

文章编号: 1673-8691(2008)02-0103-04

## 多波束抛物面天线测高功能的研究与实现

郝绍生<sup>1</sup>, 吴智慧<sup>2</sup>, 杜鸣晓<sup>2</sup>

(1.华中地区军代室, 武汉 430077; 2.武汉滨湖电子有限责任公司, 武汉 430077)

**摘要:**基于偏置抛物反射面天线的馈源偏焦引入的相移特性产生多波束, 利用相交波束进行比幅测高。通过波束间相交状态对测高范围和精度的影响分析, 合理选择馈源的形式、数量及偏焦位移, 实现了对空警戒雷达的测高功能, 取得了良好的工程应用效果。

**关键词:**偏置抛物反射面天线; 多波束; 比幅差曲线; 测高范围; 测高精度

**中图分类号:** TN959.1

**文献标识码:** A

常规对空警戒雷达天线以抛物反射面天线为主, 测量目标的两维坐标, 以方位机扫的针状波束测量目标方位, 以发射接收电磁波的时间测量目标的距离。为了进一步获得目标高度信息, 通常需要雷达天线实现仰角面的多波束进行比幅测角, 从而获得目标的高度信息。在考虑地球曲率、大气折射等因素和其它系统的情况下, 对空警戒雷达天线仰角面的接收波束的数量、多个波束的波束指向、波束间的相交状态等常常是影响测高精度和测高范围的重要参量<sup>[1]</sup>, 而综合实现天线的上述参量又与雷达抛物面天线反射面和馈源的电尺寸、空域覆盖范围、测角范围等因素相互影响。建立在以偏置抛物反射面天线形成的多波束的基础上, 本文对影响测高范围和测高精度的因素进行了理论分析并应用于工程实现。

### 1 偏置偏焦抛物面天线多波束设计

偏置抛物反射面天线可减小馈源阻挡, 获取低的方位副瓣; 利用多馈源俯仰方向偏焦可产生堆积多波束, 实现比幅测高功能。与常规旋转对称反射面天线相比, 其馈源坐标系与反射面坐标系不重合而导致多种复杂的坐标关系变换。正焦时俯仰面辐射场( $\varphi = 90^\circ$ 时)<sup>[2]</sup>为

$$F(\theta) = jk_0 \frac{e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \cos \theta \oint E(x, y) e^{jk_0 y \sin \theta} ds \quad (1)$$

当抛物反射面天线馈源偏离焦点时, 其辐射波束指向将发生改变, 以此可形成多波束。常规的偏焦计算方法主要考虑的是偏焦位移较小时相位因子变化对方向图的影响, 而忽略口径面场分布变化

的影响<sup>[2]</sup>。而在需形成多波束的雷达天线中, 馈源的偏移量相对较大, 除了要考虑相位因子的影响, 还需考虑幅度因子以及矢量因子变化引起的影响。假设在  $x, y, z$  3 个方向上的偏移量分别为  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , 则  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ,  $r' = \sqrt{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 + (z - \Delta z)^2}$ 。根据式(1), 偏焦波束的远区辐射场可表示为

$$F(\theta) = jk_0 \frac{e^{-jk_0 R}}{2\pi R} \cos \theta \oint E(x, y) e^{jk_0 y \sin \theta} e^{-jk_0 (r' + \frac{2\pi}{\cos \alpha} - r)} ds \quad (2)$$

式中  $E(x, y) = rE(x, y) / r'$ ,  $z = 0.25(x^2 + y^2) / f - f$ 。

因只需在俯仰面产生多波束, 故可只考虑在  $y$  轴方向和  $z$  轴方向偏焦的情况。设计 4 个以角锥喇叭为馈源, 覆盖空域范围为  $0 \sim 20^\circ$  的波束, 其中波束 1 为正焦波束, 波束 2、3、4 为偏焦波束, 偏焦波束的相对偏焦量分别为  $\Delta y_2 = 0.90\lambda$ ,  $\Delta z_2 = 0.31\lambda$ ,  $\Delta y_3 = 1.87\lambda$ ,  $\Delta z_3 = 0.75\lambda$ ,  $\Delta y_4 = 2.68\lambda$ ,  $\Delta z_4 = 1.38\lambda$ 。

