

一种子阵级平面相控阵相干源超分辨新方法

胡 航, 景秀伟

(哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 二维子阵级超分辨方法对于多功能相控阵雷达具有重要意义. 提出了应用于相干源子阵级 WSF 的信号模型. 应用简化阵列流形是降低大型相控阵校正成本与代价的十分有效的途径. 为此引入子阵级加权网络并构造出基于近似高斯方向图的简化阵列流形, 使超分辨测向的灵活性大大提高. 该方法克服了直接简化阵列流形方法测向范围无法调整且旁瓣源不能够被完全抑制的缺陷, 与基于高斯方向图的简化阵列流形方法相比, 运算代价得到显著降低, 而测向性能却基本保持不变. 仿真结果证实了所提出方法的有效性.

关键词: 子阵级超分辨; WSF 方法; 简化的阵列流形; 近似高斯方向图; 相控阵雷达

中图分类号: TN957.51; TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)06-1052-06

A New Super-Resolution Method at Subarray Level in Planar Phased Array for Coherent Source

HU Hang, JING Xiurwei

(School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: 2 D super resolution methods at subarray level possess important significance for multi function phased array radar. The WSF method at subarray level suitable for coherent source is presented. The application of simplified array manifold is a quite effective approach to reduce calibration cost and expense of phased array. Therefore, weighting network at subarray level is introduced so that simplified array manifold based on approximate Gaussian patterns is constructed, thereby the flexibility of super-resolution direction finding is improved greatly. This method overcomes the disadvantage of the method based on direct simplified array manifold whose available direction finding area can't be changed and the sidelobe sources can't be suppressed completely. Compared with the simplified array manifold based on the Gaussian patterns, cost and complexity of calculation is reduced remarkably and the direction finding performance is basically not degraded at the same time. Simulation results demonstrate the validity of the proposed method.

Key words: super resolution at subarray level; WSF method; simplified array manifold; approximate Gaussian pattern; phased array radar

1 引言

相控阵雷达系统是超分辨测向技术的一个重要应用领域. 对于多功能相控阵雷达, 阵列常常包含有成千上万个阵元, 因而通常采用子阵结构, 此时必须应用子阵级超分辨测向方法. 在由很多不规则子阵构成的平面阵中, 阵列流形中可能存在较大的误差, 特别是在旁瓣区域. 但是对整个阵列进行校正是一项十分复杂的任务, 而且成本非常高昂. 因而, 研究能够降低阵列校正代价的子阵级超分辨测向方法具有重要意义.

目前国内外对子阵级超分辨测向的研究开展得极

少. U. Nickel 在文献[1]中提出了一种“聚焦” MUSIC 方法, 但其主要研究简化的阵列流形问题, 而未对子阵级超分辨测向方法进行深入分析, 且是针对非相干源进行讨论的.

为此, 本文对二维相干源子阵级超分辨测向方法进行研究, 该方法适用于任意的平面相控阵, 并适用于重叠和非重叠子阵的情况.

应用简化的阵列流形是降低相控阵校正成本与代价的一种有效途径. 其中, 直接简化的阵列流形(Direct Simplified Array Manifold, 记为 DSAM)根据阵列结构直接得到子阵的相位中心与增益. 基于这种阵列流形的超分

辨方法的有效测向范围是在以波束指向为中心的子阵波束宽度内, 当信号源位于波束宽度外时, 测向性能迅速下降(原因之一是子阵方向图对波束宽度外的入射信号的抑制和衰减作用)^[2,3]. 为实现对任意方向的测向, 需将基于 DSAM 的方法与波束扫描方法结合起来.

基于 DSAM 的方法可滤除旁瓣中的不可靠信息, 有利于在多径反射情况下抑制旁瓣源, 且运算简单. 但其缺陷是有效测向范围是固定的, 无法根据实际需要进行调整, 而且旁瓣源不能够被完全抑制^[2,3]. 为克服这些局限性, 需要改变子阵方向图. 为此, 可使子阵的数字输出通过一个加权网络, 将该网络的输出看作是一个新子阵的输出, 从而构造出所需要的方向图^[1,4].

本文结构如下: 首先建立信号模型, 然后给出基于近似高斯子阵方向图的简化阵列流形, 接着分析子阵级 WSF(Weighting Subspace Fitting) 方法, 下面是模拟仿真, 最后进行总结.

