

文章编号: 2095-4980(2020)01-0057-04

一种快速唯相位方向图置零方法

路成军, 胡勤振, 孟自强

(中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

摘 要: 在相控阵雷达中, 为了降低雷达信号被敌方侦收设备截获的概率, 需要在阵列发射方向图某一角度形成零点。对此, 提出一种快速相位加权方向图置零方法。该方法依据零点位置设置虚拟干扰, 并构建干扰协方差矩阵; 根据最小输出功率准则, 建立零点生成数学模型; 最后通过单坐标迭代算法求解相位权值。计算机仿真结果验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 快速; 唯相位; 置零; 单坐标

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019067

A fast phase-only pattern nulling algorithm

LU Chengjun, HU Qinzhen, MENG Ziqiang

(Leihua Electronic Technology Research Institute, AVIC, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: In order to obtain low probability of intercept, it is required to form nulling in the transmit pattern for the phased radar. To solve the problem, a fast phase-only pattern nulling algorithm is proposed in this paper. First, dummy interferences are introduced according to the nulling angles, and the interference covariance matrix is calculated; then the mathematical model for forming nulling is established by minimizing the array output power; last, the phase-only weight can be obtained by the single coordinate algorithm. The experimental results demonstrate the correctness and effectiveness of the proposed approach.

Keywords: fast; phase-only; nulling; single coordinate

相控阵雷达通过发射电磁波, 从接收回波中提取目标信息。相控阵雷达探测过程中, 其发射的大功率电磁信号很容易被对方电子侦察设备发现和截获, 从而招致对方的电子干扰以及反辐射导弹的攻击。为提高相控阵雷达低截获性能, 可以通过加权方式在敌方侦察设备方向形成零点。传统方法一般采用复数加权方式实现^[1-6], 而复数加权方式存在 2 个问题: 工程实现较为复杂, 需要对移相器和幅度衰减器同时进行控制; 幅度加权会降低相控阵雷达系统发射时的输出功率, 导致雷达主波束探测威力下降。而唯相位加权方式只需要对相控阵雷达的移相器进行配置, 工程实现起来较为简单, 且不损失能量。因此, 已有一些学者对唯相位技术进行了相关研究。Shore 通过非线性编程技术解决唯相位波束形成问题, 可以在指定干扰位置形成零陷^[7]; Khzmalyan 介绍了 2 种迭代的唯相位数值计算方法^[8], 根据目标函数的特殊结构, 每次迭代过程中固定其余的阵元相位, 只计算其中 1 个或 2 个阵元的相位权重; Haupt 利用遗传算法优化阵列天线中的唯相位权重^[9], 用数字移相器近似表示实际的相位, 然后将相位编码, 通过交叉、变异和选择等进化操作调整移相器的相位。此外, 克隆选择算法^[10]、蜂群算法^[11]和声搜索算法^[12]也被用来优化唯相位问题。Thompson 将输入信号和参考信号的误差作为目标函数, 通过梯度法搜索该最小误差来自动调整移相器的相位^[13]; Smith 以阵列输出信号干扰噪声比为目标函数, 推导了该目标函数的梯度和 Hessian 矩阵, 然后通过共轭梯度法和牛顿迭代法搜索唯相位最优权^[14]; Choi 提出基于直接数据域的唯相位最小二乘波束形成算法, 并通过共轭梯度法求解相位权重, 但是该方法形成的波束方向图旁瓣电平较高^[15]; Mismar 提出基于 Schelkunoff 单位圆的唯相位零陷算法^[16], 用 z 平面上的多项式表示阵列方向图, 然后将该阵列多项式表示成子多项式乘积形式, 每个子多项式都有 $z^{n_i}+1$ 的形式, n_i 为子多项式的最高次数, 次数最高的子多项式对应方向图主瓣, 调整其他的子多项式在单位圆上的根的位置到干扰位置上, 即可在

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-05-02

基金项目: 航空科学基金资助项目(2015ZD07006, 2016ZC07002)

作者简介: 路成军(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达系统技术等。email: lcjmdxian@126.com

干扰方向上形成零陷；Kajenski 利用半正定松弛技术优化唯相位问题，在指定角度范围内可以形成比较宽的凹槽零陷^[17]。为提高运算效率，本文提出一种快速相位加权方向图置零方法，其首先根据零点位置设置虚拟干扰，并构建干扰协方差矩阵；对静态相位权值施加扰动，根据最小输出功率准则，建立零点生成数学模型；最后，通过单坐标迭代算法求解相位权值。

