

相控阵部分自适应波束形成收发算法

孙胜贤, 龚耀寰, 王维学

(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 610054)

摘 要: 为减少大型相控天线阵的优化唯相权值的计算量, 本文提出一种新的相控阵部分自适应波束形成的收发算法. 它采用自适应部分地选择控制零点的控制阵元(PA), 按照最大信干噪比原则, 用部分唯相共轭梯度法计算各个阵元的优化唯相权矢量来减轻干扰的影响. 模拟结果表明, 当干扰数目小于阵元半数时计算性能有很大提高, 同时天线远场模式的主瓣损失、波形变化及干扰方向零点深度与全阵自适应相比几乎没有变化.

关键词: 波束形成; 干扰置零; 相控阵列; 梯度算法

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1755-04

Partial Adaptive Beamforming Receiving and Transmission Algorithm on Phase-Only Antenna Arrays

SUN Sheng-xian, GONG Yao-huan, WANG Wei-xue

(Dept. of Electronic Technology, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: To lessen the computational cost of optimal weight phasor in massive linear isotropic phase-only arrays, a novel partially adaptive approach suiting for both beamforming receiving and transmission is presented in this paper. With this approach, array elements controlling nulls are partially selected adaptively (PA) and the optimal phasor is achieved by partial phase-only conjugate gradient algorithm to mitigate interferences according to the maximal signal to interference plus noise ratio (SINR). The simulations show that the computational performance will be improved greatly while the mainbeam loss, mainlobe shape distortion and nulls depth in the directions of arrival (DOA) of interference of the far-field pattern do not change significantly compared to the full adaptive (FA) case with assumptions that the number of interferences are less than half of the array elements and directions of arrival of interference are not in the mainbeam of the arrays.

Key words: beamforming; interference nulling; phase-only arrays; gradient algorithm

1 引言

相控天线阵列具有很强的抗干扰能力和简化的硬件实现^[1,2], 在现代军事与民用中显示出日益强大的作用, 然而实时求出大型相控天线阵各阵元的优化唯相位权值却比较困难. 对于相控天线阵波束形成的接收与发射的算法, 近年来的研究一部分在小相位和很少的干扰(相对于阵元数)假设下的局部线性化方法^[3,4], 一部分是不作小相位假设且能够对称置零的非线性唯相共轭梯度方法^[5]、非线性优化方法^[6,7]和遗传算法^[8], 但都具有相当大的计算量, 另外, 文[4]在干扰数目远小于阵元数的情况, 考虑到在全阵自适应时各阵元的相位变化幅度很小, 使用低分辨率移相器时的相位变化可能小于移相器发生移相的阈值, 从而导致天线远场模式并没有自适应地变化, 天线阵抗干扰性能变差, 为解决这种情况引入了部分自适应方法, 用局部线性化方法, 取得了较好的效果, 但计算量并没有明显减少, 且前提是小相位假设和很少的干扰.

本文考虑在干扰数目小于阵元半数的情况下, 在各向同性线性相控阵中通过自适应地选择部分控制阵元的方式, 采用具有很强鲁棒性的唯相共轭梯度法计算优化权值的唯相位矢量. 其基本原理是通过固定一部分阵元的权值, 同时加大另一部分阵元权值的变化, 在天线远场模式中的主瓣损失、偏移和畸变及干扰方向零点深度仅有很小的变化的前提下, 达到在使用低分辨率移相器情况下能够使移相器发生移相变化, 使天线远场模式发生相应的调整, 从而保持了天线阵优良的抗干扰性能. 由于权值的计算是采用具有二次收敛性能的非线性的唯相共轭梯度法, 同时采用的部分自适应方法缩小了搜索空间, 与全阵自适应相比, 计算速度显著提高, 而且不需要小相位假设. 模拟实验结果表明了这种方法的高度有效性.

2 模型分析

假设有 m 个干扰信号分别从 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 角度(与阵法线的夹角, 后同定义)以强度 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m$ (干扰功率比)到达

收稿日期: 2001-08-10; 修回日期: 2001-12-10

基金项目: 国防科技预研基金(No. 2000J7. 1. 3. DZ0207)

天线阵, 干扰和噪声的相关矩阵为 \mathbf{R} (空间谱估计方法计算或空间采样), 天线阵由 n 个等间距线性各向同性相控阵元构成.