将偏焦波束的相对偏焦量代入式(2), 可求出各单馈源波束的归一化方向图。按高度覆盖要求采用不等功率合成可计算得到合成波束方向图。即

$$F(\theta) = m_1 F_1(\theta) + m_2 F_2(\theta) + m_3 F_3(\theta) + m_4 F_4(\theta) \quad (3)$$

式中  $m_1 = 0 \text{ dB}$ ,  $m_2 = -4.4 \text{ dB}$ ,  $m_3 = -8.2 \text{ dB}$ ,  $m_4 = -9.6 \text{ dB}$ 。

各单馈源波束及合成波束方向图如图 1 所示。

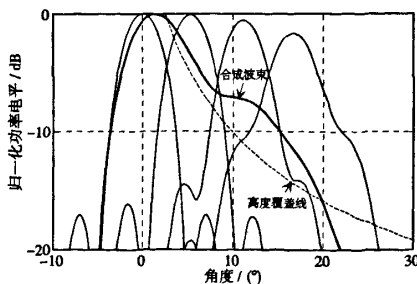


图 1 多波束俯仰面方向图

收稿日期: 2007-12-12; 修订日期: 2008-01-03

作者简介: 郝绍生(1951-), 男, 高级工程师, 主要从事雷达系统监制工作。

图1结果表明:正焦时,波束1最大指向在零点,表示其最大能量传输方向俯仰角为零.偏焦时,波束2、3、4的最大指向均偏离零点,其指向偏离角度随着偏焦距离增加而增大.偏焦时方向图略有畸变,辐射增益亦有所下降.

## 2 天线多波束对测高范围及精度的影响

对于具有测高功能的抛物面堆积多波束天线雷达系统,其测高范围在足够的信噪比条件下,由天线多个相邻波束间的多条比幅差曲线的测角范围叠加表征<sup>[3,4]</sup>;测高精度由比幅差曲线的斜率表征.

根据天线功率方向图仿真结果,其超越函数在波束主瓣区可用最小二乘法构建成为简单的二次曲线函数,取任意两相邻波束,表示为

$$\begin{cases} f_1(\theta) = -\alpha_1(\theta - \theta_1)^2 - G_1 \\ f_2(\theta) = -\alpha_2(\theta - \theta_2)^2 - G_2 \end{cases}$$

式中 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为与波束形状相关的常数因子,当天线口径确定时,各波束形状相当,可近似认为 $\alpha_1 \approx \alpha_2 = \alpha$  ( $\alpha \geq 0$ ).  $G_1$ 、 $G_2$ 为相对于焦点波束的增益差. $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 为偏焦波束相对于焦点波束的指向,令 $\theta_2 > \theta_1$ .对偏置偏焦抛物面天线,偏焦波束的指向 $\theta$ 可通过调整馈源偏焦位移量 $h$ 实现,工程上偏焦波束指向的经验计算公式为

$$\theta = \arcsin \left[ \frac{h/F}{1 + (D/F)^2} \right]$$

式中 $F$ 为抛物反射面的焦距, $D$ 为天线口径.

在对数功率电平状态,天线波束测高比幅差曲线

$$\Delta f(\theta) = f_1(\theta) - f_2(\theta) = \alpha \Delta \theta (\theta_2 + \theta_1 - 2\theta) - \Delta G \quad (4)$$

式中 $\Delta \theta = (\theta_2 - \theta_1)$ 为波束指向差, $\Delta G = G_1 - G_2$ 为相邻波束的增益差.