1 阵列模型

如图 1 所示，考虑一 N 元均匀间隔线性天线阵，阵元间距 d ，工作波长 λ ，所有阵元各向同性。则相邻 2 个阵元在空间 θ 方向的辐射信号存在一个时延差：

$$\tau = \frac{d \sin \theta}{c} \quad (1)$$

式中 c 为光速。对于窄带信号，时延意味相移，相邻 2 个阵元的相位差：

$$\psi = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \quad (2)$$

阵列空域导向矢量为：

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{j2\pi d \sin \theta / \lambda}, \dots, e^{j2(N-1)\pi d \sin \theta / \lambda}]^T \quad (3)$$

为在角度 θ_j 形成零点，可以假设在 θ_j 方向存在一个虚拟干扰，则虚拟干扰协方差矩阵为：

$$\mathbf{R} = \mathbf{a}(\theta_j) \mathbf{a}^H(\theta_j) \quad (4)$$

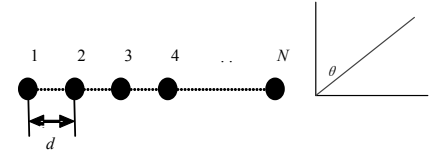


Fig.1 Array geometry
图 1 阵列结构

2 快速唯相位置零方法

为对方向图进行置零，首先根据主波束指向生成各阵元的静态相位权值 $\varphi_i^0, i=1, 2, \dots, N$ ；然后对各静态相位权值施加一个小的扰动量，该扰动值应足够小，确保不会影响主波束的指向性能；最后在该扰动范围优化各阵元的相位权值，使干扰功率最小，达到抑制虚拟干扰，从而实现在指定角度 θ_j 形成零点的目的。根据上述原理，建立数学模型

$$\begin{cases} \min \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \\ \text{s.t. } \mathbf{w} = [e^{j\varphi_1}, e^{j\varphi_2}, \dots, e^{j\varphi_N}]^T \\ |\varphi_i - \varphi_i^0| \leq \varepsilon, i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

式中： φ_i 为第 i 个阵元的相位权值； $\varphi_i^0 = 2(i-1)\pi d \sin \theta_0 / \lambda$ ， θ_0 为主波束指向； ε 为小的正实数。对上述建立的数学模型进行求解，将函数 $f(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}$ 看成是 φ_i 的函数，并令 $\mathbf{w}_{0i} = [e^{j\varphi_1}, \dots, e^{j\varphi_{i-1}}, 0, e^{j\varphi_{i+1}}, \dots, e^{j\varphi_N}]^T$ ， $\mathbf{w}_i = [0, \dots, 0, e^{j\varphi_i}, 0, \dots, 0]^T$ ，可得

$$f(\varphi_i) = (\mathbf{w}_{0i} + \mathbf{w}_i)^H \mathbf{R} (\mathbf{w}_{0i} + \mathbf{w}_i) = \mathbf{w}_{0i}^H \boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\gamma}^H \mathbf{w}_i + \beta \quad (6)$$

式中： $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{R} \mathbf{w}_{0i}$ ； β 为一常数。 $f(\varphi_i)$ 可以进一步表示为：

$$f(\varphi_i) = 2A \cos(\varphi_i - \alpha_i) + \beta \quad (7)$$

式中： A 为矢量 $\boldsymbol{\gamma}$ 第 i 个分量 γ_i 的模； α_i 为 γ_i 的相位。可以看出，当 $\varphi_i = \alpha_i + \pi$ 时， $f(\varphi_i)$ 取值最小。

综上所述，所提算法流程如下：

步骤 1) 设置 ε 值，根据主波束指向设置初始相位权值 $\varphi_i = \varphi_i^0, i=1, 2, \dots, N$ ；

步骤 2) 算法迭代第 m 次，计算 $\gamma_i = \mathbf{r}_i^H \mathbf{w}_{0i}$ ($i = \text{mod}(m, N)$ ， mod 表示取余运算)，其中 $\mathbf{r}_i$ 是矩阵 $\mathbf{R}$ 的第 i 行元素构成的列矢量；

步骤 3) 取复数 γ_i 的相位得到 α_i ；

步骤 4) 计算 $\varphi'_i = \alpha_i + \pi$ ，并按照式(8)更新相位权值：

$$\varphi_i = \begin{cases} \varphi'_i, & |\varphi'_i - \varphi_i^0| \leq \varepsilon \\ \varphi_i^0 + \varepsilon, & \varphi'_i - \varphi_i^0 > \varepsilon \\ \varphi_i^0 - \varepsilon, & \varphi'_i - \varphi_i^0 < -\varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

步骤 5) 检查是否满足停止条件，如满足，则算法停止迭代；不满足，则跳到步骤 2) 继续迭代。

由于变量是相位, 本文算法不是一个凸优化问题, 算法模型存在局部最优值。能否收敛到全局最优解与算法的初始取值有关, 初始值选取不合适有可能会收敛到局部最优, 因此需要选取合适的初始值。本文算法选取主波束指向对应的相位值作为初始值, 通过后续多次仿真测试, 最后收敛得到的零点深度基本相当, 且零点深度足够满足系统设计要求。