2 信号模型

设由 M 个全向阵元组成的平面阵位于 xoy 平面上, 第 1 个阵元位于坐标原点为参考阵元, 第 $m(m=1, \dots, M)$ 个阵元的坐标为 (x_m, y_m) . 阵列共被划分为 L 个子阵, 各子阵间可以是重叠或非重叠的. 阵元上的幅度加权用以获得低旁瓣的和方向图, 设第 m 个阵元的加权为 g_m ; 通过移相器来实现波束指向. 子阵级上的加权用来完成 ADBF(自适应数字波束形成) 等任务^[5,6], 设第 $l(l=1, \dots, L)$ 个子阵的加权为 c_l . 用 (θ, φ) 表示仰角和方位角, 阵列波束指向为 (θ_0, φ_0) . 设有 D 个远场窄带辐射源, 其中第 $k(k=1, \dots, D)$ 个源的入射方向为 (θ_k, φ_k) , 且假设源的个数小于子阵数.

设阵元级输出为 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t), \dots, x_M(t)]^T$. 令 $\alpha(\theta, \varphi) = \sin\theta\cos\varphi$, $\beta(\theta, \varphi) = \sin\theta\sin\varphi$, 且 $\varphi_m(\theta, \varphi) = \exp\{-j2\pi[x_m\alpha(\theta, \varphi) + y_m\beta(\theta, \varphi)]/\lambda\}$ (1) 令 $\mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k) = [\varphi_1(\theta_k, \varphi_k), \dots, \varphi_m(\theta_k, \varphi_k), \dots, \varphi_M(\theta_k, \varphi_k)]^T$, 并设

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \varphi_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k), \dots, \mathbf{a}(\theta_D, \varphi_D)] \quad (2)$$

则

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_k(t), \dots, s_D(t)]^T$, 且 $s_k(t)$ 为第 1 个阵元接收到的第 k 个辐射源的信号; $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), \dots, n_m(t), \dots, n_M(t)]^T$, 且 $n_m(t)$ 为第 m 个阵元中与信号相互独立的高斯加性白噪声.

令 $\mathbf{T}_0$ 为 $M \times L$ 的子阵形成矩阵, 在其第 $l(1 \leq l \leq L)$ 列的所有元素中, 只有与第 l 个子阵的阵元序号相对应的元素值为 1, 其余均为 0 (在非重叠子阵的情况下, $\mathbf{T}_0$ 的列向量相互正交). 设 $\mathbf{G} = \text{diag}(g_m)_{m=1,2,\dots,M}$,

$$\Phi_0 = \text{diag}[\varphi_m^*(\theta_0, \varphi_0)]_{m=1,\dots,M}, \mathbf{C} = \text{diag}(c_l)_{l=1,\dots,L}$$

其中 $\text{diag}()$ 表示对角阵, 则子阵转换矩阵可表示为

$$\mathbf{T} = \Phi_0 \mathbf{G} \mathbf{T}_0 \mathbf{C} \quad (4)$$

因此子阵级输出为

$$\mathbf{x}_{\text{sub}}(t) = \mathbf{T}^T \mathbf{x}(t) \quad (5)$$

其协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{\text{sub}} = E[\mathbf{x}_{\text{sub}}(t) \mathbf{x}_{\text{sub}}^H(t)] = \mathbf{T}^H \mathbf{R} \mathbf{T} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t)]$.

3 基于近似高斯子阵方向图的简化阵列流形

首先考虑 DSAM. 对于第 l 个子阵, 沿 x 轴方向的中心 ξ_x , 沿 y 轴方向的中心 ξ_y 和增益 G_l 分别为^[1]

$$\xi_x = \sum_{m \in U_l} g_m x_m / \sum_{m \in U_l} g_m \quad (7)$$

$$\xi_y = \sum_{m \in U_l} g_m y_m / \sum_{m \in U_l} g_m \quad (8)$$

$$G_l = \sum_{m \in U_l} g_m \quad (9)$$

式中, U_l 为第 l 个子阵中所有阵元的序号的集合.

