

图 9 MATLAB 仿真的原始信号方向图及 DBF 处理后的方向图

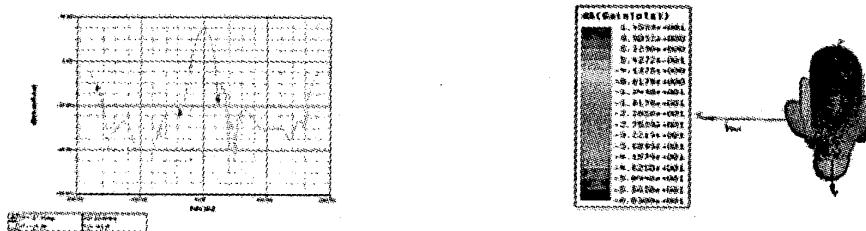


图 10 HFSS 仿真的 DBF 处理后的方向图

可以看到经过 DBF 处理后，两者都在干扰方向形成零深，但由于 MATLAB 的模型描述比较接近于理想（理想的互耦模型），因此 HFSS 仿真的副瓣电平要高一些，比较符合实际情况。因此，采用 DBF 技术可以大大提高增强天线系统的抗干扰性能，

## 5 结束语

通过对宽频带的对称阵子天线单元的 HFSS 仿真和优化分析得到了比较好的结果，并且结合该种天线单元构成的直线阵列，仿真直线阵列的互耦效应以及考虑互耦效应的 DBF 的波束特性，均取得了比较满意的结果，HFSS 是天线设计师不可或缺的工具。

## 参考文献

- |             |   |             |
|-------------|---|-------------|
| [1] 石镇      | 《自适应天线原理》                                   | .西北电讯出版     |
| [2] 谢处方     | 《天线原理与设计》                                   | 西北电讯工程学院    |
| [3] 汪茂光     | 《.阵列天线分析与综合》                                | .北京电子科技大学出版 |
| [4] 沈福民     | 《.自适应信号处理》                                  | .西安电子科技大学出版 |
| [5] 李苗.吕善伟. | 《考虑互耦和激励误差时智能天线波束形成》.北京航空航天大学学报. 2004 年 8 月 |             |

# 阵列天线赋形波束幅相加权实现自适应控零

史冰芸<sup>[1]</sup>, 顾长青<sup>[2]</sup>, 章传芳<sup>[1]</sup>

([1] 中航雷达与电子设备研究院[2] 南京航空航天大学信息科学与技术学院)

**摘要：**基于改进的 Woodward 法，给出了一种在阵列天线方向图赋形的同时，对干扰方向实现自适应控零的方法。该方法对阵列单元的幅度和相位进行预置加权，可使波瓣自适应形成凹口。并把此方法和正交化方法相比较，文末给出了结论。南京航空航天大学信息科学与技术学院

**关键词：**阵列天线，赋形波瓣，余割平方方向图，自适应控零，正交化方法

Adaptive Null Control in shaped Patterns

## by Amplitude and Phase Perturbation of Array Antennas

**Abstract :** Based on the modified Woodward synthesis method, the adaptive null control in the shaped pattern of array antenna is presented. In the shaped pattern, the amplitudes and phases at elements of array are changed to form adaptively a notch in the pattern in any direction of the jammer. The calculated results and conclusion are given.

**Key words:** array antenna, shaped pattern, power of type of  $\csc^2 \theta$ , adaptive null control, normalized method

### 1、引言

在雷达、通讯等众多领域中，天线的笔形波束和简单扇形波束已不能适应现代战争和民用事业的需要，新形势要求今天的天线具有特殊形状的波束。例如，为了在离地等高空域中使被测目标在不用水平距离上有近于恒定的回波强度，要求天线能发射或接收余割平方型的功率波束。

根据天线波束赋形理论，阵列天线可通过控制各单元的幅相达到赋形的目的。余割平方型的功率波瓣是天线赋形常选的形式。它在很宽的角域内有强度近于恒定的回波，能较好的满足某些雷达的作战需求。但是，由于其角域比较宽阔，受到干扰的可能性也随之而增大。

自适应地将方向图的零点对准干扰源方向，可大大降低干扰的影响。本文介绍一种在阵列天线波束赋形的同时，对阵元进行幅相加权实现自适应控零的方法，并与自适应控零的另一种算法正交投影算法作比较，两种方法都可以产生 60dB 的零深，但是后一种方法对波瓣的影响较小。

