

文章编号:1008-8652(2007)03-025-05

# 天线阵列方向图调零算法研究

李绪平 赵交成

(西安电子工程研究所 西安 710100)

**【摘要】**军用雷达经常在存在电子干扰的环境中作战,如果天线阵列方向图能在干扰方向形成零陷,将大大提高雷达整机性能。本文分别研究了天线单元的馈电幅相控制、幅度控制、相位控制算法,给出了仿真结果。这些算法具有思路简单、计算速度快、稳定性好的特点,适用于自适应天线阵列,对相控阵调零算法亦有参考价值。

**关键词:**方向图调零;复幅值控制;幅度控制;相位控制**中图分类号:**TN821<sup>+8</sup>;TP301.6      **文献标识码:**A

## Study on Antenna Pattern Nulling Algorithms

Li Xuping, Zhao Jiaocheng

(Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100)

**Abstract:** Military radars are often used under electromagnetic interferences. If the pattern forms nulls in the directions of interference, the radar performance will be improved greatly. Three methods for pattern null steering, amplitude-phase perturbation, amplitude perturbation, phase perturbation, are presented and analyzed through simulations in the paper. These methods are simple, fast and steady, and are fit for adaptive antenna array. They may be a reference in phased-array null steering.

**Keywords:** pattern null steering; amplitude-phase perturbation; amplitude perturbation; phase perturbation

### 1 引言

雷达天线方向图调零技术能有效的抑制有源电子干扰,因此成为近年来研究的热点。其基本思想是调整各阵元的馈电权值,使方向图在目标信号方向形成主波束,而在干扰信号方向上形成零陷,从而抑制干扰,提高系统信噪比。

常用的零陷技术包括:馈电单元幅相控制、幅度控制、相位控制和阵列单元位置控制。其中,单元位置控制是近年来出现的新技术,它要求零陷个数远小于阵列单元数,同时需要机械驱动系统,成本高,技术还不成熟<sup>[1]</sup>。下面从计算方法、计算时间、算法稳健性等方面具体分析常用的前三种调零方法。

### 2 馈电单元幅相控制<sup>[2]</sup>

馈电单元幅相同时控制是最有效的调零方法,解的自由度大,零陷深,计算速度快。假设有一线阵,单元总数  $N$ ,间距  $d$ 。设天线波瓣在空间  $L$  个方向  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L)$  设置零点。阵列上第  $n$  个单元在这  $L$  个方向上接收

\* 收稿日期:2007-04-18

到的信号为：

$$x_n = \sum_{l=1}^L a_l \exp[j(nu_l + \varphi_l)] \quad (1)$$

式中  $u_l = 2\pi d \sin(\theta_l)/\lambda$ ,  $\lambda$  是波长,  $a_l$  和  $\varphi_l$  分别是接收信号振幅和相位。

从上式可以看出, 每个单元在空间  $L$  个方向的接收信号是  $\{\exp(j(nu_l))\}$  的线性组合。为了在空间  $L$  个方向上设置零点, 应使阵列单元在这  $L$  个方向上接收的信号之和为零。构造以下向量:

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^L \exp[j(u_l + \varphi_k)] \\ \sum_{l=1}^L \exp[j(2u_l + \varphi_k)] \\ \sum_{l=1}^L \exp[j(Nu_l + \varphi_k)] \end{bmatrix} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (2)$$

式中,  $\varphi_k$  是计算机产生的  $(0, 2\pi)$  之间的随机数。

令  $N$  维列向量  $w_0$  为线阵原单元馈电复幅值, 包含幅度和相位信息

现在构造  $K+1 (K=L)$  个  $N$  维的复数列向量组:

$$\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_K, w_0 \quad (3)$$

由于此向量组分量间线性无关, 进行 Gram-schmidt 正交化[3], 得到一组正交向量:

$$\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_k, w_p \quad (4)$$

根据 schmidt 正交化的过程可以知道, 新的一组向量彼此正交,  $w_p$  就是所求加权复幅值。

这种算法思路简单, 下面通过一个优化的例子, 给出一些 Matlab 编程仿真结果, 具体分析其性能。

假设有一个 30 单元线阵, 原幅度分布满足  $-37\text{dB}$  低副瓣 Taylor 分布, 主波束指向阵列法向。现在需要在  $[-42, -35, -34.3, -33.6, -33, 30, 35, 50]$  度形成 8 个零陷。