为克服 DSAM 的局限性, 以便灵活控制有效测向范围并更好地抑制旁瓣源, 我们对子阵的数字输出进行后处理, 使其通过一个加权网络. 将加权网络用一个 $L \times L$ 维的矩阵 $\mathbf{W}$ 表示, 则新的子阵输出为

$$\mathbf{x}'_{\text{sub}}(t) = (\mathbf{T}\mathbf{W})^T \mathbf{x}(t) \quad (10)$$

令 $u = \sin\theta\cos\varphi$, $v = \sin\theta\sin\varphi$, $u_0 = \sin\theta_0\cos\varphi_0$, $v_0 = \sin\theta_0\sin\varphi_0$ 并设

$$\mathbf{f}(u, v) = [f_1(u, v), \dots, f_m(u, v), \dots, f_M(u, v)]^T$$

这里 $f_m(u, v) = e^{j2\pi(x_m u + y_m v)/\lambda}$, 则新的子阵方向图为

$$\mathbf{F}_{\text{new}}(u, v) = (\mathbf{T}\mathbf{W})^H \mathbf{f}(u, v) \quad (11)$$

这里, 我们构造高斯方向图, 这是一种较理想的选择, 因为其方向图的波束宽度通过改变高斯函数的参数可以很容易地进行调整, 而且在波束外方向图的增益很低, 有利于抑制旁瓣源. 将高斯方向图用 $\mathbf{F}_{\text{Gau}}(u, v) = [f_{\text{Gau}_1}(u, v), \dots, f_{\text{Gau}_l}(u, v), \dots, f_{\text{Gau}_L}(u, v)]^T$ 表示, 其中

$$f_{\text{Gau}_l}(u, v) = \frac{1}{\pi\sigma^2} e^{-[(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2]/\sigma^2} \cdot e^{j2\pi[\xi_x(u-u_0) + \xi_y(v-v_0)]/\lambda} \quad (12)$$

$\mathbf{W}$ 的选取应使

$$H = \iint_V \|\mathbf{F}_{\text{new}}(u, v) - \mathbf{F}_{\text{Gau}}(u, v)\|_2^2 du dv \quad (13)$$

为最小. 令 $\frac{\partial H}{\partial \mathbf{W}} = \mathbf{0}$, 有^[1]

$$\mathbf{W} = (\mathbf{T}^H \mathbf{T})^{-1} \mathbf{T}^H \mathbf{Q} \quad (14)$$

其中 $\mathbf{Q} = (q_{m,l})_{M \times L}$ 且

$$q_{m,l} = e^{-\pi^2 \sigma^2 [(x_m - \xi_x)^2 + (y_m - \xi_y)^2]/\lambda^2 + j2\pi(x_m u_0 + y_m v_0)/\lambda} \quad (15)$$

我们将由上述方法得到的阵列流形称为基于高斯子阵方向图的简化阵列流形(Simplified Array Manifold based on Gauss Subarray Patterns), 简记为 SAM_GSP. 然而, 式(14)中的 $\mathbf{Q}$ 为 $M \times L$ 维矩阵, 由于 M 可以达到几千甚至上万, 因而运算量相当大.

为此, 下面构造一个近似的高斯子阵方向图. 设此时的加权网络为 $\mathbf{W}'$, 则新的子阵方向图为

$$\mathbf{F}'_{\text{new}}(u, v) = \mathbf{W}'^H \mathbf{F}_0(u, v) \quad (16)$$

式中

$$\mathbf{F}_0(u, v) = \mathbf{T}^H \mathbf{f}(u, v) \quad (17)$$

表示阵列的原始子阵方向图. 引入 $\mathbf{F}'_0(u, v)$ 对 $\mathbf{F}_0(u, v)$ 进行近似, 并设

$$\mathbf{F}'_0(u, v) = [f'_{0,1}(u, v), \dots, f'_{0,L}(u, v)]^T$$

其中

$$f'_{0,l}(u, v) = G_l e^{j2\pi(\xi_x(u-u_0) + \xi_y(v-v_0))/\lambda}$$

则此时可将 $\mathbf{F}'_{\text{new}}(u, v)$ 近似表示为

$$\mathbf{F}'_{\text{new}}(u, v) \approx \mathbf{W}'^H \mathbf{F}'_0(u, v) \quad (18)$$