根据阵列天线理论, 天线的方向复增益为

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^n w_i \exp(j2\pi d \lambda_0^{-1} (i-1)(\sin\theta - \sin\theta_0)) \quad (1)$$

其中 w_i 为第 i 个阵元复增益, d 为阵元间距, λ_0 为天线阵工作波长, θ_0 为主瓣方向, θ 为扫描角. 相控阵各阵元权值幅度恒定不变, 记阵元幅度矢量为 $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$, 其中 a_i 为第 i 个阵元的幅度, 相位矢量为 $\boldsymbol{\phi} = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)^T$, ϕ_i 为第 i 个阵元的相位, 天线阵的方向矢量为 $\mathbf{v}(\theta) = (v_1(\theta), v_2(\theta), \dots, v_n(\theta))^T$, 其中 $v_i(\theta) = a_i^* \exp(j2\pi d \lambda_0^{-1} \sin\theta (i-1))$, $i = 1, \dots, n$, \otimes 表示向量间的哈达玛积, 即

$$\mathbf{w} = \mathbf{a} \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}} = (a_1, \dots, a_n)^T \otimes (e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_n})^T = (a_1 e^{j\phi_1}, a_2 e^{j\phi_2}, \dots, a_n e^{j\phi_n})^T$$

ϕ_i 为第 i 个阵元的相位, 则输出信干噪比为阵元相位的函数,

$$\sigma(\mathbf{w}) = \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{S} \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}} = \frac{(\mathbf{a}^T \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}H}) \mathbf{S} (\mathbf{a} \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}})}{(\mathbf{a}^T \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}H}) \mathbf{R} (\mathbf{a} \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}})} \quad (2)$$

$$e^{j\boldsymbol{\phi}} = (e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_n}) \in T^n$$

自适应波束发射的目标是实时求得 $\mathbf{w} = \mathbf{a} \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}}$, 使得 $\sigma(\mathbf{w})$ 最大. 由全阵唯相权值的 SINR 分析, 唯相梯度为

$$\nabla \sigma(\mathbf{w}) = \text{Im}(\text{diag}[\mathbf{S} - \sigma(\mathbf{w}) \mathbf{R}, \mathbf{w} \mathbf{w}^H]) / \mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{S} = \mathbf{v}(\theta) \mathbf{v}(\theta)^H$, $\mathbf{R} = E[\mathbf{n} \mathbf{n}^H] + \sum_{j=1}^m \mathbf{M}_j$, 假定噪声为加性高斯白噪声, 各干扰互不相关, 噪声矢量 $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_n)^T$, \mathbf{M}_j 为第 j 个干扰的自相关矩阵, 即 $\mathbf{M}_j = \rho_j \mathbf{v}(\theta_j) \mathbf{v}(\theta_j)^H$, T^n 表示 n 维环面, $[\mathbf{A}, \mathbf{B}] = \mathbf{A} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{A}$ 是矩阵李代数, Re, Im 代表取复数 (矩阵) 的实、虚部, \mathbf{x}^* 、 \mathbf{x}^T 、 \mathbf{x}^H 分别代表 \mathbf{x} 复共轭、转置、共轭转置, diag 代表取矩阵的对角部分, Diag 表示向量的对角化矩阵, 并且后面均作如此定义, 不另说明.

当全部阵元参与唯相控制时计算量相当大, 为了减少计算量, 并考虑在天线远场模式相对于全阵相控时变化相当小的情形下, 采用自适应选择部分控制阵元的方法来处理. 下面均考虑干扰数目小于阵元数半数的情形, 并且由于天线主瓣主要被阵列中间部分的阵元控制 (特别是在降低旁瓣技术中), 旁瓣和零点主要由两边的阵元来控制, 故可以恰当选择阵列中间的某些阵元, 使它们的相位权值相对固定, 其它阵元相位值变化来达到控制阵列零点的目的. 本文在阵元的选择方法上采用较简单的准则, 选择天线阵两边的各干扰数目和分布式干扰数的和个阵元来控制阵列零点变化, 当然, 也可考虑另外较复杂控制准则^[2,4].

