

### 一种阵列天线的波束赋形设计

张前悦, 王光明, 夏冬玉, 张晨新

(空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘要: 对俯仰面波束需要赋形的阵列天线进行了分析和设计。采用数值方法对阵列天线的方向图进行了综合, 将平均偏差用于目标函数的构造之中, 同时结合工程实际, 给出了约束条件。通过优化目标函数, 得到所需的单元馈电电流。天线的实测方向图完全符合赋形波束的要求, 表明该设计方法是可行的。

关键词: 阵列天线; 波束赋形; 平均偏差

中图分类号: TN015 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)05-0053-03

现要设计一套矩形平面阵列天线, 其俯仰面波束在  $0^\circ - 40^\circ$  内要按给定的数据赋形, 且天线增益值要大于所给的数据值。由于矩形平面阵列天线的电流分布是可分离型的<sup>[1,2]</sup>, 即天线俯仰面方向图仅取决于所在列的电流分布, 所以在天线方向综合时, 就可以把行、列电流分开来单独考虑, 平面阵的方向图综合简化为直线阵的综合。该波束的赋形设计不同于普通的低副瓣、等副瓣等设计, 没有现成的电流分布公式, 只能根据赋形要求, 选用合适的方法来解决。在该天线的赋形设计中, 我们采用了一种新的数值方法。

## 1 设计方法

阵列天线的列方向上分布有4个辐射单元, 如图1所示。辐射单元采用微带印刷振子结构。在天线单元形式和间距确定的情况下, 其方向图仅由各单元馈电的幅度和相位决定。采用数值方法来优化列上的激励电流的幅度和相位, 使天线阵列的俯仰面方向图在要求的范围内与赋形要求的形状相似, 同时每一点处的值必须大于给定的数值。由于要考虑到馈电网络的可实现性和天线总体增益不因赋形而有较大损失等问题, 天线的赋形问题实际上是一个带有约束条件的最优化问题<sup>[3,4]</sup>。