图 1 比较了理论计算的复幅度加权方向图(实线)与原方向图(虚线)。可以看出, 这种方法得到的含有 8 个零陷的新方向图主瓣与原方向图基本重合, 副瓣抬升不到  $1\text{dB}$ 。按照精确的理论值, 在所设零陷方向, 零陷深度超过  $-150\text{dB}$ 。单个方向零陷很窄, 如果需要较宽零陷, 可以牺牲零陷数量, 按一定间隔设置多个角度, 就可形成很宽的零陷, 比如图 1 中前 5 个方向形成的零陷在  $-42^\circ \sim -32^\circ$  范围内零陷深于  $-70\text{dB}$ , 这样做使零陷附近方向的副瓣略有增高。这种算法从理论上讲可在  $N$  个方向形成零陷, 实际上形成少于  $N/2$  个零陷时主副瓣均保持较好, 当零陷接近  $N$  时, 在指定方向仍然能形成较深零陷, 但副瓣明显增高, 主瓣亦有变形, 如图 2 所示。

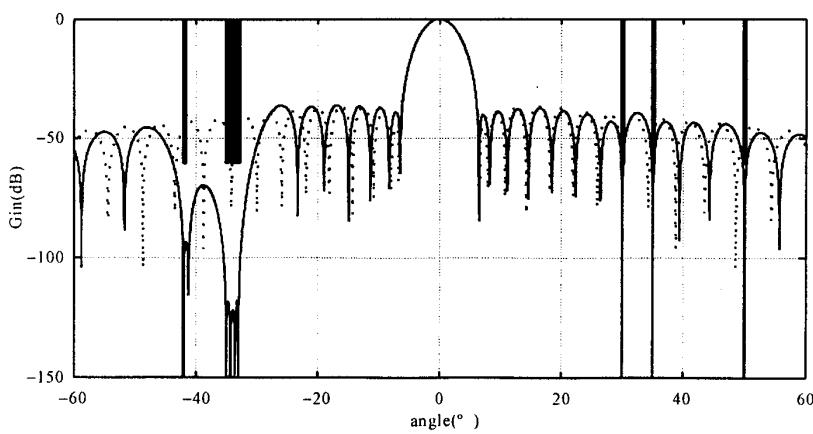


图 1 含有 8 个零陷的复幅度加权方向图

工程应用中必然存在误差, 为此给优化结果加随机误差观察其方向图的变化, 图 3 中实线加入 2% 的随机误差, 虚线加入 10% 误差。可以看出, 引入误差后零陷明显抬升, 但即使加入 10% 的随机误差, 所需频段

零陷也在 $-45\text{dB}$ 以下,同时副瓣抬升,但仍然低于 $-32\text{dB}$ ,满足工程应用。

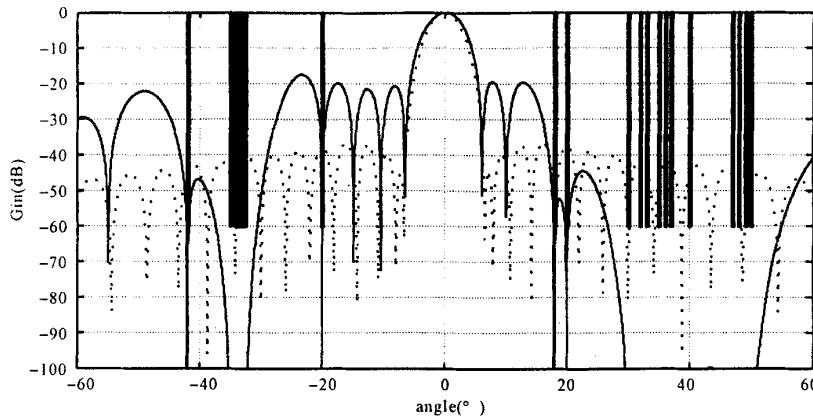


图2 含有25个零陷的复幅度加权方向图

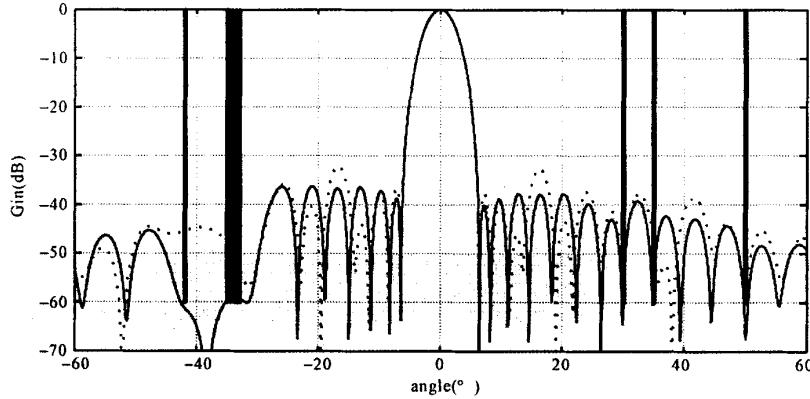


图3 复幅值加入随机误差的8零陷的方向图

另外,这种复幅值加权算法复杂度低,计算速度较快。采用 Matlab 编程仿真,上述 30 个单元形成 8 个零陷耗时 16ms; 25 个零陷耗时 47ms。在工程应用中,采用专用的可编程器件计算,速度更快,因此这种算法适合时实处理系统。

