

基于空间均衡方法的自适应零点形成

王炎 徐善驾

(中国科技大学电子工程与信息科学系, 安徽, 合肥, 230027)

摘要 提出空间均衡方法用来消除由天线的机械加工误差和阵面的边缘绕射引起阵元间的幅相误差. 对阵列互耦校正后, 推导了一种基于空间均衡方法的自适应零点形成算法. 该方法极大地提高了阵列的干扰对消性能. 实验结果证明了空间均衡方法的优越性.

关键词 阵列, 互耦校正, 空间均衡, 干扰对消.

ADAPTIVE NULLING BASED ON SPACE EQUALIZATION METHOD

WANG Yan XU Shan-Jia

(Department of Electronics Engineering and Information Science, USTC, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract The space equalization method (SEM) is put forward in this paper to eliminate the amplitude and phase errors among antennas caused by mechanical manufacturing errors and array edge effects. After array mutual coupling calibration (MCC), an adaptive nulling algorithm based on SEM is derived, which greatly improves jammer cancellation performances. The experimental results demonstrate the advantage of SEM.

Key words array, MCC, space equalization, jammer cancellation.

引言

对于阵列天线而言, 阵元间的互耦效应、阵元的机械加工误差和阵面的边缘绕射引起了阵元间的幅相误差, 并导致了阵列性能的降低^[1,2]. 通常有二种方法来校正这些误差. 一种是采用多线性插值法^[10], 由于多线性插值法需要大量存储各个方位的阵列流形, 且运算复杂, 实用性差. 另一种是提高机械加工精度和改善设计方法来使各个天线阵子保持各向同性^[6,9], 再结合信号处理方法消除互耦误差, 如截短傅氏变换法、傅氏变换法、最小二乘法^[3-7]. 该方法设计周期长、加工要求精度高和费用昂贵.

因此, 我们提出了一种新的简便易行的阵列插值方法——空间均衡方法来解决这些问题. 首先用互耦校正将最主要的阵列误差互耦误差消除, 然后用局部优化方法实现空间均衡以校正机械加工误差和阵面边缘绕射引起阵元间的幅相误差, 再根据计算的空间均衡矩阵提出了相应的自适应零点形成算

法. 最后, 用实验数据验证了空间均衡方法的优异性能. 本文的空间均衡方法不同于文献[11]的插值方法, 文献[11]的方法是从圆形阵列中插值出虚的均匀线性阵列.

1 阵列误差校正

本文将阵列误差校正分互耦校正和空间均衡校正二步完成.

1.1 互耦校正

设 θ 方向信号入射到 N 阵元输出为

$$x(\theta) = s(\theta)Ca(\theta) + v, \quad (1)$$

式(1)中

$$\begin{aligned} x(\theta) &= [x_1(\theta) \ x_2(\theta) \ \cdots \ x_N(\theta)]^T, \\ a(\theta) &= [1 \ e^{j2\pi d \sin\theta/\lambda} \ \cdots \ e^{j2\pi(N-1)d \sin\theta/\lambda}]^T, \\ v &= [v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_N]^T. \end{aligned}$$

这里 d 是相邻阵元间距, λ 是信号的波长. v 是噪声矢量, $a(\theta)$ 是理想导向矢量, C 是互耦矩阵. 当远场测试信号从 θ_1 至 θ_M 方向入射时, 阵列共接收到 M

