

## 天线与系统

用多波束提高四喇叭单脉冲天线的搜索性能<sup>\*</sup>

林 岩

(桂林空军学院雷达教研室, 广西桂林 541003)

**【摘要】** 提出了四喇叭单脉冲抛物面天线和多波束抛物面天线共用一个抛物面来提高四喇叭单脉冲抛物面天线的搜索性能。计算了个实例, 该多波束抛物面天线的波束扫描角达  $22.78^\circ$ 、口径直径为  $53.33\lambda$  ( $\lambda = 0.03\text{ m}$ )、馈源方向图为  $\cos\theta$ 、增益比原四喇叭和波束下降  $4\text{ dB}$  左右。

**【关键词】** 抛物面天线; 单脉冲天线; 多波束天线

中图分类号: TN957.2 文献标识码: A

## Scan Performance of Four Horns Mono-pulse Antenna Improved by Multibeam Antenna

LIN Yan

(Guilin Air Force Academy, Guilin 541003, China)

**【Abstract】** Improving scan performance of a mono-pulse antenna by using a multibeam antenna is presented. The  $22.78^\circ$  scan case with  $53.33\lambda$  diameter aperture and a feed radiation pattern of  $\cos\theta$  has a  $4\text{ dB}$  drop of peak gain.

**【Key words】** paraboloid antenna; mono-pulse antenna; multibeam antenna

## 0 引言

单脉冲雷达是一种有效的火力控制雷达, 但某些没有配备较好的宽角搜索天线的单脉冲雷达不能快速发现目标, 会削弱战斗力<sup>[1]</sup>。为此本文对四喇叭单脉冲抛物面天线进行改进, 使其有较宽波束扫描角的搜索波束。

## 1 理论

## 1.1 天线的组成及工作过程

搜索天线由多波束抛物面天线和铁氧体开关组成, 如图1所示。0号喇叭代表单脉冲抛物面天线的四喇叭馈源, 左边的弧线代表抛物面, 1~6号喇叭代表在垂直面内横向偏焦的喇叭馈源(喇叭个数由实际情况而定, 有的喇叭有小的纵向偏焦, 如表1所示)。0~6号喇叭和抛物面组成多波束天线。铁氧体开关依次接通5, 3, 1, 0, 2, 4, 6号喇叭, 每次只要接通一个序号的喇叭(用于收发), 每个喇叭的接通时间为1 s, 多波束天线在水平面内每秒旋转一周, 这样多波束天线在水平面内旋转的同时在垂直面内就可实现宽角搜索。

当单脉冲雷达用于跟踪和用针状波束搜索时, 铁氧体开关断开1~6号喇叭, 只接通0号喇叭, 天线恢

复成普通的四喇叭单脉冲抛物面天线, 只是此时1~6号喇叭的遮挡使天线的增益比原来的四喇叭单脉冲抛物面天线略有下降。

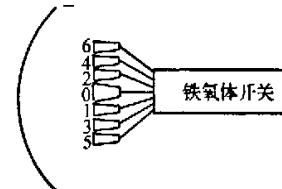


图1 搜索天线示意图

## 1.2 多波束天线的性能

## 1.2.1 一个置于坐标原点的最大辐射方向在z轴方向上的馈源的辐射场

为简化计算, 假设馈源(可等效为点源)圆形口径上只有y方向的电场分量  $E_y$ , 它的方向图是轴对称的, 记为  $F_y(\theta)$

$$F_y(\theta) = \begin{cases} (\cos\theta)^u & 0 \leq \theta \leq \pi/2 \\ 0 & \pi/2 < \theta \leq \pi \end{cases}$$

式中:  $u$  为确定主瓣宽窄的参数;  $\theta$  为场点与馈源最大辐射方向的夹角; 如图2所示。由平面口径远区辐射场计算公式<sup>[2]</sup>, 假设该馈源(放置于坐标原点O)在

