

一种利用幅值抖动形成阵列零陷的方法

曾云宝 黄才试 彭涛 王文博

(北京邮电大学电信工程学院无线通信中心 北京 100876)

摘要 该文提出了一种在阵元关于阵列中心对称的线阵中利用幅值抖动形成零陷的方法,该方法能够在多个强干扰源方向或在较宽的范围形成深度零陷,而不影响主瓣,同时克服了传统幅值抖动方法零陷深度不足、旁瓣水平高的缺陷。该方法使得移相器只需用来控制主瓣方向,加快了响应速度。仿真表明,该算法实现简单,且其性能可与复权值控制方法的性能相比。同时由于幅度抖动的对称性,在中心对称的线阵中只需要天线数目一半的衰减器,成本较低。

关键词 幅值抖动, 零陷, 衰减器

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-2073-04

Array Pattern Nulling by Amplitude-Only Perturbations

Zeng Yun-bao Huang Cai-shi Peng Tao Wang Wen-bo

(Center of Wireless Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract A new method based on amplitude-only perturbations for the pattern synthesis of linear antenna array with prescribed nulls is proposed. It is capable of steering narrow and broad nulls with satisfactory nulls depth in the directions of strong interference signals and acceptable sidelobe level in the beam pattern without affecting the main beam. The phase shifters are only used to steer the main beam toward the desired direction. In so doing, the responded time can be reduced. Simulation results show that this method is easier to realize, and its capability is comparable to that of controlling complex weights (both amplitude and phase). Besides, the fact that the amplitude perturbations of the elements are symmetrical about the center of the array means that the amount of attenuators is halved.

Key words Amplitude perturbations, Null steering, Attenuator

1 引言

越来越复杂的电磁环境推动了人们对零陷技术的研究,零陷技术在雷达、声纳和通信系统中起着非常重要的作用,它使得波束主瓣对准有用信号,零陷对准干扰源,从而最小化由干扰引起的信噪比恶化。常用零陷技术包括:相位控制(phase-only),阵列元素位置控制(position perturbation),复权值控制(control complex weights both amplitude and phase),幅值控制(amplitude-only)。控制相位的零陷技术实现简单,且不需要额外的开销^[1],因而许多零陷方法都是通过控制相位来实现的。但是,相位控制不能在关于主瓣对称的位置形成零陷,而在各个形成零陷的位置的主瓣对称位置上将会不可避免地出现旁瓣增益^[1]。虽然文献[2]提出了一些解决方案,但是结果不理想,相位调整太大,导致主瓣畸变。阵列元素位置控制是较新的零陷解决方案之一^[3-5],它能在关于主瓣方向对称的位置形成零陷,但它要求零陷个数远小于阵元数,同时它需要机械驱动装置,如同步电动机。相位控制和阵列元素位置控制都是非线性的,不能通过解析的方法直接求解。非线性优化计算量大,且在非线形优化过程中需要设定初值,如果

初值选取不好,可能只能获得局部最优;为了简化求解,假设相位或位置抖动很小,此时零陷方程可用线性方程近似表示^[3],但是这样得到的解一般不够理想。此外,保证有较宽的零陷范围是必要的^[6-9],因为在大多数情况下干扰信号会随时间发生变化,如果只形成尖锐的零陷角度就必须通过连续地调整权值来获得合适的信噪比,这将大大加重天线端智能处理的负担。复权值控制是这些常用零陷技术中最有效的方法,它的解空间有更大的自由度^[10],但是这种方法也是最昂贵的。幅值控制是利用衰减器来调整元素的振幅,这种方法容易执行,并且对量化误差不太敏感^[11],同时如果天线元素是关于阵列中心对称,则衰减器的数量只需天线数的一半。

文献[12-14]中阐述了通过幅值控制来产生零陷的方法,但不能得到满意的零陷深度和旁瓣水平;文献[15]是利用遗传算法求取幅值的方法来形成零陷,计算量很大。本论文提出了一种在阵元关于阵列中心对称的线阵中利用幅值抖动形成零陷的方法,通过构建的代价函数,能够在多个强干扰源方向和较宽的范围形成深度零陷,而不影响主瓣方向,且其性能可与复权值控制方法的性能相比,同时克服了传统幅值抖动方法零陷深度不足、旁瓣水平高的缺陷。

本文结构安排:第2节介绍本论文提出的控制幅值抖动形成零陷的方法;第3节是仿真分析;第4节是结束语。

2 控制幅值抖动形成零陷的方法

考虑一个具有 N 根天线的均匀线阵,阵元间距为半波长,如图1,其在各个方向的波束方向图可以表示为

$$F(u) = \sum_{n=1}^N a_n e^{jd_n(u-u_s)} \quad (1)$$

其中 a_n 为阵元激励,关于阵列中心偶对称; $d_n = d_0(n - N/2 - 0.5)$,关于阵列中心奇对称, d_0 为相邻阵元的距离; $u = k \sin(\theta)$, θ 为相对阵列中轴的偏离角度; $u_s = k \sin(\theta_s)$, θ_s 为主瓣方向。

