

# BIRM 相控阵天线

程臻 (北京无线电测量研究所 北京 142 信箱 203 分箱 2 号 100854)

**摘要** 本文介绍北京无线电测量研究所(BIRM)相控阵天线研制活动, 涉及几类地面使用的相控阵天线, 描述技术进展并列出未来研制领域。

**关键词** 相控阵天线, 仅相位零点, 圆顶阵, 扫描

## 1 一般情况

对于新雷达和通信系统来说, 天线技术是至关重要的。BIRM 的相控阵天线研制工作始于六十年代, 过去的三十多年里取得了理论分析、设计、制造和测试方面的丰富经验, 其中包括互耦分析、辐射方向图预测、馈电网络分析、仅相位零点形成、自动测试(近场和远场)以及降成本等方面。本文介绍的相控阵涵盖线阵、面阵和圆顶阵, 一些典型的实例在以下各节给出。

## 2 一维扫描相控阵天线(线阵)

线阵天线在扫描平面上的波束窄, 而在与扫描面垂直的平面上形成宽波束。将两个线阵相互垂直地装在雷达车上可以形成有限空域扫描, 并具有高的指向精度。因其单元数少, 这种特殊线阵的成本比面阵低得多, 缺点是扫描空域有限。

BIRM 研制了一个覆盖  $10^\circ \times 10^\circ$  空域的 C 波段相控阵系统, 图 1 是该天线的组成原理图, 它包含天线单元、移相器组合、功分器、单脉冲馈源和抛物柱型反射面。

- 馈源: 和通道  $H_{10}$  和  $H_{30}$  模, 差通道  $H_{20}$  模;
- 波束宽度:  $\theta_H = 0.75^\circ \sim 0.9^\circ$ ,  $\theta_E = 9^\circ \sim 10^\circ$
- 单元:  $2 \times 106$  E 面张角喇叭;
- 移相器: 4 位波导型非互易铁氧体移相器;
- 增益:  $\geq 33$  dB
- 方向图: 图 2 是中心频率的测试方向图

## 3 平面相控阵天线(二维扫描相控阵)

在过去的三十多年中, BIRM 已经研究了几种平面阵系统, 包括振子天线阵、波导裂缝阵、微带天线阵和口径天线阵。就馈电网络来说, BIRM 的研究覆盖了空馈、强迫馈电和子阵, 下面简述一些典型实例。

图 3 是为中程警戒雷达研制的工作于 VHF 波段的大间距背射天线阵, 其增益 26.6dB 副瓣电平低于 -20dB。图 4 是为北京市气象局研制的 UHF 多普勒测风雷达, 其天线是由 108 个八木天线组成的二维相控阵, 产生三个波束以获取三维风场数据。

裂缝天线是共形阵的理想单元, 可是传输和辐射的复杂机理给分析和设计带来了很大困难。基于相邻缝隙内外互耦的精确分析并考虑波导壁厚的影响, BIRM 设计了一部低副瓣窄边波导裂缝阵(图 5), 其固定波束副瓣 -39.5dB, 相扫波束幅瓣 -32dB。

为了满足现代雷达多目标搜索和跟踪的需要, 相控阵应具有宽带宽角扫描能力。BIRM 研制了两种满足这种需要的空馈相控阵, 一种是由初级馈源馈电的透镜阵(图 7), 用于多功能相控阵雷达系统(扫描至  $\pm 55^\circ$ )。和差方向图由单脉冲馈源分别优化, 阵面近似于圆形, 含大约 5,500 个单元, 使用四位双模互易式铁氧体移相器和介质辐射器组成天线单元。整部相控阵天线装于一个拖车之上, 具有很好的机动性能。

另一个透镜阵是为一部有限扫描相控阵雷达研制的, 采用双反射面天线馈电, 压缩纵向尺寸, 以满足车载要求(图 8)。精心设计馈源, 形成近乎理想的低漏损口径分布。为了

提高天线增益，对反射面实施赋形。该天线参数如下：

频段:	C 波段	零深:	-30dB
增益:	41dB	移相器:	四位双模互易式铁氧体移相器
单元总数:	3100	单元形式:	波导型
直径:	3.3m	单元栅格:	准非周期排列
副瓣:	-20dB	馈源:	收发合一的圆极化单脉冲馈源
极化:	双圆极化	相扫范围:	$\pm 10^\circ$