为确定 $\mathbf{W}'$, 考虑

$$H' = \iint_{R^2} \|\mathbf{F}'_{\text{new}}(u, v) - \mathbf{F}_{\text{Gau}}(u, v)\|_2^2 du dv$$

此时,

$$\begin{aligned} H' &= \iint_{R^2} [\text{tr}(\mathbf{W}'^H \mathbf{T}^H \mathbf{f}(u, v) \mathbf{f}^H(u, v) \mathbf{T} \mathbf{W}')] du dv \\ &+ \iint_{R^2} \|\mathbf{F}_{\text{Gau}}(u, v)\|_2^2 du dv \\ &- \iint_{R^2} [\text{tr}(\mathbf{W}'^H \mathbf{F}'_0(u, v) \mathbf{F}_{\text{Gau}}^H(u, v))] du dv \\ &- \iint_{R^2} [\text{tr}(\mathbf{F}_{\text{Gau}}(u, v) \mathbf{F}'_0{}^H(u, v) \mathbf{W}')] du dv \\ &= \text{tr}\{\mathbf{W}'^H \mathbf{T}^H \iint_{R^2} [\mathbf{f}(u, v) \mathbf{f}^H(u, v)] du dv \cdot \mathbf{T} \mathbf{W}'\} \\ &+ \text{const} - \text{tr}\{\mathbf{W}'^H \iint_{R^2} [\mathbf{F}'_0(u, v) \mathbf{F}_{\text{Gau}}^H(u, v)] du dv\} \\ &- \text{tr}\{\iint_{R^2} [\mathbf{F}_{\text{Gau}}(u, v) \mathbf{F}'_0{}^H(u, v)] du dv \cdot \mathbf{W}'\} \\ &= \text{tr}\{\mathbf{W}'^H \mathbf{T}^H \mathbf{T} \mathbf{W}' - \mathbf{W}'^H \iint_{R^2} [\mathbf{F}'_0(u, v) \mathbf{F}_{\text{Gau}}^H(u, v)] \\ &du dv - \iint_{R^2} [\mathbf{F}_{\text{Gau}}(u, v) \mathbf{F}'_0{}^H(u, v)] du dv \cdot \mathbf{W}'\} + \text{const} \end{aligned}$$

式中, $\text{tr}()$ 表示矩阵的迹.

令 $\frac{\partial H'}{\partial \mathbf{W}'} = \mathbf{0}$, 可得

$$\mathbf{W}' = (\mathbf{T}^H \mathbf{T})^{-1} \mathbf{Q}' \quad (19)$$

其中 $\mathbf{Q}' = (q'_{i,j})_{L \times L}$, 且

$$q'_{i,j} = \iint_{R^2} [f'_{0,i}(u, v) f_{\text{Gau},j}^*(u, v)] du dv$$

=

$$\frac{G_i}{\pi \sigma^2} \iint_{R^2}$$

$$\begin{aligned} & e^{-\frac{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2}{\sigma^2} + j2\pi(\xi_x - \xi_x)(u-u_0) + (\xi_y - \xi_y)(v-v_0)/\lambda} du dv \\ &= \frac{G_i}{\sqrt{\pi} \sigma} \int_R e^{-\frac{(u-u_0)^2}{\sigma^2} + j2\pi(u-u_0)(\xi_x - \xi_x)/\lambda} du \\ &\quad \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma} \int_R e^{-\frac{(v-v_0)^2}{\sigma^2} + j2\pi(v-v_0)(\xi_y - \xi_y)/\lambda} dv \end{aligned}$$

令 $u - u_0 = \alpha_1/\sqrt{2}$, $v - v_0 = \alpha_2/\sqrt{2}$, 则上式可写为

$$\begin{aligned} q'_{i,j} &= \frac{G_i}{\sqrt{2\pi}} \int_R e^{-\frac{t_1^2}{2} + j2\pi\alpha_{1l}(\xi_x - \xi_x)/(\sqrt{2}\lambda)} dt_1 \\ &\quad \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_R e^{-\frac{t_2^2}{2} + j2\pi\alpha_{2l}(\xi_y - \xi_y)/(\sqrt{2}\lambda)} dt_2 \\ &= G_i e^{-\pi^2 \sigma^2 [(\xi_x - \xi_x)^2 + (\xi_y - \xi_y)^2]/\lambda^2} \end{aligned} \quad (20)$$

这里, 与 $\mathbf{Q}$ 相比, $\mathbf{Q}'$ 由 $M \times L$ 维降为 $L \times L$ 维, 运算量的减少相当可观.