3 部分自适应唯相梯度

为方便分析, 下面考虑 m 个干扰中不含有主瓣内干扰的情形. 对全阵阵元权值矢量分组 $\mathbf{w} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_c, \mathbf{w}_2)^T$, $\mathbf{w}_p = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2)^T$, 其中 $\mathbf{w}_1 = (w_1, \dots, w_m)^T$, $\mathbf{w}_2 = (w_{n-m+1}, \dots, w_n)^T$, $\mathbf{w}_c = (w_{m+1}, \dots, w_{n-m})$ 是阵元中权值恒定不变的部分, 把信号与干扰加噪声的各相关矩阵相应分别分块

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix}, \mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{S}_1 = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{13} \\ S_{31} & S_{33} \end{pmatrix}, \mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{13} \\ R_{31} & R_{33} \end{pmatrix}, \mathbf{S}_2 = (S_{21}, S_{23}),$$

$$\mathbf{S}_3 = \begin{pmatrix} S_{12} \\ S_{32} \end{pmatrix}, \mathbf{R}_2 = (R_{21}, R_{23}), \mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} R_{12} \\ R_{32} \end{pmatrix}$$

有 $\mathbf{S}_2^H = \mathbf{S}_3$, $\mathbf{R}_2^H = \mathbf{R}_3$, 则信号与干扰加噪声比为变化部分的权值 $\mathbf{w}_p = \mathbf{a}_p \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}_p}$, $e^{j\boldsymbol{\phi}_p} \in T^{2m}$ 的函数, 但它仍是恒定部分的权值 $\mathbf{w}_c = \mathbf{a}_c \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}_c}$ 的函数, 表达式为

$$\sigma(\mathbf{w}_p) = \frac{\mathbf{w}_p^H \mathbf{S} \mathbf{w}_p}{\mathbf{w}_p^H \mathbf{R} \mathbf{w}_p} = \frac{\mathbf{w}_p^H \mathbf{S}_1 \mathbf{w}_p + 2\text{Re}(\mathbf{w}_p^H \mathbf{S}_3 \mathbf{w}_c) + \mathbf{w}_c^H \mathbf{S}_2 \mathbf{w}_c}{\mathbf{w}_p^H \mathbf{R}_1 \mathbf{w}_p + 2\text{Re}(\mathbf{w}_p^H \mathbf{R}_3 \mathbf{w}_c) + \mathbf{w}_c^H \mathbf{R}_2 \mathbf{w}_c} \quad (4)$$

$$\mathbf{w}_p = \mathbf{a}_p \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}_p} \in \mathbf{a}_p \otimes T^{2m}$$

把上式分子分母分别表示为

$$N(\mathbf{w}_p) = \mathbf{w}_p^H \mathbf{S}_1 \mathbf{w}_p + 2\text{Re}(\mathbf{w}_p^H \mathbf{S}_3 \mathbf{w}_c) + \mathbf{w}_c^H \mathbf{S}_2 \mathbf{w}_c \quad (5)$$

$$D(\mathbf{w}_p) = \mathbf{w}_p^H \mathbf{R}_1 \mathbf{w}_p + 2\text{Re}(\mathbf{w}_p^H \mathbf{R}_3 \mathbf{w}_c) + \mathbf{w}_c^H \mathbf{R}_2 \mathbf{w}_c \quad (6)$$

考虑取参与控制的阵元的相位扰动矢量 $\Delta = (\delta_1, \dots, \delta_m, \delta_{m+1}, \dots, \delta_{2m})$, t 为参量, 记 $e^{j\mathbf{t}\Delta} = \text{diag}(e^{j\delta_1 t}, \dots, e^{j\delta_m t}, e^{j\delta_{m+1} t}, \dots, e^{j\delta_{2m} t})$, 对扰动式: $\mathbf{w}_p \rightarrow e^{j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p$ 有:

$$N(e^{j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p) = \mathbf{w}_p^H e^{-j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{S}_1 e^{j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p + 2\text{Re}(\mathbf{w}_p^H e^{-j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{S}_3 \mathbf{w}_c) + \mathbf{w}_c^H \mathbf{S}_2 \mathbf{w}_c \quad (7)$$

$$D(e^{j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p) = \mathbf{w}_p^H e^{-j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{R}_1 e^{j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p + 2\text{Re}(\mathbf{w}_p^H e^{-j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{R}_3 \mathbf{w}_c) + \mathbf{w}_c^H \mathbf{R}_2 \mathbf{w}_c \quad (8)$$