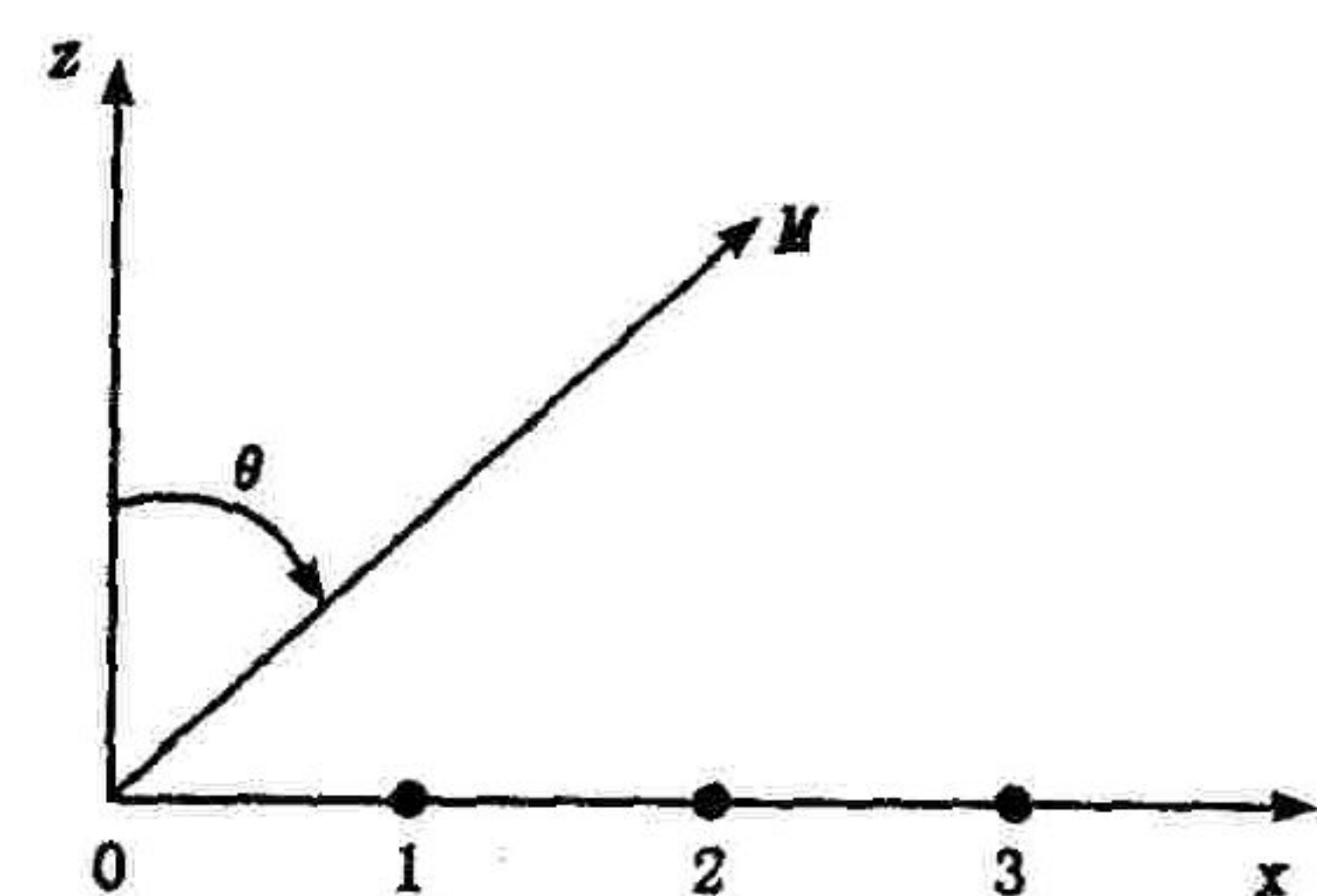


图1 天线单元分布

### 1.1 设置优化变量

为便于叙述, 把列馈上的单元自左至右编号分别为0、1、2和3, 并令0单元上的激励幅度为1, 相位为  $0^\circ$ 。分别用  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$  来表示单元1、2、3的激励幅度, 用  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  来表示单元1、2、3的激励相位。同时, 天线系统有损耗, 此处计算方向图的数据为方向性系数, 所以优化出的方向性系数必须整体超前赋形要求方向图一个值, 令其为  $b$ 。现在共有7个变量, 即  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  和  $b$ 。

### 1.2 确立目标函数

由于天线阵面上各单元激励可用6个变量( $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ )表示出来(天线方位面内的单元激励已确定, 单元形式和位置也确定), 对激励幅度归一化后, 按文献[1]可以求出天线俯仰面方向图。简单表示为

$$f(\theta) = f(\theta, I_1, I_2, I_3, a_1, a_2, a_3) \quad (1)$$

收稿日期: 2005-09-20

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2003AA05044)

作者简介: 张前悦(1978-), 男, 安徽六安人, 博士生, 主要从事电磁辐射与散射和微波电路CAD研究;

王光明(1964-), 男, 安徽砀山人, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁辐射与散射和微波电路与系统研究。

上式表示天线高低角方向图  $f(\theta)$  是与变量  $I_1, I_2, I_3, a_1, a_2, a_3$  和俯仰角  $\theta$  相关的函数。用表达式  $fx(\theta)$  ( $0^\circ \leq \theta < 40^\circ$ ) 来表示赋形要求的方向图。根据定义<sup>[5]</sup>, 平均偏差的基本公式为

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i |x_i - \bar{x}|$$

稍作变化, 取  $f_i = |x_i - \bar{x}|, x_i - \bar{x} = f(i) - (fx(i) + b)$ , 于是得到:

$$MD = \frac{1}{40} \sum_{\theta=0}^{39} [f(\theta) - fx(\theta) - b]^2 \quad (2)$$

$$PF = -1\,000 \sum_{\theta=0}^{39} [\text{sign}(f(\theta) - fx(\theta) - b) - 1] \quad (3)$$

$$OF = MD + PF \quad (4)$$

$$\text{其中: } \text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

式(4)即为建立的目标函数。优化求解目标函数 OF 的最小值  $\min(OF)$ , 可以保证计算的方向图与赋形要求的方向图形状一致。若计算出的方向性系数  $f(\theta)$  不能大于  $fx(\theta) + b$  时, 则惩罚函数 PF 值为正值(1 000 或 2 000), 此时目标函数 OF 不可能取得最小值从而程序会再次优化, 直到惩罚函数  $PF = 0$ , 这样就可以保证天线的增益大于赋形要求的值。