本文所提算法主要运算量在步骤 2) 中的 γ_i 的计算, 共需要 N 次复数乘法, 因此算法复杂度为 $O(K_1 N)$, K_1 为迭代次数; 文献[14]中算法复杂度为 $O(K_2 N^2)$, K_2 为迭代次数; 文献[17]中算法复杂度为 $O(N^{4.5})$ 。可以看出, 本文所提算法复杂度与阵列单元数呈线性关系, 明显低于文献[14]和文献[17]。

3 计算机仿真

假设阵列为含 32 个阵元的等距线阵, 阵元间距为半波长。天线主波束指向 0° , 敌方侦察设备位于 45° 和 55° 方向。仿真中, ε 为 0.17, 算法迭代 128 次。

实际相控阵系统中, 数字移相器量化位数一般为 6 位, 对算法得到的相位权值进行 6 位量化, 最终结果如图 2 和图 3 所示。从图 2 中可以看出, 本文所提方法可以有效地在方向图 45° 和 55° 方向形成零点, 且零点性能优于文献[14]和文献[17]中的方法, 零点深度分别达到了 -62 dB 和 -55 dB。

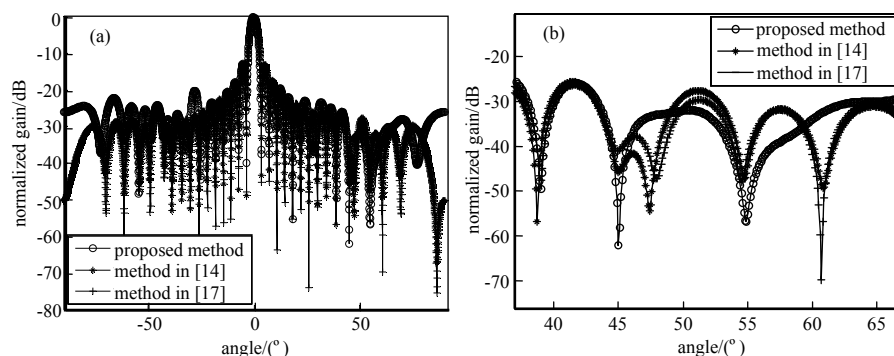


Fig.2 Array pattern
图 2 阵列方向图

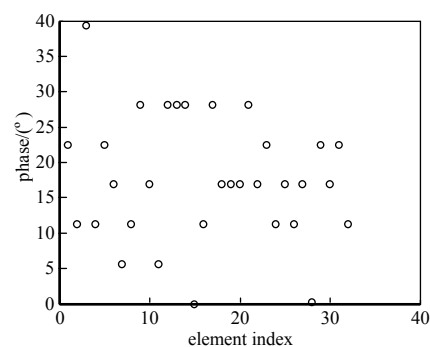


Fig.3 Phase distribution of the phase shifters
图 3 移相器相位分布

图 4 为算法迭代收敛曲线, 从图 4 中可以看出, 算法迭代到 100 次左右时已经收敛到一恒定值, 此时虚拟干扰输出功率最小。此外, 图 4 中迭代过程存在振荡, 该振荡现象是由计算得到的相位值进行边界处理和量化造成的, 通过多次仿真测试, 该振荡现象并不会影响算法的最终收敛。

图 5 比较了本文算法和已有算法的复杂度, 本文所提算法在迭代 100 次左右时已经基本收敛, 因此 K_1 取值为 100, 而文献[14]算法要迭代到 1 000 次左右才基本收敛, 因此 K_2 取值为 1 000。通过图 5 可以看出, 在阵列规模较大时, 本文算法复杂度明显低于文献[14]和[17]中算法的复杂度, 并且阵列规模越大, 本文算法的优势越明显。