把 $N(e^{-j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p)$, $1/D(e^{-j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p)$ 在 $t=0$ 处 Taylor 展开有

$$N(e^{j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p) = \mathbf{w}_p^H (\mathbf{S}_1 - j\mathbf{t}[\Delta, \mathbf{S}_1] + \dots) \mathbf{w}_p + 2\text{Re}(\mathbf{w}_p^H (\mathbf{I} - j\mathbf{t}\Delta + \dots) \mathbf{S}_3 \mathbf{w}_c) + \mathbf{w}_c^H \mathbf{S}_2 \mathbf{w}_c \quad (9)$$

$$1/D(e^{j\mathbf{t}\Delta} \mathbf{w}_p) = 1/(\mathbf{w}_p^H \mathbf{R} \mathbf{w}_p) + (j\mathbf{w}_p^H [\mathbf{t}\Delta, \mathbf{R}_1] \mathbf{w}_p + 2\text{Re}(\mathbf{w}_p^H j\mathbf{t}\Delta \mathbf{R}_3 \mathbf{w}_c)) / (\mathbf{w}_p^H \mathbf{R} \mathbf{w}_p)^2 \quad (10)$$

把式(9)、(10)相乘并取一阶项, 有

$$d\sigma(\mathbf{w}_p)(\Delta) = \frac{1}{\mathbf{w}_p^H \mathbf{R} \mathbf{w}_p} (j\mathbf{w}_p^H ([\Delta, \mathbf{S}_1] - \sigma(\mathbf{w})[\Delta, \mathbf{R}_1]) \mathbf{w}_p + 2\text{Im}(\mathbf{w}_p^H \Delta (\mathbf{S}_3 - \sigma(\mathbf{w}) \mathbf{R}_3) \mathbf{w}_c)) \quad (11)$$

故得选取两边 $2m$ 个阵元作控制阵元时, SINR 对唯相权矢量的梯度为

$$\nabla \sigma = \frac{1}{\mathbf{w}_p^H \mathbf{R} \mathbf{w}_p} \text{Im}(\text{diag}[\mathbf{S}_1 - \sigma(\mathbf{w}) \mathbf{R}_1, \mathbf{w}_p \mathbf{w}_p^H] + 2(\mathbf{w}_p^* \otimes ((\mathbf{S}_3 - \sigma(\mathbf{w}) \mathbf{R}_3) \mathbf{w}_c))) \quad (12)$$

4 算法实现

采用部分自适应共轭梯度法计算权值时, 按式(12)求得梯度后还要求计算最佳步长 t_k , 使得

$$\sigma(e^{j\mathbf{t}_k \text{diag}(\nabla \sigma(\mathbf{w}_{p,k}))} \mathbf{w}_{p,k}) \geq \sigma(e^{j\mathbf{t} \text{diag}(\nabla \sigma(\mathbf{w}_{p,k}))} \mathbf{w}_{p,k})$$

$t > 0$ 都成立, 在具体求 t_k 时可利用一维优化方法或文[9]所提及共轭梯度法性质求最佳步长, 但最佳步长的计算中还是涉及到矩阵计算, 计算量仍相当大. 采用复位共轭梯度法求优化权值的具体步骤是:

(1) 选择初始权值 $\mathbf{w}_0 = \mathbf{v}^H(\theta_0)$ 为不考虑干扰时的唯相权值相位值, 并分组得 $\mathbf{w}_{p,0} = \mathbf{a}_p \otimes e^{j\boldsymbol{\phi}_{p,0}}$, $e^{j\boldsymbol{\phi}_{p,0}} \in T^{2m}$ 和 $\mathbf{w}_c = \mathbf{a}_c \otimes$

$e^{j\phi} = (v_{m+1}(\theta_0), \dots, v_{n-m}(\theta_0))^H$, 计算 $\mathbf{g}_0 = \mathbf{h}_0 = \nabla \sigma(\mathbf{w}_{p,0})$, 并取 $k=0$;