### 1.3 附加约束条件

对于并联馈电的  $4 \times 6$  微带天线阵来说, 其工作效率在 65% 左右<sup>[2]</sup>, 即天线系统的损耗约为 1.9 dB。这里, 我们取  $b$  大于 2 dB。即

$$b > 2 \quad (5)$$

用微带功分电路来实现对单元的馈电, 其功分比是受到限制的<sup>[6]</sup>。对聚酰亚胺双面覆铜板 ( $h = 1.5$  mm,  $\epsilon_r = 4.1$ ) 来说, 功分电路的功分比一般不要大于 4, 即

$$0.5 \leq I_i \leq 2 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

同时, 要保证天线的增益不会有较大损失, 对相位  $a_1, a_2, a_3$  也有要求, 即

$$-15 \leq a_i \leq 30 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式(5)、(6)和(7)就是目标函数的约束条件。

### 1.4 编程优化

编程的任务就是求目标函数(4)在约束条件(5)、(6)、(7)下的最小值, 同时返还在取得最小值时各变量的取值。程序是用 Mathcad 软件来实现的。根据优化结果, 适当调整约束条件, 多次优化, 直到得到满意的结果为止。通过优化, 得到列电流激励幅度和相位分布值, 如表 1 所示。

表 1 列电流激励幅度和相位分布

$I_1$	$I_2$	$I_3$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
1.1	1.815	1.25	$12^\circ$	$23^\circ$	$-10^\circ$

## 2 设计制作

对设计的天线进行了实测, 其俯仰面的方向图如图 2 所示。同时, 在图 2 中还给出了天线的俯仰面仿真方向图, 通过对比可见, 仿真结果与实测结果基本一致, 两者在副瓣上的一些差别主要是由于单元间的互耦影响产生的。在设计中, 单元间距取为  $0.53\lambda$ , 此时, 单元间存在一定的互耦影响<sup>[7]</sup>。此外, 由于加工误差, 造成馈电网络提供的激励幅度和相位与设计值有一定的偏差, 这也是仿真与实测方向图在副瓣上有一些差别的原因。

为便于相互比较, 分析赋形设计的结果, 在图 3 中列出了天线实测方向图、天线赋形仿真方向图、均匀直线阵仿真方向图和赋形要求方向图 4 条曲线(均为俯仰面内  $0^\circ - 40^\circ$  局部方向图; 仿真的方向图增益值与实测值进行了统一; 均匀直线阵是假定在设计中列电流没有采用赋形设计, 而直接是均匀馈电的情况, 其行电流分布仍与实际研制的天线一致)。从图 3 可以看出: ① 天线实测方向图与赋形要求方向图形状基本一致, 且各点实测增益值均大于要求值, 设计结果完全满足赋形的要求; ② 若不进行赋形设计, 而直接采用均匀馈电设计, 所得的结果将不能满足赋形的要求。