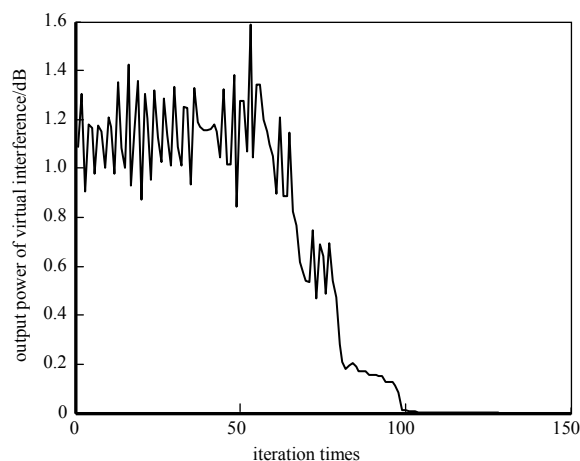


Fig.4 Convergence curve of the algorithm
图 4 算法迭代收敛曲线

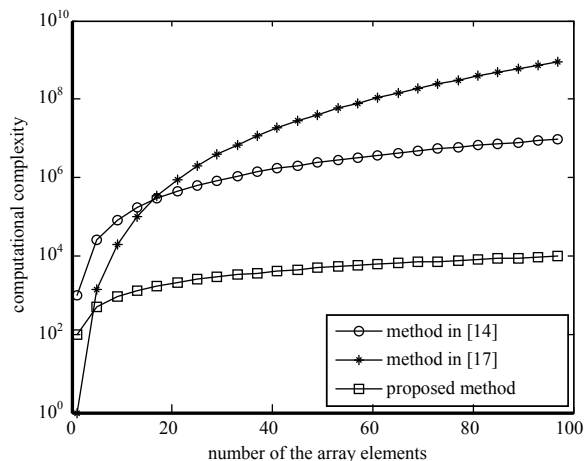


Fig.5 Comparison of the algorithm complexity
图 5 算法复杂度比较

4 结论

本文提出了一种新的快速唯相位加权方向图置零方法, 算法简单, 运算复杂度低, 能够在方向图指定位置形成零点, 降低雷达信号被敌方设备截获的概率。由于该方法仅需改变雷达移相器相位值, 不需改变幅度衰减器衰减值, 因此具有易于工程实现、不降低雷达探测威力、不增加雷达散热系统负担等优点, 具有很强的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 常晋聃,甘荣兵,兰竹,等. 自适应置零阵的改善因子上限分析[J]. 电子信息对抗技术, 2017,32(4):44-49. (CHANG Jindan,GAN Rongbing,LAN Zhu,et al. Upper limit of the improved factor of adaptive array[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2017,32(4):44-49.)
- [2] 曹德民. 发射阵列天线辐射近场特性分析及“置零”波束形成研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017. (CAO Demin. Radiative near field characteristic analysis and null beamforming of transmitting array antenna[D]. Harbin,China: Harbin Engineering University, 2017.)
- [3] 吴若增. 低截获通信中的发射波束置零关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (WU Ruozeng. Research on the key technology of transmitting null beamforming in the low intercept communication[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [4] 黄华,林桂道,张行. 子阵级阵列加权置零综合技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2013,36(4):88-91. (HUANG Hua,LIN Guidao,ZHANG Hang. Research into nulling synthesis technology with subarray weighting in array[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2013,36(4):88-91.)
- [5] 田可,杨向华,周继. 一种平面阵自适应方向图综合方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008,6(2):124-127. (TIAN Ke,YANG Xianghua,ZHOU Ji. A pattern synthesis method for adaptive plane arrays[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008,6(2):124-127.)
- [6] 张霞,陶海红,廖桂生. 一种任意阵的方向图综合方法[J]. 电子与信息学报, 2008,30(3):738-741. (ZHANG Xia,TAO Haihong,LIAO Guisheng. Pattern synthesis method for arbitrary arrays[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(3):738-741.)
- [7] SHORE R A. The use of nonlinear programming techniques for phase-only null synthesis[C]// Antennas and Propagation Society International Symposium. Houston,Texas:[s.n.], 1983:207-210.
- [8] KHZMALYAN A D,KONDRAT'YEV A S. Fast iterative methods for phase-only synthesis of antenna array pattern nulls[J]. Electronics Letters, 1995,31(8):601-602.
- [9] HAUPT R L. Phase-only adaptive nulling with a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997,45(6):1009-1015.
- [10] GUNEY K,BABAYIGIT B,AKDAGLI A. Interference suppression of linear antenna arrays by phase-only control using a clonal selection algorithm[J]. Journal of the Franklin Institute, 2008,345(3):254-266.
- [11] GUNEY K,ONAY M. Bees algorithm for interference suppression of linear antenna arrays by controlling the phase-only and both the amplitude and phase[J]. Expert Systems with Applications, 2010,37(4):3129-3135.
- [12] GUNEY K,ONAY M. Optimal synthesis of linear antenna arrays using a harmony search algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2011,38(12):15455-15462.
- [13] THOMPSON P A. Adaptation by direct phase-shift adjustment in narrow-band adaptive antenna systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1976,24(5):756-760.
- [14] SMITH S T. Optimum phase-only adaptive nulling[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999,47(7):1835-1843.
- [15] CHOI W S,SARKAR T K. Phase-only adaptive processing based on a direct data domain least squares approach using the conjugate gradient method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004,52(12):3265-3272.
- [16] MISMAR M J,ISMAIL T H,ABU-AL-NADI D I. Analytical array polynomial method for linear antenna arrays with phase-only control[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2007,61(7):485-492.
- [17] KAJENSKI P J. Phase only antenna pattern notching via a semidefinite programming relaxation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012,60(5):2562-2565.