\* 收稿日期: 2007-07-24 修订日期: 2007-10-14

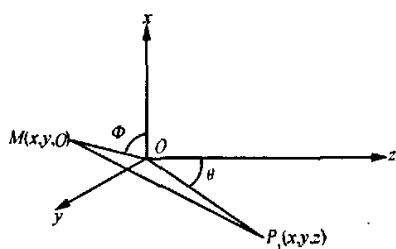


图2 直角坐标和球坐标参数关系图

$P_r(x, y, z)$ 点的辐射场可表示为

$$H(x, y, z) = H_\theta(x, y, z) \dot{e}_\theta + H_\phi(x, y, z) \dot{e}_\phi \quad (1)$$

式中:  $\dot{e}_\theta, \dot{e}_\phi$  是球坐标系的单位矢量;

$$H_\phi(x, y, z) = e^{i(\frac{\pi}{2} - k_r(x, y, z))} \cdot \frac{1}{r(x, y, z)} \cdot \sqrt{\frac{P_t}{W \cdot 4\pi}} \cdot \left(\frac{z}{r(x, y, z)}\right)^u \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \quad (2)$$

$$H_\theta(x, y, z) = -e^{i(\frac{\pi}{2} - k_r(x, y, z))} \cdot \frac{1}{r(x, y, z)} \cdot \sqrt{\frac{P_t}{W \cdot 4\pi}} \cdot \left(\frac{z}{r(x, y, z)}\right)^u \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \quad (3)$$

$$r(x, y, z) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4)$$

其中,  $P_t$  是除  $u$  外决定馈源的辐射功率的参数;  $W = 120 \pi$ ;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  是波长。

$\dot{e}_\theta$  和  $\dot{e}_\phi$  可分别用矢量矩阵表示为

$$\dot{e}_\theta = \left( \begin{array}{c} z \cdot \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} z \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \sqrt{x^2 + y^2} \\ \frac{x}{r(x, y, z)} \frac{y}{r(x, y, z)} \frac{z}{r(x, y, z)} \end{array} \right)^T \quad (5)$$

$$\dot{e}_\phi = \left( \begin{array}{c} -\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} 0 \end{array} \right)^T \quad (6)$$

式中:  $T$  表示对矩阵转置。将式(2)~(6)代入式(1)后, 式(1)等号右边是  $x, y, z$  的函数。

### 1.2.2 一个最大辐射方向偏离 Z 轴方向(在 X0Z 平面内)的馈源的辐射场

求式(1)、式(2)、式(3)表示的馈源绕  $y$  轴逆时针旋转  $\alpha$  角(如图3所示, 馈源的最大辐射方向在  $+Z$  方向)时馈源的辐射场表达式  $H_\alpha(x, y, z)$ 。直角坐标系  $O-XYZ$  是由直角坐标系  $O-X0Z$  绕  $y$  轴逆时针旋转  $\alpha$  角而得。由式(1)

$$H_\alpha(x, y, z) = H(X, Y, Z) = H_\theta(X, Y, Z) \dot{e}_\theta +$$

$$H_\phi(X, Y, Z) \dot{e}_\phi \quad (7)$$

式中:  $\dot{e}_\theta, \dot{e}_\phi$  是对应于直角坐标系  $O-XYZ$  的球坐标系(如图3所示)的单位矢量。由直角坐标系  $O-XYZ$  与直角坐标系  $O-X0Z$  之间的变换关系, 可得

$$H_\theta(X, Y, Z) = H_\theta(-z \cdot \sin\alpha + x \cdot \cos\alpha, y, z \cdot \cos\alpha + x \cdot \sin\alpha) \quad (8)$$

$$H_\phi(X, Y, Z) = H_\phi(-z \cdot \sin\alpha + x \cdot \cos\alpha, y, z \cdot \cos\alpha + x \cdot \sin\alpha) \quad (9)$$