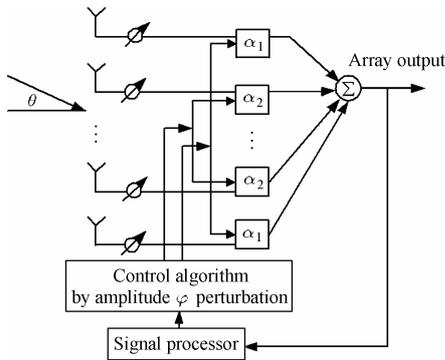


图1 幅值抖动形成零陷的 N 天线自适应阵列

Fig.1 Forming nulls through the amplitude perturbations of N antennas adaptive array

设阵元 n 幅值抖动后的激励为 $a_n + \Delta w_n$, a_n , Δw_n 为实数值。为了减少衰减器,激励 a_n , Δw_n 均相对天线阵列中心偶对称。为了保证在干扰源方向形成零陷时,对波束方向图畸变最小,我们建立如下的代价函数:

$$\min \Delta w^T C \Delta w$$

其中 $C = \text{diag}[c_1^2, c_2^2, \dots, c_N^2]$, $\Delta w = [\Delta w_1, \Delta w_2, \dots, \Delta w_N]^T$, $n=1,2,\dots,N$, c_n 是可任意设定的非负实数, T 表示向量转置。

若要在干扰源方向形成零陷,必须满足

$$\begin{aligned} F(u_m) &= \sum_{n=1}^N (a_n + \Delta w_n) e^{jd_n(u_m - u_s)} \\ &= \sum_{n=1}^N a_n e^{jd_n(u_m - u_s)} + \sum_{n=1}^N \Delta w_n e^{jd_n(u_m - u_s)} \\ &= F_0(u_m) + F_c(u_m) = 0 \end{aligned}$$

其中 $m=1,\dots,M$, M 为零陷个数,即干扰源个数。所以有

$$F_c(u_m) = -F_0(u_m) \quad (2)$$

其中 $F_c(u_m) = \sum_{n=1}^N \Delta w_n e^{jd_n(u_m - u_s)}$,由于 Δw_n 关于天线阵列中心偶对称, d_n 相对天线阵列中心奇对称,所以式(2)可以改写为

$$A \Delta w = Y$$

$$A = \begin{pmatrix} \cos[d_1(u_1 - u_s)] & \dots & \cos[d_n(u_1 - u_s)] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos[d_1(u_M - u_s)] & \dots & \cos[d_n(u_M - u_s)] \end{pmatrix}$$

$$Y = -[F_0(u_1) \quad F_0(u_2) \quad \dots \quad F_0(u_M)]^T$$

因此,幅值抖动的代价函数可以改写为

$$\min \Delta w^T C \Delta w$$

$$\text{s.t. } A \Delta w = Y$$

利用拉格朗日乘法即可求得幅值抖动的解析解:

$$\Delta w = C^{-1} A^T (A C^{-1} A^T)^{-1} Y \quad (3)$$

3 仿真分析

仿真基于20根天线的直线等距线阵,阵元之间距离为半波长,考虑理想阵元,即不考虑阵元之间的互耦影响。通过控制阵元幅值,在各个干扰源方向形成零陷,幅值抖动根据式(3)计算,取 $c_n = a_n$, $n=1,\dots,N$ 。

如图2所示,在 20° , 26° , 40° 形成零陷时,本文的幅值抖动控制法很好地满足了深度零陷要求。3个角度上的零陷深度均超过了 -100dB ,主瓣无任何畸变,保持了很低的旁瓣平均增益水平。同时在关于主瓣对称的位置也能够产生镜像零陷,相对于相位控制和阵列元素位置控制在性能上有显著的提高,且不亚于复权值控制的性能。

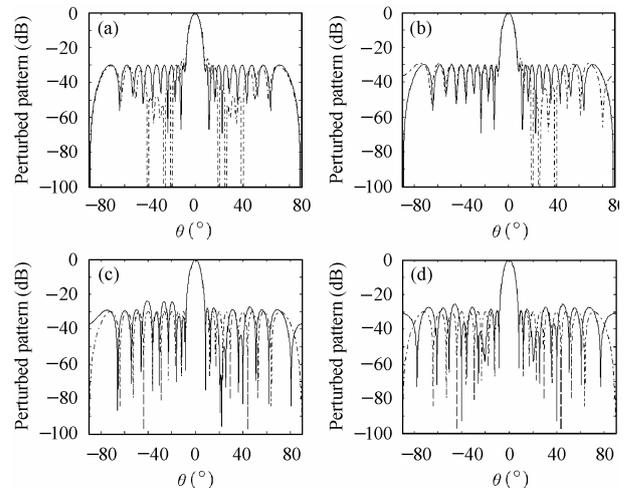


图2 不同零陷方法的性能对比(零陷在 20° , 26° , 40°)