#### 4 圆顶相控阵天线（三维扫描相控阵）

圆顶阵可以实现半球覆盖，而其成本比全方位扫描相控阵减少一半。八十年代，BIRM 研制了一部 C 波段圆顶阵天线，它包含一个口径接近 1 米的圆顶组件和一个馈电面阵，天线波束由微机控制。

图 6 是圆顶相控阵天线的截面原理图。当馈电阵的波束指向  $\theta_0$  时，由于圆顶组件的固定移相，圆顶相控阵天线的波束实际指向  $\theta'_0$ ， $\theta'_0$  和  $\theta_0$  的关系可表示为

$$\kappa(\theta') = \frac{\theta'_0}{\theta_0}$$

式中  $\kappa(\theta')$  是扫描放大系数。如果  $\kappa(\theta') > 1$ ，平面阵的扫描范围被圆顶阵扩大。BIRM 研制的圆顶阵的扫描放大系数  $\kappa = 2$ ，扫描范围从  $35^\circ$  扩大到  $70^\circ$ 。

Archimedes 螺旋天线用作圆顶组件，其位置根据计算确定。300 个组件构成透镜，圆顶其余部分用吸收材料覆盖。馈电阵的形状近似于圆形，直径 0.85m，共有 297 个双脊波导型辐射单元，三角形排列。三位非互易式铁氧体移相器的插入损耗 1dB，VSWR < 1.30。馈电阵由多模单脉冲馈源馈电，扫描角达  $35^\circ$ 。大量实验表明，其频带宽度为 350MHz，波束指向精度优于  $1/50$  波束宽度。

#### 5 相控阵天线新技术

现代雷达系统都必需具有很强的信号或信息处理功能，这些功能包括逆合成孔径（ISAR）、自适应、聚焦与散焦、阵列方向图综合、数字波束形成（DBF）、仅相位零点和极化识别等。为了跟踪国际先进技术水平，BIRM 在这些方面付出了艰苦努力。

有源相控阵和稀布阵是现代相控阵雷达的两个重要方面，BIRM 也为此进行了大量理论和实验研究，并取得了可喜成果。

##### 5.1 自适应零点

现代战争中，电磁环境日益复杂，干扰源的数量和功率大幅度增加。一般天线都不可避免地产生一定电平的副瓣，从而影响了雷达的抗干扰性能。极低副瓣天线能够抑制干扰，但其成本十分高昂。另外，极低副瓣天线的主瓣宽度增加，对于抑制干扰又带来副作用。同时，相控阵天线由于特有的幅相误差，要达到低副瓣都不容易，要达到极低副瓣那就更难了。因此，迫使人们研究自适应天线方向图控制。一种能够降低干扰源影响的有吸引力的方法，就是利用相控阵雷达天线本身固有的波束扫描移相器，对天线进行成零加权，从天线激励处着手，设法通过只改变天线的相位分布，来实现对副瓣的抑制。

仅相位零点控制技术随着相控阵天线地位的提高而越来越受到人们的重视。因为零点控制所要求的相位是波束控制系统的一部分，不增加设备，只需对波控机增加指令。因此，不需要额外增加成本，是一种提高雷达抗干扰性能的有效方法。BIRM 研究了多种零点形成算法和技术，并成功地进行了仅相位零点形成的试验验证。

在相控阵方向图某一区域降低副瓣，可以把杂波干扰的影响降到最低，也可以用来抑制宽频带干扰，或者赢得更多的时间对付反辐射导弹。可是，这种降低副瓣的方法带来天线的某些性能的降低（例如，增益、波束宽度和原有的平均低副瓣）。当然，在方向图一定区域内降低副瓣和保持原方向图完整性之间存在一个折中方案。保持原方向图完整性，要求保持为取得低副瓣所要求的复数加权尽可能小。提出了一种有用的性能参数 P，它等于成零区域的平均功率和加权之和。改变规定区域的平均功率和加权分布的权系数，可使性能参数 P 最小，从而有可能满足上述两方面的要求。

当天线加权的幅度和相位都可以自由变化时，可以得到使上述参数最小所需阵加权的解析解。在此，提出一种将复数加权分布限制到仅相位。与幅度和相位组合控制的方法不同，令性能参数 P 关于阵加权相位的偏导数为零，得到一组非线性方程。这组方程无解析解，但可以通过计算机优化程序求出数值解。分别对面 16 元、32 元和 64 元 20dB Taylor 阵仿真，单元间距  $\lambda/2$ ，天线指向  $10^\circ$ ，零控区域  $[20^\circ, 30^\circ]$ 。图 9 是 64 元阵仿真方向图，在零控区域内平均副瓣降至 -57dB。