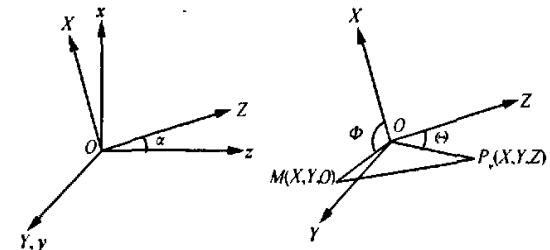


图3 两直角坐标系 o-xyz 和 o-X0Z 的关系图

求  $\dot{e}_\theta, \dot{e}_\phi$  在直角坐标系  $o-xyz$  中的表达式。由球坐标与直角坐标的互换公式

$$\begin{aligned} \Theta &= \arctg \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{Z} + c_1 = \\ &\arctg \frac{\sqrt{(-z\sin\alpha + x\cos\alpha)^2 + y^2}}{z\cos\alpha + x\sin\alpha} + c_1, \\ &(c_1 = 0 \text{ 或 } \pi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \arctg \frac{Y}{X} + c_2 = \arctg \frac{y}{-z\sin\alpha + x\cos\alpha} + c_2 \\ &(c_2 = 0 \text{ 或 } \pi \text{ 或 } 2\pi) \end{aligned}$$

设

$$\begin{aligned} \dot{e}_\theta &= [f_x(x, y, z) \quad f_y(x, y, z) \quad f_z(x, y, z)]^T \\ \dot{e}_\phi &= [g_x(x, y, z) \quad g_y(x, y, z) \quad g_z(x, y, z)]^T \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $T$  表示转置。由文献[3]知

$$\begin{aligned} f_D(x, y, z) &= \frac{\frac{\partial \Theta}{\partial D}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \Theta}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z}\right)^2}} \\ g_D(x, y, z) &= \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial D}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $D$  代表  $x$  或  $y$  或  $z$ 。这样, 将式(8)、式(9)、式(10)、式(11)代入式(7)可求得  $H_\alpha(x, y, z)$ 。

### 1.2.3 多波束天线的特性

本文的多波束天线馈源由式(7)表示的馈源平移至( $d_z, 0, d_z$ )而得。

本文馈源辐射场为  $H_a(x - d_z, y, z - d_z)$  的多波束天线的抛物面反射面  $F(x, y)$  表示为

$$F(x, y) = -\frac{x^2 + y^2}{4f} + f$$

式中  $f$  为焦距, 该反射面的法向矢量为  $N$

$$N = \left( \frac{d}{dx} F(x, y) \quad \frac{d}{dy} F(x, y) - 1 \right)^T \quad (12)$$

$F(x, y)$  上的面电流密度为

$$J_s = \frac{N}{|N|} \times H_a(x - d_z, y, F(x, y) - d_z) \quad (13)$$

反射面  $F(x, y)$  的辐射场的场点  $L$  的球坐标为  $(r_L, \theta_L, \phi_L)$ ,  $\hat{e}_\theta$  和  $\hat{e}_\phi$  在  $L$  点可表示为

$$\begin{aligned} \hat{e}_{\theta L} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_L) \cdot \cos(\phi_L) \\ \cos(\theta_L) \cdot \sin(\phi_L) \\ -\sin(\theta_L) \end{pmatrix} \\ \hat{e}_{\phi L} &= \begin{pmatrix} -\sin(\phi_L) \\ \cos(\phi_L) \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

反射面  $F(x, y)$  的口径面选定为: 它在  $XOY$  平面的投影  $S_0$  为以坐标原点为圆心的圆。远区辐射场的电场强度  $E$  在  $\hat{e}_\theta$  和  $\hat{e}_\phi$  方向的分量为<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} E_\theta &= -\frac{i\omega\mu_0}{4\pi r_L} e^{-ikr_L} \iint_{S_0} J_{\theta L} e^{ikG \cdot R} |N| dx dy \\ E_\phi &= -\frac{i\omega\mu_0}{4\pi r_L} e^{-ikr_L} \iint_{S_0} J_{\phi L} e^{ikG \cdot R} |N| dx dy \end{aligned} \quad (15)$$

