

相位控制相控阵天线方向图¹

程 臻 姜新发* 吕善伟

(北京航空航天大学电子工程系 北京 100083)

* (中国航天机电集团二院 23 所 北京 100854)

摘 要 基于线阵, 讨论成片零点的相位控制, 提出和采用快速算法、部分单元控制方法和约束非线性离散变量优化算法。试验结果验证了数学模型和仿真结果的正确性。

关键词 自适应天线, 方向图零点, 相位, 移相器

中图分类号 TN820

1 引 言

自适应天线技术的发展是现代军事电子系统的性能得到改善的重要途径之一。可供选择的方法很多, 而能够获得极高性能的先进技术正处在研究之中。各种方法的性能和复杂性差异很大, 通过应用先进的数字技术能够在恶劣环境下大大改善系统的 SNR 性能。

相控零点技术因其所用的移相器是波束控制系统的一部分而倍受相控阵研制工作者的青睐^[1-3]。因此, 如果移相器能同时用作波束控制和自适应控制方向图零点(抑制干扰), 改造已有的相控阵或在新系统上加上该功能所带来的经费就可以几乎忽略不计了。已发表文献大多涉及单个或多个零点相位控制的纯理论算法, 很少考虑工程实现和应用效果, 更难见到有价值的试验结果。

本文在已有成果的基础上并结合工程实际, 提出了成片零点的快速算法, 解决了用少数位移相器控制成片零点的问题, 实现了用部分单元及少数位移相器控制成片零点, 将优化方法引入零点相位控制, 仿真结果得到试验验证。

2 成片零点相位控制

2.1 数学模型

在相控阵方向图某一区域降低副瓣, 可以把杂波干扰的影响降到最低, 也可以用来抑制宽频带干扰, 或者赢得更多的时间对付反辐射导弹(ARM)^[2]。引入性能参数 P , 它等于成零区域的平均功率和加权之和。改变规定区域的平均功率和加权分布的权系数, 可使性能参数 P 最小, 从而有可能满足上述两方面的要求。令性能参数 P 关于阵加权相位的偏导数为零, 得到一组非线性方程。就线阵而言,

$$P = \mu_1 \sum_{n=1}^N |W_n - W_{0n}|^2 + \mu_2 P_{av}(u_0, \varepsilon)$$

其中 μ_1 和 μ_2 分别是对加权平方和及区域内平均功率的加权系数; W_n, W_{0n} 为加权分布; 需要压低副瓣区域为 $[u_0 - \varepsilon, u_0 + \varepsilon]$, 此区域内的平均功率为 $P_{av}(u_0, \varepsilon)$ 。

$$a_n \sin \phi_n - \frac{\mu_2}{\mu_1} \sum_{i=1}^N a_i \sin[\phi_{0n} - \phi_{0i} + \phi_n - \phi_i + (d_n - d_i)u_0] \cdot g_{ni} = 0 \quad (1)$$

¹ 1999-04-29 收到, 1999-12-01 定稿

式中 $g_{ni} = \text{sinc}[(d_n - d_i)\varepsilon]$, $n = 1, 2, \dots, N$; a_n, ϕ_n 分别为幅度和相位分布; d_n 是单元间距。这组方程无解析解, 但可以通过计算机优化程序求出数值。

2.2 用部分单元实现成片零点相位控制

在实际工程应用中, 如果采用全阵相位控制, 给波控机带来很大压力。求相位分布计算量大, 计算时间长, 难以实现实时控制。我们若仅用部分单元就能实施相位控制, 这个问题就可以迎刃而解了。由于相控阵存在幅度分布台阶, 我们对称地使用两边各 K 个单元。

$$P_{av}(u_0, \varepsilon) = P_{av0}(u_0, \varepsilon) + 2 \sum_{n=1}^K \left\{ \sum_{m=n+1}^K G(n, m) \cos[p(n, m) + \phi_n - \phi_m] \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^K \left\{ 2 \sum_{m=K+1}^{N-K} G(n, m) \cos[p(n, m) + \phi_n] \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{m=N+1-K}^N \eta_m G(n, m) \cos[p(n, m) + \phi_n + \phi_{N+1-m}] \right\} \right\} \quad (2)$$

式中 $P_{av0}(u_0, \varepsilon) = 2 \sum_{n=K+1}^{(N+1)/2-1} \sum_{m=n+1}^{N-n} G(n, m) \cos[p(n, m)] + \sum_{n=K+1}^{\lfloor N/2 \rfloor} G(n, N+1-n) \cos[p(n, N+1-n)] + \sum_{n=1}^N a_n^2$,