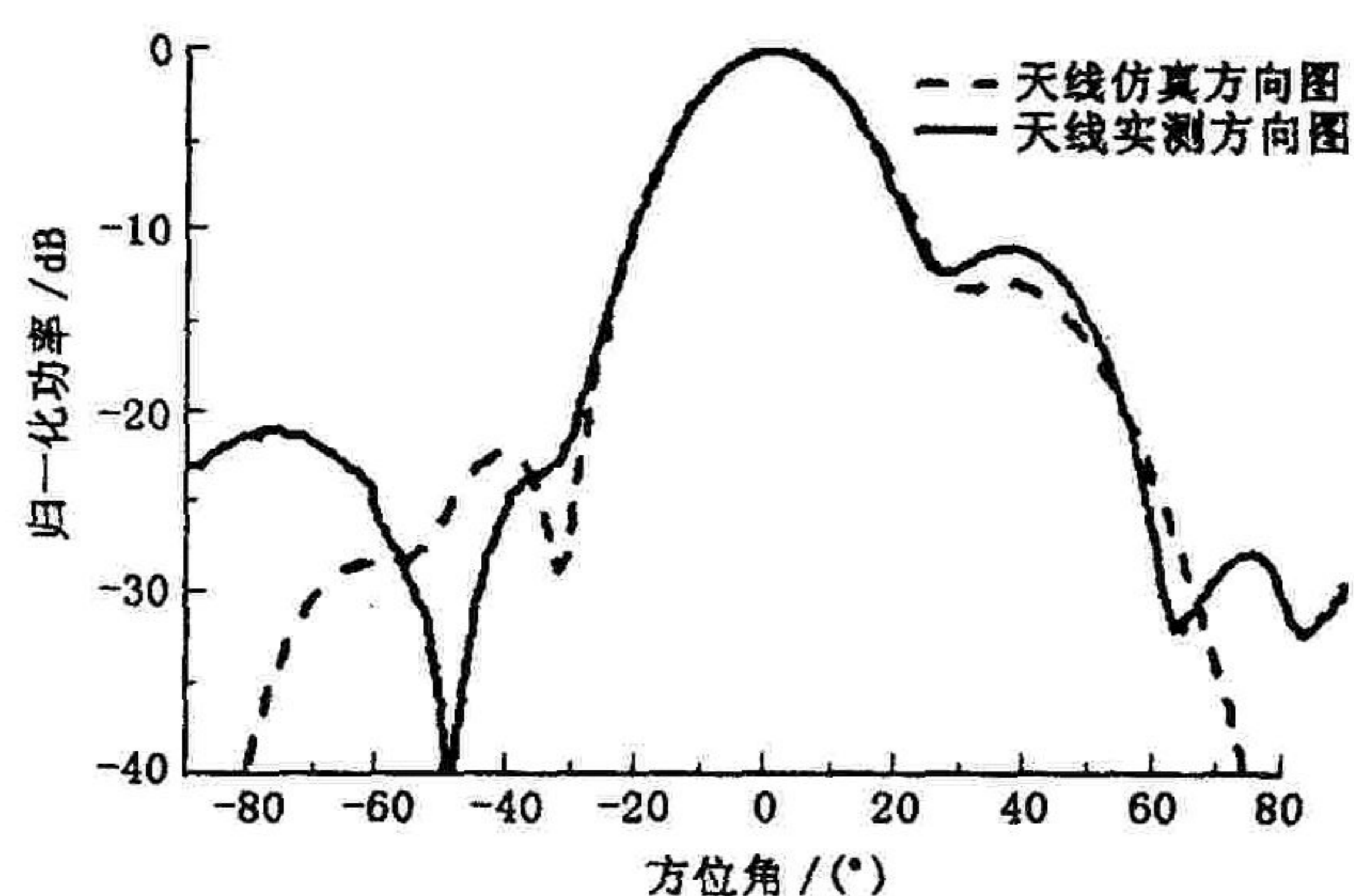


图2 天线俯仰面实测方向图与仿真方向图

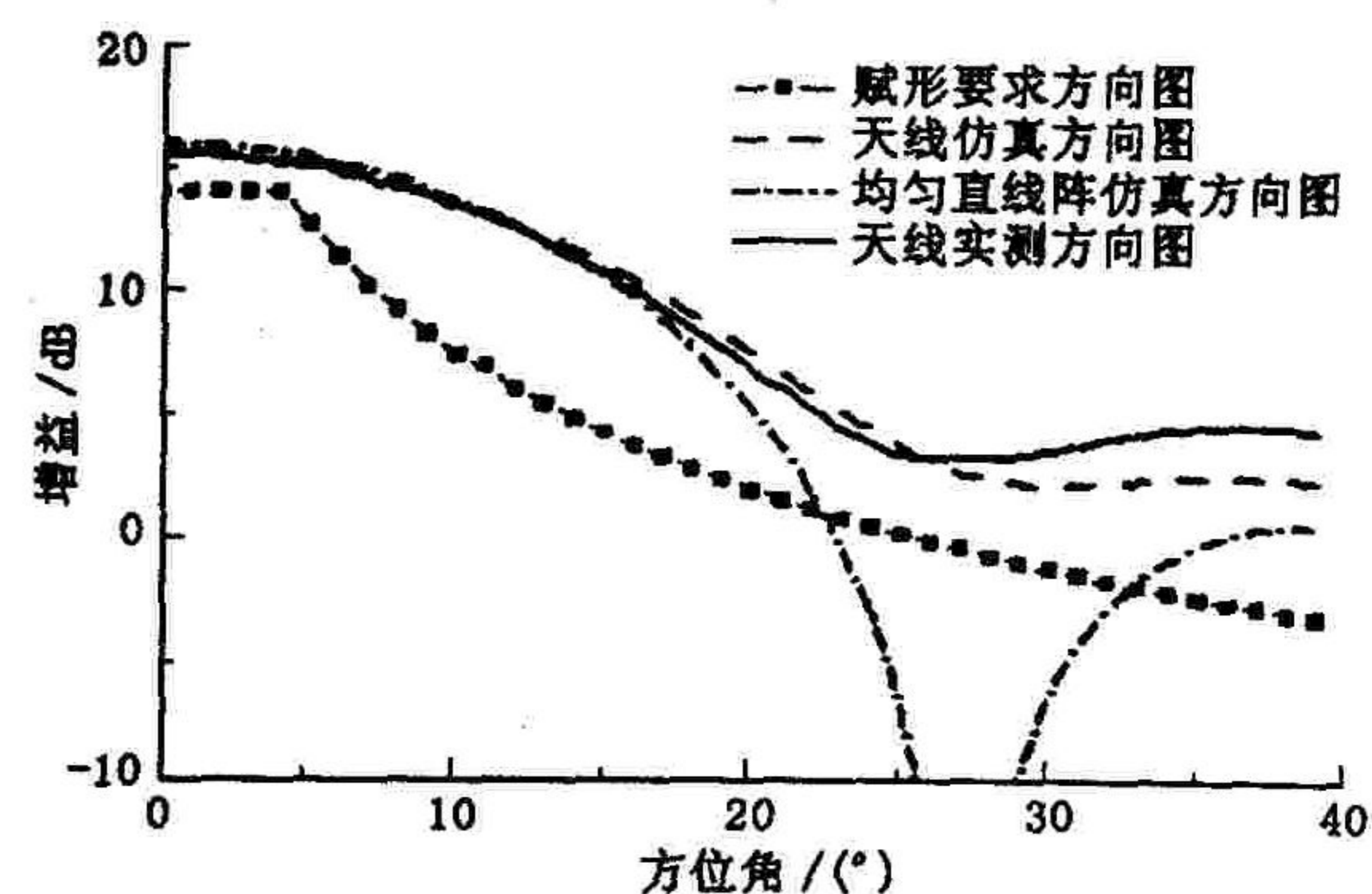


图3 天线俯仰面赋形结果

本文介绍的波束赋形方法简单实用、运算速度快。通过以上对结果的分析可以看出,该设计方法在阵列天线的波束赋形设计中是十分有效的。

#### 参考文献:

- [1] 汪茂光,吕善伟,刘瑞祥. 阵列天线分析与综合[M]. 成都:电子科技大学出版社,1989.
- [2] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [3] 丁君,王珺,郭陈江,等. 一种对任意线阵天线的主波束赋形方法[J]. 电波科学学报,2004,19(5): 638 - 640.
- [4] Subramanian A K, Pandharipande V M. Gaussian Phase Function for Phased Array Beam Shaping[A]. Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1992. 441 - 445.
- [5] W H 拜尔. 标准数学手册[M]. 北京:化学工业出版社,1988.
- [6] 清华大学《微带电路》编写组. 微带电路[M]. 北京:人民邮电出版社,1976.
- [7] 秦建军,张厚,席吉虎. 线天线阵单元间距对互耦的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(3): 74 - 76.

(编辑:田新华)

#### A Design of Beam Shaping of an Array Antenna

ZHANG Qian - yue, WANG Guang - ruing, XIA Dong - yu, ZHANG Chen - xin

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: The analysis and design of an array antenna with beam shaping in vertical plane is introduced in this paper, and the numerical method is adopted in synthesizing the radiation patterns. Based on the mean deviation and project practice, the object function and constraints are presented respectively. By optimizing the object function, the feeding currents of column are obtained. The measured radiation patterns satisfy the requirements of beam shaping well, which demonstrates the effectiveness of this approach.

Key words; array antenna ; beam shaping; mean deviation