

## 八毫米电扫跟踪天线的波束分析\*

姚德森 赵志中

(国防科学技术大学电子技术系 长沙 410073)

**摘 要** 本文对一种新型的电扫跟踪天线的波束扫描性能进行分析。这是一种在馈源的两层双加脊矩形波导中安装四个 PIN 管以实现波束电扫的抛物面天线。文中从优化参量得到最佳模比。它与所研制天线的实验结果非常一致。表明所研制天线的调试已接近最佳。

**关键词** 电扫描, 跟踪天线

**分类号** TN820.23

## An Analysis 8-mm Band Electrical Scanning-Tracking Antenna

Yao Demiao Zhou Zhizhong

(Department of Electronic Technology, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract**, The properties of the beam scan of a novel electrical scanning-tracking antenna are analysed in this paper. This is a parabolic antenna with a feed, which is composed of four PIN diodes installed in two layers dual-ridge rectangular waveguides. The suitable ratio of modes is obtained from optimum procedures for parameters. Some satisfactory identical results of calculation and experiment are obtained, which shows that thus designed antenna has almost reached perfection.

**Key words** electrical scanning, tracking antenna

作者研制的一种八毫米波段的电扫跟踪天线, 其主反射面为抛物面, 馈源为上、下两层双加脊矩形波导组成的一个方形波导。用控制在上、下脊波导中安装的四个开关二极管的方法, 能成功地实现高低与方位的角跟踪<sup>[1]</sup>。其工作原理简述如下。如图 1 所示, 由标准 8mm 矩形波导, 通过一个渐变角锥波导连接到外形为方形、内为上、下两层双加脊的矩形波导的电扫头上。当 4 个二极管全不通流时为“和”工作状态。脊波导工作模为

\* 国防科工委科技进步一等奖项目  
1995 年 4 月 19 日修订

$H_{10}$ 和 $H_{30}$ 模。上、下两层波导在馈源口面上为等幅同相,因此波束为轴向辐射。当第1、2管通流第3、4管不通流(或反之),则为“高低差”工作状态。这时,上、下波导中仍都工作有 $H_{10}$ 和 $H_{30}$ 模,但上波导中的 $H_{10}+H_{30}$ 和

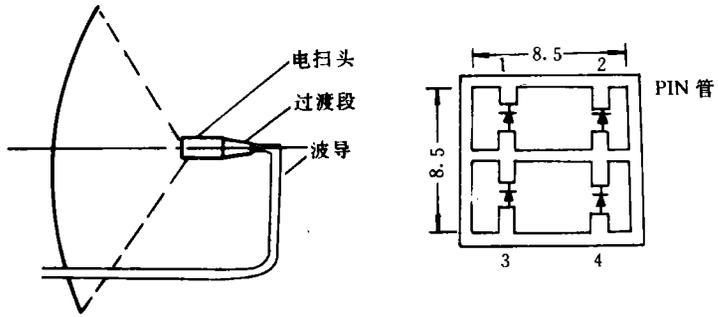


图1 系统结构示意图

下波导中的 $H_{10}+H_{30}$ 的振幅和相位不同,形成辐射波束的高低方向偏转。若第1、3管通流,第2、4管不通流(或反之),则为“方位差”工作状态。这时上、下波导中均工作有等幅同相的一对 $H_{10}+H_{30}+H_{20}$ 模。利用 $H_{20}$ 模的奇对称性,使辐射波束向左、右偏转。见图2。

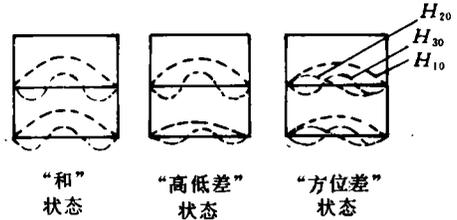


图2 口径面各模示意图

本文主要分析 $H_{10}$ 、 $H_{20}$ 、 $H_{30}$ 模的模比及上、下两波导间的幅、相差对天线主波束的影响,优化参量以达到偏转的最佳要求。优化约束条件为:1)波束宽度 $\theta_{0.5}=4.5^\circ$ ;2)交叉电平:  $-1.5\text{dB}$ ;3)最大旁瓣电平 $SL_m \leq -18\text{dB}$ 。

## 1 馈源的远区辐射场

下面讨论和波束、方位差波束、高低差波束三种情况。

### 1.1 和波束状态

这种状态,4个二极管均不通流。馈源在 $H_{10}$ 模激励下。上、下两层波导中均工作有 $H_{10}$ 和 $H_{30}$ 偶对称模。此外,尚有无数偶对称的高次衰减模。后者构成馈源口面近区的电抗场。对于仅研究远区场而言,只需考虑 $H_{10}$ 和 $H_{30}$ 模的辐射。由于和状态上、下两层口径的辐射完全相同,所以可只考虑一半口径,然后用迭加原理相加。

