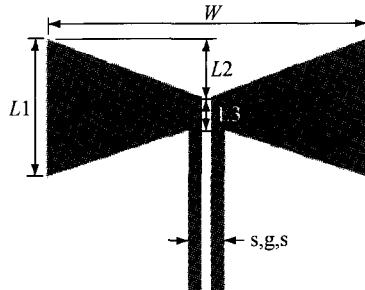
如图 7,天线 E 面、H 面波束宽度都大于



(a) 准八木型微带天线



(b) 印刷偶极子天线



(c) 微带蝶型天线

图 6 微带振子型辐射单元形式

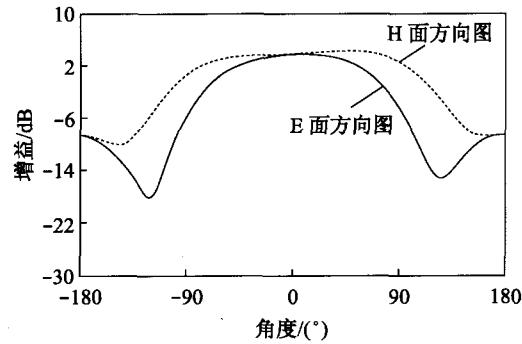


图 7 辐射单元方向图仿真结果

120°, 频段内天线驻波小于 1.5。

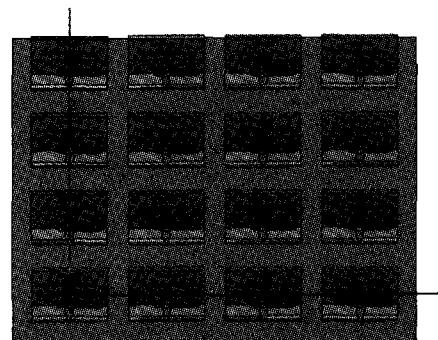
采用准八木型微带天线作为辐射单元, 按矩形排列和三角形排列两种情况分析和比较 16 元小阵的方向图及扫描特性, 并对 160 单元按三角形排列组成的圆形阵列进行仿真。

万方数据

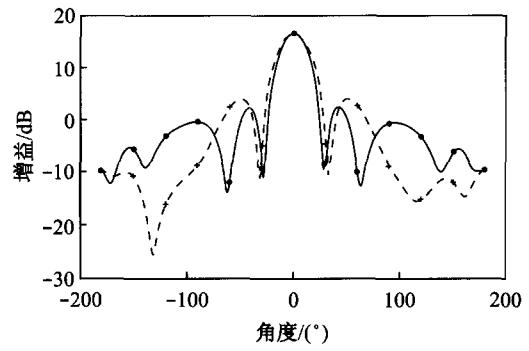
### 3.2 矩形排列的 16 元小阵仿真结果

准八木型微带天线单元按矩形排列的 16 元小阵仿真模型及仿真结果如图 8 所示。

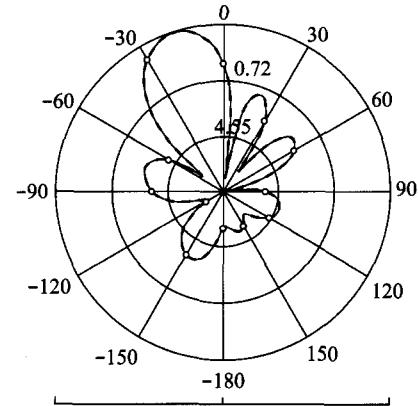
图 8(a)为矩形排列的 16 元小阵仿真模型; 如图 8(b)为扫描角为 0°时方向图, 波束宽度约 24°, 增益约 16 dB; 扫描角为 -15°时极坐标方向图如图 8(c), 随着扫描角度的加大, 副瓣升高, 主副瓣比大于 10 dB; 扫描角为 +40°时极坐标方向图如图 8(d), 增益约 14 dB, 主副瓣比约 4 dB; 扫描角度继续变大, 扫描到 50°时, 副瓣跟主瓣相