$G(n, m) = 2a_n a_m g_{nm}$, $p(n, m) = \phi_{0n} - \phi_{0m} + (d_n - d_m)u_0$, $\eta_m = \begin{cases} 1, & m = N, \\ 2, & m \neq N, \end{cases}$ 求和中 $[\cdot]$

表示取整数。

对应于 (1) 式, 得到一组非线性方程:

$$2a_n^2 \sin \phi_n - \mu \sum_{m=K+1}^{N-K} G(n, m) \sin[p(n, m) + \phi_n] \\ - \frac{1}{2} \sum_{\substack{m=N+1-K \\ m \neq N+1-n}}^N \eta_m G(n, m) \sin[p(n, m) + \phi_n + \phi_{N+1-m}] \\ - \eta_{N+1-n} G(n, N+1-n) \sin[p(n, N+1-n) + 2\phi_n] \\ - \sum_{m=n+1}^K G(n, m) \sin[p(n, m) + \phi_n - \phi_m] = 0, \quad n = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

图 1 是 72 元半波长间距线阵仿真结果, N 、 N_{bit} 分别代表单元数和移相器位数。虚线为 -20dB 泰勒分布方向图, 压低副瓣区域为 $[-5^\circ, -10^\circ]$, 控制单元数为 20, 采用 4 位移相器。实线代表相位控制方向图, 副瓣降低 20.3dB 。

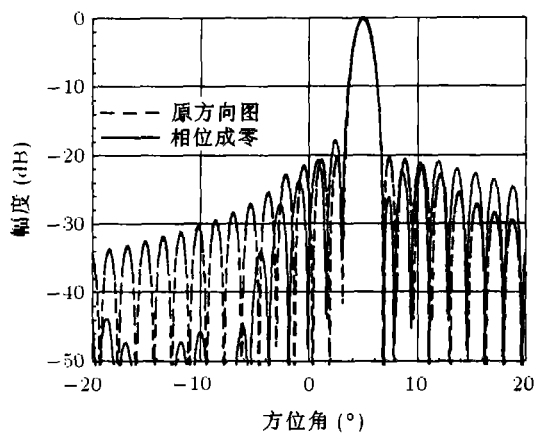


图1 控制部分单元形成成片零点
($R=-20\text{dB}$, $N=72$, $K=10$, $N_{\text{bit}}=4$)

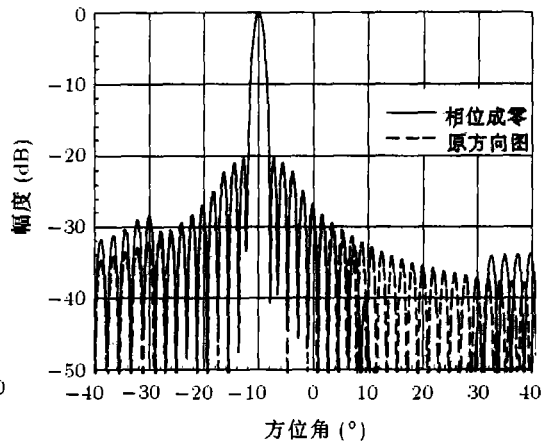


图2 成片零点相位控制快速算法
($R = -20\text{dB}$, $N=64$)

2.3 快速算法

(1) 式是非线性的，需要用非线性优化方法使 P 最小，求出相位分布。对于大型阵列，求解这个方程组需要大量 CPU 时间。但是，我们能设法把方程组线性化。

为了保持方向图主要性能不受影响，必须把降低副瓣所要求的相位分布限制在尽可能小的范围内。对于小相位，可以作下列近似

$$\left. \begin{aligned} \cos x &\approx 1, & x &\ll 1 \\ \sin x &\approx x, & x &\ll 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

实际上，数字移相器最低位相位值为 $2\pi/2^{N_{\text{bit}}}$ ，对于常用的 4 位移相器， $2\pi/2^{N_{\text{bit}}} \leq \pi/8$ ，上述近似满足工程应用。另一方面，按此近似求出的相位值大多在 10° 以下。将 (4) 式代入 (1) 式，得到一组线性方程

$$\phi_n \left(\mu a_n - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N a_i g_{ni} \cos \phi_{0ni} \right) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \phi_i a_i g_{ni} \cos \phi_{0ni} = \sum_{i=1}^N a_i g_{ni} \sin \phi_{0ni} \quad (5)$$