### 3 馈电单元幅度控制<sup>[2]</sup>

对天线阵列单元的馈电幅度单独加权原理与上述算法相似。把复向量  $\mathbf{X}_k$  的实数分量和虚数分量取出,构成  $2K$  对实向量:

$$\mathbf{X}_{kr} = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^L \cos(u_l + \varphi_{kl}) \\ \sum_{l=1}^L \cos(2u_l + \varphi_{kl}) \\ \dots \\ \sum_{l=1}^L \cos(Nu_l + \varphi_{kl}) \end{bmatrix} \quad \mathbf{X}_{ki} = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^L \sin(u_l + \varphi_{kl}) \\ \sum_{l=1}^L \sin(2u_l + \varphi_{kl}) \\ \dots \\ \sum_{l=1}^L \sin(Nu_l + \varphi_{kl}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

令  $N$  维实数列向量  $w_0$  为线阵原单元馈电幅度值。

现在构造  $2K+1(K=L)$  个  $N$  维的实数列向量组

$$\mathbf{X}_{1r}, \mathbf{X}_{2r}, \dots, \mathbf{X}_{Kr}, \mathbf{X}_{1i}, \mathbf{X}_{2i}, \dots, \mathbf{X}_{Ki}, w_0 \quad (6)$$

对此向量组进行 Gram-schmidt 正交化, 得到的最后一组实数向量  $w_p$ , 就是所求馈电幅度加权值。30 单元线阵采用幅度加权在  $[-42, -35, -34, -33, 10, 30, 31, 50]$  度形成 8 个零点, 副瓣比复幅值加权略有上升, 这个问题中, 一个零陷设到  $10^\circ$  处, 离主瓣很近, 这会使主瓣附近副瓣明显抬升, 复幅值加权和相位加权同样存在这个问题。为了考察工程应用中误差的影响, 给每个单元随机加入 5% 的随机扰动, 得到的方向图如图 5 中虚线, 零陷抬升, 但仍然低于  $-52\text{dB}$ , 说明这种算法有一定的抗扰动能力。只加权馈电幅度形成的零陷数目不会太多, 一般不能超过  $N/3$  个。

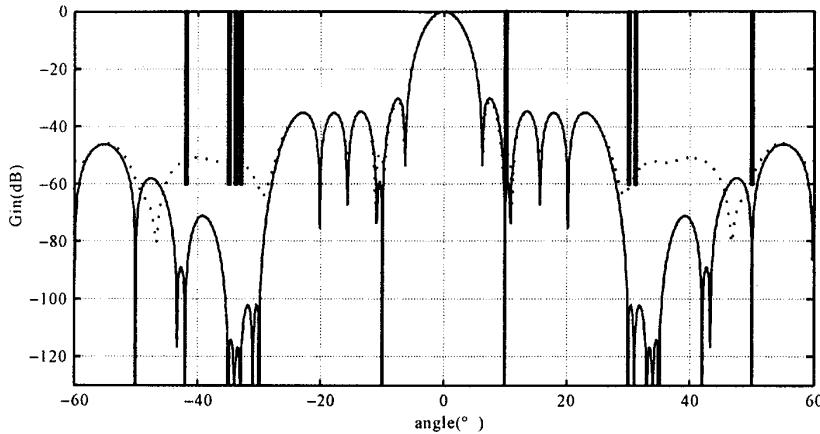


图 4 幅度加权加入 3% 随机误差的 8 零陷的方向图

#### 4 馈电单元相位控制<sup>[4,5,6]</sup>

为了简化分析, 设天线阵由  $2N+1$  个单元组成, 参考坐标系放在中间单元上。相位加权前的方向图为:

$$f_0(u) = \sum_{-N}^N a_n e^{-jnu} \quad (7)$$

同时设  $f_0(u)$  为实函数, 因而  $a_0$  为实数,  $a_{-n} = a_n^*$  互为复共轭。扰动激励系数  $a_n \exp(j\varphi_n)$  中的相位因子  $\varphi_n$ , 实现在空间  $L$  各方向调零。求解相位  $\varphi$ , 本身是非线性问题, 需要利用非线性的方法处理, 计算量大, 在速度上很难保证实时处理。假设相位调整量很小, 可以利用二阶泰勒展开成线性方程近似处理, 下面做简要介绍。当然, 由于调整量小, 也限制了其在相控阵中的应用, 且零陷深度不如前面两种加权方法好。