令 $\mathbf{V} = \Phi^H \mathbf{T} \mathbf{W}'$, 且 $[V]_{m,l}$ 表示 $\mathbf{V}$ 的第 m 行第 l 列个元素, 则

$$\xi'_x = \left[\sum_{m=1}^M [V]_{m,1} \right] \backslash \left[\sum_{m=1}^M [V]_{m,l} \right] \quad (21)$$

$$\xi'_y = \left[\sum_{m=1}^M [V]_{m,2} \right] \backslash \left[\sum_{m=1}^M [V]_{m,l} \right] \quad (22)$$

$$G'_l = \sum_{m=1}^M [V]_{m,l} \quad (23)$$

令 $\mathbf{P} = \text{diag}\left(G'_l e^{-j2\pi(\xi_x - \xi'_x)\alpha(\theta, \varphi) + (\xi_y - \xi'_y)\beta(\theta, \varphi)/\lambda}\right)_{l=1, \dots, L}$, $\mathbf{B}(\theta, \varphi) = [b_1(\theta, \varphi), \dots, b_L(\theta, \varphi)]^T$ 且 $b_l(\theta, \varphi) = e^{-j2\pi(\xi_x - \xi'_x)\alpha(\theta, \varphi) + (\xi_y - \xi'_y)\beta(\theta, \varphi)/\lambda}$, 则在这种方法中, 阵列流形 $\mathbf{A}_{\text{sub}}(\theta, \varphi)$ 可表示为

$$\mathbf{A}_{\text{sub}}(\theta, \varphi) = \mathbf{P}^H \mathbf{B}(\theta, \varphi) \quad (24)$$

我们将其称为基于近似高斯子阵方向图的简化阵列流形(Simplified Array Manifold based on Approximate Gauss Subarray Patterns), 简记为 SAM_AGSP.

4 子阵级 WSF 方法

基于常规阵元级的 WSF 方法^[7], 子阵级 WSF 可表示为

$$\begin{aligned} & \{(\theta_1, \varphi_1), (\theta_2, \varphi_2), \dots, (\theta_D, \varphi_D), \mathbf{U}_{\text{sub}}\} \\ &= \arg \min_{\theta, \varphi} \|\mathbf{E}_S \mathbf{W}_{\text{opt}}^{1/2} - \mathbf{A}_{\text{sub}}(\theta, \varphi) \mathbf{U}\|_F^2 \end{aligned} \quad (25)$$

这里 $\|\cdot\|_F$ 表示 Frobenius 范数, $\mathbf{U}$ 表示一个 $D \times D$ 维矩阵, $\mathbf{E}_S$ 是由 $\mathbf{R}_{\text{sub}}$ 的主特征向量张成的信号子空间, $\mathbf{W}_{\text{opt}}$ 是最优加权矩阵, 并可表示为

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{M}^{-1} \quad (26)$$

式中

$$\mathbf{M} = \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_d, \dots, \gamma_D) \quad (27)$$

并且

$$V_d = \lambda_d / (\lambda_d - \sigma_{n_sub}^2) \quad (28)$$

这里 λ_d 是 $\mathbf{R}_{sub}$ 的主特征值, $\sigma_{n_sub}^2$ 是子阵输出的噪声方差.

由式(25)可以得到子阵级 WSF 的方向估计表达式为

$$\{(\hat{\theta}_1, \hat{\varphi}_1), (\hat{\theta}_2, \hat{\varphi}_2), \dots, (\hat{\theta}_D, \hat{\varphi}_D)\}_{sub} = \arg \max_{\theta, \varphi} [V_{sub}(\theta, \varphi)] \quad (29)$$

式中 $V_{sub}(\theta, \varphi)$ 为代价函数, 且

$$V_{sub}(\theta, \varphi) = \text{tr}[\mathbf{P}_{A_{sub}(\theta, \varphi)} \mathbf{E}_S \mathbf{W}_{opt} \mathbf{E}_S^H] \quad (30)$$

这里 $\text{tr}[\cdot]$ 表示求迹算子, 且 $\mathbf{P}_{A_{sub}(\theta, \varphi)} = \mathbf{A}_{sub}(\theta, \varphi) [\mathbf{A}_{sub}^H(\theta, \varphi) \mathbf{A}_{sub}(\theta, \varphi)]^{-1} \mathbf{A}_{sub}^H(\theta, \varphi)$.