(2) 对 $k=0, 1, \dots$, 一维优化计算 t_k , 使得

$$\sigma(e^{jt_k \text{Diag} h_k} \mathbf{w}_{p,k}) \geq \sigma(e^{jt \text{Diag} h_k} \mathbf{w}_{p,k}), \forall t > 0;$$

(3) 计算 $\mathbf{w}_{p,k+1} = e^{jt_k \text{Diag} h_k} \mathbf{w}_{p,k}$;

(4) 取 $\mathbf{g}_{k+1} = \nabla \sigma(\mathbf{w}_{p,k+1})$, $\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{g}_{k+1} + \gamma_k \mathbf{h}_k$, $\gamma_k = \frac{(\mathbf{g}_{k+1} - \mathbf{g}_k)^H \mathbf{g}_{k+1}}{\|\mathbf{g}_k\|^2}$, 若 $k \equiv n-1 \pmod{n}$, 梯度复位, 取 $\mathbf{h}_{k+1} = \mathbf{g}_{k+1}$, k 递增, 返回到(1), 直到梯度值近似为零止。

5 算法性能分析

在干扰数 m 小于阵元半数 $n/2$ 时, 下面考虑部分自适应唯相情形每次迭代减少的计算量. 为简化分析, 考虑在均匀加权且算法最优处理的情况, 由于加法运算与乘法运算的计算时间差别较大, 故下面不考虑加法的计算量. 与采用全自适应阵相比, 采用部分自适应在计算信干噪比时减少了约 $(n-2m)(n+2m)$ 次复数乘法, 同时在计算唯相梯度时, 因为李代数, 取虚部和取矩阵的对角部分均为线性运算, 并且考虑到信干噪比是实数, 部分自适应情形可只计算需要的部分, 部分自适应情形计算量减少约为 $2n^2 - 4mn - 2m$ 次复数乘法. 故当 $m < n/2$ 时, 部分自适应情形计算量小于全阵自适应情形计算量, 并且由于搜索空间的减小, 部分自适应权值的收敛速度比全阵自适应时快得多, 从而极大地提高了计算性能。

6 模拟仿真结果

实验中采用阵元数为 16 的均匀线阵, 相邻阵元间距为阵工作波长的一半, 各阵元幅度采用矩形加窗, 并且都满足干扰数目小于阵元半数的假设. 在下面采用唯相共轭梯度法的计算机模拟结果中, 干噪比均为 30dB, 虚线都表示部分自适应情形(PA), 实线都表示全阵自适应情形(FA), 并且为比较波束主瓣的相应损失, 所有波束图都不进行归一化处理. 图 1 是 16 阵元, 存在关于主瓣完全对称的干扰以及分布式干扰, 其中 DOA: -40, 15, 25, 40, 42, 44 度的波束图, PA 情形第一旁瓣低于 FA 情形的第一旁瓣, 主瓣损失 0.216dB, 零点深度差几乎分辨不出来. 图 2 是图 1 中干扰并增加了一个分布式干扰 46 度的波束图, PA 与 FA 情形比较, 零点深度差小于 1dB, 主瓣损失差为 0.190dB, 在干扰方向零点深度均在 50dB 以上. 图 3 为图 2 中干扰从左边第 1 个逐个递增到 7 个时全阵自适应与部分自适应所需计算时间比值图, 在存在对称干扰时, 因对称干扰的自相关矩阵之和是实阵, 故计算性能有波动, 另外可

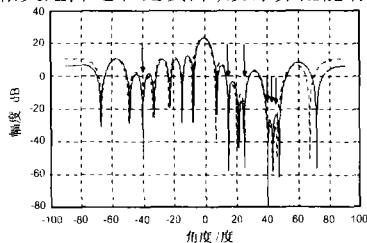


图 1 DOA: -40, 15, 25, 40, 42, 44, 均匀加权时波束图

见在干扰较少时, 计算性能提高更明显. 图 4 是图 2 中相同的干扰, 但主瓣在 -15 度的情形, 主瓣损失为 0.226dB, 在分布式干扰 42, 44 度区, PA 情形较 FA 情形抗干扰能力提高超过 10dB, 说明在主瓣在相扫范围内系统甚至有时具有更好的干扰抑制能力, 但第一旁瓣有提高, 为 1.527dB. 系统的模拟结果表明部分自适应与全阵自适应所得天线远场模式中的主瓣损失、波形变化、旁瓣电平及干扰方向零点深度几乎没有明显变化。