为了满足工程应用需要，BIRM 对用少数位移相器同时形成多零点进行了深入研究。图 10 是一部 33 元实验阵用五位移相器零控的实验方向图。

## 5.2 稀布阵

减少单元数量，可以降低相控阵的成本。但是，为了保证指向精度，必须寻找恰当的单元排列方式，以保持主波束基本不变，并控制副瓣电平。密度加权和非周期排列是目前常用的两种方法。

七十年代，BIRM 制作了一个稀布阵实验模型，它由 297 个有源单元和 136 个无源单元组成。其结构参数和实验结果如下：

• 直径:	741mm	• 焦距:	608mm
• 移相器位数:	3	• 单元:	双脊波导
• 频段:	C	• 增益:	28.5dB
• 第一副瓣:	-23dB	• VSWR:	<2.0
• 零深:	-35dB	• 相扫范围:	$\geq \pm 38^\circ$

## 6 未来研究领域

- 大型多功能相控阵；
- 有限扫描相控阵；
- 固态相控阵；
- 自适应相位零控技术；
- 各种用途的低成本相控阵。

程臻 1962 年 7 月生，北京无线电测量研究所天线研究室主任、研究员，在国内外发表学术论文十余篇。

## 参考文献

- [1] J.Zhang, G.Y.Guang and J.G.Xiong, "Proceedings of 4th International Symposium on Antenna and EM Theory," (1997, Xi'an, China) pp.310-313.
- [2] J.G.Xiong, G.L.Meи and L.M.Chen, "Records of 1st Intentional Conference on Radar," (1986, Nanjing, China), pp.571-576.
- [3] Z.Cheng and X.F.Jiang, "Proceeding of ISAP'92," (1992, Sapporo, Japan) pp.153-156.
- [4] 熊继容等，《防空导弹制导雷达天馈系统与微波器件》，宇航出版社，1994 年。