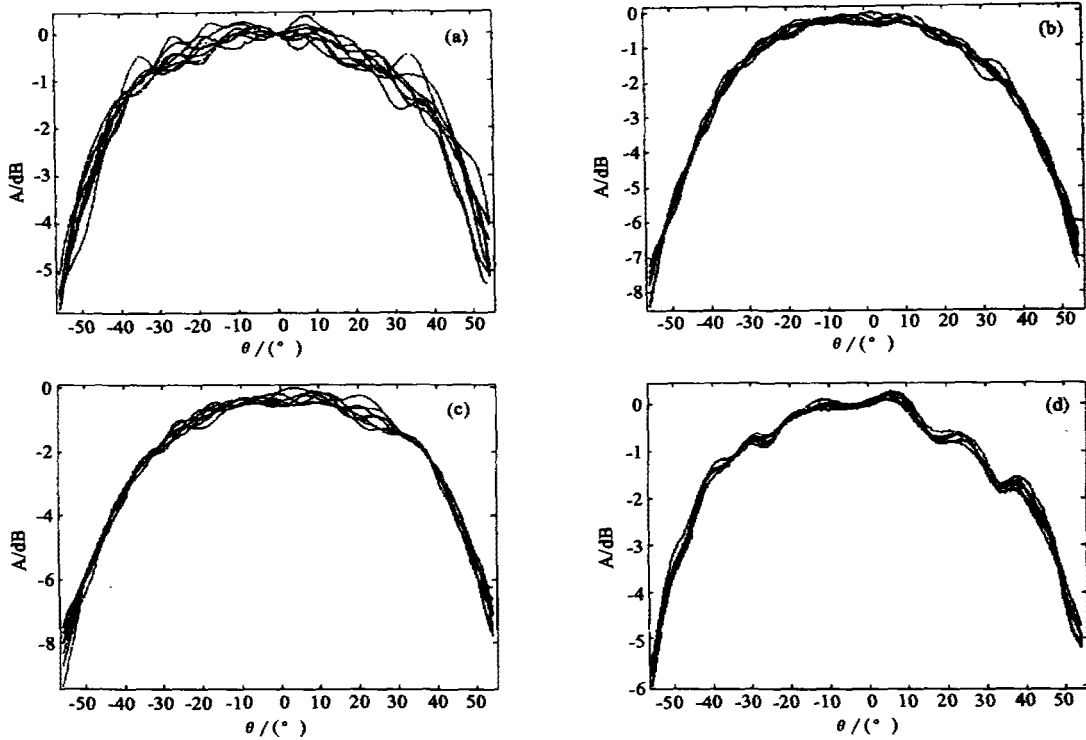


图1 单个阵元的幅度方向图($f=2.0125\text{GHz}$) (a)有互耦的(b)互耦校正后(c)空间均衡后(d)同样测试条件时的
 Fig. 1 Element amplitude patterns ($f=2.0125\text{GHz}$) (a) coupled (b) decoupled (c) space equalized (d) tested under the same conditions

组输出样本矢量,即 $\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$.那么我们可以构造如下的代价函数求互耦校正矩阵 B

$$J_B = \sum_{m=1}^M \| Bx_m - s_m a(\theta_m) \|^2. \quad (2)$$

约束条件 $B_{11} = 1$.

互耦校正矩阵的计算是二步迭代过程.首先我们估算信号的幅度 $s_m, \{m=1, 2, \dots, M\}$,并将 B_0 初始化为一个单位矩阵,则第 i 次迭代 s_m 为

$$s_m = a(\theta_m)^H B_{i-1} x_m / \| a(\theta_m) \|^2. \quad (3)$$

用估算出的 s_m 再计算 B_i 的迭代估值

$$B'_i = \left(\sum_{m=1}^M s_m a(\theta_m) x_m^H \right) \cdot \left(\sum_{m=1}^M x_m x_m^H \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$B_i = \frac{B'_i}{u^T B'_i u}. \quad (5)$$

式中 u 是第一个单元为 1 其余为 0 的 N 维列向量.通过式(3)~(5)的不断迭代,直至 $B_i - B_{i-1}$ 小于预先设置的一个非常小的值才停止迭代.

1.2 空间均衡

原始的阵列输出矢量集经过互耦校正后,得到一组新的输出矢量集 $\{y_1, y_2, \dots, y_M\}$ 为

$$y_m = Bx_m, \quad (6)$$

y_m 中仍然包含有与 θ_m 有关的残差,该误差不是随机的噪声误差,它在空间上是慢变的,因此我们提出用空间均衡的方法对局部区域优化来消除阵元间的误差.现构造代价函数为

$$J_E = \sum_{m=1}^M w_m \| E y_m - \alpha_m a(\theta_m) \|^2. \quad (7)$$

约束条件 $E_{11} = 1$.

