

任意扫描空域中相控阵的优化计算*

谭怀英 刘克成 何建国

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘要 本文研究在任意扫描空域中, 确定相控阵最佳单元间距和倾角的方法, 编制出了相应的计算程序, 自动优化计算和作图, 改变了以往手工作图的方式, 计算简便, 精度高。

关键词 相控阵, 栅瓣, 方向余弦平面

分类号 TN820

The Optimizing Calculation of the Phased Array in Any Scanning Space

Tan Huaiying Liu Kecheng He Jianguo

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

Abstract In this paper, we've discussed the methods of deciding the optimal spacing between elements and the oblique angle of the phased array antennas. Instead of drawing only by hands, we design a program, which can be used for optimizing calculation and drawing automatically. Furthermore, it's simple and of high precision.

Key words phased array, grating lobe, directional cosine plane

相控阵研究的一个重要问题是抑制栅瓣。扫描空域不同, 栅瓣出现的方式也不同。通常希望相控阵用最少的阵元, 而能获得最大扫描空域, 这就需要对阵单元间距, 单元排列格子(阵格子)和阵面倾斜作精确设计计算。一般讲, 一个平面相控阵扫描范围不超过 $\pm 60^\circ$; 否则相控阵宽角失配, 增益降低, 波束性能变劣。通常地面相控阵雷达要用3~4个阵面覆盖整个上半空间, 即每个阵元方位覆盖 $90^\circ \sim 120^\circ$; 俯仰覆盖 $0^\circ \sim 90^\circ$ 为此阵面需要倾斜, 以减小最大扫描角, 如图1所示。

有关相控阵的论述很多, 对栅瓣位置确定及抑制问题均进行过讨论。但只讨论过以阵法线方向为准的对称扫描情况, 而对相控阵设计时遇到的实际扫描空域(相控阵平面与坐标平面存在夹角 θ , 要求不对称扫描)尚未进行过具体论证。且以往设计依靠人工作图, 过程复杂, 精度不高。本文给出一计算程序, 通过对阵格子及单元间距的优化选取, 大大缩短了该问题计算过程, 使问题的解决实现了从人工作图到计算机程序的转变。

1 方向余弦平面和栅瓣图

为形象表示扫描条件下栅瓣在可见空间的出现, 可利用方向余弦平面的概念。因为空间某一点单位矢量 \hat{r} 对应一组沿直角坐标轴的方向余弦, 依次为 $\cos\alpha_x$ 、 $\cos\alpha_y$ 、 $\cos\alpha_z$,

且 $\cos^2\alpha_x + \cos^2\alpha_y + \cos^2\alpha_z = 1$, 见图2。

* 国防预研基金项目资助
1997年11月20日收稿
第一作者: 谭怀英, 男, 1974年生, 硕士生

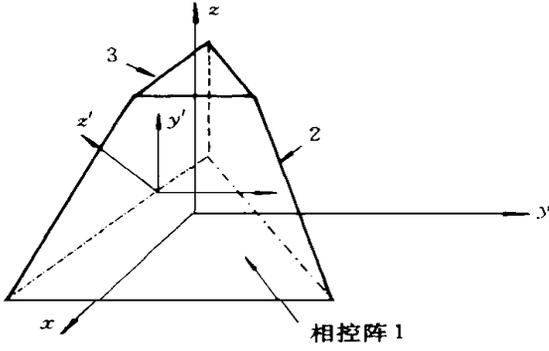


图1

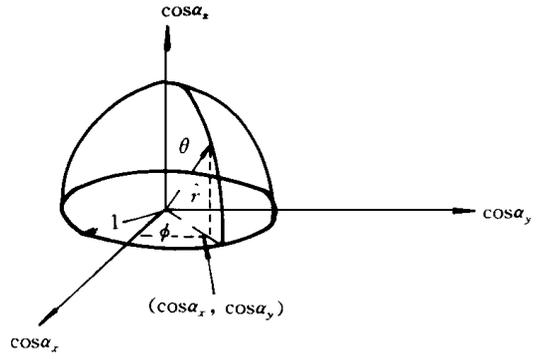


图2

由图知
$$\begin{cases} \cos \alpha_x = \sin \theta \cos \phi \\ \cos \alpha_y = \sin \theta \sin \phi \end{cases} \quad (1)$$