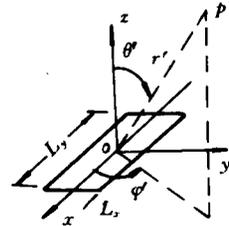


图3 坐标系

设坐标系如图3所示。球坐标为 $(r', \theta', \phi')$ ,则和状态馈源的远区辐射场不难导出为

$$E_p(\theta', \phi') = AE_0 S \frac{\sin 2u_y}{u_y} \left[ \frac{\cos u_x}{1 - \left(\frac{2}{\pi} u_x\right)^2} + \frac{m_{30}}{3} e^{j\theta_{30}} \frac{\cos \frac{u_x}{3}}{1 - \left(\frac{2u_x}{3\pi}\right)^2} \left( 2 \cos \frac{2u_x}{3} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $m_{30} e^{j\theta_{30}}$ 为 $H_{30}$ 模相对于 $H_{10}$ 模的模比;  $u_x = \frac{1}{2} k L_x \sin \theta' \cos \phi'$ ;  $u_y = \frac{1}{2} k L_y \sin \theta' \sin \phi'$ ;  $A = j(1 + \cos \theta') e^{-jkr'} / 2\lambda r'$ ;  $S = L_x \cdot L_y$ 。

### 1.2 高低差波束状态

设上波导中二极管1、2通流,下波导中二极管3、4不通流。这时,上波导中二极

管呈感性，下波导中二极管呈容性，且因通流管子的损耗比不通流的大，所以上波导中  $H_{10}$ 、 $H_{30}$  模的振幅比下波导中要小。这种上、下波导中场的幅、相差，就导致辐射波束的上、下偏转。设下波导口场强幅度为 1，相位为 0，上波导口场强幅度为  $m_2$ ，相位为  $\phi_2$  ( $m_2 < 1$ )。上、下波导构成一个不等幅的二元阵。阵函数为

$$m_2 e^{j\phi_2} e^{j(1/2)kd\cos\eta} + e^{-j(1/2)kd\cos\eta}$$

式中  $\cos\eta = \sin\theta' \cos\phi'$ ， $d \approx L_y$ 。

上、下波导总的辐射场为：

$$E_p(\theta', \phi') = AE_0 S \frac{\sin u_y}{u_y} \left[ \frac{\cos u_x}{1 - \left(\frac{2u_x}{\pi}\right)^2} + \frac{m_{30} e^{j\phi_{30}}}{3} \frac{\cos \frac{u_x}{3}}{1 - \left(\frac{2u_x}{3\pi}\right)^2} \left(2\cos \frac{2u_x}{3} - 1\right) \right] \cdot (e^{-j(1/2)kd\cos\eta} + m_2 e^{j\phi_2} e^{j(1/2)kd\cos\eta}) \quad (2)$$

### 1.3 方位差波束状态

右边（或左边）一对二极管通流，而左边（或右边）一对二极管不通流，使波导中结构沿  $y$  轴左右不对称，将激发无数奇对称高次模，其中仅  $H_{20}$  模可以传输。对远区辐射场，只要考虑  $H_{10}$ 、 $H_{30}$  和  $H_{20}$  模。设  $H_{30}$ 、 $H_{20}$  模以  $H_{10}$  模归一的模比分别为  $m_{30} e^{j\phi_{30}}$ 、 $m_{20} e^{j\phi_{20}}$ 。上、下波导一起构成一个等幅同相二元阵。总辐射场为：

$$E_p(\theta', \phi') = AE_0 S \frac{\sin 2u_y}{u_y} \left[ \frac{\cos u_x}{1 - \left(\frac{2u_x}{\pi}\right)^2} + \frac{m_{30} e^{j\phi_{30}}}{3} \frac{\cos \frac{u_x}{3}}{1 - \left(\frac{2u_x}{3\pi}\right)^2} \left(2\cos \frac{2u_x}{3} - 1\right) + \frac{m_{20} e^{j\phi_{20}}}{2} \cdot \frac{\sin u_x}{1 - \left(\frac{u_x}{\pi}\right)^2} \right] \quad (3)$$

## 2 天线的远区辐射场

从上面求得的馈源辐射场公式(1)~(3)出发，用几何光学方法导出抛物面天线的口径场  $E_y(R, \phi')$  的公式，然后代入平面口径场绕射公式

$$E(\theta, \phi) = A_0 \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} E_y(R, \phi') e^{jkR\sin\theta\cos(\phi-\phi')} R dR d\phi' \quad (4)$$