式中 E 是 $N \times N$ 空间均衡矩阵, α_m 是 y_m 的幅度估值, w_m 是加权系数.我们假设均衡区域从样本 k_1 到 k_2 ,则可以构造这样的加权系数:

$$w_m = \begin{cases} w_B & m \leq k_1 - T_k; m > k_2 + T_k \\ \frac{1}{1 + e^{-\beta(m-k_1)}} & k_1 - T_k < m \leq (k_1 + k_2)/2 \\ \frac{1}{1 + e^{\beta(m-k_2)}} & (k_1 + k_2)/2 < m \leq k_2 + T_k \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中 β 是一个调节 w_m 斜率的常数, w_B 平衡局部误差和全局误差, T_k 的计算如下

$$T_k = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1}{w_B} - 1 \right).$$

求 J_E 的最小化类似于上面的迭代过程.首先我

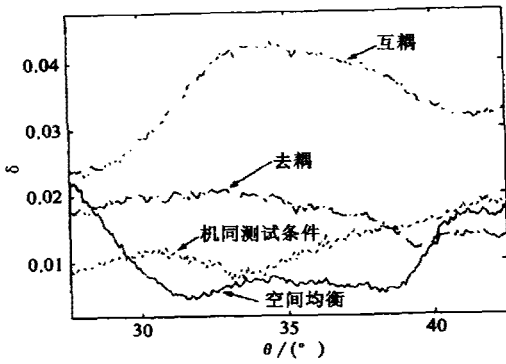


图2 阵元幅度方向图的归一化方差 ($f = 2.0125$ GHz)

Fig.2 Normalized standard deviations of element amplitude patterns ($f = 2.0125$ GHz)

们估算信号的幅度 $\alpha_m \{m = 1, 2, \dots, M\}$, 并将 E_0 初始化为一单位矩阵, 则第 i 次迭代 α_m 为

$$\alpha_m = a(\theta_m)^H E_{i-1} y_m / \|a(\theta_m)\|^2, \quad (9)$$

用估算出的 α_m 再计算 E_i 的迭代估值

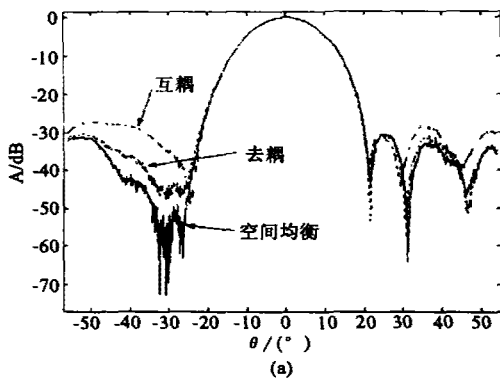
$$\bar{E} = \left(\sum_{m=1}^M w_m \alpha_m a(\theta_m) y_m^H \right) \cdot \left(\sum_{m=1}^M w_m y_m y_m^H \right)^{-1}, \quad (10)$$

$$E_i = \frac{\bar{E}}{u^T E u}. \quad (11)$$

通过式(9) ~ 式(11)的不断迭代, 直至 $E_i - E_{i-1}$ 小于预先设置的一个非常小的值才停止迭代.

2 自适应零点形成算法

前面介绍的空间均衡只是将限定在某个角度扇区内的误差基本消除, 如对应的 $k1$ 到 $k2$ 区间, 如果对消分布在比较宽的区域的多于个干扰则需要多个相应的空间均衡矩阵联合使用, 达到对消效果. 我们假设有 J 个干扰从 γ_1 到 γ_J 方向入射, 那么阵列输出为



$$x = \bar{A}s + v, \quad (12)$$

式中 s 是 $J \times 1$ 干扰强度矢量, 且

$$\bar{A} = [\bar{a}(\gamma_1), \dots, \bar{a}(\gamma_J)].$$

$\bar{a}(\gamma_j)$ 是阵列在 γ_j 方向的实际阵列流形. 假设我们已经知道干扰的精确方向 (可以用超分辨方法计算出来), 那么可以用 J 个空间均衡后的阵列流形张成的空间来近似互耦校正后的干扰空间, 即

$$\begin{aligned} \text{span}(B\bar{A}) &\approx \text{span}[E_1^{-1}a(\gamma_1), \dots, E_J^{-1}a(\gamma_J)] \\ &= \text{span}(\bar{A}). \end{aligned} \quad (13)$$