相交波束必须满足信噪比要求,工程上用波束间的对数功率电平差 $M$ 表示,即 $|\Delta f(\theta)| \leq M$ .由式(4)得

$$\frac{\theta_2 + \theta_1 - \frac{M + \Delta G}{\alpha \Delta \theta}}{2} \leq \theta \leq \frac{\theta_2 + \theta_1 - \frac{M - \Delta G}{\alpha \Delta \theta}}{2}$$

故 $\theta$ 的取值范围为

$$\frac{\theta_2 + \theta_1 + \frac{M - \Delta G}{\alpha \Delta \theta}}{2} - \frac{\theta_2 + \theta_1 - \frac{M + \Delta G}{\alpha \Delta \theta}}{2} = \frac{M}{\alpha \Delta \theta} \quad (5)$$

比幅差曲线斜率

$$\frac{d\Delta f(\theta)}{d\theta} = -2\alpha \Delta \theta \quad (6)$$

设波束2由指向 $\theta_2$ 通过偏焦位移的调整至指向 $\theta_1$ ,

波束变化如图2所示,比幅差曲线如图3所示.

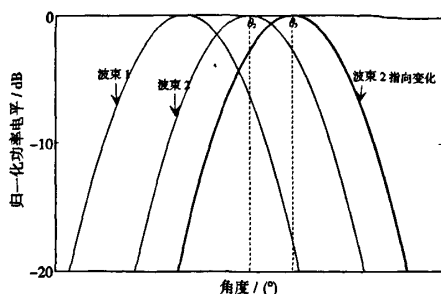


图2 相交波束指向变化

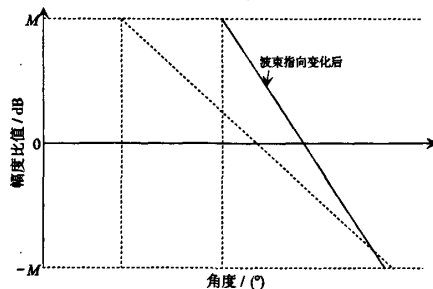


图3 波束指向变化前后的比幅差曲线

由式(5)、式(6)和图3可知,测角范围及精度均为天线相邻波束指向差 $\Delta \theta$ 的函数,波束相隔远,则精度高,但测角范围变窄.反之,则精度低,测角范围变宽.

在堆积多波束抛物反射面天线雷达系统中,测高功能实现要求天线波束间同时满足以下条件:①多条比幅差曲线斜率满足测高精度要求;②相邻比幅差曲线间无测角盲区;③多条比幅差曲线的测角范围满足空域覆盖要求.

设需 $n$ 个波束实现雷达空域覆盖,则存在 $n-1$ 条比幅差曲线;每条比幅差曲线斜率要求小于 $k_j$  ( $k_j < 0, j \in 2, \dots, n$ ).由条件①得

$$\Delta \theta_j \geq -\frac{k_j}{2\alpha} \quad (7)$$

由条件②,相邻比幅差曲线需相互重叠,即

$$\frac{(\Delta \theta_{j+1} - \frac{M + \Delta G_{j+1}}{\alpha \Delta \theta_{j+1}}) + (\Delta \theta_j - \frac{M - \Delta G_j}{\alpha \Delta \theta_j})}{2} \geq 0$$