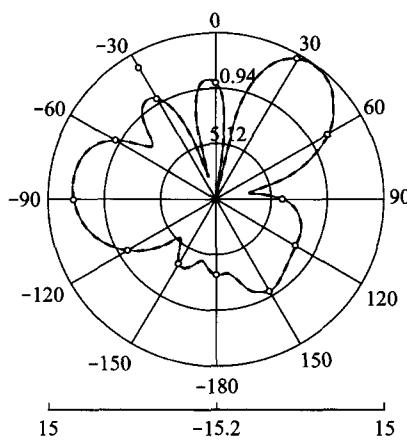
(a) 矩形排列阵列



(b) 扫描角为 0°时辐射方向图

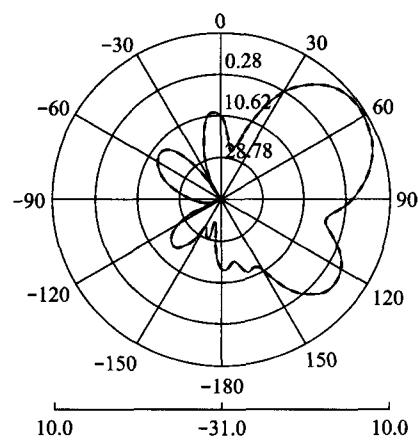


(c) 扫描角为 -15°时方向图



(d) 扫描角为+40°时方向图

图8 仿真模型及仿真结果



(b) 扫描角为-50°时方向图

图9 按三角形排列的16元小阵仿真方向图

同。可见矩形排列的16元小阵扫描角度有限,小  
于±30°,与理论分析结果吻合。

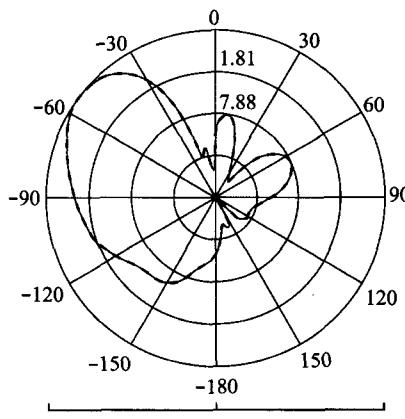
### 3.3 三角形排列的16元小阵仿真结果

按三角形排列的16元小阵仿真结果,如图9所示。当扫描角为+50°、-50°时方向图分别如图9(a)、图9(b),主副瓣比大于4 dB。对于同样数目的天线阵列,三角形排列的天线波束扫描性能优于矩形排列的天线波束扫描性能,仿真结果与理论分析结果吻合。

### 3.4 三角形排列的160元辐射阵面仿真结果

对160单元按三角形排列组成的圆形阵列进行仿真,仿真结果如图10、图11所示。

图10是扫描角为0°的立体方向图,图11是扫描角为30°的立体方向图。分析计算结果,当



(a) 扫描角为+50°时方向图

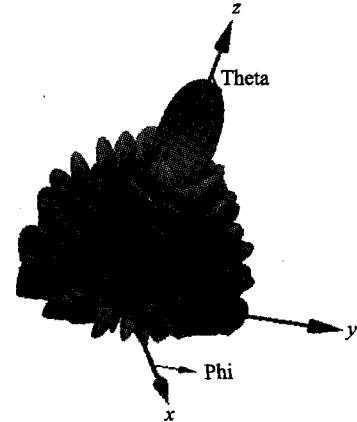


图10 扫描角为0°的立体方向图

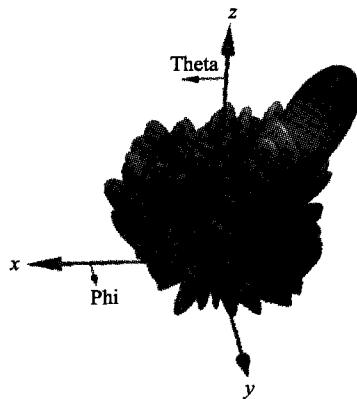


图11 扫描角为30°的立体方向图

波束扫描到30°时,H面方向图波束宽度增加约1°,副瓣电平上升约2 dB,天线增益下降约1 dB。

分析不同单元天线阵列的仿真结果也验证,随着天线单元数目增加,阵列越大,波束扫描方向图性能越好。

## 4 总结

通过对阵列方向图理论计算,分析了不同单元数阵列性能和不同排列方式的阵列性能,并对微带相控阵辐射阵面进行仿真,对比分析了不同排列方式、不同单元数对波束扫描方向图特性的影响,仿真结果与理论预计吻合。

相控阵天线系统复杂,需要解决一系列的关键技术及技术难点,如天线互耦的计算、幅相误差分析、低副瓣技术、共形技术、数字波束形成、故障诊断与测试技术、热设计及提高相控阵天线波束指向精度的方法等。相控阵天线课题难度大、更具有挑战性,相控阵天线的优势决定了未来天线

发展的方向。

## 参考文献

- [1] 张光义.相控阵雷达系统[M].北京:国防工业出版社,1994.
- [2] 李明.电子战相控阵天线[J].航天电子对抗,2004,(3):1-7.
- [3] 何炳发.固态有源单脉冲相控阵天线的实验研究[J].现代雷达,1998,(6):62-66.
- [4] 林昌禄.天线工程手册[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [5] 郭燕昌,等.相控阵和频率扫描天线原理[M].北京:国防工业出版社,1978.
- [6] 郑会利,等.一种新的相控阵天线单元[J].电子学报,1996,(9):87-90.

(上接第38页)

表2 测试数据结果

	5 V 电压 值/V	5 V 电流 /mA	27 V 电压 值/V	27 V 电流 /mA	S <sub>1</sub> /V	S <sub>2</sub> /V	S <sub>3</sub> /V	S <sub>4</sub> /V	S <sub>5</sub> /V	S <sub>6</sub> /V
待机	5.01	0.00	27.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E <sub>0</sub>	5.00	396	26.98	0.00	25.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E <sub>1</sub>	4.99	401	26.95	11.44	25.56	25.48	0.00	0.00	0.00	0.00
E <sub>2</sub>	4.98	409	27.01	12.93	25.57	25.61	25.42	0.00	0.00	0.00
E <sub>3</sub>	5.01	410	27.01	12.93	25.57	25.61	25.42	25.56	25.49	0.00
E <sub>4</sub>	4.99	398	26.99	20.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.54

实习冲击片雷管爆炸闪光检测模块,检测仪可以对ESAD与实习冲击片雷管进行在线检测,结果表明,检测仪可以安全可靠的工作。

## 参考文献

- [1] 袁士伟.固体火箭发动机直列式点火系统设计[J].宇航学报,2006,27(5):1059-1062.
- [2] 杨正发,杨振英.直列式安全点火系统及其在固体火箭发动机中的应用前景[J].火工品,2002,(1):

32-36.

- [3] 刘志强,李世义,申强.ESA 多功能测试仪的设计与实现[J].电子测量与仪器学报,2004,(增刊):398-403.
- [4] 尚亚玲,李广超,但波,等.鱼雷引信安全系统通用环境信息[J].探测与控制学报,2010,32(4):30-33.
- [5] 郭占海,焦红.引信电子安全与解除保险装置研究及设计准则的制订[J].国防技术基础,2010,(4):6-10.

## 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>