式中 E_j 是对应 γ_j 方向的空间均衡矩阵. 现在我们可以通过拉格朗日乘子法计算互耦校正后的自适应加权 \bar{w}

$$\min_{\bar{w}} \|\bar{w} - \bar{w}_q\|^2, \quad (14)$$

$$\text{约束条件 } \bar{A}^H \bar{w} = 0_J.$$

这里 0_J 是 $J \times 1$ 零向量. 解式(14)得

$$\bar{w} = [I - \bar{A}(\bar{A}^H \bar{A})^{-1} \bar{A}^H] \bar{w}_q = P_A^\perp \bar{w}_q. \quad (15)$$

式中 \bar{w}_q 是静态方向图加权矢量. 当波束主瓣存在干扰时, 我们需要将 \bar{w}_q 投影到信号子空间以防止信号对消, 因此

$$\bar{w}_q = \text{diag}(w) E_s^{-1} a(\theta_s). \quad (16)$$

式中 w 是 $N \times 1$ 的加权向量 (如汉明窗等), θ_s 是信号入射方向, E_s 是对应信号的空间均衡矩阵.

3 实验结果讨论

本文的阵元方向图数据是从一个 8 单元均匀线阵上采集到的, 阵元方向图方位是从 $-55.9^\circ \sim 54.1^\circ$, 采样间隔是 0.1° . 远场测试信号的工作频率为 2.0125 GHz, 相邻阵元间距为 8 cm. 在下面的图中

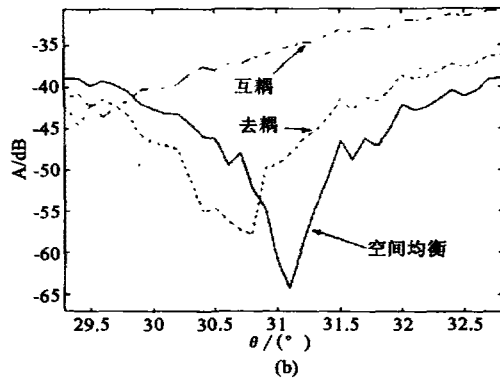


图3 8 单元自适应置零方向图 ($f = 2.0125$ GHz) (a) 显示范围 $-55.9^\circ \sim 54.1^\circ$ (b) 31° 零点附近局部放大

Fig.3 Eight element adaptive nulling patterns ($f = 2.0125$ GHz) (a) displayed from $-55.9^\circ \sim 54.1^\circ$ (b) zoomed around 31°

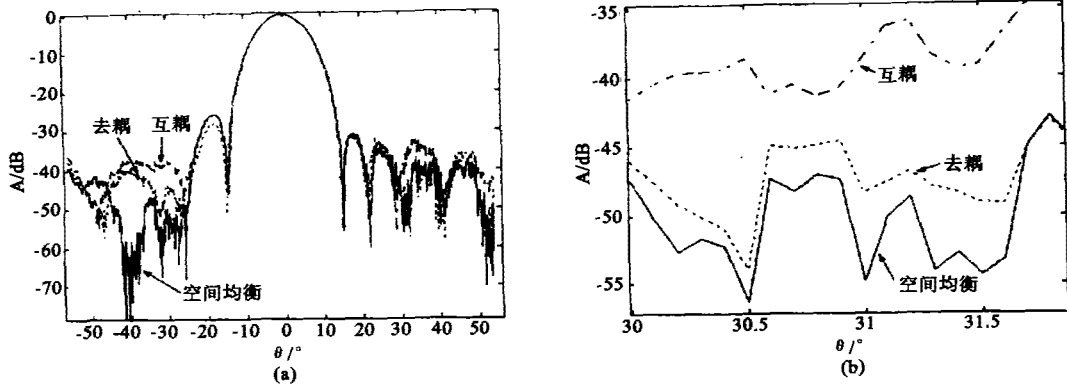


图4 12单元自适应置零方向图($f=1.9925\text{GHz}$) (a)显示范围 $-55.9^\circ\sim 54.1^\circ$ (b) 31° 零点附近局部放大
Fig.4 Twelve element adaptive nulling patterns ($f=1.9925\text{GHz}$) (a) displayed from $-55.9^\circ\sim 54.1^\circ$ (b) zoomed around 31°