因各波束增益差较小,故只需

$$\Delta \theta_j \geq \sqrt{\frac{M - \Delta G_j}{\alpha}} \quad (8)$$

由条件③得

$$\theta < \sum_{j=2}^n \frac{M}{\alpha \Delta \theta_j} \quad (9)$$

对空警戒雷达系统中,通常式(8)比式(7)要求更严格.将式(8)代入式(9)中可得到的最大取值范

围为

$$\theta < \sum_{j=2}^n \frac{M}{\sqrt{\alpha(M-\Delta G_j)}} \quad (10)$$

由此可估算空域覆盖条件下天线最少所需的波束数。

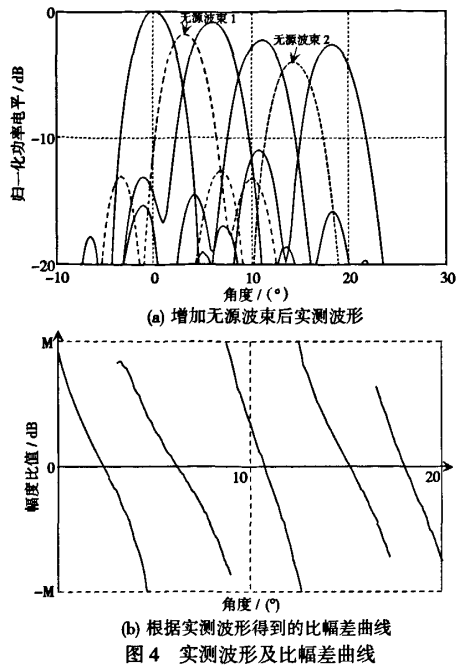
由式(9)可知,雷达全空域测高范围与精度跟波束数 $n$ 及波束相交指向差 $\Delta\theta$ 密切相关。当雷达以少量波束发射合成已满足空域覆盖要求时,各波束指向一般并不满足式(8)的要求,需增加更多的波束数来满足雷达全空域测高的要求。同时,以上构建的二次函数未考虑在波束相隔较远时副瓣参与比幅的状态,此状态将进一步导致单条比幅差曲线测角范围变窄,但可通过增加相邻的比幅差曲线重叠加以弥补<sup>[5]</sup>。

### 3 工程实现

以抛物反射面为天线的双波束两维目标指示雷达,要求将空域覆盖由原 $0 \sim 9^\circ$ 扩展至 $0 \sim 20^\circ$ ,并实现全空域测高。考虑到周期和成本影响,需在不改变天线反射面并保持原有天线性能的情况下实现性能改造,工程实现以更换馈源为解决方案。根据以上分析,工程实现中波束增加过多是不可接受的,不仅使馈源系统分配网络复杂,更重要的是为了满足雷达系统功率容量的要求,形成多波束的各馈源形式和电尺寸受限,当波束偏焦位移 $h$ 确定时,多馈源无法结构组合,各尺寸要求很难相互兼顾<sup>[6-9]</sup>。

为了解决结构安装问题,考虑到雷达系统在接收状态下测高,将发射有源波束馈源采用角锥喇叭实现,与原天线状态相同,满足雷达功率容量要求。而采用无源接收偶极子馈源形成无源波束间插于有源波束间,实现测高范围和精度要求。但偶极子馈源天线后向辐射较大,反射板尺寸又受结构安装限制,所以通过增加引向器的方法来提高天线增益。

图1的分析结果表明采用4个波束即已满足 $20^\circ$ 空域覆盖,但分析其比幅曲线发现存在明显的测高盲区,需增加无源波束。按 $\theta$ 的最大取值范围计算式计算得到波束最少为6个。为了控制波束数量最少,在波束相隔较远测高盲区较大的1、2波束和3、4波束间各增加1个无源波束,此时能同时满足结构安装要求。实测波形及比幅差曲线如图4所示,满足测高范围和精度要求。



### 4 结论

在偏置抛物面天线中,利用多馈源偏焦产生的相移特性可实现堆积多波束,通过合理控制偏焦位移获得多波束间的相交状态进行比幅测高,采用与无源馈源相结合的方式有效地解决了雷达大功率容量和结构安装的矛盾,取得了良好的工程应用效果。

### 参考文献:

- [1] Merrill I Skolnik. 雷达手册[K].王军,林强,等译.北京:电子工业出版社,2003.
- [2] 田瞰,郭陈江.偏焦偏置抛物面天线的辐射特性[J].雷达科学与技术,2004,2(4):247-251.
- [3] 邵余峰.高机动三坐标雷达比幅测高误差分析及修正[J].现代雷达,2007,29(4):79-81.
- [4] 杨春海.比幅测高误差的自动补偿[J].现代电子,2002,(2):6-9.
- [5] SCHRANK H, STUTZMAN W, TERADA M. Design of Offset-Parabolic-Reflector Antenna for Low Cross-Pol and Low Sidelobes [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1993, 35(6): 46-49.
- [6] 林昌禄.天线工程手册[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [7] 卢万铮.天线理论与技术[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [8] 李高升,刘继斌,何建国.抛物面天线馈源偏焦的理论及应用研究[J].雷达与对抗,2004,(3):38-41.
- [9] Warren L Stutzman, Gary A Thiele. Antenna Theory and Design[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.