式中 $\mu = \mu_1/\mu_2$ 。

(5) 式是 $N \times N$ 阶矩阵方程。由于相位分布的奇对称

$$\phi_{N-n+1} = -\phi_n, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

问题简化成 $N/2 \times N/2$ 阶矩阵方程

$$[A_{mn}]_{\frac{N}{2} \times \frac{N}{2}} \cdot [\phi_n]_{\frac{N}{2}} = [B_m]_{\frac{N}{2}} \quad (7)$$

式中

$$A_{mn} = \begin{cases} a_n(g_{mn} \cos \phi_{0mn} - g_{ml} \cos \phi_{0ml}), & m \neq n, \\ a_m(\mu - g_{ml} \cos \phi_{0ml}) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^N a_i g_{mi} \cos \phi_{0mi}, & m = n, \quad l = N + 1 - n \end{cases}$$

$$B_m = \sum_{i=1}^N a_i g_{mi} \sin \phi_{0mi}$$

这个线性方程组可以 Crout 分解法求解。至此, 确定相位分布的速度大大加快。

另外, 用随机馈相法^[2,4]可实现用少数位移相器形成成片零点。图 2 是 64 元半波长间距阵仿真结果。虚线为 -20dB 泰勒分布方向图, 成零区域为 $[10^\circ, 30^\circ]$ 。实线代表相位控制方向图, 副瓣降低至 -50dB 以下。由于算法上简化, 降低副瓣的效果明显提高。

对于单元很多的相控阵, 上述距阵方程阶数仍然很大, 不便求解, 其精度难以保证。另一方面, 求出的相位值太小, 工程上实现困难。在这种情况下, 采用控制部分单元的方法。将 (4) 式代入 (3) 式, 得到一组线性方程:

$$\phi_m C_m - \frac{1}{2} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^K \eta_{N+1-n} GC(m, N+1-n) \phi_n + \sum_{n=m+1}^K GC(m, n) \phi_n = B_m \quad (8)$$

式中

$$C_m = 2[a_m^2 - \eta_{N+1-m} GC(m, N+1-m)] - \mu \sum_{n=K+1}^{N-K} GC(m, n) - \frac{1}{2} \sum_{\substack{n=N+1-K \\ n \neq N+1-m}}^N \eta_n GC(m, n),$$

$$GC(m, n) = G(m, n) \cos[p(m, n)],$$

$$B_m = \eta_{N+1-m} GS(m, N+1-m) + \mu \sum_{n=K+1}^{N-K} GS(m, n) + \frac{1}{2} \sum_{\substack{n=N+1-K \\ n \neq N+1-m}}^N \eta_n GS(m, n)$$

$$+ \sum_{n=m+1}^K GS(m, n),$$

$$GS(m, n) = G(m, n) \sin[p(m, n)].$$

至此, 问题归结为 $K \times K$ 阶矩阵方程:

$$[A_{mn}]_{K \times K} \cdot [\phi_n]_K = [B_m]_K \quad (9)$$

其中

$$A_{mn} = \begin{cases} -\frac{1}{2} \eta_l GC(m, l) + GC(m, n), & m < n, \\ C_n, & m = n, \\ -\frac{1}{2} \eta_l GC(m, l), & m > n, \end{cases}$$

$$l = N + 1 - n$$

2.4 最优化算法

零点相位控制问题也可以归结为离散优化问题。用部分单元及少数位移相器形成成片零点问题可表示为

$$\left. \begin{array}{l} \min .P_{av}(u_0, \varepsilon) \\ \text{变量取值范围}[\phi_{\min}, \phi_{\max}] \\ \text{离散间隔}2\pi/2^{N_{\text{bit}}} \end{array} \right\} \quad (10)$$

式中 $P_{av}(u_0, \varepsilon)$ 由 (6) 式定值。

加上方向图非成零区畸变最小作为约束, 就形成了约束非线性离散变量优化问题。我们采用的算法是建立在离散空间沿相对方向离散搜索和在某单位邻域内进行组合优化查点策略基础上的一种约束非线性离散变量直接搜索方法。本算法还辅之有子空间轮变搜索技术、最少代价的离散查点技术。