### 2、基本原理

波瓣赋形是天线波瓣形状控制的一类综合问题，本文采用的是基于样本函数的 Woodward 法<sup>[1]</sup>，其特点是：求得的方向图与样本函数在采样点有严格相同的场强值。样本函数即为我们需要得到的方向图的波瓣形状函数。设样本函数  $f(\theta)$  为

$$f(\theta) = \begin{cases} S(\theta) & \theta \in [\theta_l, \theta_r] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$-\frac{\pi}{2} < \theta_l < \theta_r < \frac{\pi}{2}$ ，其中  $S(\theta)$  为赋形区域的波瓣形状函数，有时它也不一定是一个具体的函

数，可以是赋形区域的方向图的采样值。经过 Woodward 法综合，间距为  $d$ ，阵元数为  $N$  的等间距线阵的方向图  $E(\theta)$  为

$$E(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n \exp[j \frac{2\pi}{\lambda} d(n - \frac{N+1}{2}) \sin \theta] \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为波长， $\theta$  为从阵列法线方向算起的角度， $I_n$  为求得的阵单元复激励电流，可表示为

$$I_n = \sum_{m=1}^M f(\theta_m) \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda} d(n - \frac{N+1}{2}) \sin \theta_m] = |I_n| \exp[j \operatorname{arc}(I_n)] \quad (3)$$

(3) 式表明， $I_n$  是对样本函数  $f(\theta)$  在采样点  $\theta_m$  的  $M$  次采样的线性组合，并且由 (2) 式得到的方向图在采样点与样本函数有相同的场值，即

$$E(\theta_m) \equiv f(\theta_m)$$

若在  $\theta_i$  方向出现干扰信号， $\theta_i \in (\theta_l, \theta_r)$ ，为了使天线对干扰不产生响应，一种有效的方法是使天线的波瓣在  $\theta_i$  方向产生宽度一定的凹口。为此，基于  $f(\theta)$ ，可重构样本函数  $f'(\theta)$ 。阵列天线用 Woodward 综合时，假设在  $[\theta_l, \theta_r]$  角域内对样本函数  $S(\theta)$  进行了  $K-1$  次采样，于是  $S(\theta)$  被采样点依次划分为  $K$  个子区域：

$$\Omega_1 = (\theta_l, \theta_1)$$

$$\Omega_k = (\theta_{k-1}, \theta_k) \quad (\theta_l < \theta_1 < \theta_2 \dots < \theta_{k-1} < \theta_k < \theta_r, k = 2, 3, \dots, K-1)$$

$$\Omega_K = (\theta_{K-1}, \theta_r)$$

若干干扰信号出现在某子区域，则可重设样本函数  $f'(\theta)$  为

$$f'(\theta) = \begin{cases} S'(\theta) & \theta \in \{[\theta_l, \theta_{l-1}), (\theta_r, \theta_r]\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

同样，用 Woodward 法综合，得到阵列单元新的复电流  $I'_n$  和方向图  $E'(\theta)$ 。如果空间仅有一个干扰，此工作即已完成。当干扰信号可能出现在  $[\theta_l, \theta_r]$  内的 K 个子区域中任何一个时，经 K 次综合可得到 K 组复电流  $(I'_n)^k$  ( $k = 1, 2, \dots, K$ )。

雷达工作时，为了抑制干扰信号，可对阵列单元进行幅相加权。鉴于现在计算机的发展水平，进行实时复加权比较难实现。为此，预置 K 组幅度值和相位值。计算结果表明，这时阵列天线不仅有满意的赋形波瓣，而且可在  $[\theta_l, \theta_r]$  角域内形成需要的凹口，以抑制来自任何方向的干扰，同时工程上也易于实现。

为了验证本文给出的方法，这里将引用正交化方法，讨论满阵复加权置零综合技术。

一具有 N 个各向同性单元的阵列方向图可能有  $N-1$  个零点，通常可知的置零数目  $M \ll N-1$ ， $-N$  元等距阵列，其静态方向图为[2]

$$E(u) = \sum_{n=1}^N a_n \exp(jb_n u) \quad (5)$$

式中， $b_n = n - \frac{N+1}{2}$ ， $u = kd \sin \theta$ ， $k = 2\pi/\lambda$ ， $a_n$  为原有幅度分布。调整所有单元幅度和相位的复数加权置零综合可以描述为

$$E(u_m) = \sum_{n=1}^N a_n \exp(jb_n u_m) = 0 \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