就可得抛物面天线的远区场。式(4)中， $R_0$  为抛物面半径，馈源坐标系为  $(r', \theta', \phi')$ ，天线辐射场的坐标系为  $(r, \theta, \phi)$

$$A_0 = \frac{e^{-jkr}}{2\lambda r} (1 + \cos\theta), \quad R = r' \sin\theta'$$

$$\theta' = 2\arctg \frac{R}{2f}, \quad f \text{ 为抛物面焦距}$$

将三种不同状态（和，高低差，方位差）所得的不同的  $E_y(R, \phi')$  代入式(4)中，尔后应用多因素优化的正交表方法，对式(4)进行寻优计算。优化目标参量为：1) 波束宽度  $\theta_{0.5} = 4.5^\circ$ ；2) 交叉电平 = -1.5dB；3)  $SL_{\max} \leq -18\text{dB}$ 。

### 3 正交表法原理及其在本问题中的应用

#### 3.1 基本原理及性质

正交表是一种规范化了的表格<sup>[2]</sup>用来指导试验。将它用于多因素试验设计中,可用最少试验次数取得优良结果。它是根据均衡分布的原理,运用组合数学构造的一种数表。例如表  $L_9(3^4)$  表示四因素三位级的课题作 9 次试验,就可得优化结果。正交表的基本性质为:

(1) 正交性:正交性是均衡分布的数学思想在正交表中的实际体现。表现为:(a)在表的任一系列中各水平(位级)都出现,且出现的次数相等。(b)任何两列之间各种不同水平的所有可能组合都出现,且出现次数相等。

(2) 代表性:(a)由于任一系列中各水平都出现,使得部分试验包含所有因素的所有水平。(b)由任两列间不同水平的所有组合都出现,使得任意两因素间都是全面试验,因此部分试验中,所有因素的所有水平信息及两两因素间的所有水平的组合信息无一遗漏。这样,虽然正交表安排的只是部分试验,但却能够了解全面试验的情况。另一方面,由于正交表的正交性,部分试验的试验点必然均衡地分布在全面的试验点中,而且有很强的代表性。因此部分试验的优化结果与全面试验的优化结果应有一致的趋势。

(3) 综合可比性。由于在正交表的正交性中,任一系列中各水平出现的次数都相等,及任两列间所有可能的组合出现的次数都相等,因此使得任一因素各水平的试验条件都相同。这就保证了在各列因素的各个水平的试验结果中最大限度地排除了其他因素的干扰,从而有可能综合比较该因素不同水平对实验指标的影响。

#### 3.2 在本问题中的应用

本问题中,在馈源和抛物面的辐射公式中都含有 4 个待定参数:  $m_{30}$ ,  $\phi_{30}$ ,  $m_{20}$  (或  $m_2$ ),  $\phi_{20}$  (或  $\phi_2$ ), 因此可采用四因素三位级正交表  $L_9(3^4)$ 。

由于本问题处理结果的大批数据,要通过多个性能指标(交叉电平,第一副瓣电平,

表 1 正交表位级

试 验 号	因 素				实验结果
	一	二	三	四	
1	1	1	3	2	$F_1$
2	2	1	1	1	$F_2$
3	3	1	2	3	$F_3$
4	1	2	2	1	$F_4$
$L_9(3^4)$ 5	2	2	3	3	$F_5$
6	3	2	1	2	$F_6$
7	1	3	1	3	$F_7$
8	2	3	2	2	$F_8$
9	3	3	3	1	$F_9$
位级 I 三次结果之和	$F_1+F_4+F_7$	$F_1+F_2+F_3$	$F_2+F_6+F_7$	$F_2+F_4+F_9$	
位级 II 三次结果之和	$F_2+F_5+F_8$	$F_4+F_5+F_6$	$F_3+F_4+F_8$	$F_1+F_6+F_8$	
位级 III 三次结果之和	$F_3+F_6+F_9$	$F_7+F_8+F_9$	$F_1+F_5+F_9$	$F_3+F_5+F_7$	

波束宽度，偏转角度)来衡量，而且不同的指标间常出现矛盾。因此对处理结果采用综合评分的方法。对每一号试验，参照多个指标，进行综合评定，给出综合评分，化成单一的定量指标，然后再进行选择处理。

各因素的位级 I 为： $m_{30}-\Delta_1$ ， $m_{20}-\Delta_2$ ， $\phi_{30}-\Delta_3$ ， $\phi_{20}-\Delta_4$ 。各因素的位级 II 为： $m_{30}$ ， $m_{20}$ ， $\phi_{30}$ ， $\phi_{20}$ 。各因素的位级 III 为： $m_{30}+\Delta_1$ ， $m_{20}+\Delta_2$ ， $\phi_{30}+\Delta_3$ ， $\phi_{20}+\Delta_4$ ，其中  $\Delta_i$  为偏移量。各因素的各位级的总分分别记在表  $L_9(3^4)$  下部。某因素的某位数总分高，此位级即是此因素的最优位级。