用最优化方法可以很好地解决对称零点控制、减小对原方向图主要性能影响等一般方法难以解决的问题。由此带来的非实时问题可以通过把预先计算好的相位分布存入存储器的办法加以解决。图 3 是 72 元半波长间距线阵仿真结果。虚线为 -20dB 泰勒分布方向图, 成零区域为 $[-20^\circ, -5^\circ]$ 。实线代表相位控制方向图, 副瓣降低 24.9dB , $N_{\text{bit}}=5, K=15$ 。

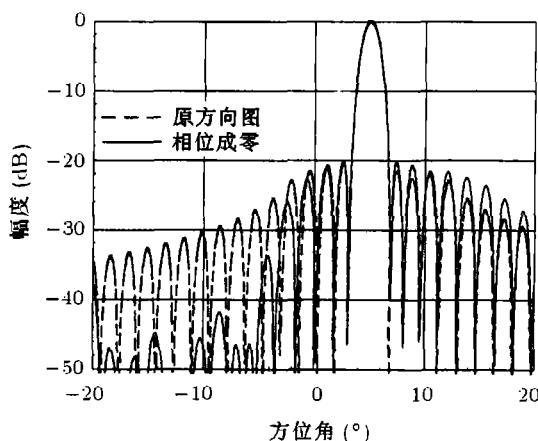


图 3 成片零点相位控制优化算法
($R = -20\text{dB}, N=72, K=15, N_{\text{bit}}=5$)

3 试验验证

试验阵是由 33 根波导裂缝天线和 33 个五位移相器构成的相控阵, 天馈系统的功分器和移相器的幅相分布是通过 8530-B 矢量网络分析仪进行测量和调试。辐射方向图的测试使用的是航天工业总公司 304 场的 2034 天线远场测试设备 (美国 SA 公司)。试验项目及其结果如表 1、表 2 所示:

表 1 单频点方向图零点相位控制的测试结果 (测试频率 $f=10.3\text{GHz}$)

序号	测试项目	控制零点位置	方向图原值 (dB)	方向图现值 (dB)
1	单零点测试	右第二副瓣	-21.4	-40.0 以下
2	单零点测试	右第一副瓣	-17.2	-37.0 以下
3	单零点测试	右第二副瓣和 左第四副瓣	-21.4 -27.0	-37.0 -36.2
4	成片零点测试	右第二副瓣至右 第四副瓣	-24.0	-35.2

表 2 成片零点相位控制的频带特性测试结果
(零点控制范围: 右第二副瓣至右第四副瓣)

序号	测试频率 (GHz)	方向图原值 (dB)	方向图现值 (dB)
1	9.95	-21.0~ -24.0	-34.0 以下
2	10.45	-21.0~ -24.0	-33.2 以下
3	10.55	-21.0~ -24.0	-32.0 以下
4	10.65	-21.0~ -24.0	-33.0 以下

4 结 束 语

本文在建模和仿真的基础上, 又进行了与工程应用相近的试验, 其结果不仅证明了理论的正确性, 而且说明了该技术的实用性。

参 考 文 献

- [1] Cheng Zhen, Jiang Xinfu, A fast algorithm of sidelobe sector nulling using phase-only control, ISAP'92, Sapporo, Japan, 1992, 153-156.
- [2] 程臻, 一种改善相控阵雷达性能的有效措施, 系统工程与电子技术, 1992, 14(3), 17-21.
- [3] R. A. Shore, The use of nonlinear programming for phase-only null synthesis, IEEE AP-S Int. Symp., 1983, Int. Symp. Digest, Antennas and Propagation, Houston, USA, 1983, Vol. I, 207-210.
- [4] 郭燕昌等, 相控阵和频率扫描天线原理, 北京, 国防工业出版社, 1978年3月, 第4章.

PHASED ARRAY ANTENNA NULLING USING PHASE-ONLY CONTROL

Cheng Zhen Jiang Xinfu* Lu Shanwei

(Dept. of Electron. Eng., Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

*(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract Based on a linear phased array antenna, sector nulling using phase-only control is analyzed by using a fast algorithm and a partly controlling method. And it can be modeled to a constrained discrete nonlinear optimization problem. An experiment is performed to verify the algorithm and the method.

Key words Adaptive antenna, Pattern nulling, Phase-only, Phase shifter

程 臻: 男, 1962年生, 博士生, 航天 23 所研究员, 研究方向为天线与微波技术、相控阵雷达信号处理技术等。

姜新发: 男, 1936年生, 研究员, 研究方向为天线与微波技术、DBF 及相控阵雷达等。

吕善伟: 男, 1937年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为微波通信、射频与微波天线馈线系统等。