其中， $a_n = a_n + w_n$ ，所以 (6) 式又可化为

$$\sum_{n=1}^N w_n \exp(jb_n u_m) + \sum_{n=1}^N a_n \exp(jb_n u_m) = 0 \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

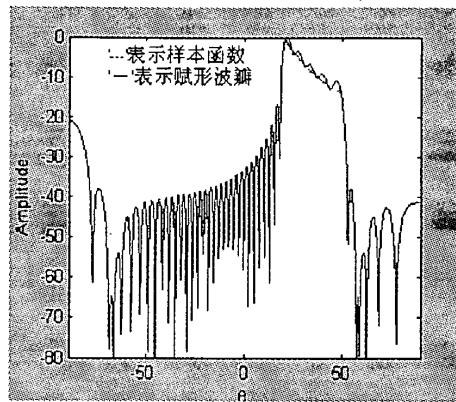
式中第 n 个单元具有幅相扰动  $w_n$ ，令  $w_n = x_n + jy_n$ ，将方程 (7) 化为实数表达式，可重写为

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N [x_n \cos(b_n u_m) - y_n \sin(b_n u_m)] + \sum_{n=1}^N a_n \cos(b_n u_m) &= 0 \\ \sum_{n=1}^N [x_n \sin(b_n u_m) + y_n \cos(b_n u_m)] + \sum_{n=1}^N a_n \sin(b_n u_m) &= 0 \end{aligned} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

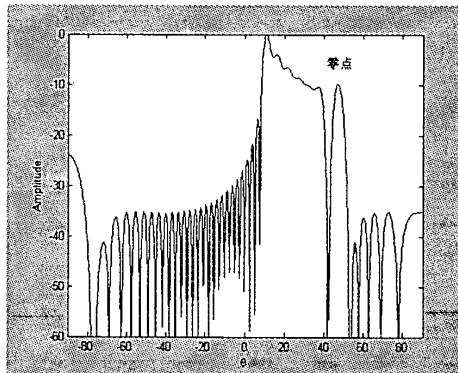
解方程 (8) 有多种方法，正交化方法<sup>[2]</sup>为最常用的方法之一。可求得  $w_n$  为  $\{\dots, x_n, y_n, \dots, 1\}^T$ 。

### 3、计算结果

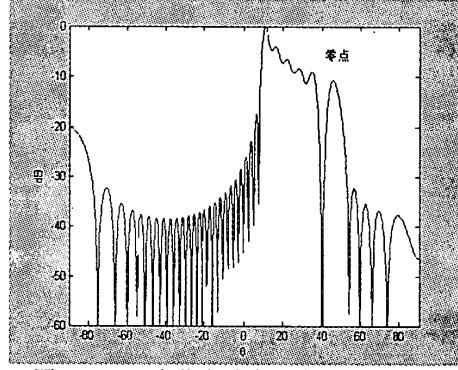
以 40 元等距线阵为例，单元间距为  $\lambda/2$ ，要求方向图为 10 至 30 度的余割平方波束，图 (1) 为用基于样本函数的 Woodward 法综合得到的方向图。图 (2) 为在任意干扰方向自适应产生零点的波瓣图。图 (3) 为用正交化方法得到的自适应控零波瓣图。其中干扰源方向为  $\theta = 40^\circ$ 。



图(1) 基于样本函数 Woodward 法



图(2) 自适应产生零点的波瓣图



图(3) 正交化方法自适应控零波瓣图

从图中看出，不论是赋形同时置零还是赋形后置零，所得的结果都令人满意，但是，相比较之下，赋形后运用正交化方法置零的波瓣与静态时相比变化较小，且零点控制较为准确，但是在计算时间上要比赋形同时置零长一点，在工程上不易于实现。

#### 参考文献

- 1、孙茂友 离散阵的 W-S 综合法——Woodward 法改进 电波科学学报, 1995 年
- 2、胡明春 李建新 阵列部分加权置零综合 电波科学学报, 1997

## 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>