#### 4 计算与实验结果

对公式(4)采用上述多因素优化的正交表设计方法，进行寻优计算。用四因素的正交表原理优化结果为：

1. 对高低差波束，得初级方向图的最佳参数为  $m_{30}=0.225$ ， $m_2=0.168$ ， $\phi_{30}=0.375$ ， $\phi_2=1.7$ 。用此参数作初值计算抛物面天线的辐射方向图，并进一步以次级方向图的旁瓣电平、交叉电平、波束宽度要求，为标准再次寻优，最终的优化参数为：

$$m_{30} = 0.2, m_2 = 0.16, \phi_{30} = 0.3, \phi_2 = 2.333$$

所得次数方向图见图 4。

2. 对方位差波束用同样顺序多次寻优，最终得：

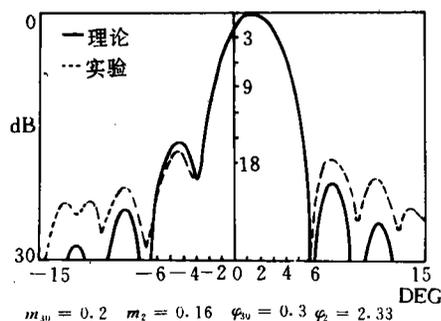


图 4 高低(E)差方向图

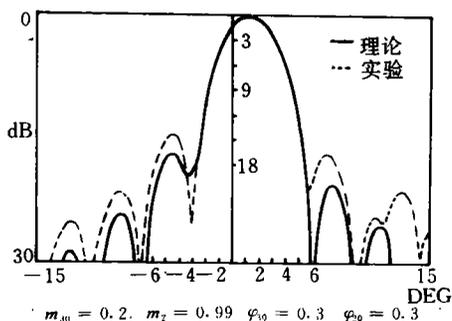
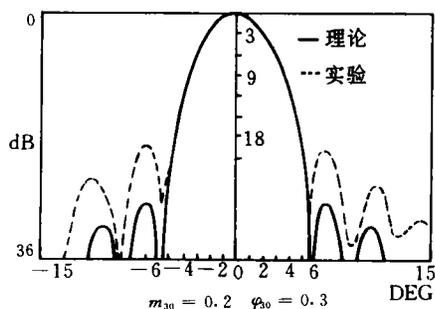
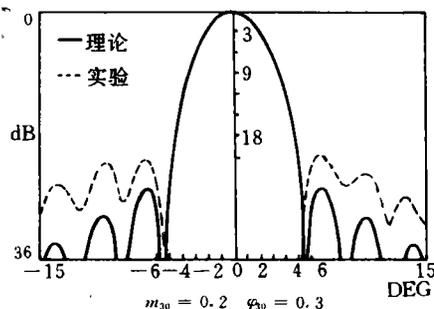


图 5 方位(H)差方向图



(a) H 面和方向图



(b) E 面和方向图

图 6 和方向图

$$m_{30} = 0.2, m_{20} = 0.99, \phi_{30} = 0.3, \phi_{20} = 0.3$$

所得次级方向图见图 5。

3. 对于和波束的次级方向图,只要在高低差波束计算程序中令  $m_2=1, \phi_2=0$ ,即可得  $E$  面和方向图,即  $m_{30}=0.2, m_2=0, \phi_{30}=0.3, \phi_2=0$ 。若在方位差计算中,令  $m_{20}=\phi_{20}=0$ ,即可求得  $H$  面和方向图,即  $m_{30}=0.2, m_{20}=0, \phi_{30}=0.3, \phi_{20}=0$ 。和波束方向图见图 6。

上述方向图计算中所取频率为  $f_0=35.2\text{GHz}$ ,馈源口径为  $8.5\times 8.5\text{mm}^2$ ,抛物面口径  $D=135\text{mm}$ ,  $f=68\text{mm}$ 。按同样尺寸设计并研制成功的天线在毫米波暗室中测试了全部性能参数<sup>[1]</sup>。取  $f_0=35.2\text{GHz}$  的一组典型方向图,同时画在相应的计算图中。从计算和实测的方向图可知,二者在主波束内非常吻合;波束宽度、偏转电平、零点位置等均十分一致;旁瓣电平因边缘绕射、支架等影响,实测比计算要差些。从比较说明,所研制的天线在波导脊高、脊位置、二极管安装位置等方面均已接近最佳。

## 参 考 文 献

- 1 姚德森、毛钧杰、张 钧等,新型八毫米电扫跟踪天线. 国防科技大学学报, 1996, 18(1)
- 2 中国现场统计研究会. 正交法和三次设计. 北京: 科学出版社

(责任编辑 潘 生)