(a)本文提出的幅值抖动控制方法 (b)复权值控制(振幅相位控制) (c)相位控制 (d)位置抖动

Fig.2 The performance of different null steering methods (Null at 20° , 26° and 40°) (a)The proposed amplitude perturbations method (b)Complex weights control method (c)Phase control method (d)Position perturbations method

图3(a)和3(b)分别是 $30^\circ \sim 34^\circ$ 和 $40^\circ \sim 44^\circ$ 角度范围内形成宽带零陷的效果,从图3可以看出,主瓣无畸变,旁瓣水平较低(最高的旁瓣增益出现在图3(a)主瓣附近约 -25dB),仍能形成深度零陷,零陷值超过 -100dB 。另外,随着宽带零陷角度远离主瓣,旁瓣的增益水平逐渐递减。

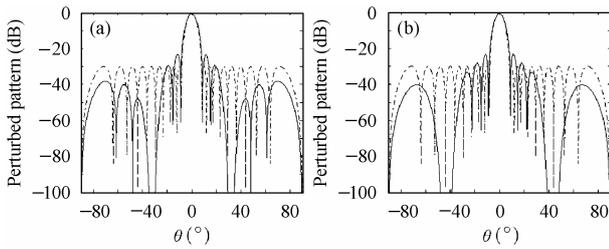


图 3 本文提出的幅值抖动控制方法的宽度零陷性能
(a) 30°~34°角度范围形成宽度零陷
(b) 40°~44°角度范围形成宽度零陷

Fig.3 The broadband null performance of the proposed amplitude perturbations method

(a)Broad null from 30° to 34° (b)Broad null from 40° to 44°

图 4 是将数据截短, 对本论文方法进行灵敏度分析。表 1 中的第 2 列是初始的-30dB Chebyshev 阵元激励; 第 3 列和第 4 列分别是图 4(a) 在 20°方向各阵元的幅值调整值和只保留前 4 位的截短值; 第 5 列和第 6 列分别是图 4(b) 在 20°, 26°, 40°方向各阵元的幅值调整值和只保留前 4 位的截短值; 第 7 列是图 3(b) 在 40°~44°角度范围形成宽度零陷的幅值抖动。从表 1 可看出, 幅值抖动相对阵列中心偶对称, 这意味着控制各阵元幅值抖动的衰减器只需 $N/2$ 就足够了, 可降低成本。我们分别把 20°的单个零陷点和同时在角度 20°, 26°, 40°设置零陷点对应的幅值调整值由原来的 6 位, 截短至 4 位, 具体数据参见表 1 的 3~6 列。

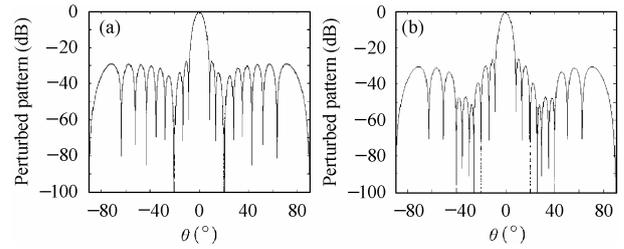


图 4 本文方法的灵敏度分析
(虚线为小数点后保留 6 位, 实线为小数点后保留 4 位)
(a)零陷在 20° (b)零陷在 20°, 26°, 40°

Fig.4 The sensitivity analysis of proposed method
(dotted with 6 decimal and solid with 4 decimal)

(a)Null at 20° (b)Null at 20°, 26° and 40°

由图 4 可以看出, 数据截短后的波束方向图和截短前的波束方向图几乎完全一样, 主瓣保持不变, 且各零陷方向的零陷深度几乎与截短前一致, 可见本方法在对窄带零陷点操作中对微小的数据误差不敏感。

4 结束语

本文通过建立一个幅值抖动的代价函数, 可在不改变主瓣方向的前提下, 在多个干扰源方向和较宽的范围内形成深度零陷。仿真表明, 该方法克服了传统幅值抖动方法的缺陷, 可得到较大的零陷深度和较低的旁瓣水平, 同时, 在诸多性能上可与控制复权值的方法相比。另外, 控