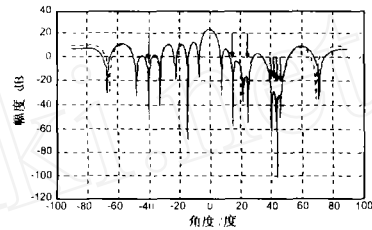


图 2 DOA: -40, 15, 25, 40, 42, 44, 46, 均匀加权时波束图

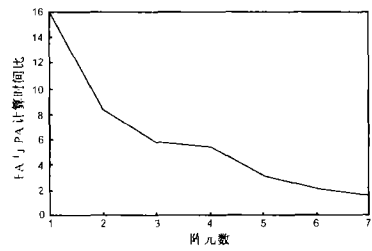


图 3 在图 2 中干扰从左逐个递增 FA 与 PA 计算时间比图

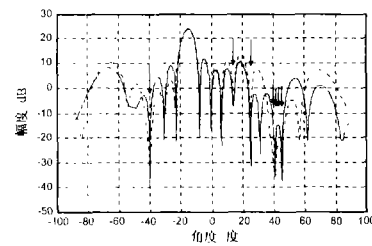


图 4 主瓣在 -15 度, 图 2 中干扰, 均匀加权时波束图

7 结论

本文在允许天线远场模式有很小的变化的前提下, 利用自适应方式选择一部分阵列阵元恒定, 另一部分变化来控制天线零点, 按照最大信干噪比原则, 用部分唯相共轭梯度法计算得到控制阵元的优化权值. 模拟结果表明, 在干扰数小于阵元半数时, 采用部分自适应方法, 通过固定一部分阵元的权值, 确实能加大另一部分阵元权值的变化, 在天线远场模式中的主瓣损失、波形变化及干扰方向零点深度几乎没有变化的情况下, 计算性能有很大的提高. 然而, 当干扰较多或使用高分辨率移相器情形, 仍应考虑全阵自适应处理. 另外, 对于圆阵列, 采用类似地部分自适应方法也是我们进一步的工作, 将在另文阐述。

参考文献:

[1] C A Baird, G G Rassweiler. Adaptive sidelobe nulling using digitally

- controlled phase-shifters [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1976, AP-24(5):638 - 649.
- [2] H Steyskal, R A Shore, R L Haupt. Methods for null control and their effects on the radiation pattern [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1986, AP-34(3):404 - 409.
- [3] H Steyskal. Simple method for pattern nulling by phase perturbation [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1983, AP-31(1):163 - 166.
- [4] D C Chang, K T Ho, C I Hung. Partial adaptive nulling on a monopulse phased array antenna system [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1992, 40(2):121 - 125.
- [5] S T Smith. Optimum phase-only adaptive nulling[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 47(7):1835 - 1843.
- [6] R A Shore. Nulling at symmetric pattern location with phase-only weight control[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1984, AP-32(5):530 - 533.
- [7] K Hirasawa. The application of a biquadratic programming method to phase-only optimization of antenna arrays[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1988, 36:1545 - 1550.
- [8] W P Liao, F L Chu. Application of genetic algorithms to phase-only null steering of linear arrays [J]. Electromagnetics, 1997, 17(2):171 - 183.
- [9] P S Chang, A N Willson Jr. Analysis of conjugate gradient algorithms for adaptive filtering[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 48(2):409 - 418.

作者简介:



孙胜贤 男,1972 年生于湖南益阳市,电子科技大学博士研究生,主要从事自适应信号处理,混沌信号处理及纠错编码技术研究.



龚熺寰 男,1938 年生于四川内江市,电子科技大学教授、博士生导师,主要从事自适应信号处理,智能天线及编码技术研究.



王维学 男,1967 年生于山西阳城市,电子科技大学博士研究生,主要从事信号信息处理及图像处理等方面的研究.