5 模拟仿真

设阵列中有 12 行 $\times$ 32 列 = 384 个全向阵元, 按 $\lambda/2$ 间距的矩形栅格放置. 水平向(沿 x 轴方向)为 -40dB Taylor 加权, 垂直向(沿 y 轴方向)为 -30dB Taylor 加权. 阵列被划分为 5 行 $\times$ 6 列 = 30 个子阵, 各子阵均为矩形阵, 但不同子阵包含的阵元数不同. 设各空间信号源为等功率相干窄带信号源, 快拍数取为 200.

实验 1 对旁瓣源的抑制.

设阵列波束指向为 $(25^\circ, 18^\circ)$, 有一个信号源, 信噪比为 10dB, 考虑其入射方向分别为 $(25^\circ, 20^\circ)$ (位于波束

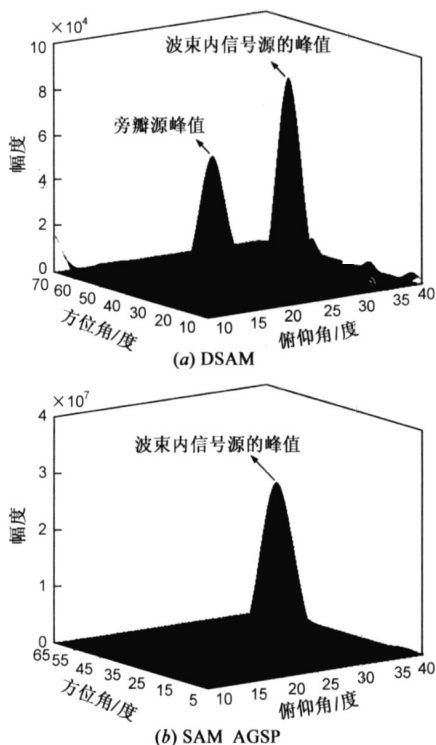


图 1 两种方法对旁瓣源的抑制效果比较
宽度内)和 $(25^\circ, 50^\circ)$ (位于旁瓣区域)的两种情况. 利用子阵级 WSF, 我们得到代价函数的幅度随 θ 和 φ 变化的

3 维图如图 1 所示. 为方便起见, 将信号源位于波束内和旁瓣区域两种情况下所对应的两个代价函数表示在同一个图中. 图 1(a) 是 DSAM 的处理结果, 可见此时旁瓣源没有被完全抑制, 其代价函数中存在一个较高的峰值; 而图 1(b) 是 SAM_AGSP ($\sigma^2 = 0.02$) 的结果, 此时旁瓣源被完全抑制.

实验 2 测向精度.

设阵列波束指向为 $(5.0^\circ, 45.0^\circ)$, 两个信号源分别从 $(4.0^\circ, 43.0^\circ)$ 和 $(6.5^\circ, 43.0^\circ)$ 的方向入射(均位于波束宽度内). 图 2 给出了 SAM_GSP 和 SAM_AGSP (σ^2 均取为 0.05) 的方向估计偏差和标准差随 SNR 的变化关系. 这里估计偏差和标准差取的是对两个信号源的平均值, Monte Carlo 实验次数为 100. 由图可见, 不论是方位角还是仰角, SAM_AGSP 的估计偏差和标准差均与 SAM_GSP 十分接近.