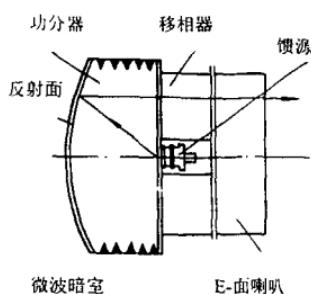


图 1 线阵轮廓图

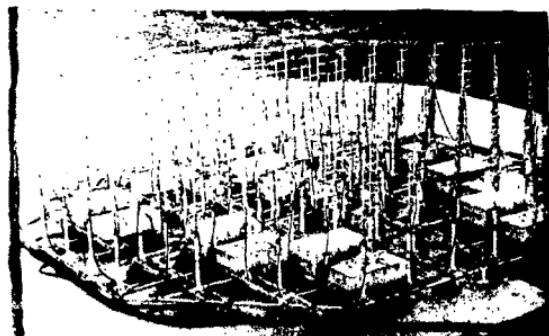


图 4 108 元八木相控阵天线

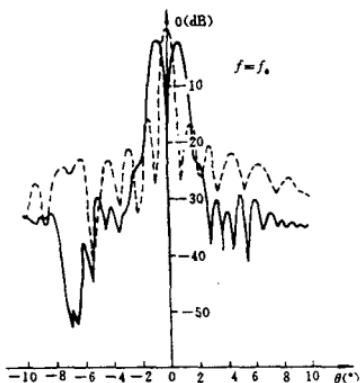


图 2 线阵测试方向图

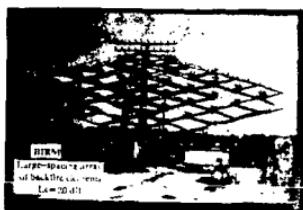


图 3 大间距 VHF 背射阵天线

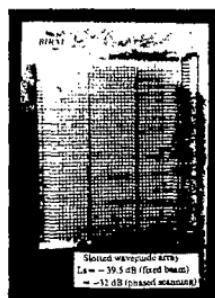


图 5 低副瓣波导裂隙阵

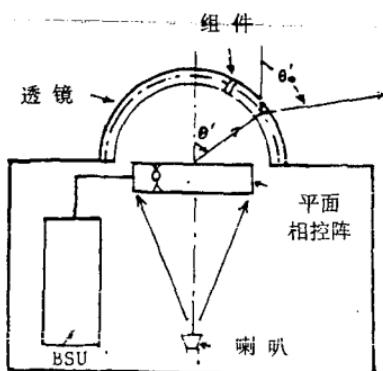


图 6 圆顶阵天线剖面图

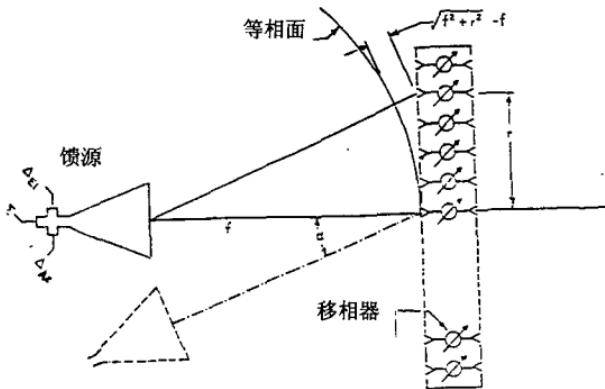


图 7 空馈相控阵系统

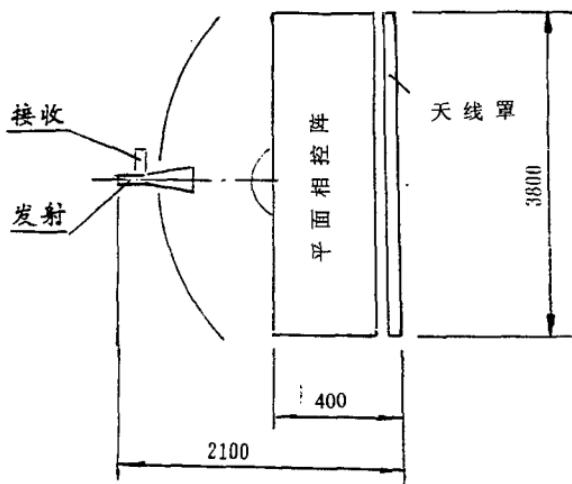


图 8 平面波馈电相控阵系统

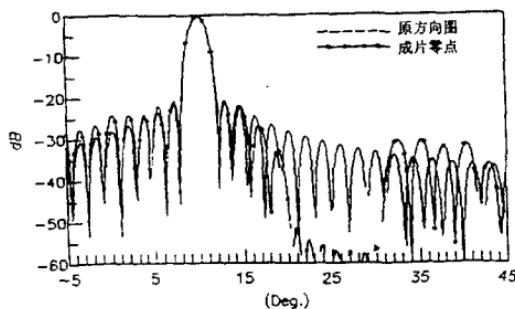


图 9 64 元阵仅相位零点仿真结果  
(20dB 泰勒分布)

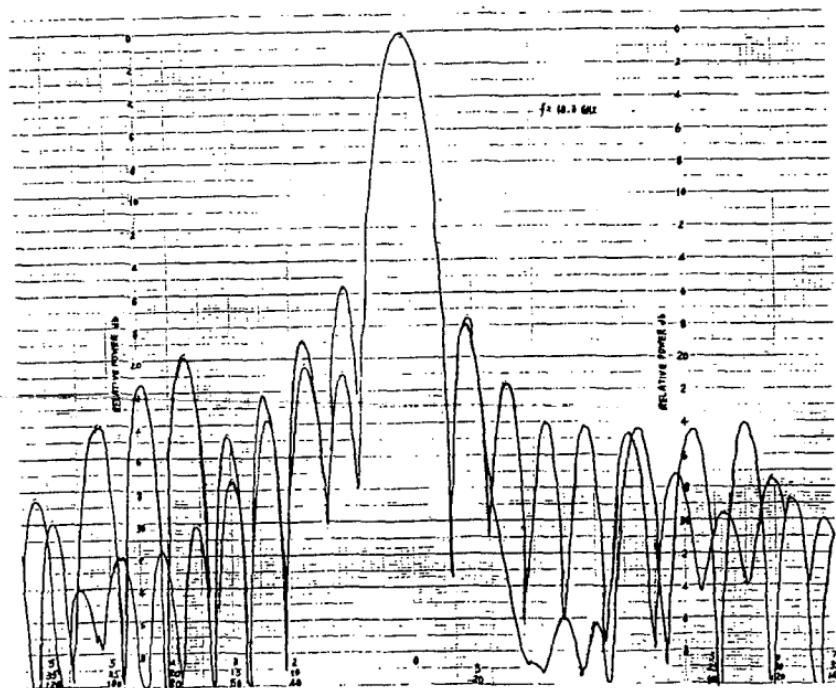


图 10 33 元阵仅相位零点控制实验结果

## 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>