相位加权后的方向图为

$$f_a(u) = \sum_{-N}^N a_n e^{j\varphi_n} e^{-jnu} \cong \sum_{-N}^N a_n e^{-jnu} + j \sum_{-N}^N a_n \varphi_n e^{-jnu} = f_0(u) + f_c(u) \quad (8)$$

问题的目标是方向图在空间  $L$  个方向上形成零点, 并且其它方向与原有方向图相比变化最小, 数学表达如下:

$$\begin{cases} f_0(u_l) + f_c(u_l) = 0 & l = 1, 2, \dots, L \\ \sum_n \varphi_n^2 = \min \end{cases} \quad (9)$$

将上式分解成实部和虚部, 得实方程组

$$\begin{cases} (\varphi, \text{Real}(C_l)) = 0 & l = 1, \dots, M \\ (\varphi, \text{Im ag}(C_l)) = f_0(u_l) \\ \|\varphi\| = \min \end{cases} \quad (10)$$

其中  $\varphi = (\varphi_{-N}, \dots, \varphi_N)$ ,  $C_l = [a_{-N} \exp(-jNu_l), \dots, a_N \exp(-jNu_l)]$ ,  $(x, y) = \sum x_n y_n^*$  为矢量内积,  $\|x\| = (x, x)^{1/2}$  为矢量二范数。求出(10) 中间方程的极小范数最小二乘解即为所求相位加权值<sup>[3]</sup>。

以 31 单元等间距线阵为例, 考察相位加权调零算法性能。设单元馈电幅度关于阵列中心对称。如图 5

所示,仅调节相位,得到的零陷不如前两种方法深,在-60dB左右,副瓣也有较多抬升,大约3dB(图中实线)。由于利用了二阶泰勒展开近似处理,相位调整量小,一般在 $\pm 15^\circ$ 以内。为了考察工程应用中误差的影响,给每个单元随机加入 $0^\circ \sim 3^\circ$ 的扰动,得到的方向图如图5中虚线所示,零陷抬升,但仍然低于-48dB,说明这种算法具有一定的抗扰动能力。另外,只加权馈电相位形成的零陷数目不会太多,一般不能超过N/4个。

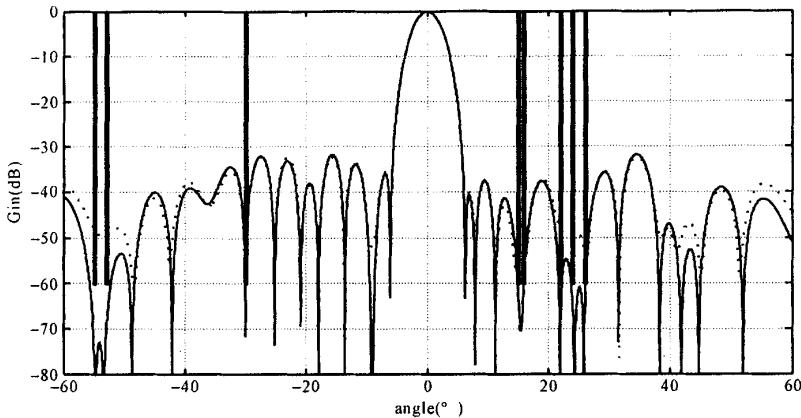


图5 相位加权加入随机误差的8零陷的方向图

## 5 结论

本文分别研究了天线单元的馈电幅相同时控制、幅度单独控制、相位单独控制三种方向图调零算法,并给出了仿真结果。针对一些工程应用中关心的问题进行讨论,指出这些算法具有思路简单、计算速度快、形成零陷深、抗随机扰动的特点,适用于自适应天线阵列,对相控阵调零算法亦有参考价值。

### 参考文献:

- [1] Hejres, Jasem A. Null steering in phased arrays by controlling the positions of selected elements[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2004, 52 (11): 2891-2895
- [2] 林昌禄等,天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002年6月.
- [3] 程云鹏、张凯院、徐仲,矩阵论[M]. 西安:西北工业大学出版社,1989年6月.
- [4] 王茂光、吕善伟、刘瑞祥. 阵列天线分析与综合[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1989年10月.
- [5] Hans Steyskal, Simple method for pattern nulling by phase perturbation[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1983, AP-31(1).
- [6] Hans Steyskal, Robert A. Shore and Randy L. Haupt, Methods for null control and their effects on the radiation pattern [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1986, AP-34 (3).

(上接第19页)

### 参考文献:

- [1] 3ds max 6 白金教学
- [2] 丁玉兰. 人体工程学(第三版)[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002.3.
- [3] 人机工程实施程序指南[S]. GJB/Z 134—2002.
- [4] 军事装备和设施的人机工程设计准则[S]. GJB 2873—97.
- [5] 赵徵,李家樾,肖伟. 电子设备结构设计原理[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1981,2.
- [6] Flotherm 帮助文件.
- [7] UG 帮助文件.

## 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>