式中

$$J_{\theta L} = \mathbf{J}_s \cdot \hat{e}_{\theta L}; \quad J_{\phi L} = \mathbf{J}_s \cdot \hat{e}_{\phi L}$$

$$R = \begin{pmatrix} \sin(\theta_L) \cdot \cos(\phi_L) \\ \sin(\theta_L) \cdot \sin(\phi_L) \\ \cos(\theta_L) \end{pmatrix}; \quad G = \begin{pmatrix} x \\ y \\ F(x, y) \end{pmatrix}$$

选定馈源的  $u=1$ , 波长  $\lambda=0.03$  m, 口径半径  $R=0.8$  m,  $f=0.6$  m, 以下计算结果忽略馈源等的遮挡影响。馈源在各偏焦点的特性如表 1 所示。表 1 中  $(d_z, d_z)$  表示最大增益的偏焦点, 偏角、 $\alpha$  分别表示反射面远区辐射场的最大辐射方向偏离  $-z$  轴的度数和馈源最大辐射方向偏离  $+z$  轴的度数, 当最大辐射方向向上 ( $x>0$ ) 偏移时用正数表示, 当最大辐射方向向下 ( $x$

$<0$ ) 偏移时用负数表示;  $SLL_H$ 、 $2\theta_{0.5H}$  分别表示波束在平面  $y=0$  上的副瓣电平和半功率宽度; 原四喇叭和波束的偏焦点为  $(\pm 8.485 \times 10^{-3}$  m,  $\pm 8.484 \times 10^{-3}$  m)。

从表 1 可看出: 波束扫描角达  $22.78^\circ$  时, 增益比原四喇叭和波束下降  $3.918$  dB。

表 1 多波束天线特性

焦点位置	原四喇叭	$d_z = 0.035$	$d_z = 0.07$	$d_z = 0.105$	$d_z = 0.14$
/m	和波束	$d_z = 0$	$d_z = 0$	$d_z = -0.01$	$d_z = -0.015$
增益/dB	42.456	43.18	41.871	39.833	38.538
偏角/(°)	0	2.72	5.46	8.40	11.39
$SLL_H$ /dB	-20.3	-13.9	-9.7	-8.2	-10.2
$2\theta_{0.5H}$	1.66	1.30	1.46	1.92	2.12
$\alpha$ /(°)	$\pm 0.67$	-2.00	-4.00	-6.50	-9.00

### 1.3 其他战术技术指标

#### 1.3.1 双重战术功能

某型炮瞄雷达加装“多波束天线系统”后该雷达具备了较强的用“3 cm 波段”搜索空中目标的能力。即实现了集搜索与跟踪于一体的双重战术功能。

#### 1.3.2 工作状态转换时间

“搜索天线”与“原天线”两种状态的相互转换时间小于 2 ms。

#### 1.3.3 作用距离

当波束扫描角达  $22.78^\circ$  时, 雷达作用距离由原来的 60 km 下降到 38.2 km。

## 2 结语

由单脉冲抛物面天线的四喇叭馈源和偏焦位置适当的多个馈源以及单脉冲抛物面天线的抛物面组成的多波束天线在本文参数条件下产生  $22.78^\circ$  波束扫描角时增益下降 4 dB 左右, 比同样性能的扇形波束的增益高出许多; 按本文的方案搜索和跟踪只需一个抛物面; 多波束天线在水平面内旋转的同时在垂直面内可实现快速宽角扫描, 大大增强了炮瞄雷达搜索空中目标的能力, 为部队赢得更长的射击准备时间和预警时间。

## 参 考 文 献

- [1] 林瑞平, 员继业, 丁卫安. 用赋形天线提高炮瞄雷达性能 [J]. 火力与指挥控制, 2003, 28 (6): 88-90.
- [2] 魏文元, 宫德明. 天线原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [3] 《数学手册》编写组. 数学手册 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.

林 岩 男, 1964 年生, 副教授。研究方向为电磁场与微波技术。

## 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>