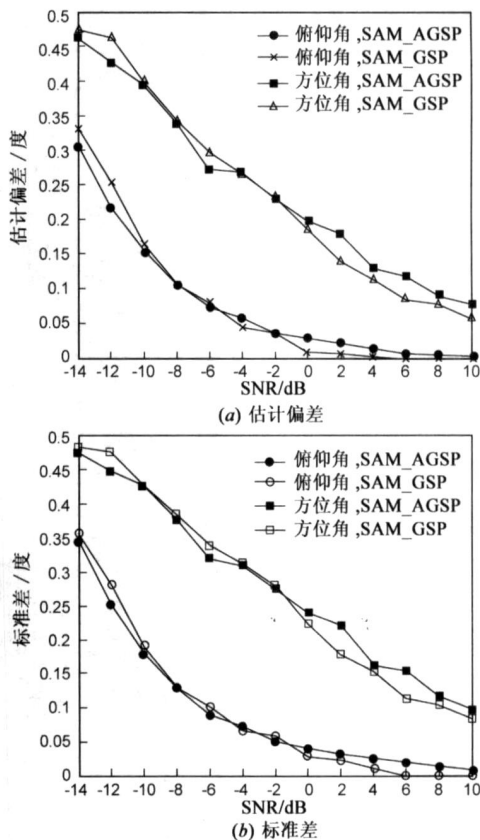


图 2 方位角和仰角的估计偏差和标准差随 SNR 的变化关系
实验 3 子阵方向图.

设阵列波束指向为 $(5.0^\circ, 45.0^\circ)$, 图 3 给出了方位面和俯仰面的子阵方向图. 其中图 3(a) 为 DSAM 的情况, 由于不同子阵的大小和结构不同, 因而各方向图的差别很大. 图 3(b) 给出了 SAM_GSP 方法得到的方向图 ($\sigma^2 = 0.02$), 可见, 各子阵的波束形状、波束宽度和波束内增益都非常接近. 图 3(c) 为由 SAM_AGSP ($\sigma^2 = 0.02$) 方法得到的方向图, 此时不同子阵的波束宽度和波束形

状很接近,但波束内的幅度相差较大.

6 结论

(1) 加权网络的引入为子阵级的阵列处理提供了一种新途径并大大提高了灵活性,但增加了运算代价.

(2) 基于 SAM-AGSP 的子阵级 WSF 可有效控制测

向范围,并很好地抑制旁瓣源.

(3) 与 SAM-GSP 相比, SAM-AGSP 所得到的方向图的性能有所下降,但运算成本得到很大的降低.

(4) 基于 SAM-AGSP 的子阵级 WSF 的测向精度与基于 SAM-GSP 的方法十分接近.