并有
$$\begin{cases} \cos \alpha_x = \cos \alpha_{x0} + \frac{\lambda}{D_x} m & m = 0, 1, 2, \dots \\ \cos \alpha_y = \cos \alpha_{y0} + \frac{\lambda}{D_y} n & n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2)$$

式(2)右端第一项表示初始馈电相位提供的波束扫描位置,第二项是周期量,表示可能出现的栅瓣,见图3(图中单位圆代表空间可见区域)。

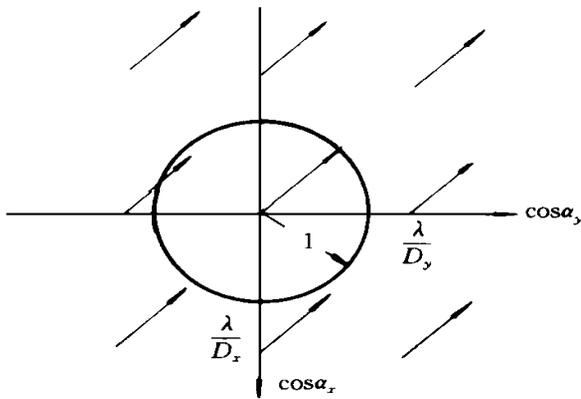


图3

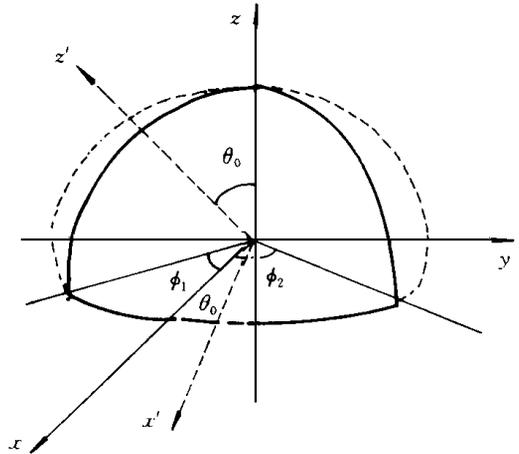


图4

从式(2)知,初始馈电相位确定了主瓣的扫描轨迹,并且扫描时,在方向余弦平面上的主、栅瓣矢径将画出相同的轨迹。把原点与栅瓣扫描轨迹上的一点相连,设其距离为d。若d>1,则栅瓣在单位圆外,即栅瓣未进入可见空间;反之,若d<1,则栅瓣进入可见空间,此时需要适当减小阵元间距,使栅瓣位于单位圆外。

2 实际扫描空域的栅瓣图

通常扫描空域都是在以大地为基准,以天顶方向为z轴的xyz坐标系下考虑的,但是扫描空域投影形成的方向余弦平面却是相对于阵平面而言的,实际中的阵平面对地面是倾斜的,为此需要通过坐标变换,建立新的xyz坐标系,以阵平面法向为z向,求解在xyz坐标系下的方向余弦平面。

如图4,阵平面发生倾斜,绕y轴旋转了theta_0角,即在xoz平面上,z轴旋转theta_0角到z'轴,x轴旋转theta_0角到x'轴,构成新的坐标系x'y'z'。

新坐标系下的方向余弦平面与原坐标系下的方向余弦平面有一变换关系, 用矩阵表示如下

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha_x \\ \cos\alpha_y \\ \cos\alpha_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & 0 & -\sin\theta_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_0 & 0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_x \\ \cos\alpha_y \\ \cos\alpha_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

同样满足

$$\cos^2\alpha_x + \cos^2\alpha_y + \cos^2\alpha_z = 1 \quad (4)$$

此即为实际问题中考虑栅瓣抑制的依据。经过坐标变换, 便可在坐标系 $x y z$ 下运用前节所述理论解决实际问题。下面以实例说明:

扫描空域 $\phi = \pm 45^\circ$; $\theta_1 = 20^\circ$; $\theta_2 = 90^\circ$; 阵倾角 $\theta_0 = 55^\circ$; 其在方向余弦平面图下的主、栅瓣扫描轮廓线如图5所示。由于扫描轮廓线关于 k_y 轴对称 (但关于 k_x 轴不一定对称), 故分析时仅考虑图中上 (下) 半部分即可。

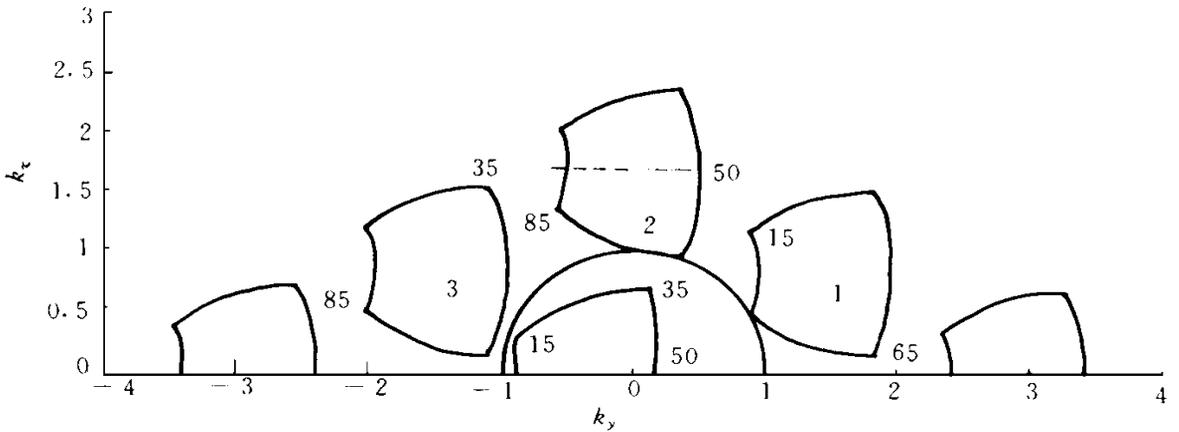


图5

3 计算程序

为得到相控阵的最佳设计, 我们编制了一计算程序, 其思想如下:

首先求出倾斜相控阵在其方向余弦平面 $k_x \sim k_y$ 上的扫描空域边缘轮廓线。由于计算机只能就离散点进行计算, 因此, 需将该轮廓线离散成点, 若以3为间隔, 将得到100个点, 如图5所示。

主、栅瓣扫描轮廓线求出后, 再运用计算程序检测栅瓣是否可见, 即栅瓣是否将出现在单位圆内。连接原点与栅瓣扫描轮廓线上各点, 求得距离 d , $d > 1$, 则栅瓣不可见。事实上, 并不需对栅瓣扫描轮廓线上各点均进行计算, 只要栅瓣扫描轮廓线的拐角部分不进入单位圆, 则栅瓣便是不可见的。

例如: 见图5, 对栅瓣1, 只需考虑点65~15; 对栅瓣2, 只需考虑点50~85; 对栅瓣3, 只需考虑点35~85, 这样将会大大减少计算量, 但已足以满足判断要求。

上述讨论是在阵平面倾角 θ 一定的情况下考虑的。事实上, 阵平面倾角 θ 对方向余弦平面上的扫描范围有很大影响, 倾角 θ 不仅影响扫描空域在方向余弦平面上的投影范围, 而且也影响其形状。例如: 图6所示扫描空域在方向余弦平面上的投影, 当 $\theta = 80^\circ$ 时为图形1, 当 $\theta = 35^\circ$ 时, 为图形2。因此, 不断改变 θ , 扫描空域在方向余弦平面上的投影也改变, 便需不断重复前述的计算。