表 1 阵元幅值扰动值

Tab.1 Elements Amplitude perturbations

阵元号	初始-30dB Chebyshev 阵 元激励	图 4 (a)		图 4 (b)		图 3 (b)
	a_n	Δw_n	$\Delta \hat{w}_n$	Δw_n	$\Delta \hat{w}_n$	Δw_n
1	0.024685	-0.004419	-0.0044	-0.011095	-0.0110	-0.021569
2	0.021456	-0.007903	-0.0079	-0.006773	-0.0067	-0.010503
3	0.029308	-0.000898	-0.0008	0.004116	0.0041	-0.003246
4	0.037750	0.002037	0.0020	0.000103	0.0001	0.001140
5	0.046341	0.001647	0.0016	0.000805	0.0008	0.003049
6	0.054581	0.000156	0.0001	0.000834	0.0008	-0.001682
7	0.061957	-0.000805	-0.0008	-0.001318	-0.0013	-0.000447
8	0.067984	-0.000738	-0.0007	-0.000505	-0.0005	-0.000100
9	0.072252	-0.000029	0	0.000830	0.0008	0.001436
10	0.074464	0.000588	0.0005	-0.000139	-0.0001	-0.000908
11	0.074464	0.000588	0.0005	-0.000139	-0.0001	-0.000908
12	0.072252	-0.000029	0	0.000830	0.0008	0.001436
13	0.067984	-0.000738	-0.0007	-0.000505	-0.0005	-0.000100
14	0.061957	-0.000805	-0.0008	-0.001318	-0.0013	-0.000447
15	0.054581	0.000156	0.0001	0.000834	0.0008	-0.001682
16	0.046341	0.001647	0.0016	0.000805	0.0008	0.003049
17	0.037750	0.002037	0.0020	0.000103	0.0001	0.001140
18	0.029308	-0.000898	-0.0008	0.004116	0.0041	-0.003246
19	0.021456	-0.007903	-0.0079	-0.006773	-0.0067	-0.010503
20	0.024685	-0.004419	-0.0044	-0.011095	-0.0110	-0.021569

制复权值的方法需要给每个天线元素安装移相器和衰减器, 成本较高, 并且响应时间相对较慢(尤其是在大阵列系统中); 而本文提出的利用幅值抖动形成零陷的方法, 由于天线元素关于阵列中心对称, 因而只需要天线数目一半的衰减器, 实现成本大大降低, 且移相器只需用来控制主瓣方向, 响应速度也大大加快。

参 考 文 献

- [1] Steyskal H, Shore R A, Haupt R L. Methods for null control and their effects on the radiation pattern. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1986, AP-34(3): 404–409.
- [2] Shore R A. Nulling a symmetric pattern location with phase-only weight control. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1984 AP-32(5): 530–533.
- [3] Ismail T, Dawoud M. Null steering in phased arrays by controlling the elements positions. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1991, 39(11): 1561–1566.
- [4] Hejres J, Richie J. Adaptive pattern nulling utilizing the elevations of the antenna array elements. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1993, AP-S(28): 694 – 697.
- [5] Steyskal H. Simple method for pattern nulling by phase perturbation. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1983, AP-31(1): 163–166.
- [6] Steyskal H. Wide-band nulling performance versus number of pattern constraints for an array antenna. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1983, AP-31(1): 159–163.
- [7] Shpak D J. A method for the optimal pattern synthesis of linear arrays with prescribed nulls. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1996, AP-44(3): 286–294.
- [8] Er M H. Technique for antenna array pattern synthesis with controlled broad nulls. *IEE Proc. Microwave Antennas and Propagation*, 1988, 135(6): 375–380.
- [9] Er M H. Linear antenna array pattern synthesis with prescribed broad nulls. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1990, AP-38(9): 1496–1498.
- [10] Guney K, Akdagl A. Null steering of linear antenna arrays using modified Tabu search algorithm. in *Book Series of Progress in Electromagnetics Research*, Kong J A (Editor), 2001, 33: 167–182.
- [11] Vu T B. Method of null steering without using phase shifters. *IEE Proc.- H*, 1984, 131: 242 –246.
- [12] VU T B. Null steering by controlling current amplitude only. *antennas and propagation society international symposium*, 1984, 22: 811–814.
- [13] VU T B. Pattern nulling in difference pattern by amplitude control. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1985, AP-33(6): 669 – 671.
- [14] Hosny M, Ibrahim. Null steering by real-weight control—A method of decoupling the weights. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1991 AP-39(11): 1648 –1650.
- [15] Liao W P, Chu F L. Array pattern synthesis with null steering using genetic algorithms by controlling only the current amplitudes. *Int. J. Electronics*, 1999, 86: 445–457.

曾云宝: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为智能天线技术和移动通信技术等。

黄才试: 男, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为智能天线技术等。

彭 涛: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为智能天线技术、3G 和 B3G 系统等。

王文博: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理和无线通信及网络等。