A 代表幅度, θ 代表角度, δ 代表归一化方差. 图1(a)、(b)和(c)分别给出了有互耦、互耦校正和空间均衡后的单个阵元幅度方向图. 图1(c)对应的空间均衡范围是从 $30^\circ\sim 40^\circ$, 其它参数为: $\beta=2$ 和 $W_B=0.01$. 从图1可知, 互耦校正后阵元间的误差大大降低了, 而空间均衡则几乎将均衡区域内的误差全部对消了. 图1(d)给出了这8个阵元在同一位置条件下测试的方向图, 由图可知, 机械加工误差引起各个阵元方向图的不一致. 图2进一步分析了图1(a)~(d)的幅度方向图在 $25^\circ\sim 45^\circ$ 区间的归一化方差, 其中点划线、虚线、逗点线和实线分别对应有互耦、互耦校正、空间均衡和在同样测试条件下计算的方向图归一化方差. 图2表明空间均衡方法将天线的机械加工误差和阵列的边缘效应的影响均消除了.

图3(a)画出了波束指向 0° 、 -35dB 切比雪夫加权且有4个零点的自适应合成方向图, 其中位于 -32° 、 -30° 、 -28° 的3个零点构成一个宽零点, 剩下的一个零点在 31° . 它们对应的空间均衡区域为 $-35^\circ\sim -25^\circ$ 和 $30^\circ\sim 40^\circ$, 其它参数均为: $\beta=2$ 和 $W_B=0.01$. 图3(b)和(c)是在2个宽、窄零点附近局部放大的合成方向图, 图3中的点划线、逗点线和实线分别对应有互耦、互耦校正和空间均衡后的合成方向图. 从图3可以看出, 空间均衡后的平均零点深度比互耦校正后的低 10dB 左右并且保留了互耦校正后的低旁瓣特性, 而互耦校正后的平均零点深度比有互耦情况下的又要低 10dB 左右.

图4给出了与图3类似的结论, 图4的信号频率为 1.9925GHz 和12个天线单元. 因此空间均衡技术极大地提高了阵列性能, 又易于工程实现, 即降低了阵列天线的加工精度和材料一致性要求.

REFERENCES

- [1] Gupta I J, Ksienski A A. Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays. *IEEE Trans. AP*, 1983, **31** (9): 785—791
- [2] Huang J. The finite plane effect on the microstrip antenna radiation patterns. *IEEE Trans. AP*, 1983, **32** (4): 649—653
- [3] Koerber M A, Fuhrman D R. Array calibration by fourier series parameterization; Stochastic maximum likelihood solution. *Statistical Signal and Array Processing, 1992, Conf. Proceedings, IEEE 6th SP Workshop on*, 1992: 304—307
- [4] Steyskal H, Herd J S. Mutual coupling compensation in small array antennas. *IEEE Trans. on AP*, 1990, **38** (12): 1971—1975
- [5] See C M S. Sensor array calibration in the presence of mutual coupling and unknown sensor gains and phases. *Electronics Letters*, 1994, **30** (3): 373—374
- [6] Pettersson L, Danestig M, Sjöström U. An experimental S-Band digital beamforming antenna. USA; *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 1996: 93—98
- [7] See C M S, Poh B K. Parametric sensor array calibration using measured steering vectors of uncertain locations. *IEEE Trans. On SP*, 1999, **47** (4): 1133—1137
- [8] WANG Yan, WU Man-Qing, JIN Xue-Ming, et al. The development of DBF phased array radar system. Beijing: 2001 *CIE Inter. Radar Conf*(王炎, 吴曼青, 靳学明, 等. DBF相控阵雷达系统研制. 北京: CIE国际雷达会议), 2001, 61—64
- [9] Carlson B D, Goodman L M, Austin J, et al. An ultralow-sidelobe adaptive array antenna. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1990, **3** (2): 291—310
- [10] Schmidt R O. Multilinear array manifold interpolation. *IEEE Trans. SP*, 1992, **40** (4): 857—866
- [11] Wax M, Sheinvald J. Direction finding of coherent signals via spatial smoothing for uniform circular arrays. *IEEE Trans. AP*, 1994, **42** (5): 613—620