通过上述分析, 我们看到, 扫描空域给定后, 阵平面倾角 θ 、栅瓣1位置 $(0, y_1)$ 中 y_1 、栅瓣2位置 $(x_2, y_1/2)$ 中 x_2 是三个变量。所谓相控阵的最佳设计, 是指在相同面积内, 用最少的阵元, 却仍可保证无可见栅瓣出现。为得到最佳设计, 需要选择合适的 θ, y_1, x_2 , 使 $y_1 \times x_2 = \min$ 。即对应实际阵元间距 a, b 来说, 使得 $a \times b = \max$ 。为此, 我们采用最优化算法, 来得到 θ, y_1, x_2 的最佳值。若该问题对变量不作任何要求, 即为无约束问题, 采用 Newton 迭代法求解; 若问题对变量有所约束, 即为约束问

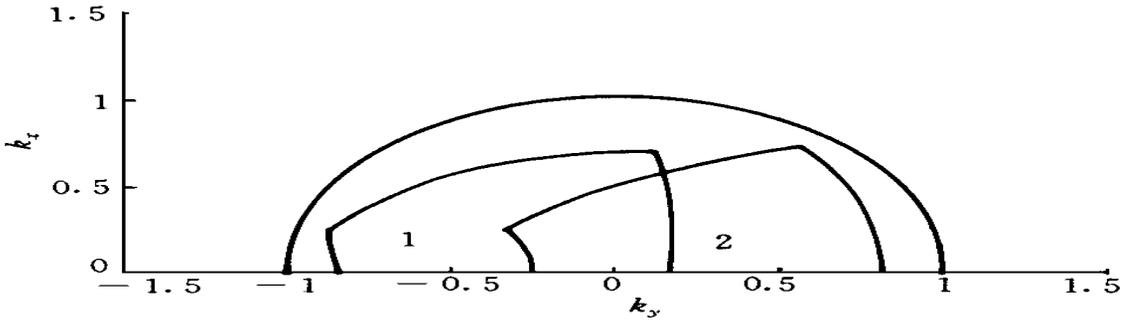


图6

题, 例如对一给定截止频率为 f_c 的波导, 波导尺寸受 f_c 影响, 则 y_1 、 x_2 必然受波导尺寸的限制, 需采用乘子法求解。

4 计算实例

选取 $\phi = \pm 45^\circ$; $\theta = 20^\circ$; $\theta = 90^\circ$; 经过计算机计算, 得到表1结果。

表1 计算结果

θ	45°	50°	51°	54°	55°	57°	60°	70°
y_1	1. 64	1. 655	1. 658	1. 665	1. 67	1. 675	1. 68	1. 695
x_2	1. 565	1. 502	1. 49	1. 455	1. 44	1. 46	1. 495	1. 598
a/λ	0. 6097	0. 6042	0. 6031	0. 6006	0. 5988	0. 597	0. 595	0. 5899
b/λ	0. 3195	0. 3329	0. 3356	0. 3436	0. 3472	0. 3424	0. 3344	0. 3129
$a b/\lambda^2$	0. 1948	0. 2011	0. 2024	0. 2064	0. 2079	0. 2045	0. 1991	0. 1846

可见, 阵平面倾角 θ 的改变, 将影响到扫描空域的投影范围, 从而 y_1 、 x_2 的最优值选取也有所改变, 验证了前述理论。由表可见, θ 为 55° 左右, $y_1 = 1.67$, $x_2 = 1.44$, $a \times b = \max$ 达到最佳。

参考文献

- 1 Zaisteve E F. MM-wave Integrated Phased Arrays with Ferrite Control. IEEE Trans. Antennas Propat, 1994, 42
- 2 Stern R A et al. Scanning Phased Array. U. S. Patent 4785304 Nov. 1986, 20
- 3 Steyskal H, Herd J S. Mutual Coupling Compensation in Small Array Antennas. IEEE Trans. Antennas Propat, Dec. 1990, 38
- 4 Maillonx R J. Phased Array Theory and Technology. IEEE Trans. Antennas Propat Aug. 1990, 38
- 5 Chang D E, Huang C I, Huang W K. Development of X-band space fed phased array antenna system. IEEE Trans. Antennas Propat May 1990, 38