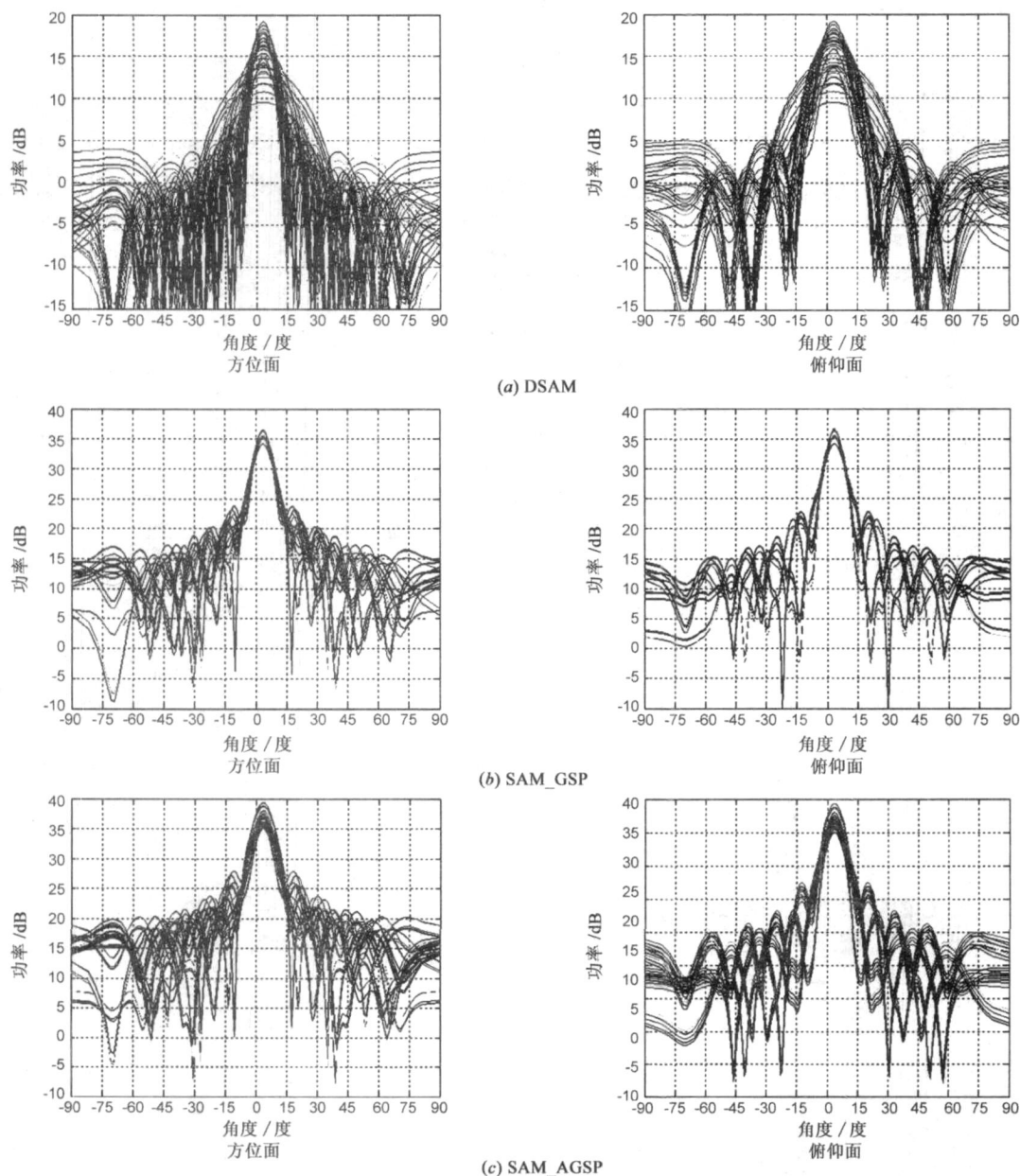


图3 不同方法得到的子阵方向图

参考文献:

- [1] U Nickel. Spotlight MUSIC: super resolution with subarrays with low calibration effort[J]. IEE Proc- Radar, Sonar & Nav-ig, 2001, 149(4): 166- 173.
- [2] Hu Hang, XiangRong Pan. Two dimensional spatial spectrum estimation direction finding method at subarray level[A]. Proc

of 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. Washington, USA: IEEE Press, 2005. 374 - 377.

- [3] Hu Hang, Pan XiangRong. Spatial spectral estimation direction finding algorithms at subarray level for complete calibration array and partly calibration array[A]. Proc IEEE 2005 International Symposium on MAPE[C]. Beijing: IEEE Press, 2005.

1223– 1226.

- [4] 胡航, 等. 二维子阵级相控阵空间谱估计方法[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 415– 419

HU Hang, et al. 2-D spatial spectrum estimation methods at subarray level for phased array [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 415– 419. (in Chinese)

- [5] 胡航. 子阵级平面相控阵 ADBF 的旁瓣抑制方法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 201– 205.

HU Hang, et al. The sidelobe suppression method for ADBF at subarray level with planar phased array [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(1): 201– 205. (in Chinese)

- [6] 胡航, 等. 二维子阵级 ADBF 及方向图控制方法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 881– 884.

HU Hang, et al. Study on the two dimensional ADBF at subarray level and pattern control method[J]. Journal of Electronics

& Information Technology, 2008, 30(4): 881– 884. (in Chinese)

- [7] M Viberg, B Otterstern and T Kailath. Direction and estimation in sensor arrays using weighted subspace fitting[J]. IEEE Transactions on SP, 1991, 39(11): 2436– 2449.

作者简介:

胡 航 男, 1968 年生, 硕士生导师, 博士, 近几年以第一作者在核心期刊以上学术期刊及国际会议上发表论文四十余篇. 是《IEE Proc. Radar, Sonar & Navig.》、《Circuits, Systems and Signal Processing》、《中国科学 E 辑》等学术期刊的审稿人, 及国内外举办的多个国际会议的技术程序委员会成员. 曾赴日本、加拿大、俄罗斯等国进行学术交流. 承担或参加省部级以上科研项目多项. 目前的研究领域为阵列信号处理技术在相控阵雷达、电子侦察及电子反对抗中的应用.

E-mail: huhang@hit.edu.cn

景秀伟 男, 1983 年生, 硕士研究生. 研究方向为阵列信号处理.