## Research on the Height-finding of Multiple-beam Parabolic Antennas and Its Implementation

HAO Shao-sheng<sup>1</sup>, WU Zhi-hui<sup>2</sup>, DU Ming-xiao<sup>2</sup>

(1. Airforce Military Representative Office in Huazhong Region, Wuhan 430077, China;

2. Wuhan Binhui Electronic Limited Liability Company, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** The amplitude-comparison height-finding was done by using the intercrossed beams that were generated from the offset-parabolic-reflector antenna whose phase-shift characteristics resulted from the feeding source being off-focused. By analyzing the influences of the intersection state of beams on the range and accuracy of height-finding, selecting properly the form, number and off-focus displacement of feeding sources, the height-finding of warning radar was implemented, which is of significant engineering application.

**Key words:** offset-parabolic-reflector antennas; multiple-beam; curve of amplitude-comparison; range of height finding; accuracy of height finding

(上接第96页)

## Effects of Mutual Coupling and Random Amplitude-phase Errors on Sidelobe Level of Linear Arrays

YANG Zhi-rong<sup>1</sup>, WANG Jian-wu<sup>2</sup>, FU Wen-bin<sup>3</sup>, KAN You-xun<sup>3</sup>

(1. 93897 Unit of the PLA, Xi'an 710061, China; 2. Guilin Air Force Academy, Guilin 541000, China;

3. Department of Electronic Countermeasures, AFRA, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Based on the statistical theory of antenna arrays, the mean power expression of radiation pattern was obtained and the sensitivity coefficient of antenna error was defined when a linear array was fed with the random amplitude-phase errors and its mutual coupling considered. Using the expression, the effects of mutual coupling and random amplitude-phase errors on sidelobes were analyzed in terms of different unit numbers and amplitude weights of linear arrays, and the corresponding numerical results were obtained. By simulation it shows that the sidelobe level change sharply with the scan angle when mutual coupling increasing and the antenna units decreasing, and the amplitude-weight used for attaining the super-low sidelobe makes the antenna much more sensitive to the random amplitude-phase errors.

**Key words:** linear arrays; mutual coupling; random amplitude-phase errors; sidelobe level

(上接第99页)

## Design of Radar Intelligence Transmission System via Computer Network

JIN Jia-geng<sup>1</sup>, DONG Peng-shu<sup>1</sup>, LU Hao<sup>2</sup>, XIE You-cai<sup>1</sup>

(1. Department of Early Warning Detection Equipment, AFRA, Wuhan 430019, China; 2. Division of Training, AFRA, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** It is seen that the plot data and track data are transmitted only in one way and the other radar stations can not share all the data in the radar network currently. For solving this problem, a new kind of radar intelligence transmission system via the computer network of sever/client, was brought about. The corresponding experimental system was done and the satisfactory result was attained.

**Key words:** radar intelligence; network; VC++ language

(上接第102页)

## Analysis of Performance of DS-FH/MSK-based Repeater Jamming

HAN Dong-ping<sup>1</sup>, WANG Min<sup>2</sup>

(1. Department of Graduate Management, AFRA, Wuhan 430019, China; 2. Department of Electronic Countermeasures, AFRA, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of the DS-FH/MSK signal and its key anti-jamming techniques, the feasibility to have the signal repeater jamming was analyzed. And the transmission channel model was established and the error code rate was also analyzed. The simulation results show that the repeater jamming is more efficient than the partial band jamming on the condition that their interference powers are both the same and the time delays properly limited.

**Key words:** DS-FH/MSK; repeater jamming; Rician channel; time delay

## 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>